

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Marta
Minussi Franco E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 25, 02, 2008
.....
Arnaldo
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**“Aplicação de técnicas de análise espacial para a
avaliação do potencial de produção de eletricidade a
partir de sub-produtos da cana-de-açúcar no Estado
de São Paulo”**

Autor: Marta Minussi Franco
Orientador: Arnaldo Cesar da Silva Walter
Co-orientador: Marcos César Ferreira

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

**“Aplicação de técnicas de análise espacial para a
avaliação do potencial de produção de eletricidade a
partir de sub-produtos da cana-de-açúcar no Estado
de São Paulo”**

Autor: Marta Minussi Franco
Orientador: Arnaldo Cesar da Silva Walter
Co-orientador: Marcos César Ferreira

Curso: Planejamento de Sistemas Energéticos.

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos.

Campinas, 2008
S.P. – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA – BAE – UNICAMP

F848a Franco, Marta Minussi
Aplicação de técnicas de análise espacial para a avaliação do potencial de produção de eletricidade a partir de sub-produtos da cana-de-açúcar no estado de São Paulo / Marta Minussi Franco. --Campinas, SP: [s.n.], 2008.

Orientadores: Arnaldo Cesar da Silva Walter, Marcos César Ferreira
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Energia da biomassa. 2. Biomassa. 3. Sistemas de informação geográfica. 4. Cana-de-açúcar. I. Walter, Arnaldo César da Silva. II. Ferreira, Marcos César. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Use of geographical information systems to evaluate the potential of cogeneration from sugarcane residues in the state of São Paulo

Palavras-chave em Inglês: Cogeneration, Electricity production from biomass, Geographical information systems, Sugarcane

Área de concentração: Planejamento de Sistemas Energéticos

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Sergio Valdir Bajay, Jansle Vieira Rocha

Data da defesa: 25/02/2008

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADEMICO

**“Aplicação de técnicas de análise espacial para a avaliação
do potencial de produção de eletricidade a partir de
sub-produtos da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo”**

Autor: Marta Minussi Franco

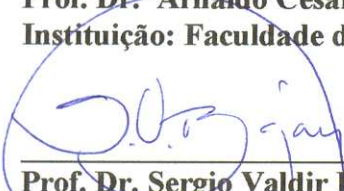
Orientador: Arnaldo César da Silva Walter

Co-orientador: Marcos César Ferreira

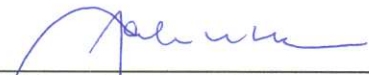
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Arnaldo César da Silva Walter , Presidente
Instituição: Faculdade de Engenharia Mecânica



Prof. Dr. Sergio Valdir Bajay
Instituição: Faculdade de Engenharia Mecânica



Prof. Dr. Jansle Vieira Rocha
Instituição: Faculdade de Engenharia Agrícola - Unicamp

Dedicatória:

Dedico este trabalho à minha família: Neusa, Ivan, Marina, Maria Luiza, Iracema e Abílio.

Agradecimentos

À Capes, pelo financiamento no primeiro ano da pesquisa, e à Fapesp, pela concessão da bolsa de estudos no segundo ano da pesquisa.

Ao Prof. Dr. Arnaldo Cesar da Silva Walter, pela orientação e compreensão em todas as etapas.

Ao Prof. Dr. Marcos César Ferreira pela co-orientação.

Ao Professor Jose Luis Garcia Cuesta, pela orientação na Espanha.

Aos Professores Lindon Matias Fonseca e Sérgio Waldir Bajay, pelas sugestões e contribuições a este trabalho.

Aos meus pais, Marina, Maria Luiza, Iracema e Abílio, por sempre me apoiarem em todos os momentos da vida.

A todos os professores e colegas do Planejamento Energético, do Instituto de Geociências, e da Unesp, campus de Rio Claro: Gessika Sábio, Vivian Pretti, Mateus Vidotti, Thais Tinos, Maria Fernanda Bacilo, Gustavo Godoy, João Fascina Neto, Ana Carolina Greco, e aos amigos da Espanha, Thais Lutz, Rebeca Delatore, Jose Luis Martins, Amy Harmon, Sara Sander, Patrícia Antunes, Tiago Fassoni que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

A todas as pessoas que contribuíram para a formação da base de dados desta pesquisa, e aos pesquisadores que contribuíram respondendo o questionário: José Marinaldo Gleriane, Bernardo (INPE), Luis (CTC), Orivaldo Brunini (IAC), Roberto Cesnik, Murilo de Godoy Gasparoto, Diego Brandimarte e Kátia Zambom.

Resumo

FRANCO, Marta Minussi, *Aplicação de técnicas de análise espacial para a avaliação do potencial de produção de eletricidade a partir de sub-produtos da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008. 120p. Dissertação (Mestrado)

Na dissertação é apresentado o desenvolvimento de um procedimento metodológico baseado em Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e Análise Espacial, e sua aplicação na avaliação do potencial de produção de eletricidade a partir da biomassa residual da cana-de-açúcar (bagaço e pontas e folhas), tendo como foco o estado de São Paulo. O horizonte de avaliação do potencial é 2015. Primeiramente foram avaliadas as áreas nas quais deve ocorrer a expansão do cultivo da cana-de-açúcar. No procedimento foram considerados fatores condicionantes tais como uso da terra, aptidão do solo, propensão à erosão, fertilidade do solo, potencial de mecanização (sobretudo da colheita), disponibilidade de recursos hídricos e aptidão climática. O potencial foi calculado baseado na moagem estimada em diferentes usinas, em 2015, considerando tecnologias comerciais de sistemas de cogeração a vapor. Na avaliação do potencial foram considerados como fatores restritivos o acesso a rede elétrica e a disponibilidade de água na região. A dissertação demonstra a importância dos SIG em trabalhos de planejamento, sobretudo quando múltiplos fatores são considerados e suas características espaciais são relevantes na análise.

Palavras Chave

- Cogeração, Geração de eletricidade a partir da biomassa, Sistemas de Informações Geográficas, Cana-de-açúcar.

Abstract

FRANCO, Marta Minussi, *Use of Geographical Information Systems to evaluate the potential of cogeneration from sugarcane residues in the state of São Paulo*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008. 120 p. Dissertation (M.Sc.)

This dissertation presents the use of a methodological procedure based on *Geographical Information Systems (GIS)* and on Spatial Analysis and its application on the evaluation of the potential of electricity production using cogeneration systems based on residual biomass of sugarcane (bagasse and trash). The study was developed considering the state of São Paulo and 2015 as the horizon period. Firstly, the areas more adequate for sugarcane plantations were evaluated. Doing this, many factors were considered as potential constraints, such as land use patterns, soil adequacy, risk of erosion, soil fertility, the potential regarding mechanization (mainly regarding harvesting), availability of water resources and weather conditions. The potential of electricity production was estimated considering predicted sugarcane crushing in 2015 in each mill and commercial cogeneration technologies based on steam cycles. The potential evaluation was complemented with the consideration of additional potential constraints, as the distance of the power unit to the electric grid and water availability. This dissertation demonstrates the importance of GIS in energy planning studies, mainly when many factors should be taken into account and when their spatial characteristics are a relevant aspect.

Keywords

- Cogeneration, Electricity production from biomass, Geographical Information Systems, Sugarcane.

Sumário

Resumo	vi
Abstract	vii
Lista de Mapas	ix
Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas.....	xi
Capítulo 1	
Introdução.....	01
Capítulo 2	
Sistemas de Informação Geográfica e suas Aplicações em Energia.....	05
Capítulo 3	
Procedimento Metodológico e Base de Dados.....	18
Capítulo 4	
A Cana de Açúcar em São Paulo e no Brasil	32
Capítulo 5	
Fatores Condicionantes	44
Capítulo 6	
Análise dos Resultados	72
Capítulo 7	
Conclusões	90
Referências Bibliográficas	93
Anexo	99

Lista de Mapas

Mapa 1 – Distribuição da cana-de-açúcar no estado de São Paulo	37
Mapa 2 – Uso da terra no estado de São Paulo	50
Mapa 3 – Níveis de necessidades de práticas conservacionistas	54
Mapa 4 - Níveis de necessidades de fertilizantes	58
Mapa 5 – Níveis de possibilidades de mecanização.....	61
Mapa 6 – Distribuição das usinas no mapa de demanda versus disponibilidade de água	64
Mapa 7 – Aptidão climática para cultura da cana-de-açúcar.....	69
Mapa 8 – Acessibilidade à rede elétrica	71
Mapa 9 – Análise dos resultados.....	77
Mapa 10 – Áreas Adequadas para a expansão da Cultura da Cana-de-açúcar e Usinas a 10 km da rede.....	87
Mapa 11 – Potencial de Geração de Eletricidade e Capacidade Instalada.....	89

Lista de Figuras

Figura 1 – Fluxograma do Procedimento Metodológico	26
Figura 2 – Esquema de sistema de cogeração com turbina a vapor de extração (dupla) e condensação	39
Figura 3 – Evolução da geração elétrica nas usinas de cana-de-açúcar no Brasil	41
Figura 4 – Distribuição do atual cultivo de cana-de-açúcar em função das necessidades de práticas conservacionistas.	74
Figura 5. Distribuição do atual cultivo de cana-de-açúcar em função das necessidades de aplicação de fertilizantes.....	74
Figura 6. Distribuição do atual cultivo de cana-de-açúcar em função do potencial de mecanização	75
Figura 7. Distribuição das usinas existentes, e das novas usinas, segundo as áreas de adequação ao cultivo de cana-de-açúcar	79
Figura 8. Histograma com capacidade instalada (em MW) de sistemas de cogeração, em 2006.....	81
Figura 9 – Histograma com estimativa da capacidade excedente (em MW) em sistemas cogeração.....	81
Figura 10. Relação entre percentual de capacidade excedente e capacidade excedente	82
Figura 11 – Histograma com estimativa da capacidade instalada (em MW) em 2015.....	83
Figura 12. Histograma de distância das usinas à rede elétrica	85
Figura 13 - Capacidade excedente de sistemas de cogeração e distância das usinas a rede elétrica	85

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Escala de valores HP para comparação pareada	31
Tabela 2. Algumas configurações típicas de sistemas de cogeração em usinas de cana-de-açúcar	43

Nomenclatura

AHP - Analytical Hierarchy Process

ArcInfo – Software de Geoprocessamento

ArcView – Software de Geoprocessamento (Versão Anterior)

Buffer - Ferramenta utilizada em geoprocessamento para análise de proximidade

CANASAT - Mapeamento da Cana via imagens de satélite

CEPEA - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada

COGEN – Associação Paulista de Cogeração de Energia

CTC – Centro de Tecnología Canavieira

CTEEP – Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista

Fuzzy - Grau de pertinência de cada elemento a um determinado conjunto

Geodatabase – Base de Dados Geográficos

GIS - Geographical Information Systems

IDRISI – Software de Geoprocessamento

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Landsat – Satélite capaz de monitorar e realizar o mapeamento das feições da superfície terrestre a partir do espaço

MDL - Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

Miscanthus – Genêro Botânico

Modis - Satélite capaz de monitorar e realizar o mapeamento das feições da superfície terrestre a partir do espaço

Raster - imagens que contém a descrição de cada pixel, em oposição aos gráficos vectoriais

Shapefiles – uma organização de dados idealizada pela empresa ESRI para representação de dados vetoriais e seus atributos.

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

SPRING – Software de Geoprocessamento

SUPLAN - Secretaria Nacional de Planejamento Agrícola

UDOP - Usinas e Destilarias do Oeste Paulista

UGHRI - Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos

UNFCCC - Convenção Quadro das Nações Unidas para Mudança do Clima

ÚNICA - União das Indústrias Canavieiras de São Paulo

Capítulo 1

Introdução

1.1 Introdução

O Brasil é o maior produtor mundial de cana de açúcar e o segundo maior produtor de etanol combustível, produzido a partir da cana, uma vez que foi superado pelos Estados Unidos na produção de etanol em 2006. A produção de cana de açúcar está concentrada na região Sudeste e Centro do Brasil, com aproximadamente 90% da produção anual. A tradicional região produtora do Nordeste do país responde hoje por apenas 10% da produção nacional. O estado de São Paulo é maior produtor do país, com aproximadamente 60% da produção nacional de cana de açúcar e de etanol.

Nos últimos anos o chamado setor sucroalcooleiro está em rápido crescimento, em função da demanda crescente de etanol combustível, tanto no mercado interno quanto para exportação, bem como em função da oportunidade de aumento das exportações de açúcar, em decorrência da mudança do regime de comercialização de açúcar na União Européia. O mercado interno de etanol tem sido influenciado pelo sucesso dos veículos flex-fuel, lançados em 2003, enquanto as exportações de etanol – sobretudo para os Estados Unidos, União Européia e Japão – devem-se à políticas de estímulo do uso do etanol em substituição parcial da gasolina.

Em consequência das mudanças observadas nos mercado nacional e internacional, a produção de cana de açúcar deve crescer de 426 milhões de toneladas em 2006 para 685 milhões de toneladas em 2012. Segundo estudos da UNICA (Carvalho, 2007), no mesmo período o

aumento da produção de cana no estado de São Paulo seria de quase 125 milhões de toneladas, passando de 267 a 392 milhões de toneladas entre 2006 e 2012.

A produção de eletricidade a partir da biomassa é uma alternativa de geração distribuída – GD –, que pode trazer benefícios ao setor elétrico devido à redução das perdas nos sistemas de transmissão e de distribuição e, também, pela postergação de investimentos. Como toda tecnologia de geração distribuída, o adequado planejamento da expansão requer não só as informações do potencial existente, mas também sua localização espacial.

O maior potencial de cogeração no Brasil está no setor sucroalcooleiro, no qual a tecnologia é tradicional, mas com capacidade instalada muito abaixo do potencial técnico e econômico. O grande potencial está associado à existência de biomassa residual que pode ser utilizada como combustível (bagaço, no presente, e mais a palha, no futuro) e às demandas térmicas muito significativas na forma de vapor de baixa pressão.

Em função da expansão do setor sucroalcooleiro, com a construção de novas usinas e a expansão de usinas existentes, há uma janela de oportunidades para investimentos na produção de eletricidade excedente, que poderia ser comercializada com distribuidoras de eletricidade e grande consumidores.

Para a avaliação do potencial de produção de energia elétrica a partir da cana de açúcar é necessário primeiramente um planejamento que determine a expansão espacial do setor sucroalcooleiro, o que também poderia evitar que essa expansão ocorra de forma indiscriminada.

O setor sucroalcooleiro destaca-se por sua grande importância econômica, mas também é considerado como um dos responsáveis pela degradação ambiental, como a destruição de ecossistemas naturais, deterioração dos solos e dos recursos hídricos (Pinto *et al.*, 2000). Levando-se em consideração tanto as expectativas de crescimento do setor quanto devido ao potencial impacto ambiental da cana de açúcar, torna-se necessário a elaboração de um planejamento que considere as múltiplas variáveis relacionadas a tal crescimento, visando à mitigação de tais impactos.

Neste trabalho foi empregado um procedimento metodológico que permite a integração das variáveis relacionadas à expansão do setor, e a posterior análise dos resultados parciais e finais, através do uso de técnicas de análise espacial presentes nos Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

No presente trabalho é analisada a atual situação do setor sucroalcooleiro no estado de São Paulo, e são identificadas as áreas próprias para a expansão do cultivo da cana de açúcar. Posteriormente, são identificadas as melhores oportunidades para o aproveitamento do bagaço para a geração de energia elétrica. Entre outros, os seguintes fatores condicionantes foram considerados: (i) a expansão da atividade sucroalcooleira no estado de São Paulo, tendo em conta as restrições relativas à aptidão das terras para a cana de açúcar, (ii) restrições ambientais associadas, por exemplo, à não disponibilidade de água ou existência de unidades de conservação e/ou de outros espaços protegidos, (iii) dificuldades de acesso à rede elétrica, etc. O emprego dos Sistemas de Informação Geográfica permite que todos os aspectos relevantes possam ser considerados no processo de decisão, bem como permite que o decisor tenha uma visão espacial dos fatores condicionantes e, dessa forma, seja possível analisar o problema de forma mais adequada.

1.2 Objetivos

O principal objetivo da dissertação é o desenvolvimento de um procedimento metodológico baseado em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) de sorte a que vários aspectos relevantes na análise da expansão da atividade canavieira no estado de São Paulo possam ser explicitamente considerados. O procedimento metodológico e os resultados obtidos no que diz respeito à expansão do cultivo da cana de açúcar no estado foram utilizados na avaliação do potencial de geração de eletricidade excedente a partir da biomassa residual da cana.

É um objetivo secundário desta dissertação, embora fundamental no contexto das atividades desenvolvidas no Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético, a demonstração da utilidade e da aplicabilidade dos SIG no processo de planejamento, em geral, e de planejamento energético, em particular.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação está estruturada em seis capítulos adicionais a este texto introdutório. No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica sobre SIG e sobre aplicações de SIG na área energética, em particular em estudos de levantamento do potencial da biomassa.

No Capítulo 3 faz-se a descrição do procedimento metodológico adotado e da base de dados que foi utilizada no trabalho.

No Capítulo 4 faz-se análise da atividade canavieira em São Paulo e no Brasil, além de serem apresentadas informações sobre a geração de eletricidade a partir da biomassa residual da cana.

No Capítulo 5 são analisados os fatores condicionantes à expansão do cultivo da cana de açúcar. Os fatores relevantes ao cultivo da cana que foram considerados neste trabalho são: uso da terra, aptidão do solo, propensão à erosão, fertilidade do solo, potencial de mecanização (sobretudo da colheita), disponibilidade de recursos hídricos e aptidão climática.

No Capítulo 6 é feita a análise dos resultados, tanto no que diz respeito à identificação das áreas mais adequadas à expansão da atividade canavieira em São Paulo, bem como no que diz respeito ao potencial de geração de eletricidade e fatores restritivos. São explicitamente considerados, mas apenas a título exploratório, em função da dificuldade encontrada na obtenção de dados, restrições de acesso à rede elétrica e restrições impostas pela baixa disponibilidade de água em certas regiões do estado.

Finalmente, no Capítulo 7 são apresentadas as conclusões desta dissertação.

Capítulo 2

Sistemas de Informação Geográfica e suas Aplicações em Energia

Sistemas de Informação Geográfica (SIG, ou GIS, da designação em Inglês "*Geographical Information Systems*") têm sido empregados em diversos trabalhos de planejamento, inclusive no planejamento energético. Na seqüência do texto são descritas algumas aplicações de SIG na área energética e, mais especificamente, em estudos relacionados com a produção e o uso de biomassa.

2.1 Sistemas de Informação Geográfica

Os Sistemas de Informação Geográfica correspondem a um conjunto de recursos que permitem a coleta, o armazenamento, a extração de informações desejadas, a transformação e a representação espacial de dados. Quaisquer dados representativos de fenômenos do mundo real podem ser tratados com emprego dos SIG, respeitados o sistema de coordenadas e seus atributos espaciais, bem como as inter-relações espaciais que existem entre eles (Burroughs, 1998). Em função da capacidade de inter-relacionamento de dados de natureza distinta, os SIG são recursos poderosos na solução de problemas espaciais complexos. Com os SIG é possível explorar cenários distintos e, conseqüentemente, verificar os resultados associados, minimizando ou evitando problemas e impactos associados.

Aronoff (1989) define SIG como sistemas computacionais usados para armazenar e gerenciar informações geográficas. Por sua vez, Smith *et al.* (1987) definem SIG como um banco de dados indexados espacialmente, sobre o qual operam procedimentos de consulta de entidades espaciais.

Segundo Foresman (1998), os SIG foram utilizados pela primeira vez na década de 1960, por Roger Tomlinson, membro do governo canadense, na criação de um inventário de recursos naturais no Canadá. O sistema também foi empregado no planejamento da ocupação do solo naquele país. Na década de 1970, nos EUA, os SIG foram utilizados para planejar o uso da terra e a proteção ambiental, no contexto do NEPA (*National Environmental Policy Act*). A partir de então a utilidade dos SIG passou a ser reconhecida pelas agências federais nos EUA.

Entre os sistemas de informação geográfica criados nos anos 1960 e 1970, nos Estados Unidos, destacam-se o LUNR (*Land Use and Natural Resources Information System*, criado em Nova York, em 1967), o MLMIS (*Minnesota Land Management Information System*, de 1969), o PIOS (*Polygon Information Overlay System*, de 1971), o ORMIS (*The Oak Ridge Modelling Information Systems*, de 1972), e o STORET (*Storage and Retrieval of Data Water Quality Control System*) (Sendra 1992).

Na década de 1980, com o surgimento e a evolução dos computadores pessoais e dos sistemas gerenciadores de bancos de dados, houve expansão do uso dos SIG. Muitas funções de análise espacial foram então incorporadas, o que contribuiu para a ampliação de suas aplicações. A partir da década de 1990 observou-se maior velocidade de penetração dos SIG nas organizações, fato que foi induzido por custos decrescentes de hardware e dos softwares, e também pelo surgimento de alternativas mais baratas para a construção de bases geográficas de dados (Câmara, 1999).

Com os SIG foi possível a automatização do processo de armazenagem, a manipulação e a geração de novos mapas. Em decorrência do tratamento computacional da informação, o processo de representação da realidade geográfica tornou-se mais dinâmico, permitindo a diversificação das análises e das consultas espaciais.

A capacidade de integrar os componentes espaciais e temáticos dos dados, e o conjunto de operações que podem ser executadas, diferenciam os SIG de outros tipos de sistemas de dados, como, por exemplo, o Sistema de Cartografia Automatizada (AM) e o Sistema de Desenho Assistido por Computador (CAD) (Aronoff, 1989).

No fim do século XX a demanda por dados topográficos e a importância de temas como os recursos naturais cresceram aceleradamente. As técnicas de sensoriamento remoto e fotogrametria permitiram o mapeamento de grandes áreas, com precisão. Tais tecnologias contribuíram para avanços na elaboração de diversos mapas temáticos como, por exemplo, de uso da terra, geológicos, ecológicos, etc.

Segundo Burroughs *et al* (1998), antes dos SIG todos os mapas desenhados sobre o papel tinham alguma limitação. O emprego da tecnologia computacional na cartografia permitiu rapidez na produção de mapas, redução de custos, a elaboração de mapas específicos para as necessidades dos usuários, e a representação gráfica da mesma informação de diversas formas, facilitando a análise dos dados e a análise estatística dos mesmos, a criação de mapas em três dimensões, etc.

Como os softwares de SIG permitem o armazenamento, a manipulação e a integração de dados geo-referenciados, sua importância em atividades de planejamento é evidente. Os SIG são úteis em atividades de planejamento urbano, rural, ambiental, energético e militar. Um SIG tem componentes de hardware e software, e seus elementos fundamentais são as bases de dados (as informações) e sua organização (Maguire, 1991).

Em um SIG a informação é armazenada em uma ou várias bases de dados, e é organizada e controlada por diversos subsistemas do software. As informações geo-referenciadas de um SIG podem representar a realidade de forma digital, e serem utilizadas em estudos de natureza distinta. Entretanto, segundo Comaz e Ruiz (1993), a realidade geográfica é demasiadamente complexa, e sua modelagem é sempre subjetiva.

Comaz e Ruiz (1993) destacam aplicações típicas dos SIG: (i) aplicações bióticas nas quais estão incluídos estudos afetos à agricultura, ao uso da terra e à gestão de recursos naturais; (ii) aplicações em atividades de administração e gestão, como a construção e organização de

cadastros, o planejamento e a gestão dos serviços públicos; (iii) aplicações de caráter urbano, (iv) aplicação com objetivos de defesa e segurança; (v) aplicações sócio-econômicas, como censos e estatísticas da população e análises de mercado; e (vi) aplicações em contexto internacional, relacionadas a bases de dados mundias.

Scholten (1990) analisa o uso dos SIG no planejamento do uso do solo. No contexto do planejamento territorial há conflitos de interesse entre os usos para agricultura, indústria, comércio, infra-estrutura pública e recreação. No planejamento territorial as informações quantitativas ou qualitativas das unidades espaciais devem ser armazenadas, processadas, e devem ser disponibilizadas para uso nos diferentes estágios do processo. Os SIG permitem a estruturação das informações de maneira a que possam ser usadas de tal forma. O mesmo autor afirma que os SIG proporcionam visão mais ampla sobre as informações existentes, os problemas a serem resolvidos, as políticas relacionadas a eles, as opções em consideração, e seus impactos. Dados estatísticos e geográficos podem ser integrados, e a representação gráfica é facilitada.

2.2 SIG e suas aplicações no planejamento energético

Em função da possibilidade de integração de dados de natureza distinta, os SIG têm sido empregados em trabalhos de planejamento energético. Nesse sentido, uma das aplicações mais difundidas dos SIG é na avaliação do potencial de fontes renováveis de energia. As publicações mencionadas na sequência ilustram aplicações dos SIG na área energética.

Varela *et al.* (2006) propuseram o emprego de SIG em estudos de planejamento integrado de recursos na Escócia, tendo como objetivo otimizar o uso de fontes renováveis de energia. No trabalho é destacada a aplicação da energia eólica e explorado o condicionante imposto pelos custos de conexão das unidades de geração à rede elétrica. Fatores analisados pelos autores foram: topografia, o uso da terra, informações ambientais e o posicionamento da rede elétrica. Técnicas de geo-processamento foram empregadas na integração e na análise de dados. A análise multi-critério com atribuição de pesos foi empregada, em associação a técnicas como *buffer*, *overlay*, e reclassificação. No caso específico do estudo da interconexão elétrica, foram empregadas técnicas algébricas e operadores existentes nos SIG, o que permitiu a identificação

da rota da rede de interconexão entre a nova unidade de geração elétrica e linhas elétricas ou subestações mais próximas.

Ramachandra e Shruth (2006) apresentam a aplicação de SIG na avaliação do potencial de fontes renováveis de energia (solar, eólica, hídrica e biomassa) no estado de Karnataka, na Índia. O principal objetivo do estudo era a definição espacial tanto da disponibilidade dos recursos energéticos quanto da demanda em diferentes localidades, visando a posterior aplicação do conceito de planejamento integrado de recursos em nível regional. Com o emprego dos SIG também foi possível a identificação do impacto dos fatores climáticos sobre o potencial das fontes renováveis de energia.

No trabalho, o potencial de biomassa foi avaliado a partir da consideração da disponibilidade de resíduos agrícolas, florestais, da horticultura e resíduos animais. As informações de disponibilidade de resíduos foram armazenadas e integradas nos SIG, com posterior geração de mapas de disponibilidade local.

Já Musselli *et al.* (1999) apresentam o emprego dos SIG em um estudo de planejamento integrado de recursos no qual várias fontes renováveis de energia são consideradas. O caso objeto de análise corresponde à Córsega, no sudeste da França. Uma base de dados regionais foi construída com informações do potencial solar, localização da rede elétrica de média e de alta tensão, e caracterização das áreas afastadas (e.g., uso da terra e topografia). A partir dessa informação o potencial energético foi relacionado às demandas de eletricidade em diferentes locais. Os vários sistemas de geração distribuída de eletricidade foram analisados sob a premissa de minimização dos custos de atendimento das localidades.

No estudo todas as informações foram geo-referenciadas e mapas foram digitalizados. Foi feito um *buffer* da rede elétrica para a determinação da distância entre a rede elétrica e as áreas remotas; o *buffer* utilizado foi de 500 m, que é, segundo os autores, o limite máximo convencional para a transmissão elétrica em baixas tensões. Os autores destacam a relativa facilidade de adaptação do procedimento metodológico descrito a qualquer localidade, desde que existam bases de dados locais.

Bravo (1996) desenvolveu um estudo para a identificação dos locais e a avaliação do potencial de geração distribuída de eletricidade com fontes renováveis de energia, na Espanha. No estudo foi utilizada uma base de dados regionais para estimar a demanda e a oferta de energia; para determinação da distribuição geográfica da demanda foram utilizadas estatísticas demográficas relacionadas com dados de consumo de eletricidade. Na estimativa da oferta foram utilizados dados de velocidade média anual do vento e radiação solar média anual. As demais informações utilizadas no estudo foram: as áreas de preservação natural, a localização das redes elétricas e das subestações, os limites administrativos e o posicionamento das rodovias.

Yue e Wang (2005) descrevem um estudo de planejamento visando a expansão do emprego de fontes renováveis de energia. No estudo foram feitas as análises técnica, econômica e ambiental de fontes de energia tais como a solar, a eólica e biomassa. O estudo foi desenvolvido para a área rural de Chingu, no sudoeste de Taiwan.

No trabalho, os autores descrevem um procedimento metodológico baseado em SIG no qual busca-se a compatibilização das demandas energéticas aos potenciais locais. Informações climáticas, ambientais e a caracterização do uso da terra fazem parte da base de dados. Os autores descrevem mais detalhadamente a aplicação da metodologia em um estudo de avaliação do potencial de produção de energia elétrica a partir do bagaço da cana-de-açúcar. A área disponível para plantio da cana foi avaliada a partir da diferença entre a área total e as áreas ecologicamente sensíveis, as áreas de preservação, as áreas urbanas, e as zonas de amortecimento (faixa litorânea localizada a 1,5 km da linha de costa). Em linhas gerais, o procedimento metodológico apresentado por Yue e Wang (2005) é semelhante ao que foi desenvolvido na presente dissertação.

No Brasil, as aplicações de SIG em estudos de avaliação do potencial de fontes renováveis de energia são mais limitadas. Sordi *et al.* (2004) avaliaram o potencial técnico de produção de eletricidade a partir dos resíduos produzidos pela avicultura de corte no oeste do Paraná. Ávila *et al.* (2002) avaliaram as áreas propícias para instalação de pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) na Bacia São Francisco, mais especificamente no município de São Desidério, no oeste da Bahia. Zambon *et al.* (2003) utilizaram SIG na avaliação da instalação de novas termelétricas no estado de São Paulo.

Já o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) desenvolve desde 2001 o sistema ENERGIS para o Departamento de Sistemas Isolados de Centrais Hidrelétricas Brasileiras, da Eletrobrás. O sistema foi operacionalizado em 2004. Trata-se de um SIG voltado ao auxílio no processo de tomada de decisões no planejamento do atendimento de energia elétrica nos sistemas isolados da região norte do Brasil. O estado do Amazonas foi utilizado como área piloto (Carvalho *et al.*, 2007).

Carvalho *et al.* (2007) também apresentam em seu trabalho o projeto MEAPA, no qual foram desenvolvidas metodologias integradas no mapeamento de fontes alternativas de energia no estado do Pará. Os objetivos do projeto são a construção de uma base de dados geográficos para apoiar o planejamento energético na região, o desenvolvimento de metodologias integradas para a avaliação de soluções de eletrificação, a implementação da metodologia em SIG e, por fim, o mapeamento dos recursos energéticos (e.g., solar, eólico e biomassa) na Ilha do Marajó.

Santos *et al.* (2003) desenvolveram um modelo baseado em SIG para elaborar o planejamento espacial de geração distribuída, com o objetivo de proporcionar equilíbrio entre o planejamento do sistema elétrico, custos e desenvolvimento social no estado de Santa Catarina. No estudo foi considerado o impacto causado pela inserção da geração descentralizada com diferentes formas de energia, bem como as restrições técnicas operativas e comerciais dos geradores, e a disponibilidade dos sistemas de transmissão.

O mapa utilizado para o desenvolvimento do projeto foi o mapa do sistema CELESC, com subestações e linhas de transmissão geo-referenciadas pelos autores. À base de dados foram agregados dados referentes à demanda em 10 anos e dados relativos a estimativa de oferta, o que permitiu a análise estatística da distribuição espacial da disponibilidade energética no estado de Santa Catarina.

2.3 SIG e suas aplicações em avaliações do potencial de biomassa

Em função dos objetivos da presente dissertação, são destacadas a seguir aplicações de SIG em estudos de avaliação do potencial de biomassa.

Segundo Voivontas *et al.* (2005), o uso de SIG em tais aplicações permite a consideração de fatores geográficos que tanto afetam o potencial da fonte quanto os custos de suprimento. Os autores descrevem um sistema de suporte à decisão, baseado em SIG, que foi utilizado na avaliação do potencial de produção de eletricidade a partir de resíduos agrícolas em Creta, na Grécia. O sistema permite a consideração de distintos posicionamentos das unidades de geração e a avaliação das áreas de influência no que diz respeito ao suprimento da biomassa. Os autores descrevem estudo similar ao que foi desenvolvido na presente dissertação, ou seja, a avaliação do potencial de geração de eletricidade com biomassa residual.

No trabalho os autores avaliaram geograficamente o potencial teórico (ou termodinâmico), o potencial técnico e o potencial econômico de geração de eletricidade. O potencial econômico de geração de eletricidade foi avaliado a partir da consideração da distribuição espacial da biomassa e de suas propriedades enquanto combustível.

A disponibilidade espacial de biomassa associada a resíduos agrícolas foi estimada em uma das etapas do algoritmo desenvolvido, a partir de dados de produção. A informação foi armazenada em uma base de dados do SIG. A quantificação da biomassa disponível para a produção de eletricidade foi feita em função da consideração de usos alternativos e da tecnologia de geração elétrica. Os custos de geração de eletricidade foram então calculados e comparados aos custos de geração em sistemas térmicos convencionais que empregam combustíveis fósseis.

A metodologia descrita pelos autores permite não só a avaliação do potencial associado à biomassa residual como, também, a seleção do local ótimo de instalação das unidades de geração elétrica, em função da distribuição espacial do insumo e dos custos de transporte. Conclui-se que o potencial em Creta é significativo, e depende principalmente do investimento associado.

Já Schneider *et al.* (2001) descrevem uma metodologia baseada em SIG que permite a consideração de fatores de grande dispersão espacial, tais como aspectos sociais, culturais, econômicos, biológicos, climáticos, geofísicos, etc. A metodologia foi empregada na avaliação do potencial de produção de biomassa no Nordeste do Brasil.

Como fatores condicionantes, no estudo os autores consideraram aspectos biológicos e geofísicos aliados a dados tais como localização de estradas, usos da terra, densidade

populacional e taxa de crescimento da população, localização de espécies em risco de extinção, áreas significativas do ponto de vista arqueológico, etc. Aspectos sociais e culturais também foram considerados no que diz respeito à posse de terra e ao seu uso. Condicionantes ambientais foram igualmente considerados.

Dados de solo e clima foram usados na determinação de produtividades agrícolas, tendo em conta a disponibilidade d'água e a radiação solar. Os recursos de geo-processamento disponíveis no SIG, IDRISI, foram utilizados na interpolação de dados e no cálculo das produtividades. Foram interpolados os dados disponíveis de textura e profundidade do solo, radiação solar anual média, temperatura média e pluviometria.

Com certa semelhança em relação ao que foi feito nesta dissertação, a metodologia descrita por Schneider *et al.* (2001) permite a identificação dos locais adequados para a geração de energia elétrica a partir da biomassa em uma dada região, aspecto de grande importância no desenvolvimento de políticas regionais. Além da identificação dos locais adequados para a instalação das unidades de geração elétrica, a metodologia permite também a identificação de áreas que requerem políticas específicas de proteção ambiental.

Goora (2001) propõe o uso de SIG na avaliação da geração elétrica a partir da biomassa de uma floresta de salgueiros, que foi uma das alternativas consideradas para emprego da biomassa contaminada pela radioatividade devido ao acidente nuclear em Chernobyl, em 1986. A disponibilidade de biomassa foi avaliada em função das condições de solo e clima. Os SIG foram utilizados na integração e no controle dos dados.

O software utilizado no estudo é o mesmo empregado pela autora da presente dissertação, porém em uma versão anterior (ArcView 3.1). Com o software foram identificadas as áreas apropriadas para a produção de Salgueiro, em função de sua produtividade e nível de contaminação por ^{137}Cs . Assim, foi avaliada a biomassa que poderia ser empregada na produção de eletricidade.

Por sua vez, Ranta (2005) descreve o desenvolvimento e a aplicação de um modelo baseado em SIG que foi empregado na avaliação do potencial e das melhores oportunidades de uso de

resíduos da madeira na geração de energia elétrica na Finlândia. A metodologia proposta seleciona locais ideais para instalação das unidades de geração, minimizando os custos.

O artigo descreve a utilização de SIG na avaliação da disponibilidade regional de resíduos de biomassa, considerando também os custos. Tanto a disponibilidade física quanto os custos dependem das condições geográficas e das atividades econômicas em cada local. Na avaliação dos custos de geração elétrica foram consideradas as distâncias relativas ao transporte da biomassa, tendo sido considerada uma distância máxima de 100 km. Outros fatores analisados são a concentração de resíduos, as dimensões da área ocupada e as dificuldades relacionadas ao processo de colheita.

A localização das unidades de geração é resultado da aplicação do modelo SIG desenvolvido, em função da consideração da localização de estradas e das redes elétricas. Assim, os custos de transporte de biomassa e os custos de interconexão elétrica puderam ser explicitamente considerados. Feita a localização geográfica da oferta de biomassa e dos possíveis locais de instalação das unidades de geração, um modelo de otimização foi empregado para a definição dos locais adequados para as usinas termoeletricas. Regras foram definidas de acordo com as especificidades de cada usina. A partir dessas regras foram modelados espacialmente os locais ideais para a instalação das usinas através de ferramentas de geo-processamento que agregam dados e criam áreas de proximidade (*buffer*).

No mesmo trabalho, entre as técnicas de geo-processamento utilizadas destaca-se o processo de triangulação de Delaney, pelo qual muitos pontos são agrupados de acordo com a distância que têm entre si, permitindo a criação de novas sub-regiões. Para o cálculo das distâncias foi realizado um *buffer* com raio de 10 km em torno das áreas nas quais se encontra a biomassa. A área de *buffer* empregada no trabalho de Ranta (2005) é semelhante a que foi adotada nesta dissertação.

Ranta (2005) também utilizou o método *Natural Neighbor* para agrupar os terrenos de acordo com sua proximidade. Após o cálculo da disponibilidade de dados do ponto, foram usados métodos de interpolação para integrar as diferentes fontes de dados. Para a análise final o autor aplicou o método AHP, procedimento de ponderação dos diferentes fatores analisados, que também foi aplicado na presente dissertação.

Jonsson e Hillring (2006) descrevem a aplicação, na Suécia, de um SIG na avaliação da concentração de poluentes atmosféricos em áreas residenciais, considerada a hipótese de emprego de biomassa, em larga escala, na calefação. O uso da biomassa em calefação nessas condições é justificado em função das necessidades de redução das emissões de gases de efeito estufa.

Os SIG foram empregados na definição dos cenários de uso da biomassa e na modelagem da dispersão de poluentes. As emissões foram calculadas a partir de fatores de emissão e da necessidade de biomassa para calefação. A dispersão dos poluentes foi analisada em função das condições meteorológicas e topográficas das áreas objeto de estudo. Assim, tem-se a informação de áreas críticas de concentração de poluentes. Os autores apresentam mapas que ilustram concentrações previstas em função do uso de biomassa em calefação.

Já Ahamed *et al.* (2006) descrevem a aplicação de um modelo baseado em SIG na seleção de tecnologias de irrigação em Bangladesh. Um banco de dados foi desenvolvido com informações relativas a florestas, proteção do ambiente, gestão de recursos hídricos, proteção do solo e desenvolvimento urbano. As principais etapas do trabalho desenvolvido foram: elaboração do plano de desenvolvimento do cenário energético, avaliação da demanda de energia, criação da base de dados em SIG ArcView 3.2, criação dos temas (*shapefiles*) e, por fim, desenvolvimento da estrutura de dados, que foram então integrados e analisados através de operações algébricas disponíveis no SIG.

O modelo de avaliação multicriterial do SIG ArcView foi utilizado por Ahamed (2006) para integração dos dados e análise dos condicionantes. O modelo multicriterial de cenários dos SIG é uma aplicação facilitadora que permite ao usuário o acesso à informação, a análise espacial e a produção de resultados na forma de mapas, tabelas e gráficos. Permite, também, que o usuário tenha respostas quando da consideração de cenários distintos.

Batzias *et al.* (2005) propõem a aplicação de SIG na avaliação da produção de energia elétrica e biogás a partir de resíduos de biomassa animal. O estudo descreve como a ferramenta de consulta SQL, disponível em SIG ArcView 8.2, pode ser aplicada para estimar futuros cenários e coordenar o planejamento. O método de consulta SQL também é utilizado nesta dissertação na versão ArcInfo 9.2. Os resultados obtidos para todo o território geográfico

definido nos SIG podem ser aplicados independentemente das regiões administrativas envolvidas, o que o torna uma ferramenta especialmente útil em estudos de gestão de uso e de ocupação do solo. A análise de custos também foi feita pelos autores.

Por sua vez, Maserra *et al.* (2006) descrevem o modelo *Woodfuel Integrated Supply/Demand Overview Mapping*, igualmente baseado em SIG, e sua aplicação em estudos de caso no México, na Eslovênia e no Senegal. O modelo foi empregado na análise da demanda de lenha vis-à-vis o padrão espacial do suprimento, permitindo a organização de informações dispersas e a visualização dos resultados dos procedimentos de ranqueamento multicriterial.

Fisher *et al.* (2005) descrevem o inventário de recursos naturais feito para a China, Europa, Mongólia e antiga União Soviética, e que fundamenta-se em bases de dados em SIG considerando informações do clima, solo, terreno e vegetação. No trabalho, os autores fazem uma avaliação do potencial de biomassa do *miscanthus*.

Finalmente, Nord-Larsen e Talbot (2004) descrevem uma metodologia também baseada em SIG e que foi utilizada na avaliação dos recursos florestais para fins energéticos na Dinamarca. O resultado apresentado pelos autores corresponde a um inventário de disponibilidade energética e econômica.

O processo de avaliação das fontes locais de energia renovável adotado pelos autores supracitados tem por base estudos técnicos e análises econômicas, ambientais e políticas, as quais são exemplos de trabalhos de investigação em estudos de avaliação do potencial. Os resultados de tais análises podem ajudar a planejar a utilização das fontes de energia mais adequadas, em escala local e nacional, em médio e longo prazo, segundo políticas ambientais. A avaliação simultânea de diversas fontes de energia permite a identificação das melhores alternativas de emprego de cada recurso. A maioria das referências citadas trata do emprego de fontes renováveis de energia na geração de eletricidade;

A avaliação de múltiplas fontes renováveis de energia, sob a ótica do uso da terra em locais específicos, dá subsídios ao processo de tomada de decisões por parte de gestores e investidores. A aplicação da metodologia pode ser expandida com o objetivo de conduzir um exame detalhado do potencial de um país inteiro. Tais implicações podem ajudar a construir uma visão

desenvolvimentista para os sistemas de energia baseados em recursos naturais localmente disponíveis, em busca do desenvolvimento ambientalmente correto do setor energético, com foco na sustentabilidade.

Capítulo 3

Procedimento Metodológico e Base de Dados

3.1 Procedimento metodológico

Esta dissertação visa o estudo da expansão da capacidade de geração de eletricidade a partir da biomassa residual da cana de açúcar (bagaço e palha), tendo como instrumento básico um modelo de análise espacial baseado em SIG. No capítulo anterior foram mencionados vários trabalhos acadêmicos que demonstram que as ferramentas de análise espacial auxiliam no processo de tomada de decisão e permitem a agregação de dados para gerar informações de suporte às decisões.

O procedimento metodológico adotado neste trabalho está dividido em três etapas: a primeira diz respeito ao levantamento, à sistematização e à construção da base de dados geográficos para aplicação em SIG, a segunda etapa consiste na análise espacial dos dados e, finalmente, a terceira corresponde à modelagem cartográfica e à avaliação multicriterial.

As funções dos SIG podem ser agrupadas em quatro ações fundamentais associadas aos dados: sua entrada, a gestão e a transformação dos mesmos, sua análise e, finalmente, a saída. Os dados espaciais e as características temáticas associadas a eles provêm, em geral, de diversas fontes e têm distintos formatos (e.g., mapas analógicos, imagens de sensores espaciais e fotografias aéreas), o que requer prévia homogeneização da informação (Barredo, 1991).

Os dados primários utilizados na pesquisa consistem de três tipos de dados geográficos que diferem entre si pela natureza geométrica na qual estão estruturados, bem como pelo nível temático de sua representação cartográfica. Os dados cartográficos descrevem as entidades do território, bem como atributos descritivos relacionados a estas entidades, ou fenômenos geográficos. Em geral, para entrada nos SIG os dados estão disponíveis de maneira distinta; a

entrada de dados nos SIG pode ser feita a partir de dados analógicos ou digitais (Comaz e Ruiz, 1992).

Em um projeto de planejamento, ou de ordenação espacial de uma região, um elemento muito importante a ser considerado é a disponibilidade da informação. Outro aspecto importante é o formato no qual ela está disponível, ou seja, se está em formato digital e se já foi processada para poder ser analisada em um SIG. Gutierrez e Gould (1994) afirmam que o aspecto da disponibilidade dos dados é o “calcanhar de Aquiles” dos SIG, uma vez que condiciona enormemente a possibilidade de emprego do sistema e a qualidade dos resultados.

As diferentes formas de apresentação da base de dados, bem como a própria dificuldade de acesso aos dados, representam potencialmente sérias limitações. No Brasil, em geral, a base cartográfica não está disponível em meio digital e é muito raro encontrar dados em ambiente SIG, o que é um empecilho para pesquisas. A necessária digitalização da base de dados é um processo que demanda tempo significativo. Da mesma forma, os custos de homogeneização e de adequação da base de dados aos SIG podem ser elevados. Por outro lado, é evidente que sem a base de dados adequada a potencialidade dos SIG não pode ser devidamente aproveitada (Barredo, 1996).

Nesta dissertação diversos fenômenos geográficos foram analisados, e cada um deles, em sua informação original, seja pela natureza dos fenômenos ou pela forma de disponibilização da base de dados, estavam representados em diferentes escalas. A base de dados utilizada não pode ser considerada ideal para o estudo em questão; nesse sentido, a pesquisa em si, e os resultados alcançados, devem ser considerados um exemplo de aplicação da metodologia.

A escala é de fundamental importância para os estudos que envolvem informações geográficas, uma vez que é usada para se referir à magnitude do estudo (i.e., extensão geográfica) e ao grau de detalhe (i.e., escala geográfica). Para um cartógrafo, escala pode ser definida simplificada como uma relação entre a distância no mapa e a distância real – frequentemente denominada de escala métrica. A maneira tradicional de armazenar, disseminar e analisar dados geográficos era através de mapas em papel, de escala pré-definida, mas os SIG abriram a possibilidade de se trabalhar com representações de escalas múltiplas. É frequente se ter na mesma base versões digitais de dados em diferentes escalas, e com os SIG a

compatibilização é muito fácil, embora seja apenas possível alterar a escala de representação do mapa e não a escala na qual a base de dados foi construída, ou seja os graus de detalhe continuam os mesmos (Goodchild *et al.* 1997).

As informações geográficas necessárias a uma pesquisa que envolve múltiplos parâmetros e diversas fontes de informação estão invariavelmente disponíveis em escalas distintas. Por exemplo, nesta dissertação alguns planos de informação foram criados a partir da interpretação de imagens de satélite, para as quais a unidade de medida utilizada é o pixel. Nesse caso, quanto maior a resolução da imagem maior é o nível de detalhe da informação que pode ser obtida.

A mudança de escala de um mapa pode implicar erros de generalização, uma vez que alguns fenômenos geográficos se tornam aparentes apenas a uma certa distância e os dados podem carregar informações distintas dependendo da escala na qual são representados. Por exemplo, um mapa construído na escala 1:1.000.000 tem mais erros quando representado em escala 1:500.000 do que quando representado na escala 1:1.500.000, uma vez que a menor escala não permite a identificação de todas as informações existentes no mapa original..

Para os tomadores de decisão, a generalização associada com a escala pode reduzir a clareza que é vital para o processo (Goodchild *et al.*, 1997). Em geral, para o processo de tomada de decisão é necessária a integração das diferentes informações, combinando dados físicos com dados geográficos baseados em divisões políticas, o que torna necessária a abordagem do problema com as diferentes escalas.

Nesta dissertação, para a minimização do problema de uniformização de escalas múltiplas, não foram aumentadas as escalas originais dos mapas. Com a finalidade de padronizar diferentes escalas foi considerado padrão a escala 1:1.500.000, já que nenhuma base de dados utilizada foi elaborada em escala menor.

3.2 Base de dados

Alguns dados empregados nesta dissertação estavam originalmente disponíveis de forma analógica, o que requereu a digitalização da informação, enquanto outros já estavam em formato digital; a estes muitas vezes foram necessários procedimentos de correção dos erros topológicos dos dados. Os dados foram armazenados e organizados na *Geodatabase ArcCatalog*, existente no SIG ArcGis.

Os seguintes mapas correspondem à fonte primária de informação desta dissertação:

- (i) mapa de plantio de cana de açúcar em 2006, elaborado a partir de imagens do satélite Landsat-5 (Rudorff *et al.*, 2006),
- (ii) mapas com áreas classificadas por níveis de necessidades de fertilizantes e corretivos, em função da necessidade de adoção de práticas conservacionistas e em função das possibilidades de mecanização (MAPA, 1979),
- (iii) mapa de aptidão climática para cana-de-açúcar (IAC, 1979),
- (iv) mapa demanda versus disponibilidade de água no estado de São Paulo (Secretaria do Meio Ambiente, 2006),
- (v) mapa de uso da terra no estado de São Paulo, elaborado a partir de imagens do satélite Modis (Shimabukuro *et al.*, 2007),
- (vi) mapa de acessabilidade à rede elétrica no estado de São Paulo, com identificação de linhas de transmissão em diferentes níveis de tensão e localização de subestações (CTEEP, 1999).

O conjunto de mapas é completado com informações de posicionamento geográfico das usinas de açúcar e álcool no estado de São Paulo (CTC, 2007), e com os dados de moagem de cana-de-açúcar nas usinas de São Paulo na safra 2006-2007 (i.e., moagem em 2006) (UDOP, 2007).

Cada mapa relacionado acima representa uma variável temática, e cada um deles recebe o nome de camada temática (*layer*). Aronoff (1983) define as camadas como um conjunto de elementos geográficos logicamente relacionados a seus atributos temáticos.

Após a entrada dos dados e sua organização na *Geodatabase*, a etapa seguinte é a transformação e a análise dos dados, o que permite gerar novas informações a partir das existentes. Os mapas, após a necessária correção topológica, foram manipulados com técnicas de análise espacial disponíveis nos SIG.

Parte do procedimento realizado corresponde à identificação das áreas aptas para expansão do plantio da cana-de-açúcar no estado de São Paulo. Em tais áreas devem ser instaladas novas usinas de produção de açúcar e/ou etanol, e nelas haverá potencial de produção de energia elétrica. A identificação das áreas aptas foi realizada a partir de análise multicriterial, que foi aplicada aos seguintes mapas: (i) níveis de exigência de fertilizantes e corretivos, (ii) exigência de práticas conservacionistas e (iii) possibilidades de mecanização. Todos eles foram elaborados na década de 1970, pela SUPLAN (Secretaria de Planejamento – Ministério da Agricultura), a partir da carta de solos na escala 1:1.500.000. Tais mapas foram mais recentemente digitalizados pelo INPE (2000). Também foi utilizado no procedimento o Mapa de Aptidão Climática para cana-de-açúcar do estado de São Paulo (IAC, 1979), que reflete adequação do regime pluviométrico ao plantio da cana.

A análise multicriterial para a elaboração do mapa de "Áreas Aptas para Cana-de-Açúcar" foi desenvolvida a partir da consulta a especialistas, que ponderaram a respeito da relevância de diferentes fatores, e da análise das áreas nas quais o cultivo de cana está concentrado, tendo em vista que essas áreas apresentam características adequadas para o cultivo.

Na prática há também outros fatores condicionantes que restringem a produção de cana-de-açúcar. Por exemplo, no processo de licenciamento ambiental de uma usina deve ser considerada a qualidade do ar na região e, em princípio, uma nova usina não deve ser instalada em áreas nas quais a qualidade do ar é insatisfatória. Entretanto, tal aspecto não pode ser explorado nesta pesquisa uma vez que a CETESB não tem estações de monitoramento da qualidade do ar para todos os municípios do estado, e para alguns municípios as informações disponíveis são esporádicas. Portanto, a informação essencial não estava disponível.

Outro aspecto importante em tal análise é o Uso da Terra, aspecto que também impõe limitações à presente pesquisa pois as informações ainda não estão disponíveis para todo o estado em escala adequada. Nesta dissertação foi utilizado o mapa de Uso da Terra do estado de São

Paulo, de 2005, produzido pelo Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) a partir de dados multi-temporais obtidos pelo sensor Modis (Shimabukuro *et al.*, 2007).

O ideal seria trabalhar com indicadores de demanda e de disponibilidade de água por município, mas essa informação, infelizmente, não está disponível. Foi então utilizado o mapa Demanda versus Disponibilidade por bacias hidrográficas, do Relatório de Qualidade Ambiental do Estado de São Paulo 2006 (Secretaria do Meio Ambiente, 2006). Através da técnica AHP (*Analytical Hierarchy Process*; ver informações mais a frente), foram atribuídos pesos diferenciados em função da disponibilidade d'água nas bacias, sendo consideradas menos aptas as bacias que têm relação Demanda versus Disponibilidade mais próxima da condição crítica.

No procedimento foram realizadas operações *booleanas* de exclusão das áreas urbanas, bem como das áreas ocupadas com florestas, restingas, reflorestamento e outros usos agrícolas. O mapa resultante é o mapa das áreas aptas segundo as restrições ambientais, que corresponde à indicação das áreas adequadas ao plantio da cana. No caso dessas áreas ainda não estarem ocupadas com cana, são áreas aptas à expansão.

Uma segunda categoria de dados corresponde aos dados específicos, que dizem respeito às unidades produtoras de açúcar e álcool já existentes, bem como àquelas que estão em construção no estado de São Paulo. A localização precisa das unidades industriais foi feita pelo georeferenciamento com coordenadas geográficas (latitude e longitude), e os dados correspondentes foram organizados na tabela “Cadastro de Usinas”. As informações de coordenadas das usinas foram disponibilizadas pelo CTC (Centro de Tecnologia Canavieira), e correspondem a 162 usinas de açúcar e álcool existentes no estado de São Paulo, além de 32 novas usinas que estão em diferentes estágios de construção.

Para cada uma das usinas foi feito o registro correspondente da moagem de cana na safra 2006-2007, da capacidade instalada de geração elétrica e da moagem de cana estimada em 2015. Os dados de moagem na safra 2006-2007 foram obtidos da UDOP (2007), e foram comparados com registros da UNICA (2007). Os dados de capacidade instalada de geração elétrica e expectativa de moagem em 2015 foram obtidos de Macedo *et al.* (2007). Não foi possível obter todas as informações necessárias para as 162 usinas cadastradas pelo CTC e que, supostamente, deveriam estar em operação. Por exemplo, dados de moagem na safra 2006-2007 foram obtidos

para 127 usinas. Os dados de capacidade instalada de geração elétrica apresentados por Macedo *et al.* (2007) estão baseados no banco de dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), no banco de dados da COGEN-SP e em levantamento feito por pesquisadores envolvidos no projeto em questão.

No SIG ArcGIS a tabela “Cadastro de Usinas” foi agregada à base cartográfica digital dos municípios do estado de São Paulo, construindo-se, dessa forma, o primeiro plano de informação correspondente à distribuição espacial das usinas de açúcar e álcool do estado de São Paulo.

Para mapear as áreas ocupadas pela cana-de-açúcar no estado de São Paulo havia sido originalmente prevista a utilização das imagens do sensor Modis. Porém, o programa CANASAT, que é um consórcio entre INPE e CTC, tem elaborado tais mapas nos últimos anos. O mapa correspondente à distribuição espacial das áreas plantadas com cana-de-açúcar no estado de São Paulo, em 2006, foi disponibilizado em formato "*shape*", e é esse o segundo plano de informação do presente trabalho.

Por sua vez, o mapa das linhas de transmissão em diferentes níveis de tensão e de localização das sub-estações é a terceira categoria de dados, organizada no formato linear qualitativo. O mapa da rede de energia elétrica foi transformado para inclusão de superfícies de iso-distâncias. O mapa de acessibilidade à rede elétrica foi então construído, e permite a comparação de duas ou mais localidades do ponto de vista da facilidade de acesso à rede elétrica (referência do mapa). Na prática, uma das limitações encontradas no presente trabalho é que a acessibilidade à rede elétrica não depende somente da distância à rede, ou a uma sub-estação, mas também da capacidade de escoamento da energia elétrica. Assim, o ideal seria conhecer qual a capacidade de interconexão em cada ponto, informação que não foi possível obter junto à CTEEP e às companhias distribuidoras.

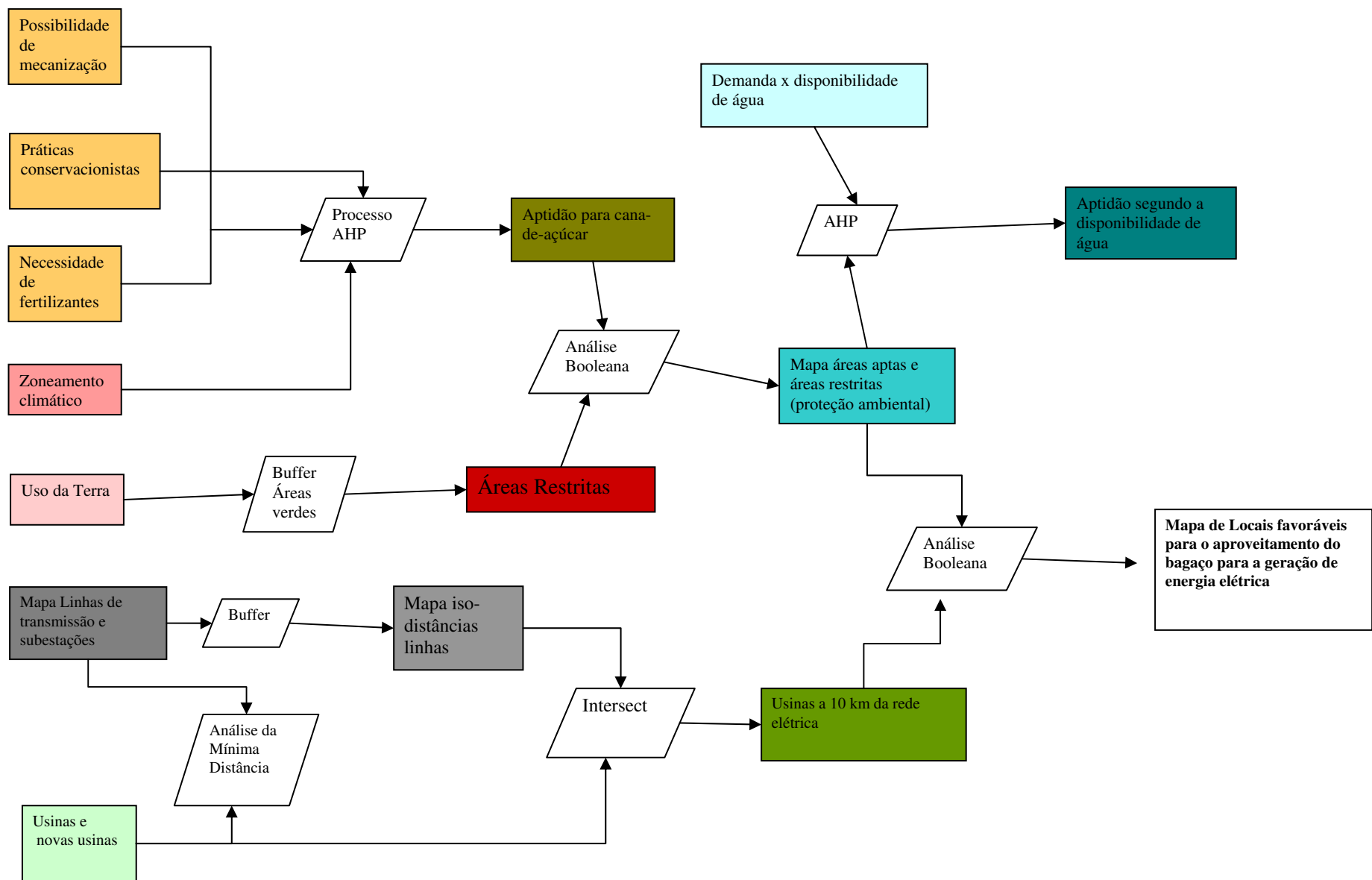


Figura 1 : Fluxograma do Procedimento Metodológico

3.3 Análise Espacial

A etapa final da análise espacial visa a construção de um mapa de locais favoráveis à geração elétrica a partir da biomassa residual da cana-de-açúcar. Os mapas produzidos segundo os procedimentos descritos anteriormente foram utilizados como base intermediária de dados, e tais produtos foram integrados por meio da aplicação de diferentes procedimentos de análise geográfica, tais como a álgebra de mapas, a intersecção, operações *booleanas* e operações matemáticas entre mapas, a consulta ao banco de dados (SQL), e a análise multicriterial. Todos esses procedimentos foram realizados no ambiente de um Sistema de Informação Geográfica comercial, o ArcGis.

A "Avaliação Multicriterial" consiste de um conjunto de técnicas orientadas a assistir os processos de tomada de decisão através da hierarquização de alternativas. No procedimento é utilizada uma lógica interna, baseada em um critério único, para a seleção de uma alternativa ótima entre um conjunto de alternativas. Inicialmente é estabelecido um conjunto de soluções possíveis para o problema analisado e, em seguida, tendo por base um critério, é associada a cada solução um valor que quantifica o grau de importância que cada alternativa tem para o centro decisor. Assim, entre as soluções possíveis são identificadas aquelas de maior relevância, que melhor satisfazem os aspectos mais importantes (Romero, 1993, apud Barredo, 1996).

"Análise Espacial" é a denominação dada ao conjunto de procedimentos adotados no estudo de dados geográficos nos quais, de alguma maneira, características espaciais são destacadas (Unwin, 1981).

Goodchild (1987), por sua vez, distingue "Análise Espacial" de outras técnicas de análise uma vez que, nessa, os resultados dependem da localização e dos atributos dos objetos, ambos componentes dos dados espaciais. Já Comaz e Ruiz (1993) destacam que a Análise Espacial revolucionou a ciência geográfica. A aplicação de métodos estatísticos para a solução de questões geográficas foi proposta por Gatrell (1987).

Análise Espacial pode ser definida como um conjunto de procedimentos que permitem a escolha de um modelo de inferência que considere explicitamente o relacionamento espacial do fenômeno. Os procedimentos são métodos de análise exploratória, sendo que a visualização dos

dados é, em geral, feita através de mapas (Druck *et al.* 2004). Tais métodos permitem descrever a distribuição das variáveis, a identificação das observações atípicas, a distribuição e as relações entre as áreas próximas, bem como a identificação de padrões de distribuição espacial. Dessa forma, são possíveis inferências e hipóteses sobre as observações.

O desenvolvimento da Análise Espacial se deu com a incorporação de metodologias estatísticas e sua adaptação ao estudo dos dados espaciais. A Análise Espacial é também caracterizada por procedimentos analíticos na análise das características geométricas dos dados geográficos (Sendra, 1992).

Em diferentes áreas do conhecimento, no processo de tomada de decisão, a Abordagem Multicriterial é uma técnica usualmente empregada. Sua integração com os SIG tem facilitado trabalhos de planejamento e permitiu avanços significativos em relação ao procedimento tradicional de cruzamento de planos de informação com priorização de dados (Eastman, 2001).

A regra de decisão alimentada por critérios deve ser estruturada a partir de objetivos, e a pontuação dos critérios é o passo inicial da Avaliação Multicriterial. Os critérios limitantes restringem algumas alternativas e, dessa forma, algumas categorias do *layer*. Um *layer* binário pode ser gerado com um código para as alternativas factíveis para uma atividade, e outro para as situações de indisponibilidade (Barredo, 1996).

Os métodos e técnicas de Avaliação Multicriterial se diferenciam basicamente nos procedimentos aritméticos-estatísticos realizados sobre as matrizes de avaliação e de prioridades, com as quais se obtém a avaliação final das alternativas. Os métodos aritméticos podem ser simples, como o Método da Somatória Linear Ponderada, ou métodos que requerem operações aritméticas mais complexas, como Análise do Ponto Ideal, Método de Otimização Hierárquica, Programação Linear, e outros.

A integração da Avaliação Multicriterial aos SIG gera um importante instrumento para a análise espacial, o que permite o emprego dos SIG em trabalhos de planejamento e de ordenação do território ou, ainda, em operações de decisão sobre localização segundo múltiplos critérios (Barredo, 1996).

Segundo Barredo (1996), os diversos critérios envolvidos em uma análise podem ser classificados como "fatores" e "limitantes". Os primeiros refletem a capacidade de influência de um fator específico quanto à atividade em consideração, enquanto o aspecto limitante efetivamente restringe a atividade avaliada. Na presente dissertação os critérios tipo "fatores", como erosão, fertilizantes, mecanização e clima, foram integrados com Análise Multicriterial, e os critérios "limitantes", como áreas de proteção ambiental, com Análise Booleana.

A atribuição de pesos deve ser feita de forma a ser considerada a importância dos diferentes aspectos, ou fatores. Na presente dissertação a ponderação para a Análise Multicriterial foi baseada a partir da consulta a especialistas da área agrícola (técnica participativa, Eastman 2001), de pesquisa bibliográfica e da análise da distribuição histórica do cultivo de cana. Foi considerada que a concentração do plantio de cana em determinadas regiões do estado reflete a preponderância de certos aspectos em detrimento de outros.

A consulta a especialistas foi realizada através do envio de questionários a engenheiros agrícolas e agrônomos que trabalham ou desenvolvem pesquisas relacionadas ao cultivo da cana-de-açúcar. A opinião dos especialistas consultados não divergiu muito e, assim, foi calculada uma média com a pontuação dada por cada especialista em cada questão da consulta. Para a elaboração da pontuação final foram comparadas as opiniões dos especialistas com o comportamento histórico do cultivo, ou seja, com as características das áreas de tradicional cultivo da cana-de-açúcar.

A álgebra *booleana* utiliza os ponderadores lógicos “E”, “OU”, “Exclusivo OU” e “NÃO” para determinar se uma hipótese satisfaz ou não uma particular condição. Assim como em conjuntos *booleanos*, dados em conjuntos *fuzzy* podem ser manipulados utilizando métodos lógicos para selecionar e combinar dados provenientes de vários conjuntos. Para que isso seja possível, linguagens de consulta a sistemas gerenciadores de bancos de dados precisam ser modificadas para tratar operações da lógica contínua. As operações básicas sobre subconjuntos *fuzzy* são similares, e são generalizações das operações básicas da lógica binária. Essas operações podem ser utilizadas para se obter um mapa resultante da sobreposição de vários dados *fuzzy* (planos de informação), e assim obter novos dados. Os seguintes operadores *fuzzy* podem ser

empregados: "AND", "OR", "Soma Algébrica", "Produto Algébrico", "Operador Gama" e "Soma Convexa" (Câmara *et al.*, 1999).

As informações espaciais contidas nos mapas elaborados, áreas aptas e restrições ambientais, superfície de acessibilidade à rede energética, dados do potencial de cada usina e o espectro de distância de cada usina a rede, foram utilizados para a elaboração do mapa final das áreas favoráveis à instalação de unidades geradoras de eletricidade. Para tanto, os aspectos refletidos nos mapas foram integrados com técnicas de análise espacial e ponderados através do processo analítico hierárquico (AHP). A técnica AHP é baseada na lógica da comparação pareada e foi proposta por Thomas Saaty, em 1978.

Para o processo de tomada de decisão que envolve múltiplas variáveis o processo analítico hierárquico é uma importante ferramenta, pois integra os diferentes tipos de dados através da atribuição de pesos relacionados à escala de importância de cada uma das variáveis. A técnica AHP foi aplicada através da ferramenta *Weighted Overlay*, disponível no SIG ArcGis.

Nesta dissertação foi utilizada a escala de valores AHP para comparação pareada¹ que atribui fator de ponderação igual a 1 para aspectos que contribuem igualmente com o objetivo, fator 5 para aspectos de importância essencial e fator 9 para aspectos de importância extrema. Os diferentes aspectos que influenciam a tomada de decisão são comparados dois a dois, e um critério de importância relativa é atribuído ao relacionamento entre esses aspectos, conforme uma escala pré-definida (ver Tabela 1). A técnica foi utilizada em várias etapas da pesquisa aqui reportada e para tal aplicação foi necessária a elaboração de uma relação de importância relativa entre as evidências.

Segundo Câmara *et al.* (1999), a técnica AHP é baseada na matemática e permite organizar e avaliar a importância relativa entre critérios, bem como medir a consistência dos julgamentos. A aplicação requer a estruturação de um modelo hierárquico, o qual geralmente é composto por metas, critérios, sub-critérios e alternativas, e um processo de comparação pareada por importância relativa, preferências ou probabilidade, entre dois critérios, tendo como referência um critério de nível superior. Com base na comparação, os sub-critérios e critérios podem ser

¹ Para mais informações, ver Câmara *et al.* (1999). Disponível em <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>.

ponderados, e é calculado um valor de razão de consistência entre $[0, 1]$, com 0 indicando a completa consistência do processo de julgamento.

Tabela 1. Escala de valores AHP para comparação pareada

Grau de Importância	Definição e explicação
1	Importância igual, ou seja os dois fatores contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância moderada, ou seja um fator é ligeiramente mais importante que o outro.
5	Importância essencial, ou seja, um fator é claramente mais importante que o outro.
7	Importância demonstrada, ou seja, um fator é fortemente favorecido e sua maior relevância foi demonstrada na prática.
9	Importância extrema, ou seja, a evidência que diferencia os fatores é da maior ordem possível.
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre julgamentos, que correspondem à possibilidade de compromissos adicionais.

Capítulo 4

A Cana-de-Açúcar em São Paulo e no Brasil

4.1 A atividade canavieira

As primeiras mudas de cana-de-açúcar foram introduzidas no Brasil em 1532, quando da expedição colonizadora de Martim Afonso de Souza. Com o clima adequado, o solo fértil e, mais tarde, com a mão-de-obra escrava, a cana-de-açúcar foi responsável por um importante ciclo econômico na história brasileira, o chamado Ciclo do Açúcar. Desde sua introdução, a produção de cana passou por algumas fases de ascensão e declínio (UNICA, 2007).

No estado de São Paulo a introdução do cultivo da cana-de-açúcar, em substituição parcial ao cultivo do café, foi responsável por uma grande alteração no perfil da economia paulista na passagem do século XVIII para o XIX. Mais recentemente, a atual importância da cultura de cana-de-açúcar no Brasil e no estado de São Paulo deve-se ao apoio do governo federal para a produção em larga escala de etanol combustível, que começou por decorrência das duas crises de preços do petróleo, em 1973 e 1979.

Atualmente o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, e o segundo maior produtor de etanol combustível. Os Estados Unidos suplantaram a produção brasileira de etanol combustível em 2006. A produção de cana existe em quase todos os estados brasileiros, porém está concentrada nas regiões Sudeste e Centro, nas quais ocorrem 90% da produção, e Nordeste. O estado de São Paulo é o maior produtor, com pouco mais de 60% da produção nacional; o plantio de cana em São Paulo ocupa mais de 3,6 milhões de hectares (na safra 2006/2007,

segundo o CANASAT). Em 2006, a área plantada com cana no Brasil superou 7 milhões de hectares, sendo 6,2 milhões de hectares a área colhida naquele ano (IBGE, 2007).

Nesta dissertação, para analisar o atual cenário de produção da cana-de-açúcar, foi utilizado o mapeamento realizado em 2003 pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), em parcerias com a ÚNICA (União da Agroindústria Canavieira de São Paulo), com o CEPEA (Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada) e o CTC (Centro de Tecnologia Canavieira). Naquela oportunidade foi feito o mapeamento do plantio da cana-de-açúcar no estado de São Paulo a partir de imagens de sensoriamento remoto adquiridas pelo sensor TM, a bordo do satélite Landsat-5 (Rudorff *et al.*, 2004). O mapeamento foi realizado em duas etapas, a classificação digital das imagens e a interpretação visual das imagens na tela do computador, em ambiente *SPRING*, procedimento que aumenta a exatidão do mapa final.

Dados do projeto acima mencionado indicam que a área de cultivo da cana aumentou 2% entre as safras 2003/2004 e 2004/2005, quando atingiu 3,16 milhões de ha. Daquela safra até a safra 2006/2007 o aumento da área ocupada com cana foi superior a 500 mil hectares. No Mapa 1 é apresentada a distribuição do plantio de cana no estado de São Paulo em 2006; a distribuição é apresentada em mapa com identificação das regiões das unidades de gerenciamento de recursos hídricos (UGHRI).

O crescimento da produção de cana-de-açúcar é induzido pelo aumento da demanda tanto de açúcar quanto de etanol, tanto no mercado nacional quanto internacional. Segundo Peres (2003), os crescimentos dos mercados interno e externo implicarão a necessidade de se dobrar a produção de etanol e aumentar em 44% a produção de açúcar, em um horizonte de 10 anos. Essas estimativas levariam à necessidade de aumento da produção em 230 milhões de toneladas de cana/ano, no ano 2013.

Estudo feito pela UNICA em 2006 (Carvalho, 2007) indica que as exportações de açúcar devem crescer 37% entre 2006 e 2012, enquanto o mercado interno cresce a taxas entre 1,8 e 2% ao ano. O crescimento do mercado interno de açúcar é considerado vegetativo, e está principalmente associado ao aumento da população e, em menor medida, ao aumento do poder aquisitivo.

Por outro lado, o mercado interno de etanol deve crescer de 14,3 bilhões de litros em 2006 para 28,7 bilhões de litros em 2012, enquanto as exportações devem crescer de 3,1 bilhões de litros para 7 bilhões de litros no mesmo intervalo. O crescimento do mercado interno deve-se ao sucesso de venda dos automóveis *flex-fuel*, que no Brasil podem ser abastecidos indistintamente com gasolina (na verdade, mistura gasolina-etanol anidro) ou etanol hidratado. O crescimento das exportações brasileiras de etanol tem ocorrido nos últimos anos por dois motivos: primeiro, em função do interesse que há em vários países para a substituição parcial de gasolina por etanol produzido a partir de biomassa, para redução das emissões de gases de efeito estufa e menor dependência de petróleo, e, segundo, em função da grande competitividade da produção de etanol no Brasil, que tem os menores custos em todo o mundo.

Em consequência, o aumento estimado na produção de cana seria de quase 260 milhões de toneladas de cana no período, passando de 426 milhões em 2006 para 685 milhões em 2012. Segundo um estudo da UNICA (Carvalho, 2007), o aumento da produção de cana no estado de São Paulo seria de quase 125 milhões de toneladas de cana, passando de 267 a 392 milhões de toneladas entre 2006 e 2012.

No Brasil, em 2006, pouco menos de 52% da produção de cana-de-açúcar foi destinada à fabricação de açúcar, e a diferença à produção de etanol. A produção nas regiões Sudeste e Centro é mais equilibrada entre açúcar e etanol, enquanto a produção no Nordeste é mais voltada ao açúcar. Na safra 2012/2013, estima-se que 60% da produção de cana sejam destinados à produção de etanol. No Brasil, em 2006, havia 335 unidades industriais em operação, tendo sido estimado que o número de unidades industriais será 410 em 2012 (Carvalho, 2007).

O Plano Nacional de Agroenergia 2006-2011², elaborado pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2006) e pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), apresenta medidas para reduzir o uso de combustíveis fósseis e ampliar a produção e o consumo dos biocombustíveis, visando ao mesmo tempo a proteção do meio ambiente, maior participação no mercado internacional e a inclusão social. As ações estratégicas estão pautadas na missão “promover o desenvolvimento sustentável e a competitividade do agronegócio em benefício da sociedade brasileira”.

Entre os objetivos do Plano destacam-se: (i) o apoio à mudança da matriz energética, com o aumento da participação de fontes de agroenergia; (ii) a interiorização e a regionalização do desenvolvimento, baseadas na expansão da agricultura de energia e na agregação de valor à cadeia produtiva; (iii) expansão do emprego no âmbito do agronegócio; (iv) ampliação das oportunidades de aumento de renda, com distribuição mais equitativa entre os atores; (v) redução de emissões de gases de efeito estufa; (vi) redução das importações de petróleo; (vii) incremento das exportações de biocombustíveis; e (viii) fomento a todos os aspectos associados à produção sustentável de biocombustíveis.

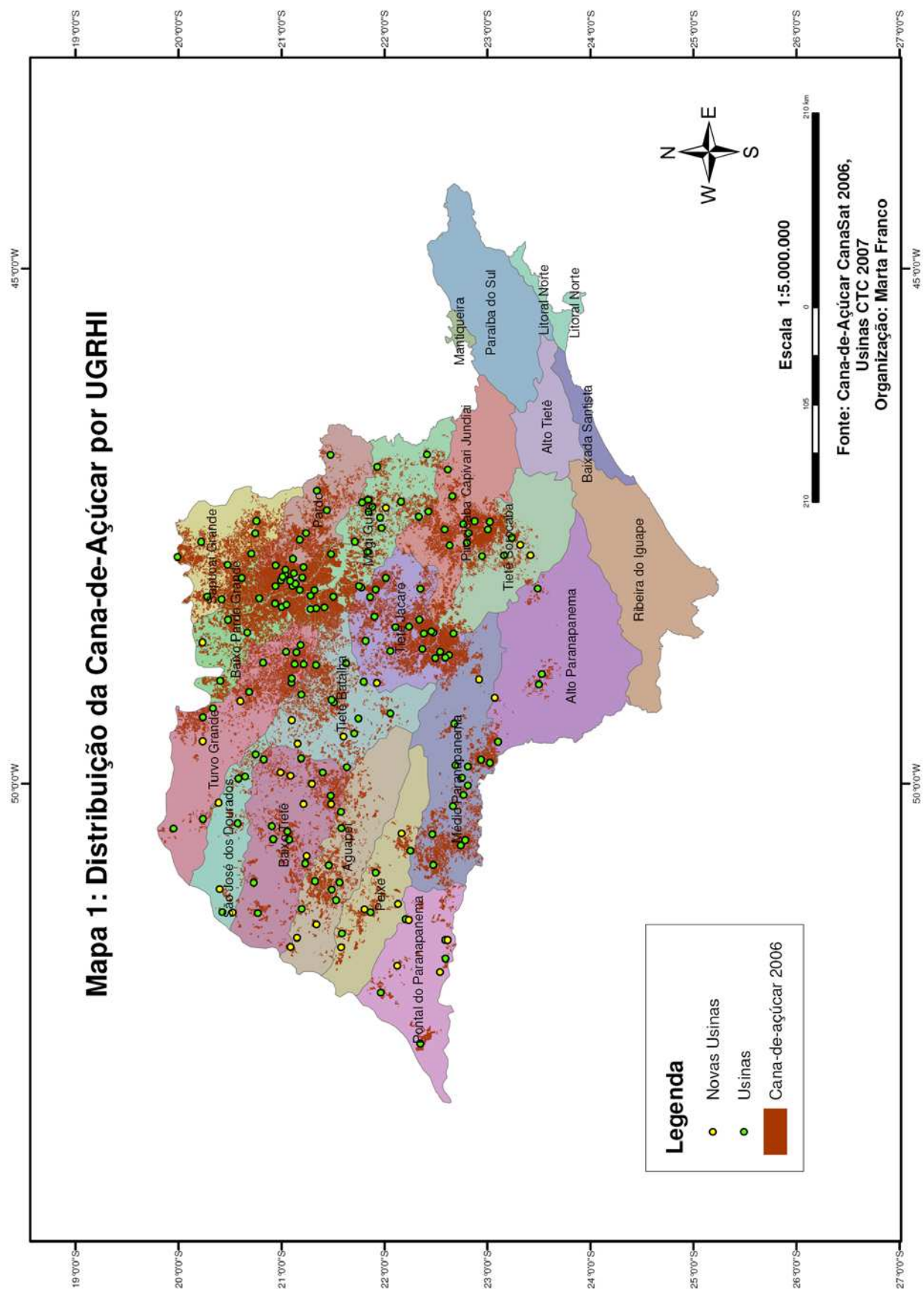
Principalmente por causa da crescente demanda por etanol, tanto no mercado interno quanto externo, várias usinas existentes estão sendo ampliadas, e outras tantas estão sendo construídas. Em um primeiro momento a expansão se concentra no estado de São Paulo e em estados vizinhos. Os investimentos que estão sendo feitos na reforma das unidades existentes e na construção de novas unidades também estão associados a investimentos visando a geração de energia elétrica excedente, que seria comercializada com o setor elétrico e permitiria a diversificação da atividade produtiva. Segundo dados da COGEN-SP (2005), praticamente todas as unidades industriais do setor sucroalcooleiro, no Brasil, geram eletricidade para seu consumo próprio, mas apenas 10% comercializam excedente no mercado.

No estado de São Paulo, conforme pode ser observado no Mapa 1, a Meso-Região de Ribeirão Preto, região correspondente às Bacias Baixo Pardo/Grande, Sapucaí/Grande, Pardo e Mogi-Guaçu, é a região na qual se concentra maior fração da produção de cana-de-açúcar no estado, bem como o maior número de usinas. No mesmo mapa pode ser observado que as regiões tradicionais do setor sucroalcooleiro no estado, como Piracicaba e Ribeirão Preto, em função da grande área ocupada com cana, não têm significativo potencial de crescimento da atividade, podendo ser consideradas regiões já saturadas ou próximas da saturação.

No estado as novas usinas estão distribuídas nas Meso-Regiões de Presidente Prudente (entre as Bacias Peixe e Pontal do Paranapanema) e São José do Rio Preto (Bacia Baixo Tietê), com 8 novas usinas em cada uma delas, na nas Meso-Região de Araçatuba (Bacia Baixo Tietê), com 7 novas unidades, Bauru (Bacias Tietê Batalha e Médio Paranapanema), com 4, e

² Disponível em <http://www.agricultura.gov.br/pls/portal/docs/PAGE/MAPA/PLANOS/>

Itapetininga (Bacia Turvo Grande), com 2. Há um projeto de nova usina nas Meso-Regiões de Ribeirão Preto, Campinas e Assis (Bacias Baixo e Pardo/Grande, Mogi-Guaçu e Tietê/Sorocaba). No total, há 32 projetos de novas usinas no estado, em diferentes etapas de construção (CTC, 2006). Conforme pode ser observado no Mapa 1, a expansão da atividade no estado se dá em direção ao oeste.



4.2 A geração de energia elétrica com biomassa residual da cana

A população do estado de São Paulo supera 41 milhões de habitantes (SEADE, 2008) e o estado contribui com 33.9% do PIB do país (IBGE, 2007). Em função da população, de sua renda e da atividade econômica que se concentra no estado, o consumo de energia elétrica é, conseqüentemente, o maior do país. Para ilustrar a dependência de São Paulo a respeito do abastecimento elétrico, basta notar que em 2006 menos de 15% da capacidade de geração elétrica do país estavam instalados no estado (MME, 2007). Em função da concentração das usinas de cana-de-açúcar no estado, é natural que seja dada certa prioridade ao desenvolvimento do potencial de produção de eletricidade com biomassa residual da cana-de-açúcar, uma vez que o mesmo é significativo.

A geração de eletricidade a partir do bagaço da cana-de-açúcar é tradicional nas unidades produtoras de açúcar e álcool em todo o Mundo. Segundo dados da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2008) – a capacidade instalada de geração elétrica a partir de bagaço de cana somava 3 GW no início de 2008, em 244 empreendimentos (usinas). Considerando que no Brasil existem hoje aproximadamente 350 usinas em operação, a capacidade instalada deve superar 3,5 GW, ou seja, algo próximo a 4% da capacidade instalada no Brasil. No estado de São Paulo, em 146 usinas, a capacidade instalada em 2007 foi estimada em 1,7 GW, sendo que 900 MW podem ser comercializados. A estimativa de capacidade instalada foi feita a partir do levantamento feito por Macedo *et al.* (2007), enquanto a estimativa de capacidade instalada foi feita neste trabalho, considerando a moagem de cana em 2006, que o consumo de eletricidade associado à auto-suficiência é 12 kWh/t cana, e que, na média, as usinas operam 200 dias por ano, com fator de capacidade 90% (4320 horas/ano). Dados de usinas são apresentados no Anexo 1 desta dissertação.

Os sistemas de produção de eletricidade existentes nas usinas são unidades de cogeração, majoritariamente com turbinas a vapor de contra-pressão, que operam apenas durante o período da safra, suprimindo toda a potência mecânica necessária e grande parte da potência elétrica requerida, bem como atendendo toda a demanda térmica através do vapor de escape das turbinas. As usinas localizadas no estado de São Paulo são auto-suficientes do ponto de vista energético,

inclusive elétrico, durante o período da safra. Algumas poucas usinas têm sistemas de cogeração com turbinas de extração-condensação e apenas uma usina tem gerado eletricidade excedente, de forma regular, também durante o período de entressafra.

A título ilustrativo, na Figura 2 é apresentado o esquema de um sistema de cogeração com turbina a vapor de extração e condensação, com uma extração de vapor para alimentação das turbinas a vapor de acionamento mecânico (a 2,2 MPa) e extração de vapor complementar para atender a demanda de vapor de processo (a 0,247 MPa). A diferença entre o vapor gerado (a 8,0 MPa) e as duas extrações é levado à condensação (a 0,03 MPa). Fora da safra, quando não há demandas de vapor para acionamento mecânico e para o processo industrial, todo o vapor gerado pode ser condensado (modo de operação termoeletrico).

Uma instalação de cogeração apenas com turbinas de contra-pressão não teria o corpo de baixa pressão da turbina a vapor, mais à direita na figura, no qual ocorre expansão de 0,247 MPa até 0,03 MPa. Nesse caso vapor deve ser gerado em função da demanda de vapor de processo, que é atendida com as extrações de vapor das turbinas de acionamento mecânico e com o escape da turbina de geração elétrica (ambos fluxos a 0,247 MPa).

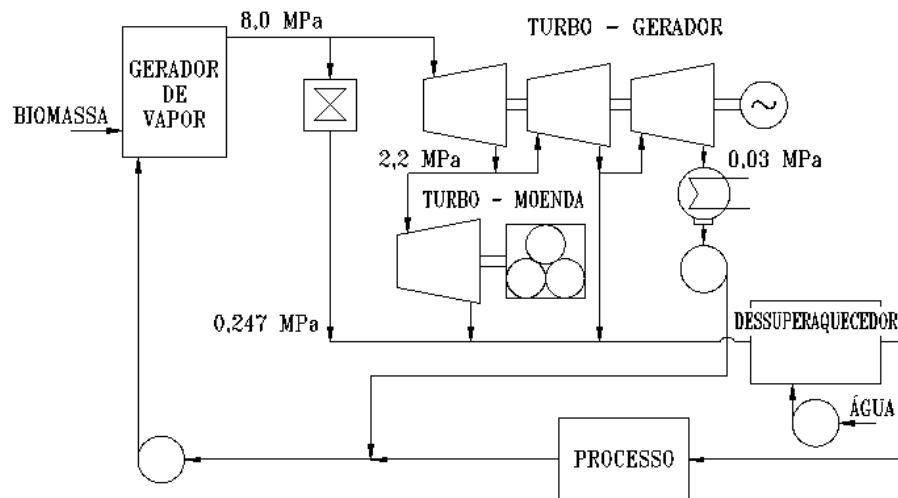


Figura 2. Esquema de sistema de cogeração com turbina a vapor de extração (dupla) e condensação

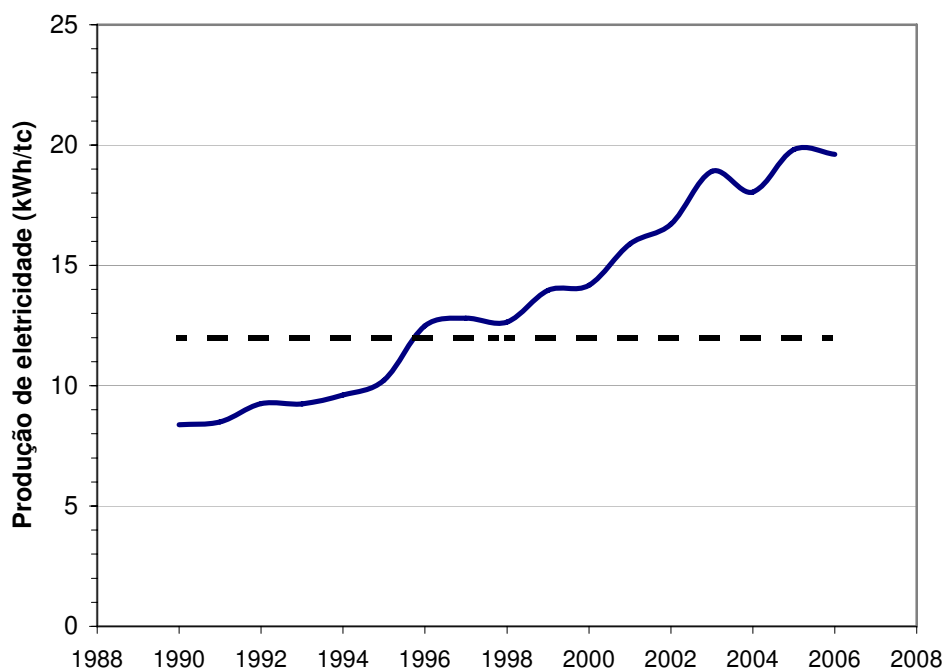
Na análise do potencial de produção de eletricidade a partir da biomassa residual da cana, que é apresentada no Capítulo 6, foram considerados sistemas de cogeração similares aos apresentados na Figura 2, com geração de vapor a 8,2 MPa e eletrificação total da instalação (e, conseqüentemente, com apenas uma extração para atendimento da demanda de vapor de processo). Em uma das situações analisadas foram também considerados sistemas de cogeração com turbinas de extração e condensação.

Em função do perfil majoritariamente hidrelétrico do parque gerador brasileiro (pouco mais de 75% da capacidade total instalada no início de 2008, segundo a ANEEL), e pelo fato da safra de cana na região Sudeste e Central do Brasil coincidir com o período hidrológicamente desfavorável, é natural que a geração de eletricidade a partir da biomassa residual da cana se concentre no período da safra.

Nos últimos anos a conjuntura não foi completamente favorável à produção de energia elétrica excedente a partir da biomassa residual da cana, mas vários investimentos foram feitos e outros tantos estão em curso. Por um lado, parte do setor sucroalcooleiro tem interesse na diversificação de sua produção, principalmente quando a expansão da capacidade de geração pode ser feita no momento da substituição, por obsolescência, dos equipamentos existentes, ou quando da construção de novas unidades industriais. Isso está ocorrendo no presente instante, configurando uma janela de oportunidades aos investimentos em geração de eletricidade. Em adição, vários projetos de expansão para produção e venda de eletricidade excedente estão sendo viabilizados com recursos complementares do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL, o que ajuda na viabilidade do empreendimento, embora sua contribuição seja marginal. Segundo dados da UNFCCC (2007), em junho de 2007 vinte e seis projetos brasileiros de cogeração com bagaço haviam sido registrados pelo Conselho Executivo do MDL (Oliveira, 2007).

Por outro lado, novos agentes têm interesse de entrar no setor elétrico, o ambiente regulatório é minimamente adequado e os custos de capital das opções tecnológicas disponíveis no Brasil são, atualmente, relativamente baixos.

Nos anos 1980 e 1990 as usinas de açúcar e etanol no Brasil evoluíram de uma dependência de 40% a 50% da energia elétrica da rede pública para a auto-suficiência. Como mostrado na Figura 3, em termos médios a auto-suficiência foi alcançada em meados dos anos 1990 e, desde então, cresce a geração de excedentes para a venda. A produção de excedentes passou a se consolidar na segunda metade dos anos 1990, em função das mudanças na regulação do setor elétrico, e pela consolidação da regulação específica da geração distribuída.



Fonte: MME (2007) e UNICA (2007)

Figura 3. Evolução da geração específica de eletricidade nas usinas de cana-de-açúcar no Brasil

Como comentado anteriormente, em termos médios a auto-suficiência elétrica durante o período de safra requer a geração de eletricidade equivalente a 12 kWh/tonelada de cana moída (linha tracejada na Figura 3). A geração acima desse patamar corresponde à geração de eletricidade excedente durante o período de safra (NAE, 2005). A auto-suficiência energética de

uma usina média requer a geração de 12 kWh/t cana na forma de eletricidade, 16 kWh/t cana na forma de potência mecânica (para acionamento de dispositivos como moendas e desfibradores), e mais 330 kWh/t cana de energia térmica na forma de vapor de baixa pressão (0,247 MPa no esquema da Figura 2).

O índice de geração na Figura 3 foi calculado da simples divisão da geração elétrica a partir do bagaço de cana (dados publicados no Balanço Energético Nacional), que ocorre exclusivamente nas usinas, e o total de cana moída em cada ano (dados da UNICA).

O potencial de produção de energia elétrica associado apenas à biomassa hoje disponível (bagaço) é significativamente maior do que a capacidade ora instalada, e isso apenas considerando o emprego de tecnologias comerciais. Na medida em que a cana crua passar a ser colhida em larga escala, por força de restrições ambientais que impedirão a prática da queima pré-colheita, a disponibilidade de biomassa aumentará significativamente, o que pode fazer com que o potencial de produção de energia elétrica chegue a cerca de 9.000 MW, dependendo da tecnologia considerada (potencial calculado para moagem de 420 milhões de toneladas de cana por safra, ou seja, a produção em 2006) (NAE, 2005).

A legislação que restringe gradualmente a queima pré-colheita deverá contribuir positivamente para que a palha (pontas e folhas da cana) seja incorporada ao sistema de geração de energia nos próximos anos. No estado de São Paulo a Lei nº 11.241, de 19 de setembro de 2002, dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar. Para a colheita sem queima é necessária maior mecanização da produção e, para isso, foi considerado o critério de declividade do solo, pois a mecanização convencional só é viável em declividades inferiores a 12% (NAE, 2005). Segundo a Lei, ficou definido que a proibição total da queima do canavial passaria a ser efetiva em 2021 nas áreas mecanizáveis, e em 2031, nas áreas não mecanizáveis, mas um acordo entre o Governo do Estado e os produtores, em 2007, antecipou a meta para 2017.

A efetiva recuperação da palha para ser usada como combustível requer, primeiro, o desenvolvimento de tecnologias de mecanização da colheita, transporte da palha, armazenamento de biomassa e alteração da recepção da cana, e, segundo, o desenvolvimento da tecnologia de

queima da palha. Como o teor de álcalis da palha é elevado em relação ao do bagaço, é provável que a queima de palha para geração de vapor a pressões e temperaturas elevadas cause problemas de entupimento e de corrosão das superfícies de troca de calor (NAE, 2005).

Na Tabela 2 são apresentados parâmetros de algumas configurações de sistemas de cogeração em usinas de cana-de-açúcar. A primeira configuração garante, essencialmente, auto-suficiência no abastecimento elétrico. As duas outras configurações permitem a produção de excedentes de eletricidade. A terceira configuração corresponde, em linhas gerais, ao esquema mostrado na Figura 2. A geração de 100 a 150 kWh/t cana requer o uso complementar de palha e a redução da demanda de vapor de processo, isso para que mais vapor possa ser levado à condensação e possa haver maior geração de eletricidade excedente. A primeira configuração apresentada na Tabela 2 essencialmente garante a auto-suficiência do abastecimento elétrico. Na Tabela 2, configurações similares às duas nas quais o vapor é gerado a 8,0 MPa foram consideradas na avaliação do potencial de produção de eletricidade com biomassa residual da cana (ver Capítulo 6).

Tabela 2. Algumas configurações típicas de sistemas de cogeração em usinas de cana-de-açúcar

Tecnologia	Operação	Vapor de processo	Energia elétrica excedente
Vapor gerado a 2,2 MPa, 300°C, com turbinas de contra-pressão	Na safra	500 kg/t cana	0-10 kWh/t cana
Vapor gerado a 8,0 MPa, 480°C, com turbinas de contra-pressão	Na safra	500 kg/t cana	40-60 kWh/t cana
Vapor gerado a 8,0 MPa, 480°C, com turbinas de extração-condensação	Todo ano	340 kg/t cana	100-150 kWh/t cana

Fonte: NAE (2005)

Capítulo 5

Fatores Condicionantes

Neste capítulo são descritos os fatores condicionantes à identificação das regiões do estado de São Paulo que são mais adequadas ao cultivo da cana-de-açúcar. São também descritas as fontes de informação empregadas na análise. Os fatores relevantes ao cultivo da cana que foram considerados neste trabalho são: uso da terra, aptidão do solo, propensão à erosão, fertilidade do solo, potencial de mecanização (sobretudo da colheita), disponibilidade de recursos hídricos e aptidão climática. Completando a análise do ponto de vista da geração de eletricidade excedente a partir de biomassa residual da cana, foi considerada a distribuição espacial das subestações elétricas e das linhas de transmissão, de sorte a poder ser considerada a acessibilidade de acesso à rede elétrica.

5.1 Uso da terra

A análise do uso da terra é de fundamental importância para o planejamento da expansão da cultura da cana-de-açúcar. Segundo o Plano Decenal de Agroenergia (MAPA 2006), a terra a ser utilizada na produção de biomassa deve ser essencialmente agrícola e terras usadas em práticas que tenham maior valor ecológico não devem ser utilizadas para plantios energéticos.

Na escala de trabalho utilizada nesta dissertação não há mapas detalhados de uso da terra para o estado de São Paulo e tampouco existem informações disponíveis, também na mesma escala, a respeito das áreas ocupadas com outros cultivos. Foi utilizado no presente trabalho o

mapa de uso da terra elaborado por uma equipe do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (Shimabukuro *et al.* 2007), através de dados multi-temporais do sensor MODIS, obtidos de julho e agosto de 2005. Como referência foi utilizado o mapa de vegetação produzido pelo Instituto Florestal (2005), através de imagens Landsat TM. O mapa apresenta as seguintes classes de uso da terra: *Floresta* (estágio médio e avançado); *Restinga*; *Reflorestamento* (Eucaliptos e Pinus); *Área Urbana*; *Hidrografia*, *Área Agrícola*, e *Outros*. A classe *Outros* engloba áreas de cerrado, pastagem, vegetação em estágio inicial e vegetação ripária. O mapa resultante corresponde ao Mapa 2 da presente dissertação. Ao sobrepor o mapa de uso da terra com o mapa de plantio da cana, observa-se que a cana-de-açúcar ocupa a maior extensão da denominada “área agrícola” do estado.

Ao se considerar a expansão do cultivo da cana-de-açúcar, tem-se como critério fundamental a preservação das áreas de floresta, restinga e reflorestamento. Através da análise *booleana* as áreas correspondentes foram excluídas do mapa de áreas aptas à expansão, e foi também considerada uma zona de amortecimento para a efetiva proteção dessas áreas.

Segundo a Lei 9985, do ano de 2000, Zona de Amortecimento (Z.A.) de uma Unidade de Conservação é a região no entorno desta área onde, com o propósito de minimizar os impactos negativos sobre a Unidade, as atividades humanas estão sujeitas a normas e restrições específicas. Nem todas as áreas verdes são Unidades de Conservação, porém todas devem ser protegidas. Por isso, neste trabalho foi considerada a criação de uma zona de amortecimento para todas as áreas verdes, metodologicamente através da realização de *buffers* no entorno das mesmas. Na prática, essas áreas foram excluídas enquanto áreas adequadas para o plantio da cana. Na legislação ambiental vigente não estão especificadas as dimensões adequadas para cada Zona de Amortecimento, sendo que a área em si deve ser determinada através de estudos específicos.

No estado, as áreas adequadas para a expansão do cultivo da cana-de-açúcar são áreas já antropizadas, o que evita o uso de áreas de fronteira agrícola e alterações do uso do solo. Do ponto de vista ambiental tal aspecto é, sem dúvida, uma vantagem. Em São Paulo, a tendência é a ocupação das áreas anteriormente ocupadas por pastagens, em função do confinamento do gado. No entanto, como o mapa utilizado neste estudo, com a escala empregada, não apresenta detalhes

das diferentes áreas agrícolas – engloba em apenas uma classe genérica "Outros", pastagem, cerrado etc. – tal aspecto deverá ser adequadamente analisado em estudos posteriores.

O cultivo da cana-de-açúcar é semiperene, ou seja, não há necessidade de replantio por cerca de 5 a 7 safras (5 a 7 anos), e após esse período a cana deve ser replantada. Entre um ciclo de cultivo de cana e outro pode haver alternância com outro tipo de cultura, para, por exemplo, viabilizar a fixação de nitrogênio no solo. Outro recurso é simplesmente deixar o terreno sem plantio durante uma safra, permitindo o descanso do solo. Na região Sudeste e Central a colheita tem duração de 8 meses, na média, entre os meses de Abril e Novembro.

O estado de São Paulo tem 19,2 milhões de hectares ocupados com estabelecimentos agropecuários, sendo que, segundo dados do censo agropecuário de 2006 (IBGE, 2007), 7,5 milhões de ha (pouco menos de 39%) são destinados a lavouras e 8,6 (45%) destinados a pastagens; matas e florestas ocupam 2,3 milhões de ha.

A área total do estado de São Paulo é de 248.209,4 km². A localização geográfica corresponde a 49° 00' 00" de longitude a oeste do Meridiano de Greenwich e a 22° 00' 00" de latitude a sul da linha do Equador. No estado há 645 municípios, 15 Meso-Regiões, 63 micro-regiões e 22 Unidades de Gerenciamento de Bacias Hidrográficas (UGRHI). Como o uso da terra não está detalhado no mapa utilizado na presente dissertação, faz-se a seguir uma breve descrição das principais atividades econômicas e agrícolas por UGRHI para que seja possível se fazer algumas considerações sobre o uso da terra nas quais há cultivo da cana-de-açúcar. A descrição a seguir está baseada no Relatório Ambiental do Estado de São Paulo (SMA, 2006) e corresponde ao que havia no estado em meados da presente década.

Na bacia do Pontal do Paranapanema é predominante a agroindústria, que é a base da economia na região, destacando-se também as usinas de açúcar e etanol, abatedouros e frigoríficos. Na agricultura, a braquiária ocupa extensas porções territoriais (cultura empregada na pecuária extensiva), sendo que os demais produtos agrícolas, tais como cana-de-açúcar, milho e soja ocupam áreas menores. O município de Presidente Prudente destaca-se na região.

Na UGRHI Peixe a agroindústria canavieira está presente em vários municípios, principalmente na região próxima ao município de Adamantina, sendo bastante significativo o cultivo de cana-de-açúcar. Observa-se também a ocupação de grandes áreas com cultivo de braquiária. Marília é o pólo regional e concentra grande parte das atividades industriais, destacando-se o segmento alimentício.

Na bacia Aguapeí as atividades primárias são as mais expressivas. As áreas de pastagem, com predomínio da braquiária, ocupam cerca de duas terças partes da área rural. Na região, também são bastante significativas as lavouras de café, cana-de-açúcar e milho. A ovinocultura destaca-se no município de Tupã. As olarias são importantes na região e, no setor mineral, destaca-se a extração de areia.

Na UGRHI denominada Baixo Tietê a agricultura voltada à agroindústria é a atividade predominante na região, sendo significativos os cultivos de cana-de-açúcar e de milho. No entanto, as maiores áreas cultivadas se destinam à pecuária, como a braquiária e o capim colonião. Na região se destacam as indústrias de calçados, frigoríficos e indústrias alimentícias.

Já na UGRHI São José dos Dourados predominam as atividades primárias, sendo que todos os municípios dessa UGRHI têm a braquiária como a principal cultura. As lavouras de cana-de-açúcar e laranja também são significativas. No ramo industrial destacam-se as usinas de açúcar e etanol, e os curtumes.

Na UGRHI Turvo Grande destacam-se a agroindústria e as atividades agrícolas que lhe dão suporte. O cultivo de braquiária, seguido pelo capim, ambos destinados à pecuária, ocupam as maiores áreas produtivas. Predominam também culturas de cana-de-açúcar que abastecem as usinas de açúcar e etanol localizadas nos municípios de Fernandópolis e Votuporanga, e a cultura da laranja. Nos demais municípios as lavouras predominantes são milho e feijão.

Na UGRHI Tietê Batalha destacam-se as atividades dos setores primário e secundário, como as lavouras de cana-de-açúcar que abastecem as usinas de açúcar e etanol localizadas principalmente em Matão e Novo Horizonte. A cultura de braquiária ocupa extensas áreas e é

destinada à pecuária de leite e corte, que abastecem os laticínios, frigoríficos e curtumes na região de Lins.

Na UGRHI Médio Paranapanema predomina a atividade agrícola, sendo que a braquiária representa a principal cultura na maior parte dos municípios, ocupando grandes extensões territoriais. Nota-se que na região a soja ocupa uma área maior que a cana-de-açúcar, mas menor que o milho. Destaca-se também a suinocultura, cuja produção na região representa cerca de um quarto da produção do estado.

Na UGRHI denominada Tiete Jacaré a agroindústria é expressiva, principalmente pela presença de grandes usinas de açúcar e etanol; na região há grandes áreas de cultivo de cana-de-açúcar. Há culturas de laranja, que são significativas em alguns municípios, e de braquiária, destinada à pecuária, a qual abastece frigoríficos e curtumes da região. A indústria de calçados se destaca em Jaú. Novos ramos industriais de grau tecnológico mais elevado estão sendo implantados, principalmente em São Carlos.

Já na UGRHI Baixo Pardo a agricultura é expressiva e as principais lavouras são de cana-de-açúcar, laranja, braquiária e soja, que ocupam grandes extensões territoriais. No ramo industrial destacam-se os frigoríficos, as processadoras de suco de laranja e as usinas de açúcar e etanol.

Na UGRHI Sapucaí-Grande a principal atividade econômica é representada pela indústria de calçados de Franca, uma das principais do país. Destacam-se também as indústrias alimentícias, principalmente de laticínios. Na agricultura, é evidente o predomínio da braquiária e da cana-de-açúcar, mas a soja também vem se destacando e ocupando grandes extensões.

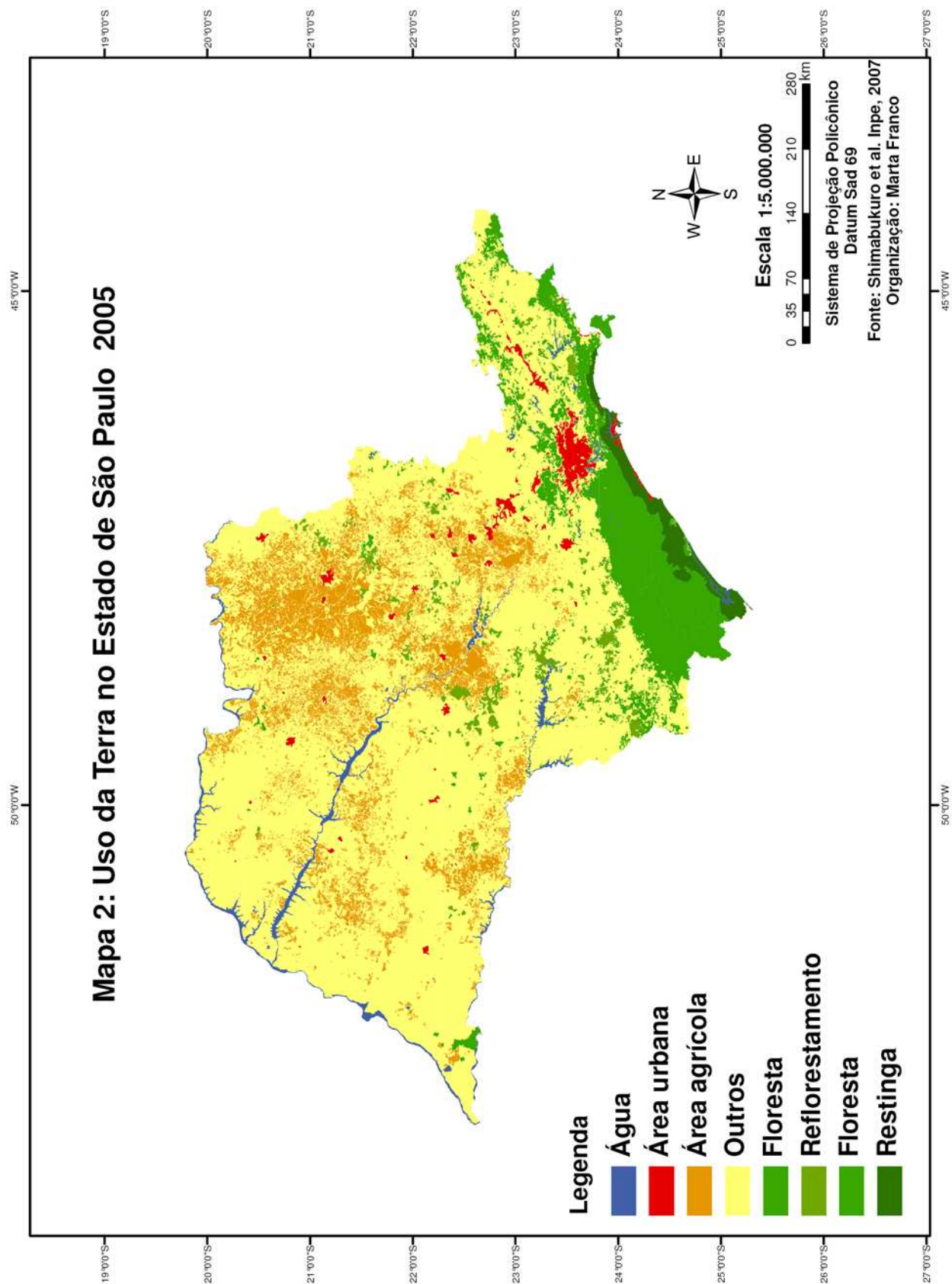
Na Bacia Pardo predominam as atividades industriais, destacando-se a agroindústria: extração e refino de óleos vegetais, papel e celulose e usinas de açúcar e etanol. O principal pólo da região é o município de Ribeirão Preto, que também concentra as atividades terciárias. Na agricultura as principais culturas da região são a cana-de-açúcar e a braquiária.

Na UGRHI Mogi-Guaçu predominam as atividades do setor primário, destacando-se a agropecuária. As principais culturas são: cana-de-açúcar, braquiária, eucalipto, laranja e milho. No setor secundário predomina a agroindústria, como usinas de açúcar e etanol, indústrias de óleos vegetais e de bebidas, além de frigoríficos e indústria de papel e celulose. O turismo é outra atividade importante, dada a presença das estâncias hidrominerais de Águas da Prata, Águas de Lindóia, Lindóia, Serra Negra e Socorro.

Na UGRHI Piracicaba, Capivari e Jundiaí as atividades econômicas são diversificadas. Há indústrias de componentes para os setores de telecomunicação e informática, montadoras de automóveis, refinaria de petróleo, papel e celulose, alimentos e usinas sucroalcooleiras. Quanto às atividades terciárias, Campinas concentra grande parte do comércio e serviços. Na agricultura há o predomínio da cana-de-açúcar e da braquiária, observando-se a ocupação de áreas significativas pelo eucalipto. A citricultura também se destaca na região.

Na UGRHI Tietê-Sorocaba destaca-se a atividade industrial, principalmente em Sorocaba, Votorantim e Alumínio. As matérias-primas agrícola e mineral são os principais fatores do desenvolvimento industrial. Na agricultura, o cultivo de braquiária ocupa grandes extensões territoriais. Em menor escala culturas de milho e cana-de-açúcar são encontradas em quase todos os municípios, além de extensas áreas de reflorestamento de eucalipto. Como pólos de atividade terciária destacam-se Sorocaba, Botucatu e Itu.

Finalmente, na UGRHI Alto Paranapanema a agropecuária é atividade de destaque na região. Dos 34 municípios que compõem a UGRHI, somente quatro não têm a braquiária como principal cultura. Em grande parte dos municípios também há cultivo de milho e feijão, em plantações menores. A extração e a transformação de bens minerais se destacam, principalmente nos municípios de Ribeirão Grande, Apiaí e Guapiara.



5.2 Aptidão do solo

A aptidão do solo para a atividade agrícola depende de diversos fatores, que devem ser analisados conjuntamente. No presente trabalho a estimativa de aptidão de terras para cultivo da cana-de-açúcar foi feita a partir dos mapas "Níveis de Exigência das Terras para Aplicação de Práticas Conservacionistas" e "Níveis de Exigência das Terras para Aplicação de Fertilizantes e Corretivos", ambos elaborados na década de 1970 por técnicos da Secretaria Nacional de Planejamento Agrícola (SUPLAN), em colaboração com os técnicos do Projeto RADAMBRASIL (Ministério da Agricultura, 1979).

Os mapas da SUPLAN foram elaborados a partir da carta de solos do estado de São Paulo. Esses mapas foram posteriormente digitalizados por uma equipe de pesquisadores do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (Gleriani *et al.*, 2001)³, em ambiente *SPRING*. A interpretação do levantamento de solos é de extrema importância para a utilização racional desse recurso natural, não apenas na agricultura como também em outros setores econômicos que utilizam o solo para diversas atividades. Assim, podem ser realizadas interpretações para atividades agrícolas, classificando as terras de acordo com sua aptidão, sob diferentes condições de manejo e perspectivas de melhoramento pela adoção de novas tecnologias.

No presente trabalho foi utilizado o método AHP (Processo Analítico Hierárquico) para integrar dados e avaliar as áreas mais aptas ao cultivo da cana-de-açúcar no estado de São Paulo. Para analisar a importância de cada fator no cultivo da cana-de-açúcar, além da pesquisa bibliográfica e da pesquisa junto a especialistas, foi realizada uma análise através da sobreposição dos mapas com a área de cultivo da cana-de-açúcar em 2006, o que permite conferir as características das áreas nas quais o cultivo está concentrado.

A elaboração do mapa de aptidão de terras para cultivo da cana-de-açúcar no estado de São Paulo deveria ser feita, em condições ideais, através da utilização do mapa de solos e do mapa de declividade, mas essa base de dados não está disponível no formato *shp*. Não tendo sido possível a Análise Espacial sobre os mapas, foram utilizados os mapas da SUPLAN como base de dados.

³ Planejamento e Realidade: Aptidão agrícola versus uso da terra no estado de São Paulo.

5.3 Propensão à erosão

O manejo predatório da área ocupada com culturas agrícolas pode causar processos erosivos e assoreamento dos corpos hídricos. As principais causas da erosão são o desmatamento de encostas e das margens de rios, as queimadas e o uso inadequado de maquinários e implementos agrícolas, que aceleram o processo erosivo (NAE, 2005). Esse impacto pode ser mitigado com a implantação de boas práticas de manejo do solo.

O processo de erosão muitas vezes é responsável por grande parte da degradação das terras, e está relacionado a diversos fatores, tais como o tipo do solo, declividade do terreno, regime de chuvas, e o uso da terra. Assim, o planejamento de uso agrícola do solo deve considerar tais fatores. O rápido crescimento da cana, o que reduz o tempo de exposição do solo, a prática de culturas de rotação, assim como o ciclo de cinco cortes, permitem a proteção do solo na maior parte do tempo, reduzindo a erosão.

No Mapa 3 são apresentados os graus de limitação ao plantio por suscetibilidade à erosão, indicando a necessidade de práticas conservacionistas para o uso da terra. O cultivo da cana-de-açúcar está principalmente concentrado em áreas nas quais a necessidade de práticas conservacionistas é baixa, como é o caso da Meso-Região de Ribeirão Preto, porém também há cultivo de cana em áreas classificadas como de média e alta necessidade. Segundo Orlando Filho (1983), a cultura da cana-de-açúcar no Brasil é reconhecida como uma cultura que apresenta relativamente pequena perda do solo por erosão.

As áreas classificadas como "Baixo" (nível de requerimento de práticas conservacionistas) são terras não susceptíveis à erosão. Geralmente essas áreas têm relevo plano ou quase plano, com solo de boa permeabilidade. Quando cultivadas por 10 ou 20 anos podem apresentar erosão ligeira, que pode ser controlada com práticas simples de manejo (MAPA, 1979).

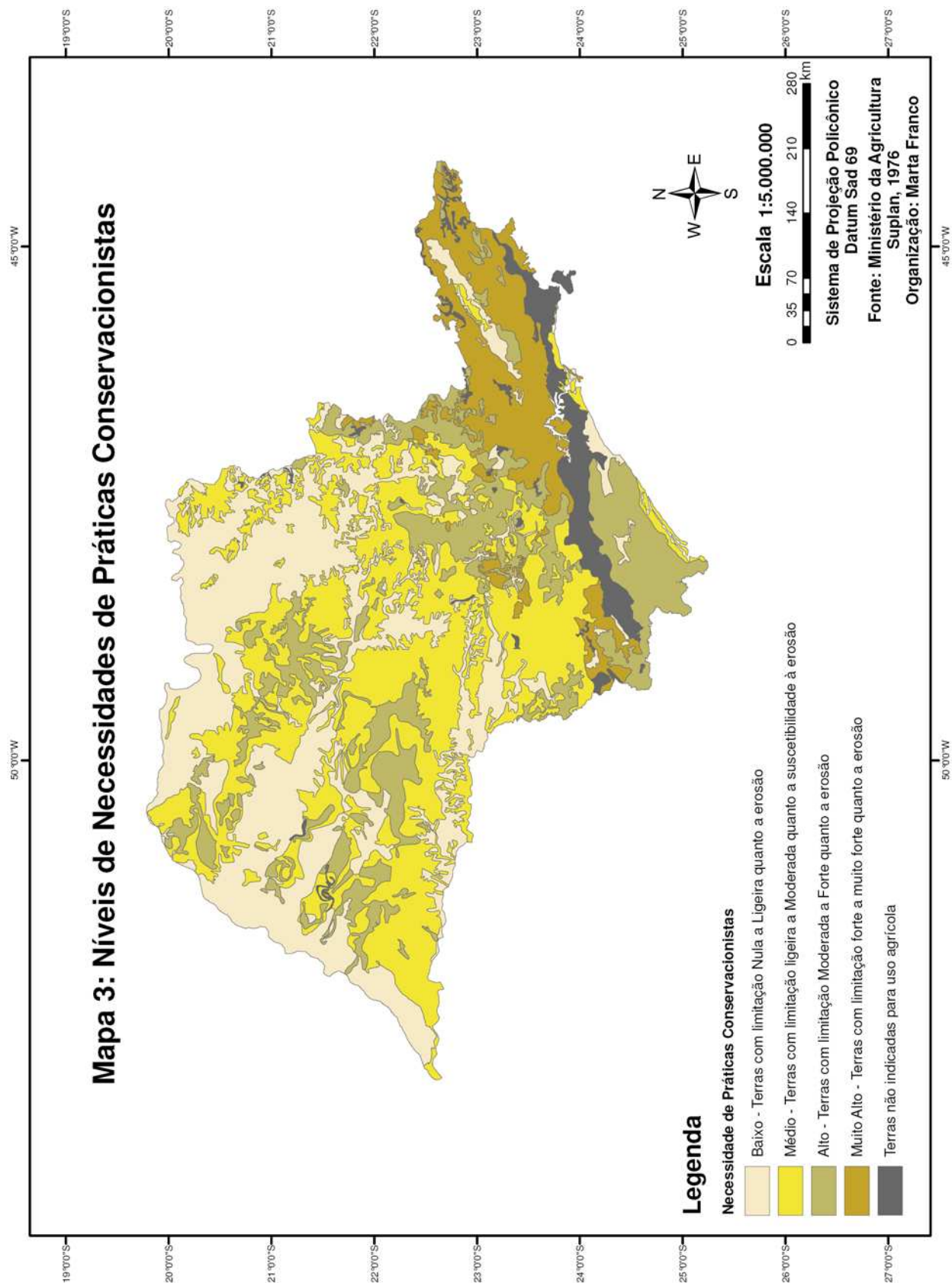
As áreas classificadas como "Médio" são terras que apresentam pouca suscetibilidade à erosão. Normalmente possuem boas propriedades físicas, com declives de 3 a 8%. Quando

utilizadas com lavouras por um período de 10 a 20 anos têm, normalmente, perda de 25% ou mais de horizonte superficial. Práticas conservacionistas simples podem prevenir contra esse tipo de erosão (MAPA, 1979).

As áreas classificadas como "Alto" apresentam moderada suscetibilidade à erosão. Seu relevo é normalmente ondulado, com declive de 8 a 20%. A declividade pode ser maior do que 20%, quando as condições físicas forem muito favoráveis, ou menor do que 8%, quando as condições forem muito desfavoráveis. Se utilizadas sem adoção de princípios conservacionistas, essas terras podem apresentar sulcos e voçorocas, requerendo, pois, práticas intensivas de controle à erosão desde o início de sua utilização agrícola (MAPA, 1979).

As áreas classificadas como "Muito Alto" são terras que apresentam suscetibilidade à erosão. Ocorrem em relevo fortemente ondulado, com declividade de 20 a 45%, os quais podem ser mais ou menos inclinados dependendo de suas condições físicas. Na maioria dos casos a prevenção à erosão é difícil e dispendiosa, podendo ser economicamente inviável (MAPA, 1979).

Já as áreas classificadas como "Nulo" apresentam severa suscetibilidade à erosão. Não são recomendáveis para o uso agrícola, sob pena de serem totalmente erodidas em poucos anos. São terrenos ou paisagens com declives superiores a 45%, nas quais deve ser estabelecida cobertura vegetal que evite o seu arrastamento (MAPA, 1979).



5.4 Fertilidade do solo

Quando comparada a outras culturas, o uso de pesticidas, herbicidas e fertilizantes no cultivo de cana-de-açúcar é relativamente pequeno (Orlando Filho *et al.* 1983). Por outro lado, o sistema de monocultura, como é o caso do cultivo da cana, no Brasil, exige a aplicação de maiores quantidades de insumos agrícolas para manter a fertilidade do solo. Para minimizar o uso de fertilizantes tem sido aplicada ao solo a vinhaça produzida no processo de fabricação do etanol. Esse processo é conhecido como ferti-irrigação.

A fertilidade do solo está relacionada à disponibilidade de macro e micro-nutrientes, incluindo também a presença ou ausência de certas substâncias tóxicas solúveis, como alumínio e manganês, que diminuem a disponibilidade de alguns minerais importantes para as plantas, bem como a presença ou ausência de sais solúveis, especialmente sódio (MAPA, 1979).

O índice de fertilidade é avaliado através da saturação de bases (V%), saturação com alumínio [$100 \cdot Al / (Al + S)$], soma de bases trocáveis (S), capacidade de troca de cátions (T), relação C/N, fósforo assimilável, saturação com sódio, condutividade elétrica e pH (MAPA, 1979). Esses dados são obtidos através da análise de perfis de solo. Outras indicações da fertilidade natural podem ser obtidas através de observações da profundidade efetiva do solo, das condições de drenagem, da atividade biológica, do tipo de vegetação, do uso da terra, da qualidade da pastagem, do comportamento das culturas, dos rendimentos, etc., que deverão auxiliar na determinação das condições agrícolas dos solos (MAPA, 1979).

Do ponto de vista da necessidade de aplicação de fertilizantes, as áreas classificadas como "Baixo" (i.e., baixo requerimento de aplicação de fertilizantes) referem-se a terras que possuem elevadas reservas de nutrientes, sem apresentar toxidez por sais solúveis, sódio trocável e outros elementos prejudiciais ao desenvolvimento das plantas. Praticamente não respondem à adubação e apresentam ótimos rendimentos durante muitos anos, mesmo sendo empregadas com culturas mais exigentes. Solos pertencentes a esse grupo apresentam ao longo do perfil mais de 80% de saturação de bases; soma de bases acima de 6mEq/100g de solo e são livres de alumínio trocável

(Al+3) na camada arável. A condutividade elétrica é menor que 4 mmhos/cm a 25°C (MAPA, 1979).

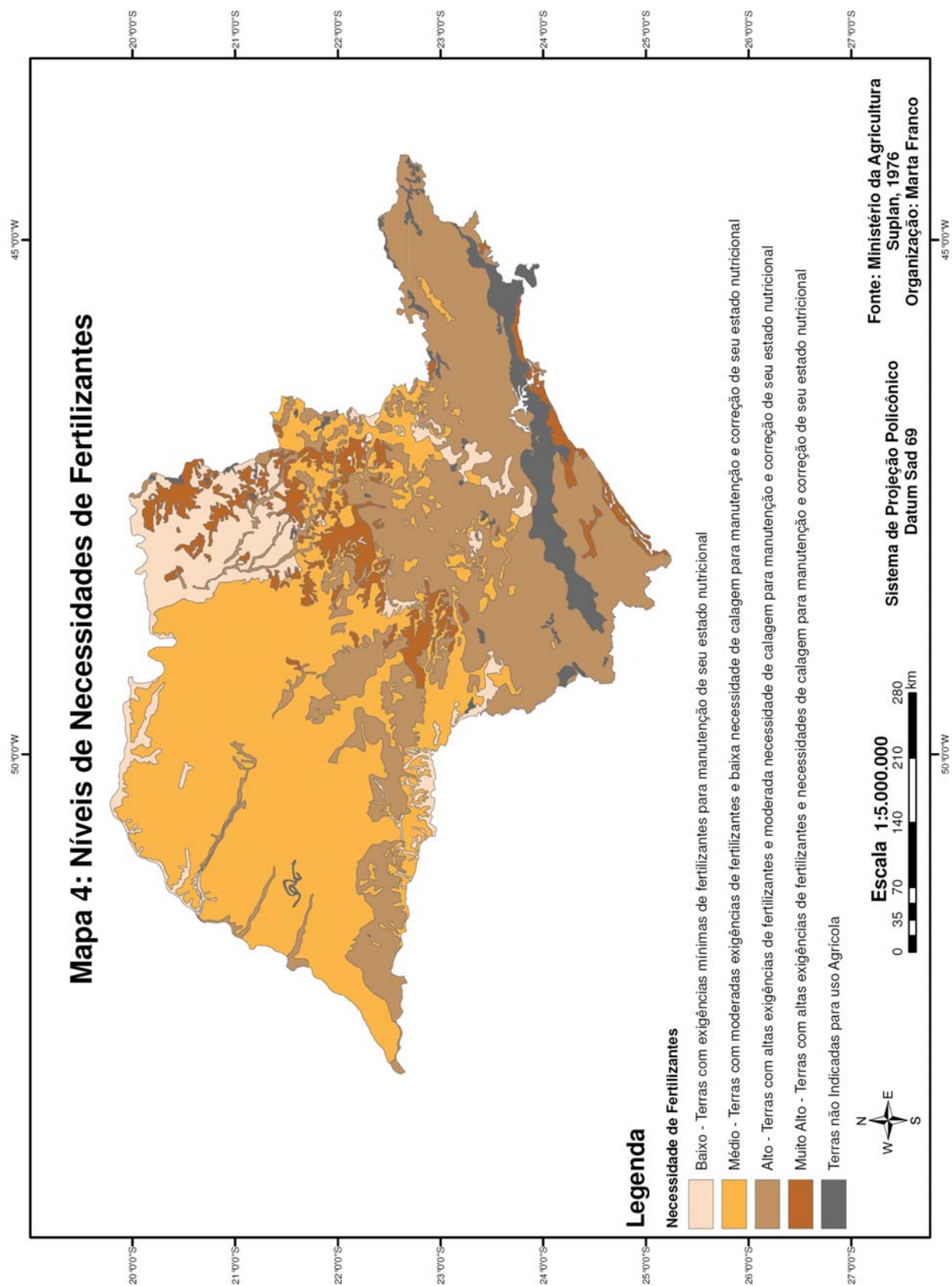
As terras classificadas como "Médio" são terras com boa reserva de nutrientes, sem a presença de toxidez por excesso de sais solúveis e sódio trocável, devendo apresentar saturação de bases (V%) maior que 50%, saturação de alumínio menor que 30% e soma de bases trocáveis (S) sempre acima de 3 mEq/100g de T.F.S.A. (Terra Fina Seca ao Ar). A condutividade elétrica do extrato de saturação dever ser menor que 4mmhos/cm a 25°C e a saturação de sódio inferior a 6%. Solos com essas características têm capacidade de manter boas colheitas durante vários anos, com pequena exigência de fertilizantes para manter seu estado nutricional (MAPA, 1979).

As áreas classificadas como "Alto" são terras com boa reserva de nutrientes para as plantas, no que diz respeito a um ou mais elementos, podendo conter sais tóxicos que podem afetar essas culturas. A condutividade elétrica no solo pode situar-se entre 4 e 8 mmhos/cm a 25°C e a saturação de sódio entre 6 e 15%. Durante os primeiros anos de utilização agrícola essas terras permitem bons rendimentos, verificando-se posteriormente (supostamente depois de cinco anos) um rápido declínio na produtividade. Após as primeiras safras é necessária a aplicação de fertilizantes e corretivos (MAPA, 1979).

A categoria "Muito Alto" corresponde a solos com reservas muito limitadas de um ou mais elementos nutrientes, podendo conter sais tóxicos em quantidades tais que permitam apenas o desenvolvimento de plantas com tolerância. Normalmente caracterizam-se pela baixa soma de bases trocáveis (S), podendo estar a condutividade elétrica quase sempre entre 8 a 15 mmhos/cm a 25°C e a saturação de sódio acima de 15%. Essas características se refletem, desde o início da exploração agrícola, em baixos rendimentos para a maioria das culturas e pastagens, devendo ser corrigida essa deficiência na fase inicial de sua utilização (MAPA, 1979).

As áreas classificadas na categoria "Nulo" têm solos mal providos de nutrientes, com remotas possibilidades de serem explorados com quaisquer tipos de utilização agrícola. Em solos dessa categoria pode haver grande quantidade de sais solúveis, chegando até haver formação de desertos salinos. Apenas plantas com muita tolerância conseguem adaptar-se a essas áreas. Solos

dessa categoria apresentam condutividade elétrica maior que 15 mmhos/cm a 25°C, compreendendo solos salinos, sódicos e thiomórficos (MAPA, 1979).



5.5 Potencial de Mecanização

A aptidão à mecanização refere-se às condições apresentadas pelo solo para o uso de máquinas e implementos agrícolas. Fatores tais como extensão e forma das pendentes, condições de drenagem, profundidade da textura, tipo de argila, e pedregosidade e rochosidade superficial condicionam o uso ou não da mecanização.

A mecanização da colheita da cana-de-açúcar foi implantada no Brasil na década de 1980 e vem se tornando mais comum devido, principalmente, à necessidade de adequação da atividade à legislação, que estabelece um cronograma para a eliminação da queima do canavial. As áreas mecanizáveis, como comentado anteriormente, são as que apresentam declividade menor que 12%. As áreas com declividade superior a 12%, por impedir a mecanização, implicam a necessidade de colheita manual sem a queima, fato que reduz drasticamente a competitividade (Macedo *et al.*, 2005).

As áreas classificadas no grupo "Alto" (i.e., alto potencial de mecanização) são terras que permitem, em qualquer época do ano, o emprego de todos os tipos de máquinas e implementos agrícolas ordinariamente utilizados. São geralmente de topografia plana com declividade inferior a 3%, não oferecendo impedimentos relevantes à mecanização. O uso efetivo do trator (i.e., número de horas de uso efetivo) é superior a 90% (MAPA, 1979).

As áreas classificadas como "Médio" são terras que permitem, durante quase todo o ano, o emprego da maioria das máquinas agrícolas. Os solos são quase sempre de relevo suavemente ondulado, com declividades de 3 a 8%. São áreas com solos profundos a moderadamente profundos, tipicamente encontradas em áreas de relevo mais suaves, apresentando, no entanto, outras limitações, como textura muito arenosa ou muito argilosa, restrição de drenagem, pequena profundidade, pedregosidade, sulcos de erosão, etc. Como resultado, o uso efetivo do trator deve estar entre 75 a 90% (MAPA, 1979).

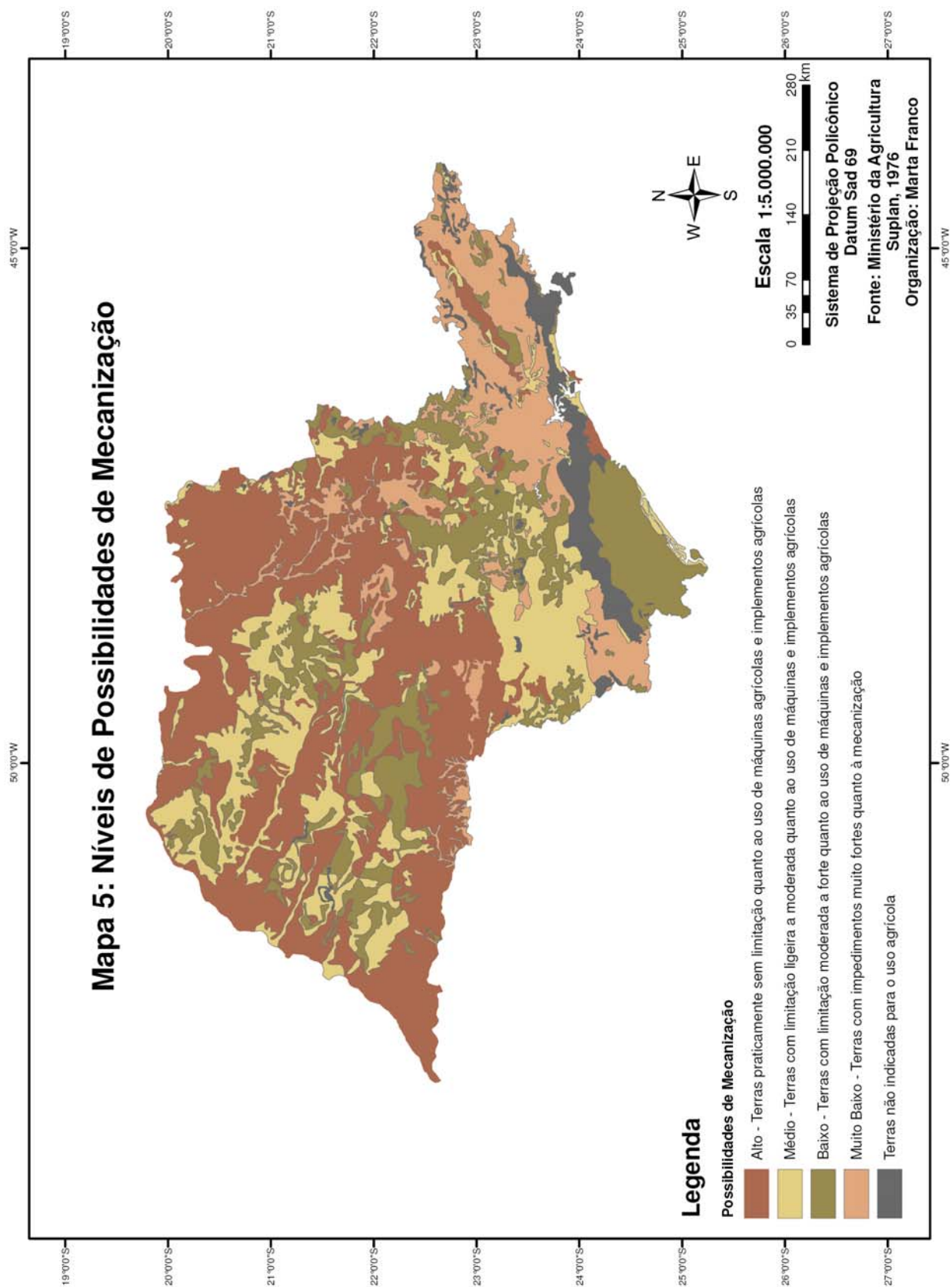
Caracterizadas como "Baixo" são as áreas que não permitem o emprego de máquinas ordinariamente utilizadas durante todo o ano. Essas terras apresentam relevo ondulado, com declividade de 8 a 20%, ou topografia mais suave no caso de outros impedimentos à mecanização

(e.g., pedregosidade, rochosidade, profundidade, textura muito arenosa ou muito argilosa, do tipo 2:1, grandes sulcos de erosão, drenagem imperfeita, etc.). O uso efetivo do trator está entre 50 e 75% (MAPA, 1979).

As áreas classificadas como "Muito Baixo" têm solos que permitem apenas, em quase sua totalidade, o uso de implementos de tração animal ou máquinas especiais. Caracterizam-se pelos declives acentuados (20 a 45%) em relevo fortemente ondulado. Sulcos e voçorocas podem constituir impedimentos ao uso de máquinas, bem como pedregosidade, rochosidade, pequena profundidade, má drenagem, etc. O uso efetivo do trator é inferior a 50% (MAPA, 1979).

Já as áreas classificadas como "Nulo" são solos que não permitem o uso de máquinas, sendo difícil até mesmo o uso de implementos de tração animal. Normalmente são de topografia montanhosa, com declives superiores a 45%, e têm impedimentos muito fortes devido a pedregosidade, rochosidade, profundidade ou problemas de drenagem (MAPA, 1979).

Além das características acima mencionadas, do ponto de vista da adequação à mecanização o terreno deve ter dimensões mínimas, de sorte a permitir a efetiva utilização do trator ao longo do ano, viabilizando o investimento, além de geometria tal que manobras não sejam necessárias com grande frequência.



5.6 Disponibilidade de recursos hídricos

O planejamento da expansão do setor sucroalcooleiro no estado de São Paulo deveria estar pautado pela análise da disponibilidade e da qualidade dos recursos hídricos. Para tanto, o ideal seria utilizar dados municipais, ou que pudessem caracterizar ambos aspectos no local de instalação de uma usina. Porém, como essa base de dados não está disponível, neste trabalho foram utilizados dados do balanço "Demanda versus Disponibilidade" de água por bacia.

Por se tratar de informação agregada, os resultados que podem ser obtidos da análise são limitados e, nesse sentido, neste trabalho a informação foi explorada apenas para a exemplificação do procedimento metodológico. Os dados do balanço "Demanda versus Disponibilidade" de água são apresentados no Relatório de Qualidade Ambiental do Estado de São Paulo 2006 (SMA, 2006). O mapa correspondente foi construído a partir de demandas estimadas, fazendo-se o balanço entre a disponibilidade hídrica existente em cada bacia e as demandas superficiais. O Mapa 6 corresponde a tal resultado.

Segundo o Relatório Ambiental do Estado de São Paulo (SMA, 2006), o estado tem abundância de águas superficiais e subterrâneas. A demanda global de águas superficiais é da ordem de 380 m³/s, distribuídas em 128 m³/s para o abastecimento público, 99 m³/s para o uso industrial e 155 m³/s para irrigação. Na média, a disponibilidade é bem maior que a demanda, porém a disponibilidade é desigualmente distribuída, pois há áreas em que a demanda está próxima ou mesmo supera a disponibilidade.

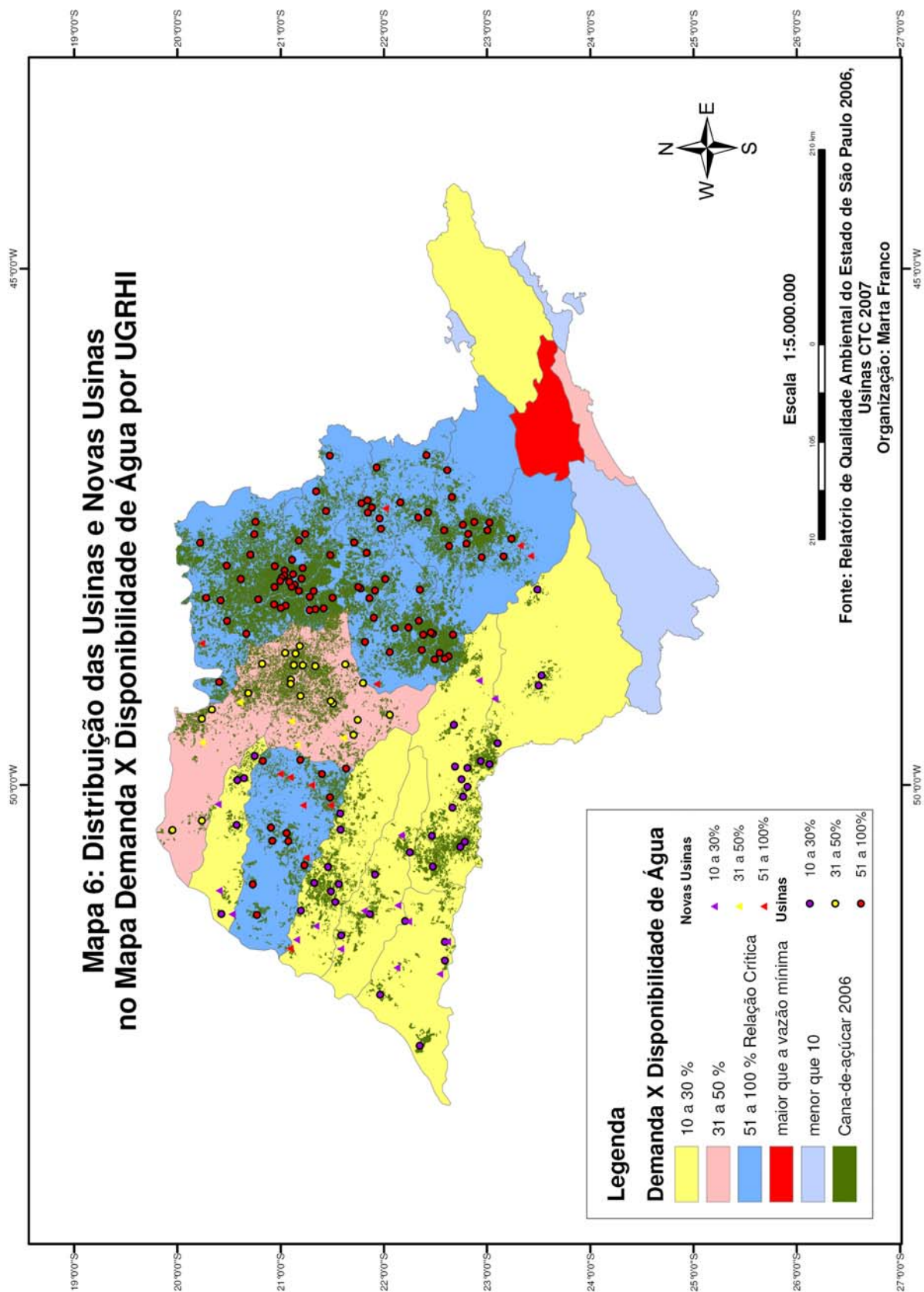
Como pode ser visto no Mapa 6, oito bacias já podem ser consideradas críticas do ponto de vista da disponibilidade de água. A condição crítica associada à relação entre demanda e disponibilidade de água se dá quando a soma das vazões captadas em uma determinada bacia hidrográfica, ou em parte dela, supera 50% da vazão mínima. Na legenda do Mapa 6, 100% corresponderia a uma situação em que a demanda seria exatamente igual à disponibilidade no período mais crítico do ano.

No estado de São Paulo, as bacias em condições críticas são: Pardo, Baixo Pardo/Grande, Sapucaí/Grande, Piracicaba/Capivari/Jundiaí, Mogi-Guaçu, Baixo Tietê, Tietê/Sorocaba e

Tietê/Jacaré. A UGRHI Alto Tietê apresenta demanda maior que a vazão mínima em função da elevada demanda na Grande São Paulo. Por outro lado, mesmo nas bacias que não estão classificadas como críticas há algumas sub-bacias que são consideradas críticas quanto à disponibilidade de água. Atualmente, grande parte do cultivo de cana-de-açúcar esta em áreas consideradas críticas do ponto de vista a disponibilidade de água, como pode ser observado no Mapa 6.

Segundo o Relatório de Qualidade Ambiental do estado de São Paulo (SMA, 2006), e no que diz respeito às águas subterrâneas, em alguns locais nos quais a extração é acentuada já se verificam rebaixamentos excessivos dos lençóis freáticos, como, por exemplo, em municípios das bacias do Pardo (e.g., Ribeirão Preto); Turvo/Grande (e.g., São José do Rio Preto); Paraíba do Sul (e.g., São José dos Campos); Tietê/Jacaré (e.g., Bauru).

O posicionamento das usinas existentes e das novas usinas no Mapa 6 demonstra a concentração das unidades industriais nas áreas nas quais a disponibilidade de água é crítica.



5.7 Aptidão climática para a cultura canavieira

Em geral a cana-de-açúcar é cultivada em climas tropicais e equatoriais. A região Paulista na qual se concentra a produção de cana-de-açúcar, bem como a região oeste na qual ocorre majoritariamente a expansão, não apresentam grandes limitações referentes às condições climáticas. O Mapa 7 indica as áreas de maior ou menor aptidão climática ao cultivo da cana-de-açúcar em São Paulo, em função de temperaturas médias anuais e níveis pluviométricos.

Segundo o Zoneamento Agrícola do Estado de São Paulo (IAC, 1974), a cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é classificada como planta semi-tropical. Nesse aspecto, a cana difere-se das culturas anuais de ciclo curto, como as de arroz, algodão, trigo, batata, etc., que são influenciadas apenas pelas características climáticas de limitados períodos do ano. As exigências climáticas da lavoura canavieira podem diferir bastante segundo o produto final, ou seja, açúcar (e/ou etanol), aguardente ou forragem.

Normalmente há maiores exigências climáticas para as lavouras destinadas à produção de açúcar. Como há necessidade de alto teor de sacarose, a planta necessita ter condições térmicas e hídricas adequadas no período vegetativo, para permitir desenvolvimento satisfatório da planta, e uma estação de repouso com acentuada restrição hídrica e térmica na época prévia ao corte, para forçar repouso da planta e enriquecimento em sacarose.

Essas restrições não deverão ser exageradas, pois poderão limitar a produção geral do canavial e exigir medidas corretivas que encarecem a produção. Dessa forma, para fugir dos efeitos de um período hibernal rigoroso, que reduza a estação vegetativa, a cultura açucareira está restrita à zona inter-tropical, com poucas incursões às áreas de latitudes mais elevadas da zona subtropical. Basta que em alguns meses do ano a temperatura caia abaixo de 15°C para que se tenha de recorrer a variedades precoces e resistentes ao frio (IAC, 1974).

No estado de São Paulo encontram-se as mais variadas condições e restrições climáticas para a lavoura canavieira. Certas áreas possuem clima que pode ser considerado ideal, sem restrição alguma. Outras apresentam restrições, térmicas ou hídricas, mas em geral moderadas,

que permitem a atividade em condições econômicas, sem exigir recursos e técnicas agronômicas especiais.

Camargo e Orotolani (*apud* IAC, 1974) estimam que o número de unidades de evapo-transpiração potencial, acumuladas, necessário ao desenvolvimento e à maturação das variedades comuns de cana, para fins açucareiros, está em torno de 850 mm anuais. Esse é o parâmetro típico nas áreas açucareiras mais frias do sudoeste do território paulista e nas regiões canavieiras do Rio Grande do Sul. Nas condições do estado de São Paulo, as áreas com menos de 850 mm de evapo-transpiração potencial por ano apresentam temperatura média anual de aproximadamente 19°C.

Nas áreas mais afetadas às geadas torna-se necessário o cultivo de espécies mais resistentes ao frio, ou o emprego de medidas preventivas, evitando-se o plantio em terrenos de baixada ou no fundo de bacias mal drenadas.

Fatores diversos podem influenciar a maturação da cana, o rendimento em sacarose e a presença de glicose no caldo. Tais fatores estão associados à taxa de crescimento da cana. Há uma relação inversa entre a taxa de crescimento do colmo e o rendimento de sacarose do caldo, pelo fato de que com o consumo de produtos assimilados, no processo de crescimento, sobram menos desses produtos para serem armazenados na haste da cana (IAC, 1974).

Dois são os fatores climáticos que influenciam o repouso e a maturação da cana: baixa temperatura e deficiência de umidade. A queda da temperatura média diária abaixo de determinados limites reduz substancialmente o crescimento da cana. Crescimentos apreciáveis são observados apenas quando a temperatura média diária ultrapassa 21°C (Walter *apud* Dillewijn, 1952). Na ausência de estação seca, e para que uma dada região tenha condições favoráveis à maturação, admite-se ser necessário que haja uma estação hiberna com médias termométricas inferiores ao limite de 21°C. Nas regiões em que a temperatura média do mês mais frio cai abaixo dos 20°C, como pode ocorrer em todo o estado de São Paulo, pode-se admitir que em pelo menos três ou mais meses da safra a temperatura média caia abaixo de 21°C para proporcionar boa maturação da cana-de-açúcar (IAC, 1974).

Ao considerar o fator térmico, os critérios comuns baseados nas temperaturas médias anuais resultam, geralmente, em indicações bastante úteis. Já não se pode dizer o mesmo a respeito do fator hídrico. Os critérios simplistas, baseados nos totais pluviométricos anuais, sem levar em conta sua distribuição ao longo do ano e as necessidades reais de umidade, nem sempre se aplicam bem, induzindo, não raro, graves erros de interpretação. Para contornar a dificuldade lançou-se mão do balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955), que se baseia em um sistema de contabilização da água do solo e permite estimar, satisfatoriamente, a disponibilidade de umidade para as plantas.

Quando a deficiência hídrica ultrapassa determinados limites pode haver sérios efeitos no desenvolvimento e na produtividade do canavial. Vários fatores poderão influenciar o limite além do qual as deficiências passam a ser prejudiciais à lavoura canavieira e a exigir correção pela irrigação suplementar. Para indicar as áreas que exigiriam a irrigação suplementar foi adotado neste trabalho o limite de 140mm de deficiência anual, comparável ao limite de 150mm proposto por Camargo e Ortolani (em 1965) (IAC, 1974).

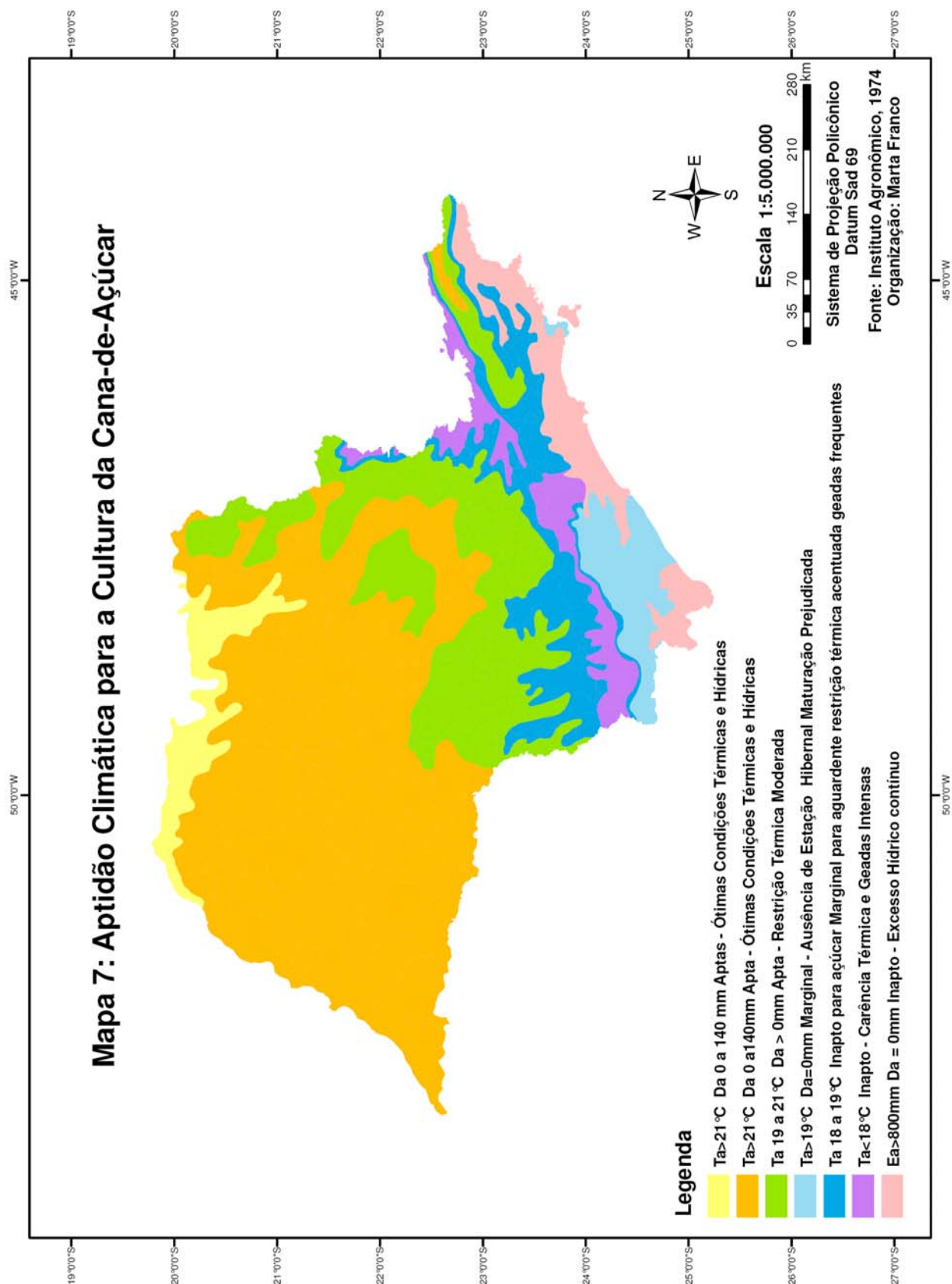
O mapa de aptidão climática da cana-de-açúcar – Mapa 7 – indica faixas com as diferentes limitações e possibilidades climáticas, para diferentes finalidades da cultura: indústria açucareira, aguardente e forragem. Os parâmetros climáticos adotados na definição das limitações agroclimáticas da cultura canavieira no Estado de São Paulo foram:

- a) Temperatura média anual (Ta) = 21°C, indica o limite inferior da faixa térmica favorável, considerada ótima para a cana-de-açúcar;
- b) Ta = 19°C, designa o limite abaixo do qual é considerado haver restrição térmica acentuada e inaptidão para a cultura da cana para indústria açucareira. Porém, tal área mostra-se ainda marginalmente adequada para produção de aguardente e forragem;
- c) Ta = 18°C, é o limite abaixo do qual a restrição ao cultivo é severa e a cultura da cana-de-açúcar é considerada inapta para qualquer empreendimento comercial;

d) Deficiência hídrica anual (Da) (segundo Thornthwaite e Mather, 1955). $Da = 140$ mm é o limite superior para a consideração de deficiência hídrica sazonal pronunciada, valor acima do qual é recomendável o emprego de irrigação suplementar;

e) $Da = 0$ mm, indica faixas com ausência de estação seca, fator que prejudica a maturação e colheita do canavial;

f) excedente hídrico anual, segundo Thornthwaite e Mather (1955); $Ea = 800$ mm, designa o limite acima do qual ocorre excesso de umidade na estação vegetativa.



5.8 Acessibilidade à rede energética

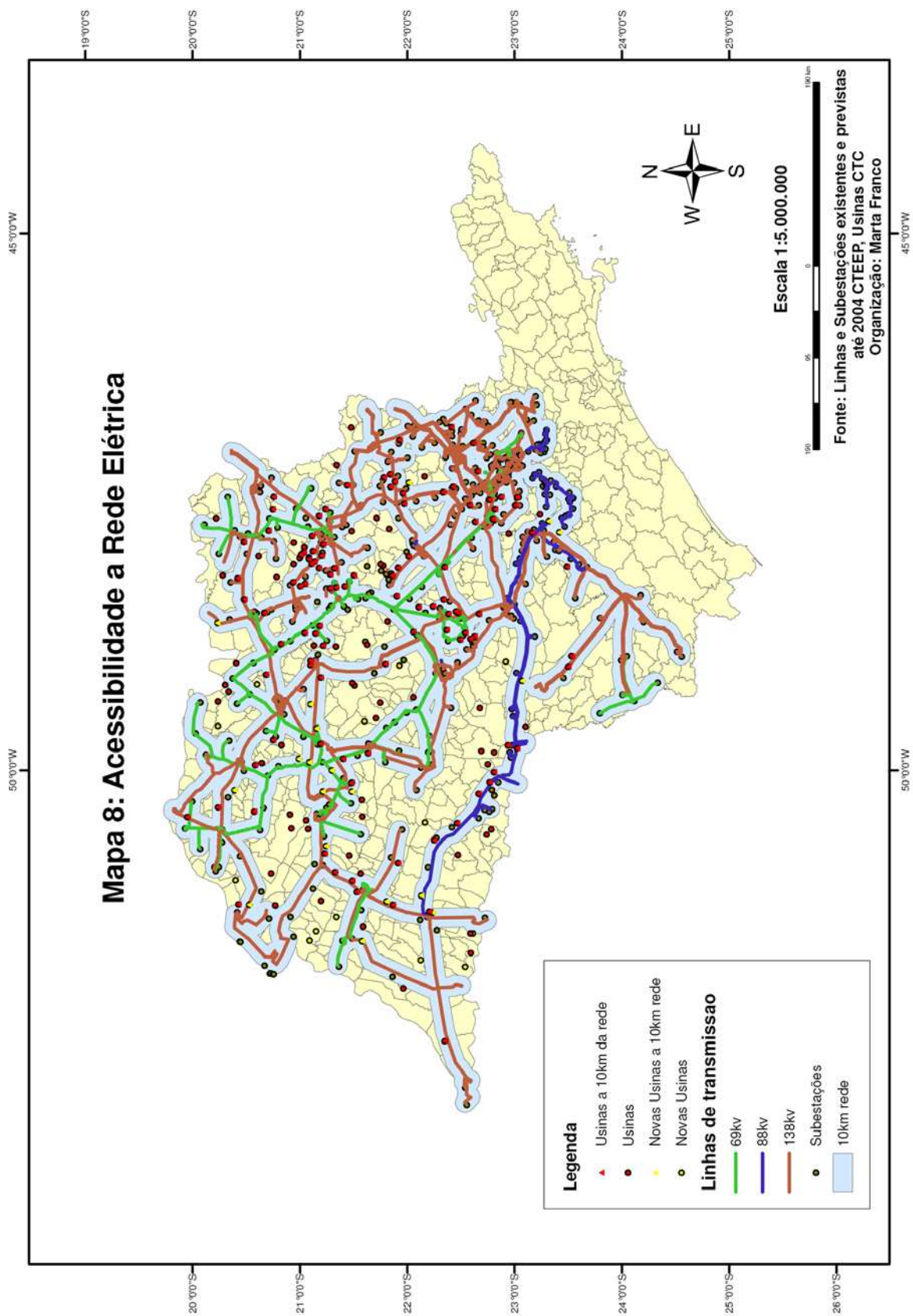
Para a identificação dos locais potenciais para o aproveitamento do bagaço para a geração de energia elétrica é preciso integrar à base de dados informações da rede elétrica do estado de São Paulo. Segundo Brighenti (2003), a geração descentralizada a partir de bagaço é feita na maioria das vezes na tensão de 13.8 kV, mas não é porque ela é gerada nesta tensão que ela deve ser distribuída na mesma. Tensões maiores na geração são possíveis, mas em função da capacidade das instalações de potência, dificilmente é justificável a geração acima de 138 kV.

A maioria das usinas com plantas de cogeração no setor sucroalcooleiro paulista tem capacidade excedente maior que 5 MW, ou condições de gerar mais do que 5 MW de capacidade excedente. Assim, as interligações devem ser sempre em tensões superiores a 13.8 kV. Portanto, é necessária a construção de subestações que elevem a tensão de 13.8 kV para 69 ou 138kV (Brighenti, 2003).

O mapa “Acessibilidade a Rede Energética” foi elaborado a partir do mapa do Sistema Elétrico do Estado de São Paulo, que têm informações de redes, subestações, usinas hidrelétricas e usinas termelétricas no ano de 2004. O mapa foi elaborado pela CTEEP (Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista) em conjunto com a EPTE (Empresa Paulista de Transmissão de Energia Elétrica).

Das informações disponíveis no mapa do Sistema Elétrico do Estado de São Paulo foram utilizadas apenas as informações relativas às linhas de transmissão de 69, 88 e 138 kV. As linhas de transmissão acima de 138 kV não foram consideradas pois, como comentado acima, não é viável a conexão de sistemas de cogeração de capacidade moderada a linhas de tão alta tensão.

O Mapa 8 representa as linhas de transmissão de eletricidade nos níveis de tensão considerados adequados, nas regiões do estado nas quais se localizam as usinas existentes e devem estar as usinas em construção. A posição das usinas é indicada no mapa. O mapa também indica uma faixa de 10 km no entorno das linhas de transmissão; como é apresentado no próximo capítulo, como simplificação, 10 km foi considerada a distância máxima para viabilizar economicamente a conexão entre o sistema de cogeração e a rede elétrica.



Capítulo 6

Análise dos Resultados

6.1 Áreas adequadas ao cultivo da cana-de-açúcar

O mapa Áreas Adequadas para o Cultivo (Mapa 9.1 da série Análise dos Resultados), foi elaborado a partir dos mapas Necessidades de Práticas Conservacionistas (Mapa 3), Necessidades de Fertilizantes (Mapa 4), Possibilidades de Mecanização (Mapa 5) e Aptidão Climática para o Cultivo da Cana-de-Açúcar (Mapa 7). Os fatores tratados em cada um desses quatro mapas foram integrados considerando ponderação igual para todos os fatores, e pontuação mais alta para as melhores classes de cada mapa (categorias que refletem maior adequação). Por exemplo, do ponto de vista das necessidades de práticas conservacionistas as regiões do estado de São Paulo estão classificadas entre baixa e muita alta necessidade de adoção de práticas. Do ponto de vista do cultivo, a melhor situação corresponde às regiões nas quais as necessidades são baixas. A mesma lógica corresponde às necessidades de aplicação de fertilizantes, com regiões classificadas entre baixa e muito alta necessidade. A situação ideal quanto a esse fator é, evidentemente, aquela em que as necessidades de fertilizantes são baixas.

Ao mapa Áreas Adequadas para o Cultivo foram adicionadas as áreas verdes remanescentes do estado de São Paulo, que foram entendidas como áreas de preservação e, portanto, inadequadas ao plantio de cana-de-açúcar, o que pode ser observado em todos os mapas 9. (Mapas 9.1, 9.2, 9.3 e 9.4).

A associação do mapa Áreas Adequadas para o Cultivo com o mapa Cultivo da Cana-de-Açúcar em 2006 resulta no Mapa 9.2 da série Análise dos Resultados. Da análise do Mapa 9.2

comprova-se, como seria de se esperar, a correlação entre as áreas mais adequadas e as áreas efetivas de cultivo. As bacias hidrográficas Baixo Pardo Grande, Sapucaí Grande, Pardo e Mogi-Guaçu, e Tietê-Jacaré, são áreas tradicionais de cultivo da cana-de-açúcar no estado e apresentam características adequadas. A não adequação de cultivo de cana-de-açúcar em áreas tradicionais (e.g., Piracicaba e região no entorno) deve-se fundamentalmente à topografia, em função da não adequação à mecanização da colheita.

Como anteriormente comentado, segundo a consulta feita aos profissionais da área agrícola, do ponto de vista da expansão do cultivo da cana-de-açúcar no estado de São Paulo o fator considerado mais importante é a "Possibilidade de Mecanização". Também como visto anteriormente, a Lei nº 11.241, de 2002, proíbe a queima da cana previamente à colheita, e associada a essa Lei há um cronograma de mecanização da colheita de cana. A mecanização só é possível em áreas de menor declividade e, assim, impõe-se restrição significativa, no futuro, a algumas áreas do estado. O resultado da definição das áreas adequadas ao plantio de cana, considerando-se a prioridade dada pelos especialistas, é apresentada no mapa Ponderação Técnica Participatória (Mapa 9.4 da série Análise dos Resultados), que se baseia na metodologia descrita por Eastman (2001). As análises subseqüentes foram feitas a partir deste mapa de adequação ao cultivo de cana.

O atual cultivo da cana-de-açúcar ocorre integralmente em áreas aptas do ponto de vista climático, que é um dos fatores considerados na elaboração do mapa Ponderação Técnica Participatória (Mapa 9.4). Portanto, a atual distribuição do cultivo da cana-de-açúcar foi indiretamente considerada na análise, em associação à aptidão climática.

O fator "Necessidade de Práticas Conservacionistas", que é relacionado com a suscetibilidade à erosão, foi considerado o segundo mais importante na opinião dos especialistas consultados. O atual cultivo de cana-de-açúcar no estado de São Paulo está concentrado nas áreas de baixa e média necessidade de práticas conservacionistas (82,9%; base mássica da cana produzida), como pode ser visto na Figura 3.

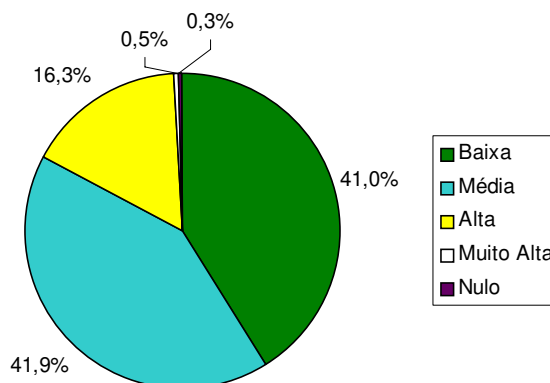


Figura 4. Distribuição do atual cultivo de cana-de-açúcar em função das necessidades de práticas conservacionistas.

Por outro lado, o fator "Necessidades de Fertilizantes" foi considerado pelos especialistas o menos importante enquanto critério de definição de áreas adequadas. Na Figura 4 é apresentada a distribuição do cultivo de cana-de-açúcar no estado, em 2006. Com efeito, pode-se ver na figura que parte significativa do cultivo ocorre em áreas que requerem aplicação significativa de fertilizantes: 52% em áreas com necessidade alta ou muito alta, e 78% em áreas com necessidade ao menos média.

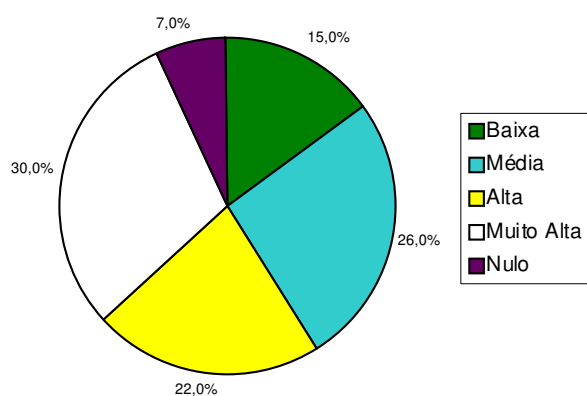


Figura 5. Distribuição do atual cultivo de cana-de-açúcar em função das necessidades de aplicação de fertilizantes.

Como comentado anteriormente, o fator considerado mais importante pelos especialistas foi a "Possibilidades de Mecanização". Na Figura 5 observa-se a atual distribuição do cultivo de cana-de-açúcar em São Paulo em função do nível de adequação à mecanização. Pode-se ver que grande parte do cultivo de cana em São Paulo (base mássica de produção em 2006) ocorre em regiões de alto ou médio potencial de mecanização (77,1%), sendo que certamente haveria restrição à continuidade do plantio em apenas pouco mais de 5% das áreas ora cultivadas com cana.

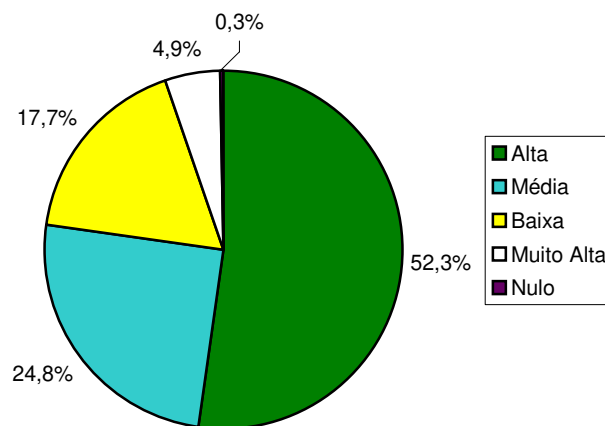


Figura 6. Distribuição do atual cultivo de cana-de-açúcar em função do potencial de mecanização

Definida a matriz final de ponderação, os mapas foram transformados de imagem vetorial para imagem *raster*, para aplicação do processo computacional de análise multicriterial. Barredo (1996) afirma que os modelos *raster* oferecem mais possibilidades de aplicação da álgebra de mapas. Além das operações de lógica *booleana* e aritméticas, realizadas pelo modelo vetorial, outras operações também podem ser realizadas com o modelo *raster*, como a classificação multivariante, entre outras.

O modelo *raster* é um conjunto de camadas de informação referentes a mesma área, que são representadas sempre por uma malha de pontos, os pixels, com relações topológicas implícitas à posição de cada pixel na malha geo-referenciada. O modelo vetorial representa as

unidades geográficas através de pontos, linhas ou polígonos geo-referenciados e inter-relacionados (Comas e Ruiz, 1993).

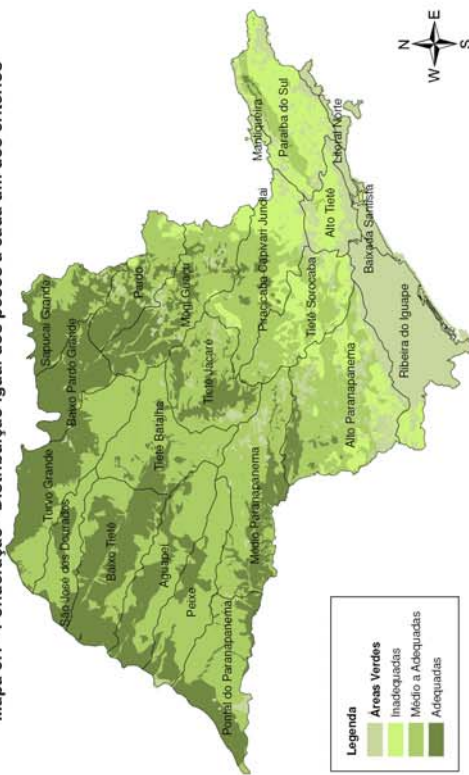
Segundo Goodchild (1987), o potencial real dos SIG está relacionado à sua habilidade na análise de dados espaciais segundo técnicas de Análise Espacial. Os operadores *booleanos* "AND" e "OR" são utilizados para operações de intersecção e união. O operador "AND" é utilizado para intersecção, quando, por exemplo, um local deve atender a todos os critérios para ser incluído no conjunto de decisão. Já o operador "OR", é utilizado com o objetivo de união, quando, por exemplo, um local será incluído no conjunto de decisões se pelo menos um critério for atendido. O resultado da aplicação do procedimento é um mapa de prioridades que pode ser limitado espacialmente por uma ou mais restrições *booleanas* (Eastman, 2001).

Para a seleção das áreas de cultivo potencial de cana-de-açúcar, além do potencial de mecanização considera-se também como fator importante a disponibilidade de água. Tendo em conta a relevância de ambos critérios, o Mapa 9.3 (ponderação com o Mapa Demanda x Disponibilidade de Água) apresenta o resultado obtido com a ponderação de cinco fatores, ou seja, os quatro fatores utilizados na ponderação que resultou no Mapa 9.4 (Ponderação Técnica Participatória), e as informações relativas ao consumo de água por bacia hidrográfica.

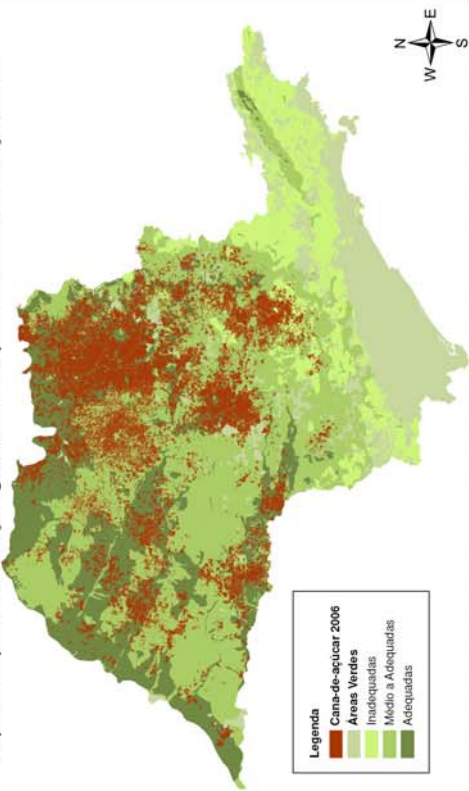
As informações do mapa "Demanda x Disponibilidade de Água", quando consideradas conjuntamente com as informações do mapa "Resultado da Técnica Participatória" (Mapa 9.4), não traz modificações consideráveis no resultado final. Na verdade, o mapa "Demanda x Disponibilidade de Água", por refletir o padrão agregado por Unidade de Gestão de Recursos Hídricos – UGRHI –, não é adequado para a ponderação nesta escala de trabalho. As informações do mapa foram utilizadas apenas para ilustrar o detalhamento da análise, mas os resultados com ponderação de suas informações não foram considerados na construção do mapa final.

Mapa 9. Análise dos Resultados

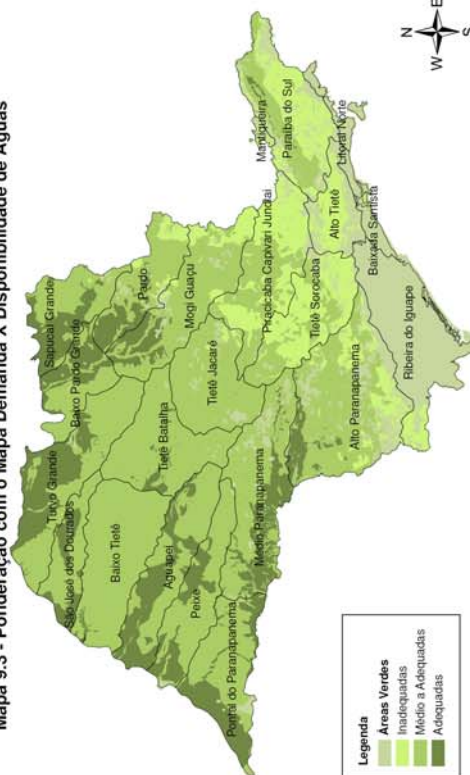
Mapa 9.1 - Ponderação - Distribuição igual dos pesos a cada um dos critérios



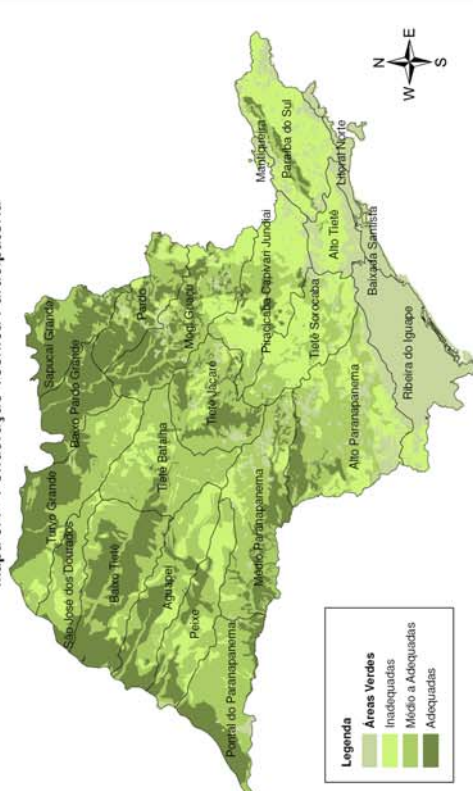
Mapa 9.2 Mapa da Ponderação igual com a área plantada com cana-de-açúcar 2006



Mapa 9.3 - Ponderação com o Mapa Demanda X Disponibilidade de Águas



Mapa 9.4 - Ponderação Técnica Participatória



Escala 1:5.500.000

Sistema de Projeção Policônico Datum Sad 69

As áreas mais tradicionais de cultivo de cana-de-açúcar no estado de São Paulo, indicadas no Mapa 9.3 (Bacias Pardo, Mogi-Guaçu e Baixo Pardo, Meso-Região de Ribeirão Preto), devem deixar de ser relevantes em um horizonte de médio prazo para a expansão da atividade canavieira, uma vez que a disponibilidade de água já se encontra em níveis críticos em relação ao consumo. Por outro lado, essas mesmas áreas tradicionais já estão densamente ocupadas com cultivo de cana, o que reduz a possibilidade de expansão do cultivo. Nessas regiões seria necessário um estudo mais detalhado do uso da terra, em escala local, para que pudessem ser selecionadas as áreas adequadas para a expansão do cultivo.

Da análise dos resultados apresentados no Mapa 9.3 é possível concluir que as bacias hidrográficas mais adequadas para a expansão do cultivo da cana são as do Pontal do Paranapanema, Peixe, Aguapeí, Médio Paranapanema, São José dos Dourados e Turvo Grande. Tal conclusão coincide com a conclusão que pode ser obtida do Mapa 4. Uma análise local seria necessária para a definição com maior exatidão das áreas adequadas ao cultivo da cana-de-açúcar.

Da análise do Mapa 9.3 pode-se concluir que as áreas mais adequadas para a expansão do cultivo da cana estão na Região Oeste do estado de São Paulo. Por sua vez, conclui-se também que a Bacia do Baixo Tietê tem menor importância como alternativa à expansão do cultivo, conclusão que não seria obtida apenas a partir da análise do Mapa 4. Ou seja, considerada a restrição associada à disponibilidade da água, a Bacia do Baixo Tietê é menos relevante à expansão do cultivo da cana.

As bacias hidrográficas com maior extensão territorial apta ao cultivo da cana, segundo o Mapa 4, são aquelas nas quais há maior número de usinas em implantação. Com efeito, na Bacia do Pontal do Paranapanema são identificados quatro novos projetos, na Bacia do Peixe mais quatro, no Médio Paranapanema um projeto, na do Aguapeí três projetos, na Bacia dos Dourados três, na do Turvo Grande dois, no Tietê Batalha três. A bacia hidrográfica com maior número de projetos de usinas em implantação é a Baixo Tietê .

Devido ao mapa Demanda x Disponibilidade de Água não ser adequado a esta escala de pesquisa, o mapa escolhido como mapa final para as áreas adequadas para a expansão foi o Mapa 9.4.

Na Figura 6 é apresentada a distribuição das usinas já existentes em função da adequação das áreas (Mapa 9.4), bem como a distribuição das novas usinas, segundo o mesmo critério. As usinas existentes estão majoritariamente localizadas em áreas adequadas (50%), sendo que 12% delas estão em áreas inadequadas, principalmente por causa da futura restrição que será imposta pela declividade. Proporcionalmente, há menor número de novas usinas em áreas absolutamente adequadas, mas também há uma proporção muito reduzida (3%) em áreas inadequadas.

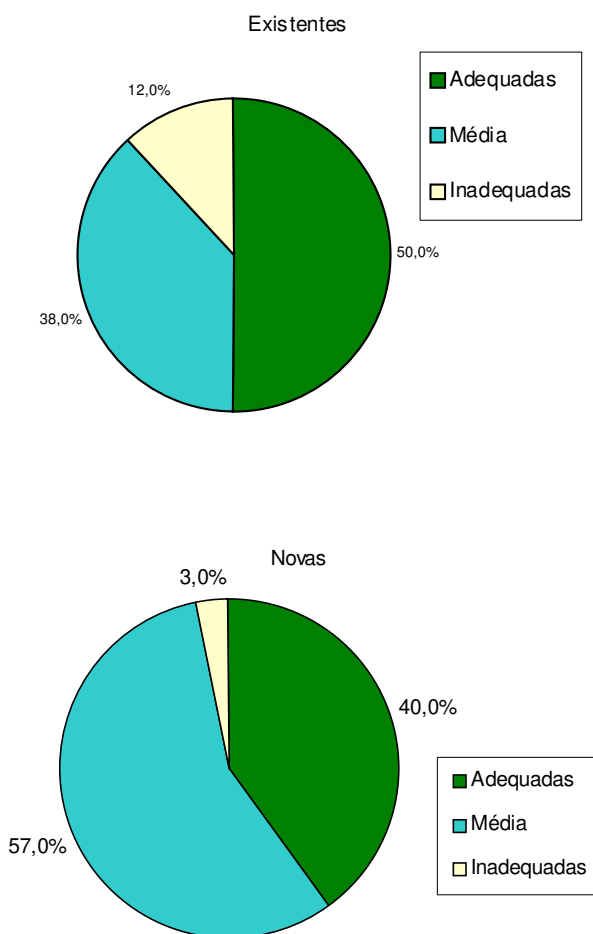


Figura 7. Distribuição das usinas existentes, e das novas usinas, segundo as áreas de adequação ao cultivo de cana-de-açúcar.

Considerada a aptidão das áreas para cultivo da cana-de-açúcar, há 19 usinas nas áreas classificadas como inadequadas, o que representa 12% do total de usinas existentes no estado, de acordo com a base de dados utilizada neste trabalho. Este percentual significativo deve-se ao fato de que a mecanização da colheita não foi, historicamente, uma restrição importante na determinação do local de produção de cana. Na medida em que tal preocupação passou a existir, apenas 3% das novas usinas estão alocadas em áreas consideradas impróprias.

A localização adequada das usinas diminui quando se leva em conta o fator disponibilidade de água. Há 14 novas usinas em áreas adequadas, inclusive do ponto de vista da disponibilidade da água, e 18 novas usinas em regiões de média disponibilidade. Deve ser lembrado que o parâmetro utilizado neste trabalho para refletir a disponibilidade da água não é o mais apropriado. Portanto, o fator disponibilidade da água deve ser objeto de estudo específico.

6.2 Potencial de geração de eletricidade excedente

A capacidade instalada de geração de eletricidade a partir da biomassa residual da cana-de-açúcar, no estado de São Paulo, foi estimada em 1.581 MW, em 125 usinas. Em mais cinco usinas que estavam, em 2007, em fase adiantada de instalação a capacidade instalada somava 109 MW, totalizando 1690 MW instalados no estado. Na Figura 7 é apresentado o histograma com a distribuição das capacidades instaladas em 130 usinas (14 usinas não têm registro de capacidade). Oitenta e quatro usinas têm capacidade instalada até 10 MW, 34 usinas capacidade instalada estimada entre 10 e 30 MW, enquanto 12 usinas têm capacidade instalada superior a 30 MW.

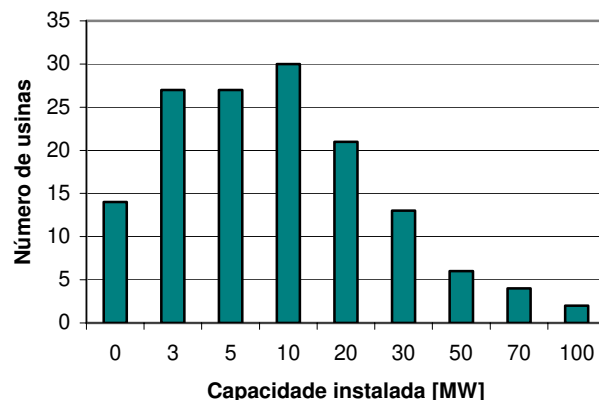


Figura 8. Histograma com capacidade instalada (em MW) de sistemas de cogeração, em 2006

Considerando a moagem de cana em 2006, supondo que o consumo próprio de energia elétrica corresponde a 12 kWh/t cana, a capacidade de geração de eletricidade excedente foi estimada em 904 MW nas usinas existentes e em 1049 MW em todas as usinas que estarão em operação em curto prazo. Na Figura 8 é apresentado o histograma com a distribuição da estimativa das capacidades excedentes em 125 usinas, em 2006. Na realidade, 44 usinas não têm capacidade excedente e outras 24 têm capacidade excedente muito pequena (< 1 MW). Sessenta e duas usinas têm capacidade excedente estimada em mais do que 3 MW, enquanto 36 usinas têm mais do que 10 MW de capacidade para comercialização.

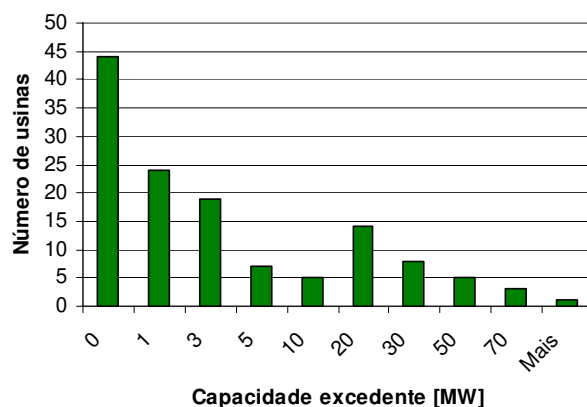


Figura 9. Histograma com estimativa da capacidade excedente (em MW) em sistemas cogeração

Na Figura 9 é mostrada a relação entre o percentual de capacidade excedente (calculada como sendo a relação algébrica entre a capacidade excedente estimada e a capacidade instalada) e a capacidade excedente em si. Observa-se um padrão assintótico que indica que maiores capacidades excedentes, em valores absolutos, estão associadas a maiores capacidades excedentes relativas em relação à capacidade instalada.

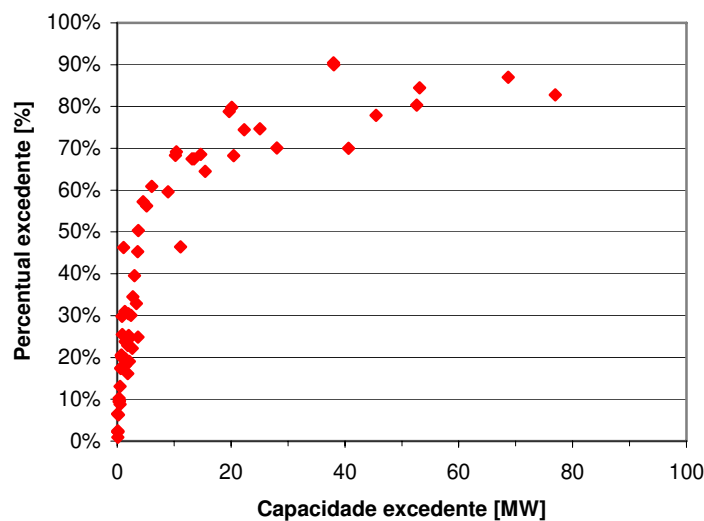


Figura 10. Relação entre percentual de capacidade excedente e capacidade excedente

As configurações dos sistemas de cogeração que foram consideradas na avaliação do potencial de produção de eletricidade excedente são similares àquela representada na Figura 2, apresentada no capítulo 4. Foram considerados sistemas de cogeração com geração de vapor a 8,2 MPa, 480°C, com turbinas de extração e condensação, sem eletrificação dos acionamentos feitos com turbinas a vapor (e.g., moendas e desfibradores), com redução da demanda de vapor de processo para 280 kg/t de cana e uso como combustível de 40% da palha disponível no campo. Operando apenas na safra, em 4320 horas/ano, o índice de geração elétrica seria igual a 92 kWh/t cana, sendo 80 kWh/t cana exportáveis. Operando todo o ano, 4320 horas na safra e 3564 horas na entressafra, o índice de geração de eletricidade seria equivalente a 144 kWh/t cana. As hipóteses aqui consideradas são conservadoras, pois já são comerciais sistemas de cogeração com geração de vapor a maior pressão e temperatura (e.g., conservadoramente a 9 MPa, 520°C) e

seria possível imaginar a recuperação de ao menos 50% da palha para ser usada como combustível.

A moagem estimada em 2006 para as usinas para as quais há registro de operação foi igual a 244,8 milhões de toneladas de cana. Em 2015, para as usinas existentes em 2006 e para as novas usinas, a moagem é estimada em 321,5 milhões de toneladas de cana, portanto pouco mais de 30% acima do verificado em 2006. A estimativa do potencial em 2015 foi feita para 148 usinas, sendo 131 existentes em 2006 e 17 novas unidades que deverão estar em operação nos próximos anos.

Caso todas as usinas tivessem em 2015 sistemas de cogeração segundo as configurações descritas acima, e operando apenas na safra, a capacidade de geração de eletricidade adicional em relação à capacidade já instalada seria 5178 MW (descontados também 109 MW em fase final de instalação). Caso a operação ocorresse ao longo de todo o ano, a capacidade adicional em 2015 seria 4221 MW. Como a capacidade já instalada é estimada em 1690 MW, a capacidade total potencial em 2015 seria 6903 MW para operação só na safra, ou 5911 MW para operação o ano inteiro.

Na Figura 10 é apresentado o histograma com a distribuição das capacidades instaladas potenciais em sistemas de cogeração em 2015. A capacidade média em 148 usinas foi estimada como 46,4 MW, com desvio-padrão 29 MW. Cento e três usinas teriam capacidade instalada superior a 50 MW, enquanto 53 teriam capacidade instalada superior a 75 MW e 19 capacidade instalada superior a 100 MW.

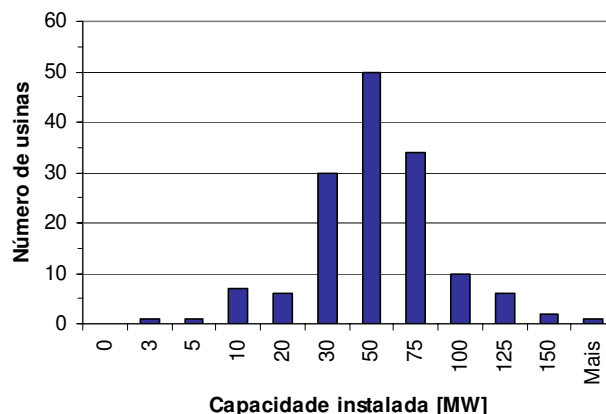


Figura 11. Histograma com estimativa da capacidade instalada (em MW) em 2015

A capacidade instalada de cada usina, e o potencial de geração de eletricidade atual, bem como o potencial previsto para 2015, ambos calculados a partir dos dados de moagem de cada usina, são representados no Mapa 11.

O atual potencial de geração de eletricidade está concentrado nas bacias do Mogi-Guaçu, do Pardo e do Baixo Pardo Grande. O potencial de geração em 2015 também está concentrado nessas áreas, porém como não há dados de estimativas de potencial para as novas usinas, pode-se inferir que o mapa em 2015 também teria um potencial significativo na região oeste do estado, embora este dado não esteja numericamente representado no mapa.

Para que o potencial de geração de eletricidade excedente possa ser mais bem aproveitado é fundamental analisar facilidades ou dificuldades de interconexão com a rede elétrica. Para isso, neste trabalho foi realizado um *buffer*⁴ para avaliar a proximidade das unidades industriais às linhas de transmissão, considerado simplificado como distância máxima viável 10 km entre a instalação e o ponto de conexão.

Em Análise Espacial a distância pode ser definida como o número de unidades de longitude que separam os pontos ou lugares do espaço (Sendra, 1992). Empregando tal procedimento, o mapa que continha linhas e pontos passou a ser um mapa com polígonos, permitindo assim

analisar as áreas de intersecção. Após a operação, ao mapa resultante foram adicionadas as usinas existentes e as novas usinas do Estado e, através do operador de intersecção (comando "AND") foram seleccionadas as usinas dentro das áreas de iso-distância a rede. Através das operações de Análise Espacial foram localizadas 106 usinas, de um total de 160 avaliadas, com distâncias máximas de 10 km em relação às linhas de transmissão, e 19 novas usinas de um total de 32 nas mesmas condições. Apenas cinco usinas estariam à distância superior a 25 km da rede elétrica. Na Figura 11 é apresentado o histograma de distribuição das usinas segundo sua distância à rede elétrica.

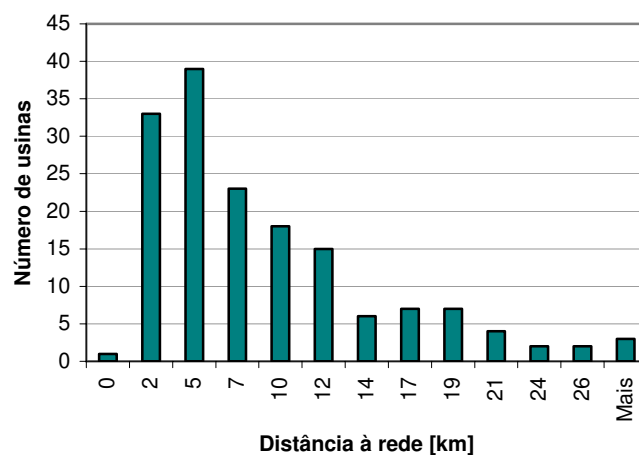


Figura 12. Histograma de distância das usinas à rede elétrica

Para as usinas para as quais estimou-se capacidade excedente em 2006, a Figura 12 mostra a relação entre a capacidade excedente e a distância mínima das usinas à rede elétrica. Grande parte das usinas que têm capacidade excedente acima de 10 MW está a no máximo 10 km da rede elétrica, exceto seis casos. Nenhuma usina com capacidade excedente (estimada) em 2006 estava a mais do 20 km da rede.

⁴ Ferramenta utilizada em geo-processamento para análise de proximidade.

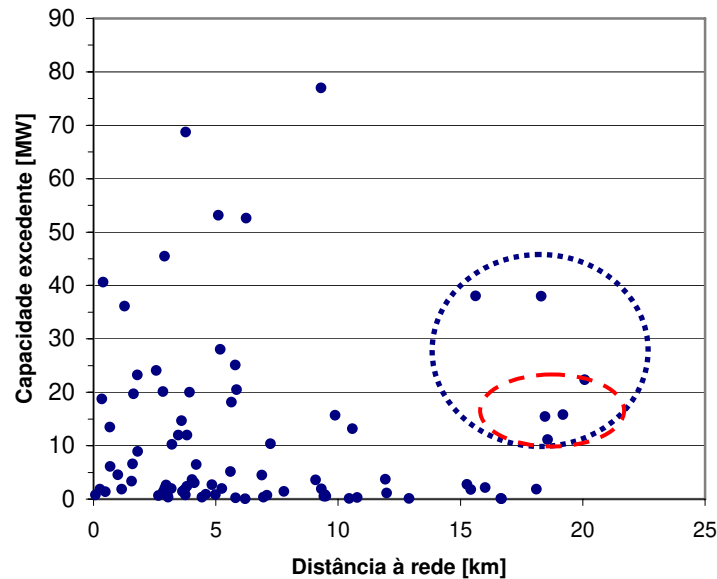


Figura 13. Capacidade excedente de sistemas de cogeração e distância das usinas a rede elétrica

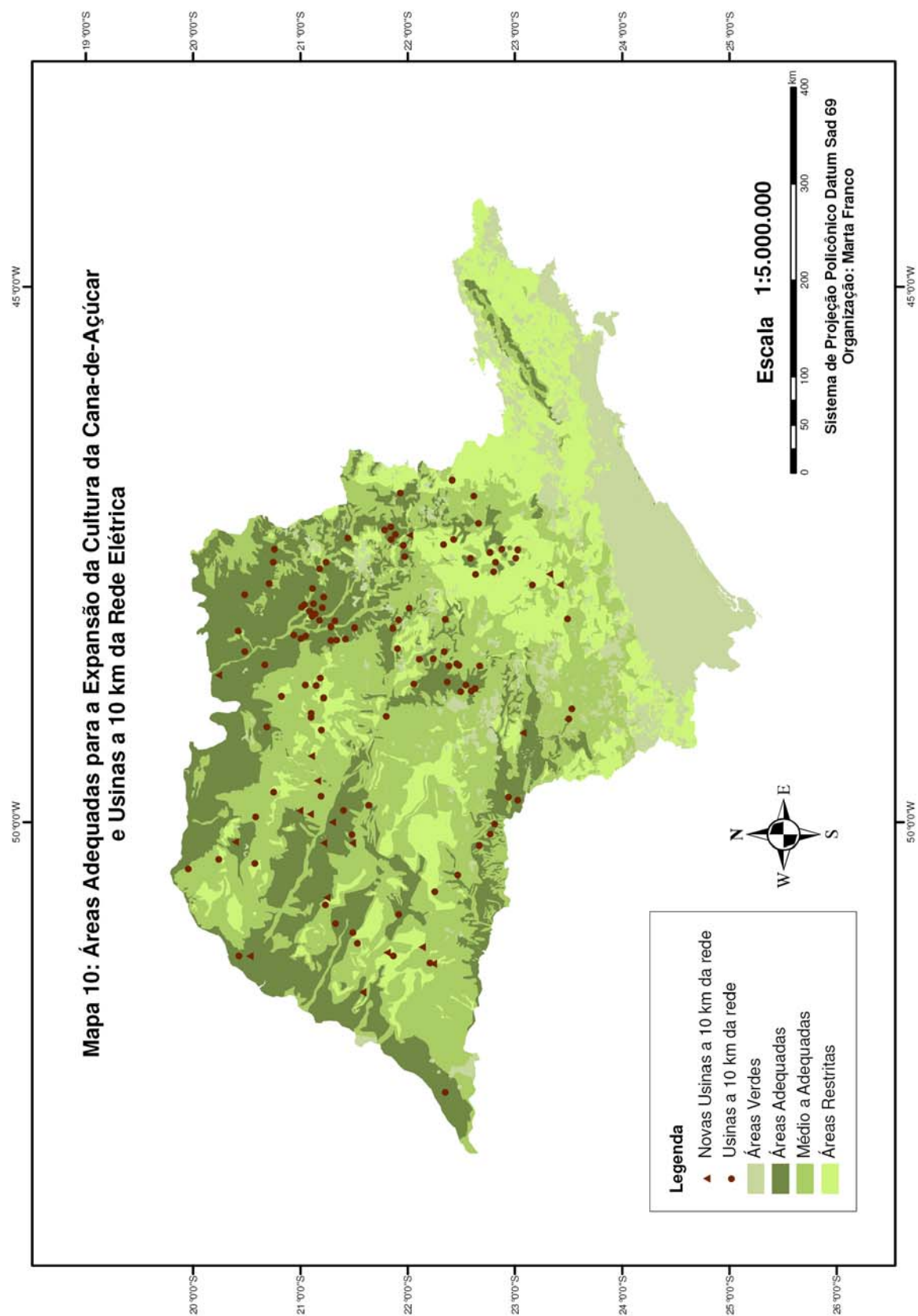
Supondo que as instalações a mais de 10 km da rede elétrica não teriam condições de ser economicamente competitivas em curto prazo, o potencial total para geração elétrica apenas durante a safra seria reduzido para 4860 MW (1690 MW existentes, mais 3170 MW a serem instalados) ou 4241 MW para geração todo o ano (1690 MW existentes, mais 2551 MW a serem instalados). Portanto, por restrições de acesso à rede elétrica, o potencial seria reduzido a 70% no caso da geração exclusivamente na safra e a 72% no caso da geração ao longo de todo o ano.

A análise acima é apenas ilustrativa da importância da consideração da restrição associada ao acesso à rede elétrica. Há importantes simplificações na análise feita. Primeiro, é apenas considerada apenas a distância enquanto fator limitante, e não são consideradas restrições associadas à capacidade das subestações e das linhas de transmissão.

Segundo, não foi feita qualquer distinção em função da capacidade de exportação de eletricidade excedente, consideradas a distância à rede e o nível de tensão. Sistemas de menor capacidade de comercialização de excedentes não deverão se conectar a rede de 138 kV, por exemplo, e para sistemas de maior capacidade de exportação a restrição de 10 km talvez seja

muito rigorosa. Não foi possível detalhar a análise quanto à restrição das capacidades das linhas e subestações, pois essa informação não foi obtida.

Terceiro, a informação de posicionamento de linhas de transmissão e subestações é de 2004, e portanto está desatualizada. O Mapa 10 é o resultado da intersecção do Mapa 9.4 com as usinas situadas a 10 km da rede, "Áreas Adequadas para a Expansão" e "Usinas e Novas Usinas" situadas a 10 km da rede. O Mapa 10 permite a identificação dos locais nos quais poderá ser mais bem aproveitado a cogeração de eletricidade a partir do bagaço da cana-de-açúcar.



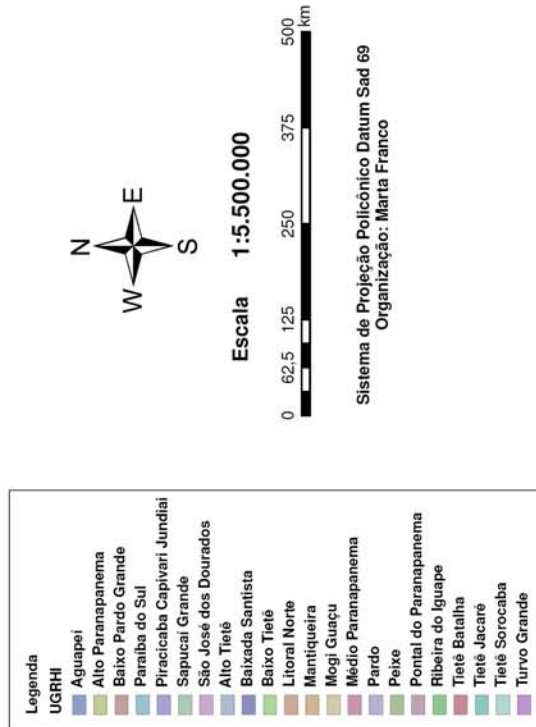
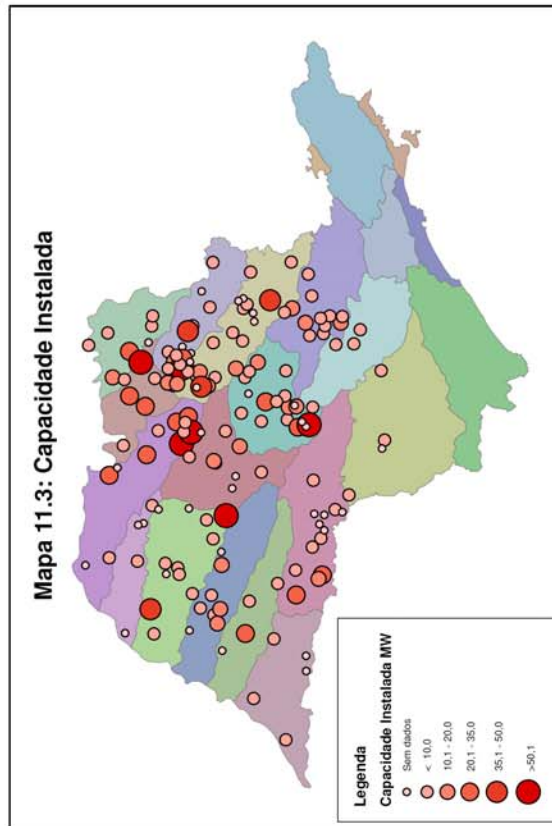
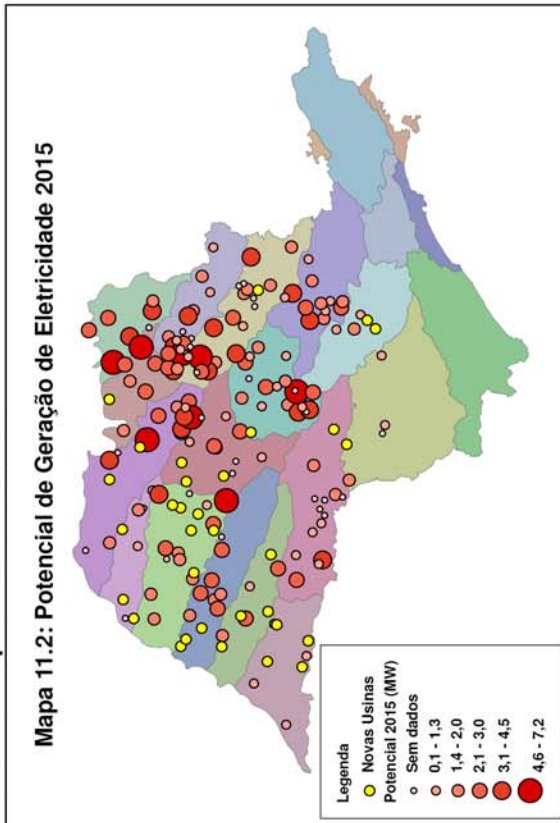
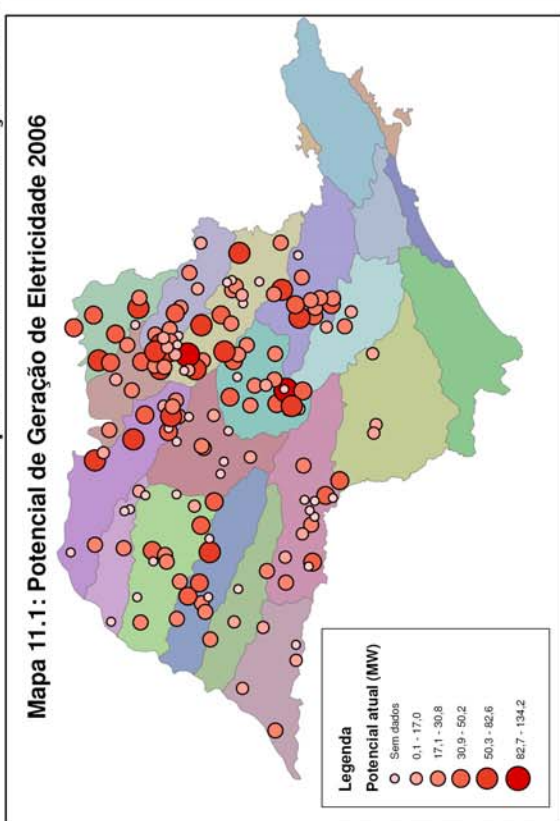
Outro aspecto a ser considerado é a restrição que pode ser imposta ao potencial em função da não disponibilidade, ou da baixa disponibilidade de água. Aqui a análise também foi feita em caráter exploratório, pois as informações sobre o balanço "Demanda x Disponibilidade de Água" só foram obtidas por bacia, enquanto o ideal era ter a informação no âmbito de municípios.

Considerando que as usinas que estão em áreas críticas do ponto de vista do balanço "Demanda x Disponibilidade de Água" não poderiam ter sistemas de cogeração com turbinas de extração-condensação, pois para a condensação há captação e consumo de água, apenas sistemas com turbinas de contra-pressão poderiam ser instalados. Sistemas de cogeração com turbinas de contra-pressão, com geração de vapor a 8,2 MPa, 480°C, sem redução da demanda de vapor de processo (nesses casos a demanda seria 500 kg/t cana) e operando apenas com bagaço, gerariam 62 kWh/t cana, sendo 50 kWh/t cana excedentes.

A capacidade que poderia ser instalada sem restrições quanto à disponibilidade de água seria 2039 MW adicionais (em sistemas com turbinas de extração-condensação) em relação aos 1690 MW já existentes. Nas áreas críticas a capacidade que poderia ser instalada em sistemas com turbinas de contra-pressão seria equivalente a 2139 MW. Portanto, o potencial total seria reduzido a 5868 MW, ou seja, a 85% do potencial calculado sem consideração da restrição associada à disponibilidade de água.

Da análise acima apresentada conclui-se que a condição mais crítica é imposta pelo acesso à rede elétrica, e os futuros estudos deveriam aprofundar a análise relativa a esse aspecto. Em particular, seria importante considerar o custo de conexão à rede como fator decisivo no processo de tomada de decisão. A restrição associada à disponibilidade de água é menos importante, mas também precisaria ser analisada com o devido cuidado em estudos posteriores.

Mapa 11: Potencial de Geração de Eletricidade e Capacidade Instalada



Capítulo 7

Conclusões

O principal objetivo desta dissertação era o desenvolvimento de um procedimento metodológico baseado em Sistemas de Informações Geográficas (SIG) visando a análise de aspectos relevantes à expansão da atividade canavieira. O procedimento metodológico foi aplicado ao estado de São Paulo, tendo como objetivo final a avaliação do potencial de produção de eletricidade excedente a partir da biomassa residual da cana-de-açúcar no horizonte de 2015.

Foram explicitamente considerados os seguintes fatores condicionantes à expansão do cultivo: uso da terra, aptidão do solo, propensão à erosão, fertilidade do solo, potencial de mecanização (sobretudo da colheita), disponibilidade de recursos hídricos e aptidão climática.

Considerado o conjunto de fatores associados a propensão à erosão (necessidade de práticas conservacionistas), fertilidade do solo (necessidade de fertilizantes), potencial de mecanização e aptidão climática, verifica-se que o cultivo de cana ocorre majoritariamente em áreas adequadas. A exceção diz respeito à existência de áreas tradicionais de cultivo em regiões não adequadas à mecanização da colheita.

Outro aspecto que foi analisado tendo em conta tanto as áreas tradicionais de cultivo de cana quanto as áreas nas quais há expansão do cultivo (majoritariamente à oeste do estado) é a disponibilidade de água. Infelizmente tal aspecto, de enorme importância para a atividade produtiva e para o meio ambiente, não pode ser explorado de forma adequada. Ocorre que informações do balanço "Demanda x Disponibilidade d'água" não estão disponíveis em nível municipal, o que permitiria uma análise mais detalhada e a identificação de problemas em

localidades específicas. As informações estão disponíveis para o agregado das bacias hidrográficas.

Várias áreas tradicionais de cultivo de cana-de-açúcar estão em áreas nas quais a disponibilidade d'água se encontra próxima ou já em níveis críticos, o que indica limitações para a expansão da atividade e, de certa forma, até a mesma a continuidade das atividades nos moldes atuais. A captação e o consumo d'água são significativos na atividade industrial, e não na etapa agrícola, uma vez que nas áreas de cultivo do estado não é requerida irrigação. A redução da captação e do consumo d'água na indústria requer a adoção de tecnologias de fechamento dos circuitos e de recuperação d'água.

Por outro lado, as bacias hidrográficas mais adequadas para a expansão do cultivo da cana são as do Pontal do Paranapanema, Peixe, Aguapeí, Médio Paranapanema, São José dos Dourados e Turvo Grande, justamente nas quais há concentração de projetos de novas usinas.

Quanto à geração de eletricidade excedente com biomassa residual da cana, avalia-se conservadoramente (em função da configuração tecnológica considerada para o sistema de cogeração) que o potencial em 2015 (supondo pouco mais de 320 milhões de toneladas de cana moídas) é quatro vezes maior do que a capacidade ora instalada, chegando a quase 7.000 MW.

Na dissertação dois aspectos de grande importância do ponto de vista da viabilização do potencial foram analisados: eventuais restrições associadas ao acesso à rede elétrica, e eventuais restrições associadas à baixa disponibilidade d'água. Infelizmente não foi possível explorar ambos aspectos adequadamente. Primeiro, as informações de localização das linhas de transmissão e subestações são relativamente antigas (de 2004), e não foi possível se obter informações sobre a capacidade ainda existente para conexão, isto é, quais linhas estão sobrecarregadas e quais não estão. Segundo, o procedimento de análise foi simplificado, apenas com a consideração de uma distância máxima entre o ponto de geração e o ponto de conexão, sem que fosse considerada a capacidade dos sistemas de cogeração. De qualquer forma, foi possível concluir que o potencial poderia ser reduzido a 70% do anteriormente calculado, o que indica a importância de tal aspecto para a viabilização do potencial.

No caso da disponibilidade d'água também foi necessário se fazer simplificações, em função da não existência de informações do balanço hídrico em localidades específicas. No caso das usinas localizadas em bacias críticas, o cálculo do potencial foi feito com a consideração de que sistemas de cogeração com turbinas de contra-pressão seriam construídos e operados no lugar de sistemas equivalentes, mas com turbinas de extração-condensação. A redução do potencial seria da ordem de 15% em relação ao potencial anteriormente calculado.

Em função da importância de ambos aspectos, e das limitações encontradas no estudo feito, recomenda-se que análises mais detalhadas sejam feitas, a partir de informações mais detalhadas de disponibilidade d'água em regiões específicas, e maior detalhamento das linhas de transmissão.

Também cabe a recomendação de que um banco de dados seja construído e mantido, com informações similares às obtidas e compiladas na presente dissertação, para que estudos baseados em SIG possam ser desenvolvidos de forma regular, e com maior precisão.

Finalmente, cabe observar que um objetivo secundário desta dissertação era demonstrar a relevância dos SIG em estudos de planejamento energético. Apesar das dificuldades encontradas, e das simplificações que foram feitas, é evidente que há um ganho de qualidade quando da realização de estudos de planejamento que envolvem múltiplos fatores, e quando da consideração de aspectos de grande importância geográfica.

Referências Bibliográficas

- Ahamed, T, Takigawaa, T, Koikea, M, Hossainb, MM, Huqb, MM, Faruk, MO. **Assessment of energy status for irrigation technology in Bangladesh: A GIS approach.** Energy. In print. 2006.
- Aronoff, S. **Geographical Information Systems: a management perspective.** Ottawa:WDL, 1989.
- Batzias F.A., Sidiras D.K., Spyrou E.K. **Evaluating livestock manures for biogas production: a GIS based method** Renewable Energy 30 (1161–1176) 2005.
- Barredo, **Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordenación del Territorio,** Ra-ma, Madrid, 1996.
- Bouvet, EP. **Cane-based power for export: overview and Hawaii experience.** Proc. International Conference on Energy from Sugarcane: Progress and Prospects, Hilo, Hawaii, 1991.
- Burrough, P. A.; Mcdonnell, R. A. **Principles of Geographical Information Systems.** Oxford: Oxford University Press, 1998.
- Camara, G., Davis, C.; Monteiro, A. M. V. **Introdução a ciência da Geoinformação.** S.J. dos Campos: INPE, 1999.
- Carvalho, P. C. M.; Júnior J. S. de A.; Jucá S. C.S.; Neto , M. R. de B.; Santos, M. A. dos **Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para Energias Renováveis.** I CBENS - I

Congresso Brasileiro de Energia Solar ABENS - Associação Brasileira de Energia Solar
Fortaleza, 8 a 11 de abril de 2007.

Carvalho, R. G. **O setor sucroalcooleiro em perspectiva**. Conjuntura Agropecuária :
Sucroalcooleiro. EMBRAPA, 2006.

Cheng-Dar Yue_, Shi-Sian Wang **GIS-based evaluation of multifarious local renewable
energy sources: a case study of the Chigu area of southwestern Taiwan** Energy Policy
34 (2006) 730–742.

Comaz, D. y Ruiz, E. **Fundamentos de los sistemas de información geográfica**. Ariel
Geografía, Barcelona, 1993.

CTEEP, Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista. EPTE, Empresa Paulista de
Transmissão de Energia Elétrica. **Mapa do Sistema Elétrico do Estado de São Paulo
existente e previsto até 2004**, São Paulo, 2000.

Druck, S.; Carvalho, M.S.; Câmara, G.; Monteiro, A.V.M. (eds) **Análise Espacial de Dados
Geográficos**. Brasília, EMBRAPA, 2004.

Eastman, J.R. **Decision support: decision strategy analysis. Idrisi 32 release 2: Guide to GIS
and image processing**. Worcester: Clark Labs, Clark University, 2001. v.2, 22p.

Fischer, G, Prieler, S, van Velthuisen, H. **Biomass potentials of miscanthus, willow and poplar
results and policy implications for Eastern Europe, Northern and Central Ásia**.
Biomass and Bioenergy, 28 (2005), p. 119–132.

Francisco, C. E. da S, Coelho R. M, Torres R. B, Adami S. F. **Espacialização de análise
multicriterial em SIG: prioridades para recuperação de Áreas de Preservação
Permanente**, Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis,
2007, INPE, p. 2643-2650.

- Foresman, T. W. **The history of Geographic Information Systems**. New Jersey: Prentice Hall, 1998.
- Gleriani, J.M., Barros, M.G.M., Pereira, J.L.G. , Câmara, G. **Planejamento e Realidade: Aptidão agrícola versus uso da terra no estado de São Paulo** . Anais X SBSR, Foz do Iguaçu, abril 2001 INPE p. 87-94
- Goora F. ; Davydchukb V., Ledentc J.-F. **Assessment of the potential of willow SRC plants for energy production in areas contaminated by radionuclide deposits: methodology and perspectives** Biomass and Bioenergy 21 (2001) 225–235
- Jonsson, A, Hillring, B. **Planning for increased bioenergy use—Evaluating the impact on local air quality**. Biomass and Bioenergy. In print. 2006
- Larson, E, Williams, R, Leal, MRLV. **A Review of Biomass Integrated-Gasifier/Gas Turbine Combined Cycle Technology and its Application in Sugarcane Industries, with an Analysis for Cuba. Sugar Cane Residues for Power Generation in the Sugar / Ethanol Mills In Brazil**. Energy for Sustainable Development, v. V (1), pp. -5476, 2001.
- Larson, E.D., Williams, R.H., **"Biomass-Gasifier Steam-Injected Gas Turbine Cogeneration"**. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 112, 1990, pp. 157-163.
- Llagostera, J, Walter, A. **Off-design operation of co-fired combined cycles**. Proc. 16th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, 2003. Copenhagen: Technical University of Denmark, 2003. v. 3, p. 1443-1450.
- Macedo, I. C. **Geração de energia elétrica a partir de biomassa no Brasil: situação atual, oportunidades e desenvolvimento**, Relatório para o MCT, Brasília, 2001.
- Maseraa, O, Ghilardia, A, Drigob, R, Trossero, MA. **WISDOM: A GIS-based supply demand mapping tool for woodfuel management**. Biomass and Bioenergy. In press.

Ministério da Agricultura. Secretaria de Planejamento Agrícola. **Aptidão das Terras de São Paulo**. Binagri, Brasília, 1979.

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Secretaria de Produção e Agroenergia **Plano Nacional de Agroenergia 2006-2011** 2. ed. rev. - Brasília, DF : Embrapa Informação Tecnológica, 2006.

Muselli M., Notton G., Poggi P., Louche A. **Computer-aided analysis of the integration of renewable-energy systems in remote areas using** Applied Energy 63 (1999), p. 141-160

Nastari, P. M. **Demand Forecast for Ethanol and Sugar in Brazil for Medium and Long Term**. III Conferência Internacional DATAGRO sobre Açúcar e Alcool, São Paulo, 2003.

Nord-Larsen, T. Talbot, B. **Assessment of forest-fuel resources in Denmark: technical and economic availability**. Biomass and Bioenergy, 27 (2004), p. 97–109.

Oliveira. J. G. **Perspectivas da cogeração com bagaço de cana-de-açúcar: potencial do mercado de carbono para o setor sucro-alcooleiro**. (Dissertação de Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo - USP. 159 p., 2007.

Orlando Filho., J.; Zambelo Júnior, E.; Aguajaro, R.; Rosseto, A.J. **Efeito da aplicação prolongada de vinhaça nas propriedades químicas dos solos com cana-de-açúcar**. Estudo Exploratório. STAB, v.1, p.28-33, 1983.

Ranta, T. **Logging residues from regeneration fellings for biofuels production—a GIS-based availability analysis in Finland**. Biomass and Bioenergy, 28 (2005), p.171–182.

Riviere, MP. **Power Cogeneration in Reunion Island**. Proc. International Conference on Energy from Sugarcane: Progress and Prospects, Hilo, Hawaii, 1991.

Rodrigues, M, Walter, A, Faaij, A. **“Co-firing of natural gas and biomass gas in biomass integrated gasification/combined cycle systems”**. Energy, v. 28, p. 1115-1131, 2003.

Saaty, T. **The Analytic Hierarchy Process**. McGraw-Hill, New York, 1980

- Schneider, LC, Kinzig, AP, Larson, ED, Solórzano, LA. **Method for spatially explicit calculations of potential biomass yields and assessment of land availability for biomass energy production in Northeastern Brazil.** Agriculture, Ecosystems and Environment, 84 (2001), p. 207–226.
- Scholten, H. J.; Stillwell, J. C. H. **Geographical Information Systems for Urban and Regional Planning.** Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990.
- Sendra, J. B. **Sistemas de información geográfica.** Ediciones RIALP, Madrid 1992.
- Shimabukuro, Y. E., Rudorff , B. F. T., Duarte, V. , Sugawara, L. M. Freitas, R. M., Arai, E. , Adami, M. , Lima , A. **Mapeamento da cobertura da terra do Estado de São Paulo utilizando imagens fração dos dados MODIS** Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 1839-1845.
- Spath, P. **Innovative Ways of Utilizing Biomass in a Cofiring Scenario with a Gas Turbine Integrated Combined Cycle System.** Biomass Power Milestone Completion Report. National Renewable Energy Laboratory, Golden USA, 1995.
- Ramachandra T.V. and. Shruthi B.V **Spatial mapping of renewable energy potential** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2006.
- Secretaria do Meio Ambiente, **Relatório de Qualidade Ambiental do Estado de São Paulo, 2006.**
- Unwin, D. **Introductory Spatial Analysis,** Methuen, London, 1981.
- Varela Q. G., Crudena A., Grahamb C., Puntonc B., Blaird L., Thomsond J. **A GIS/PSS planning tool for the initial grid connection assessment of renewable generation** 2006 Renewable Energy 1- 11
- Voivontas, D, Assimacopoulos, D, Koukios, EG. **Assessment of biomass potential for power production: a GIS based method.** Biomass and Bioenergy, 20 (2001), p. 101-112.

Zamboni, LM, Oliveira Jr. S, Tribess, A. **Performance Optimisation of Natural Gas and Sugar Cane Bagasse Based Cogeneration Systems** **Proceedings of the Conference ECOS2004** 17th Int. Conference on Energy-Efficient, Cost-Effective and Environmentally-Sustainable Systems and Processes, Guanajuato, 7-9 july, 2004, Vol. 3, p. 1171-1178.

Walter, A, Llagostera, J. **Feasibility analysis of co-fired combined cycles using biomass-derived gas and natural gas**. Paper submetido ao ECOS 2006, 2006a.

Walter, A, Llagostera, J. **Gas turbine integration to biomass boilers burning sugarcane trash: pre-feasibility analysis**. Paper submetido ao ECOS 2006, 2006b.

Walter, A, Llagostera, J, Ensinas, AV, Maio, DS, Reis, M, Leme, RM. **Levantamento do Potencial Nacional de Produção de Eletricidade nos Segmentos Sucro-alcooleiro, Madeireiro e em Usinas de Beneficiamento de Arroz**. Relatório de Projeto PNUD/MME, 2005, 168 p.

Sites Consultados:

CANASAT – Mapeamento da Cana via imagens de satélite de observação da terra em <http://www.dsr.inpe.br/mapdsr/> , acesso em 23/07/2006.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística em <http://www.ibge.gov.br> , acesso em 13/05/2007.

UDOP - Usinas e Destilarias do Oeste Paulista em <http://www.udop.com.br> , acesso em 03/08/2007.

UNICA - União das Indústrias Canavieiras de São Paulo em <http://www.unica.com.br>, acesso em 07/05/2007

Anexo 1

Principais dados das usinas de cana-de-açúcar analisadas nesta dissertação

Nome da Usina	Cidade	Moagem em 2006 (1000 t)	Moagem em 2015 (10 ⁶ t)	Capacidade instalada (MW)	Potência excedente (MW)	Potencial em 2006 (MW)	Potencial em 2015 (MW)	Distância mínima rede (km)
Agrest	Espírito Santo do Turvo	1.204	3,6	1,5	0	22,1	28,4	28,466
Agrijul Delos-Lopes Da Silva	Sertãozinho		0,7	0,3	0	4,6	4,6	11,231
Agro Valler - Londra	Itá		1,2	0,7	0	13,5	13,8	3,278
Água Bonita	Tatumã	411	17,0	0,5	16			19,188
Albertina	Sertãozinho	1.447	4,0	1,5	0	26,9	28,0	7,543
Alcidia	Teodoro Sampaio	1.131	4,0	1,2	1	20,2	21,6	3,009
Alcoazul	Araçatuba	1.259	7,4	2,0	4	19,5	35,3	11,937
Alcoeste	Fernandópolis	1.085	4,0	1,5	1	19,2	28,1	3,754
Alta Mogiana	São Joaquim da Barra	3.269	30,0	4,0	20	39,8	55,5	5,845
Alta Paulista - Usalpa	Junqueirópolis	920	0,0	1,5	0	19,7	32,0	9,439
Alto Alegre - Floresta	Presidente Alves	1.743	25,2	2,5	20	12,1	28,2	2,843
Andrade	Pitangueiras	2.954	7,2	3,2	0	55,9	61,2	6,579
Aralco	Sto. Antônio de Aracangu	1.897	4,8	2,5	0	35,7	48,6	23,845
Archangelo	São Pedro do Turvo				0	0,0	0,0	19,6302
Bacuri - Shiavon	Santa Cruz da Palmeira				0	0,0	0,0	4,533

Nome da Usina	Cidade	Moagem em 2006 (1000 t)	Moagem em 2015 (10⁶ t)	Capacidade instalada (MW)	Potência excedente (MW)	Potencial em 2006 (MW)	Potencial em 2015 (MW)	Distância mínima rede (km)
Barra Grande CL	Lençóis Paulista	3.350	62,9	4,0	53	8,7	22,6	5,097
Batatais	Batatais	3.146	5,5	3,5	0	61,7	69,3	8,676
Bazan	Pontal	3.517	10,2	3,6	0	64,9	66,7	8,555
Bela Vista	Pontal	2.658	2,4	3,0	0	54,4	61,7	10,804
Benalcool (J.P.)	Bento de Abreu	1.177	3,8	1,5	0	21,4	28,2	3,045
Bertolo	Pirangi	1.079	2,4	1,1	0	20,7	21,1	3,145
Bom Retiro (Cosan)	Capivari	980	3,6	1,2	1	17,3	22,0	7,084
Bonfim Corona (Cosan)	Guariba	3.814	14,8	4,5	4	66,7	81,3	4,025
Branco Peres	Adamantina	949	2,4	1,5	0	17,9	29,6	2,761
Buriti (I.BIAGI)	Buritizal	1.735	3,2	2,5	0	33,9	50,2	9,3209
Café-álcool	Cafelandia				0	0,0	0,0	13,937
Campestre	Penápolis	2.269	6,3	2,7	0	42,2	51,4	1,529
Capital - Nuporanga	Nuporanga				0	0,0	0,0	4,339
Catanduva (V.O.) - Indústria	Ariranha	3.913	9,0	4,0	0	74,6	76,5	11,335
CBA - Icem (J.P.)	Icem				0	10,2	0,0	11,2208
CBC Sebastianópolis	Sebastianópolis				0	0,0	0,0	9,917
Central Paulista (ATALLA)	Jaú		12,0	0,0	12			3,467
Centralcool	Lucélia	1.610	15,7	2,0	16		27,0	9,875
CERP EX.Galo Bravo	Ribeirão Preto				0	20,0	0,0	5,748
Cerradinho	Catanduva	3.527	79,0	3,6	69			3,767
Cevasa-Cargill	Patrocínio Paulista	1.002	4,0	1,5	0	23,5	28,0	5,807
Clealcool	Clementina	2.789	11,2	3,0	2	55,2	52,9	16,015
Ccocal - Cana	Paraguaçu Paulista	2.628	30,0	3,0	22	26,2	34,1	20,076
Colombo	Santa Adália		65,5	5,0	53	28,8	41,3	6,246
Colorado	Guaira	4.482	13,2	5,0	0	82,6	93,6	10,448
Coraci	São Pedro do Turvo				0	0,0	0,0	28,515

Nome da Usina	Cidade	Moagem em 2006 (1000 t)	Moagem em 2015 (10⁶ t)	Capacidade instalada (MW)	Potência excedente (MW)	Potencial em 2006 (MW)	Potencial em 2015 (MW)	Distância mínima rede (km)
Costa Pinto (Cosan)	Piracicaba	3.683	9,4	3,7	0	69,3	69,7	6,085
Cresciumal (Coinbra)	Leme	1.454	42,3	1,8	38			15,626
Da Barra (Cosan)	Barra Bonita	7.018	15,8	7,2	0	134,2	138,0	0,435
Da Pedra (I.BIAGI)	Serrana	4.101	40,0	4,5	28	47,6	56,1	5,184
Da Serra (COSAN)	Ibaté	1.628	15,0	1,7	10	19,8	21,3	3,2004
Dacal (Califórnia)	Parapuã	741	2,7	1,0	3		18,7	4,8408
Decasa - Caiua (Tenório)	Caiuá	808	2,4	1,0	0	14,9	19,0	10,49
Della Coleta	Bariri	1.043	2,6	1,2	0	19,7	23,0	0,731
Destivale FBA (Cosan)	Araçatuba	985	3,2	1,5	0	17,8	28,8	10,778
Diamante (Cosan)	Jaú	1.926	7,0	2,0	1	34,2	35,7	2,856
Diana	Avanhandava	818	2,4	0,9	0	15,1	15,8	1,6709
Dois Córregos (Cosan)	Dois Corregos	1.204	3,6	1,4	0	22,1	26,3	6,206
Ema (J.P.) EX. Cruzalcoool	Santo Antônio		0,0	0,0	0	0,0	0,0	26,026
Energética São José	Colina	2.136	25,0	3,0	19	20,6	39,1	0,334
Equipav - Agropav	Promissão	4.435	58,4	5,5	45	36,3	59,1	2,905
Ester	Cosmópolis	1.595	7,7	1,6	3	26,4	26,5	26,026
Ferrari	Porto Ferreira	1.238	4,0	1,7	0	22,5	32,3	0,334
Floralcoool	Florida Paulista	2.079	15,0	2,2	9	29,4	32,0	1,806
Furlan	Santa Barbara do Oeste	1.452	2,4	1,5	0	28,6	29,6	1,875
Gasa FBA (Cosan)	Andradina	1.192	4,0	2,0	1	21,5	38,7	9,499
Generalcoool (Aralcoool)	General Salgado	1.180	3,8	1,2	0	21,4	21,8	6,948
Grizzo	Jaí	397	0,8	0,4	0	7,7	8,6	7,228
Guaira	Guaira	2.371	5,6	2,7	0	45,1	52,1	3,237

Nome da Usina	Cidade	Moagem em 2006 (1000 t)	Moagem em 2015 (10 ⁶ t)	Capacidade instalada (MW)	Potência excedente (MW)	Potencial em 2006 (MW)	Potencial em 2015 (MW)	Distância mínima rede (km)
Guarani - Olímpia - Agrícola	Olímpia		30,0	5,0	18	56,6	76,8	5,636
Guarani - Severinia	Severinia	2.168	8,2	2,5	2	38,1	45,2	1,151
Guaricanga	Presidente Alves	671	1,6	1,0	0	12,7	19,8	9,138
Iaçanga	Iacanga		12,0	2,5	12		41,4	3,822
Ibirá (I.Biagi)	Santa Rosa do Viterbo	1.167	8,0	1,2	5	17,0	17,7	0,999
Ipaussu FBA (Cosan)	Ipaussu	1.877	6,0	2,0	1	34,1	36,7	9,146
Ipiranga (Titotto)	Descalvado	1.074	2,4	1,1	0	20,6	21,1	15,312
Iracema (Itá)	Itá	2.541			0	8,5	0,0	0,896
Iracema (Ometto)	Iracemápolis		14,0	2,6	7	40,3	41,6	1,591
Irmãos Melo	Ribeirão do Sul		0,0	0,0	0	0,0	0,0	14,734
Itaiquara	Tapiratiba	590	1,2	0,6	0	11,4	11,6	19,579
Itajobi - Destil	Marapoama		2,0	1,0	2		19,4	3,185
Jardest	Jardinópolis	1.340	4,0	1,5	0	24,6	28,0	16,654
Java	Boa Esperança do Sul				0	0,0	0,0	6,723
Junqueira (Cosan)	Igarapava		7,2	2,7	0	50,2	50,5	12,201
Macatuba	Macatuba		0,0	0,4	0	74,1	7,5	2,6706
Malosso	Itápolis		1,2	0,5	0	7,0	8,4	16,684
Maluf (Dedini) EX.Dulcini	Santo Antônio da Posse		1,9	0,3	2		3,7	0,264
Mandu	Guará	1.818	25,0	2,0	20	13,9	17,7	1,632
Maringá (Din)	Araraquara		8,0	2,0	3	30,4	34,7	15,272
MB	Morro Agudo	2.607	9,4	3,0	2	46,3	54,7	15,417
Moema	Orindiuva	4.408	24,0	4,5	11	70,2	72,1	18,564
Momesso	Barra Bonita				0	0,0	0,0	1,59
Monterey (Ruelle)	Ubarana		0,0	0,0	0	0,0	0,0	0,556
Moreno	Luís Antônio	3.054	6,9	3,5	0	58,4	67,9	9,024

Nome da Usina	Cidade	Moagem em 2006 (1000 t)	Moagem em 2015 (10 ⁶ t)	Capacidade instalada (MW)	Potência excedente (MW)	Potencial em 2006 (MW)	Potencial em 2015 (MW)	Distância mínima rede (km)
Muller	Porto Ferreira				0	0,0	0,0	18,765
Mundial (cosan)	Mirandópolis	878	0,0	2,0	0	18,8	42,7	9,024
N. Sra. Ap. BC (Carolo)	Pontal	2.078	8,0	2,3	2	36,4	41,1	3,481
N. Sra. Ap. V.O. (V.O.)	Itapira		5,8	1,5	2	23,3	26,2	3,729
Narandiba (COCAL)	Narandiba		0,0	0,0	0	0,0	0,0	10,104
Nardini	Vista Alegre do Alto	2.309	21,4	2,5	15	27,9	32,0	3,602
Nova América - Tarumã Agr	Tarumã	2.922	24,0	3,5	15	38,4	50,8	18,456
Nova Moreno	Monte Aprazível		0,0	3,5	0	0,0	74,8	10,695
Nova União - St Lidia	Serrana	1380	9,2	1,5	5	20,3	22,8	5,593
Oeste Paulista (Petribu)	Monte Aprazível		2,8	1,0	1	11,4	18,6	4,988
Ouro Verde	Canitar		0,0	0,0	0	0,0	0,0	1,083
Ouroeste (Moema)	Ouroeste		0,0	0,0	0	0,0	0,0	0,696
Paraíso	Brotas	1.049	3,7	1,2	1	18,7	21,9	4,585
Paranapanema	Narandiba		0,0	1,0	0	2,9	21,4	2,655
Parálcool	Paraguaçu Paulista	1.135	3,6	1,0	1	16,1	17,8	27,366
Pau d'álho	Ibirarema	1.096	2,4	1,2	0	21,0	23,2	1,415
Pederneiras	Tietê	442	2,4	0,5	1	7,0	8,3	11,881
Petribu Paulista (Petribu)	Sebastinópolis do Sul	1.097	0,0	2,0	0	0,0	42,7	5,332
Pignata	Sertãozinho				0		0,0	1,117
Pioneiros II (Crystalsev)	Sud Menucci	1.374	42,0	1,5	38			18,302
Pioneiros II (Crystalsev)	Ilha Solteira		0,0	0,0	0	0,0	0,0	8,732
Pitangueiras	Pitangueiras	1.589	15,0	2,0	10	18,9	27,7	7,235
Pyles	Platina	264	0,3	0,3	0	5,4	5,7	3,699
Quatá (Z.L.)	Quatá	1.527	6,4	2,5	2	26,2	47,0	5,243
Rafard (Cosan)	Rafard	2.346	10,2	2,5	3	39,9	43,2	1,555

Nome da Usina	Cidade	Moagem em 2006 (1000 t)	Moagem em 2015 (10 ⁶ t)	Capacidade instalada (MW)	Potência excedente (MW)	Potencial em 2006 (MW)	Potencial em 2015 (MW)	Distância mínima rede (km)
Ruette	Paraíso		28,0	1,6	23	7,0	6,2	1,795
São Carlos (Coimbra)	Jaboticabal		6,5	2,0	7		36,2	4,204
São Domingos	Catanduva	1.919	8,0	2,2	2	33,0	39,0	3,818
São Francisco (A.Balbo)	Sertãozinho	1.168	6,7	1,3	5	9,6	21,0	6,885
São Francisco (Cosan)	Elias Fausto	1.465	4,2	1,5	0	27,1	27,8	1,616
São Geraldo	Santa Adélia				0	0,0	0,0	11,878
São Geraldo junto com St. Elisa	Sertãozinho				0	0,0	0,0	0,104
São João (Dedini)	São João da Boa Vista	3.095	7,0	3,2	0	59,1	61,4	1,4602
São João (USJ)	Araras	3.200	12,0	3,5	3	56,4	62,8	2,964
São José da Estiva (De Biasi)	Novo Horizonte	2.173	19,5	3,0	13	26,9	44,6	10,585
São José SA (Farias)	Rio das Pedras		2,4	1,2	0	19,4	23,2	3,548
São José ZL	Macatuba		24,8	4,0	24		60,7	2,568
São Luís AA (Dedini)	Pirassununga	1.340	10,0	2,0	6	18,6	32,7	0,684
São Luís As	Ourinhos	2.157	4,8	2,0	0	41,3	37,9	7,123
São Manoel	São Manoel	2.021	4,4	2,5	0	38,8	49,0	1,991
São Martinho (Ometto)	Pradópolis	6.735	19,0	7,0	0	124,9	130,6	0,388
Santa Adália (Bellodi)	Jaboticabal	2.016	42,0	2,2	36	1,1	5,0	1,271
Santa Candida (Tonon)	Bocaina	2.918	33,6	3,0	25	28,7	30,5	5,789
Santa Clara	Jaboticabal				0	0,0	0,0	4,029
Santa Cruz	Américo Brasiliense	3.277	11,4	3,5	2	58,6	63,4	18,106
Santa Elisa (Crystalev)	Sertãozinho	5.960	58,0	6,0	41	69,3	70,2	0,395
Santa Fany	Regente Feijó	700	1,2	1,0	0	13,8	20,2	4,343

Nome da Usina	Cidade	Moagem em 2006 (1000 t)	Moagem em 2015 (10⁶ t)	Capacidade instalada (MW)	Potência excedente (MW)	Potencial em 2006 (MW)	Potencial em 2015 (MW)	Distância mínima rede (km)
Santa Fé	Nova Europa	1.705	4,8	2,0	0	31,6	37,9	11,403
Santa Helena (Cosan)	Rio das Pedras	1.881	3,2	2,0	0	37,0	39,6	1,103
Santa Heminira junto com Pau d'alho	Ibirarema				0	0,0	0,0	5,499
Santa Inês junto com Viralcool	Sertãozinho	532	1,2	0,6	0	10,2	10,6	1,212
Santa Isabel	Novo Horizonte	1.676	5,0	1,8	0	30,8	33,5	12,895
Santa Lucia	Araras	1.041	4,4	1,1	1	17,8	19,1	0,485
Santa Luiza	Motuca	1.567	6,0	1,7	1	27,5	30,3	7,777
Santa Lídia junto com Nova União	Ribeirão Preto				0	0,0	0,0	0,6604
Santa Maria	Cerquilha	1.039	3,8	1,5	1	18,4	28,2	0,081
Santa Maria de Lençóis	Paulista				0	0,0	0,0	6,632
Santa Rita (Dinã)	Santa Rita do Passa Quatro	2.238	5,2	2,3	0	42,6	43,9	16,143
Santa Rita de Cássia	Alto Alegre				0	0,0	0,0	11,508
Santa Rosa	Boituva	664	2,8	1,0	1	11,4	18,6	9,457
Santo Alexandre (Titoto)	Mococa	1.309	0,0	1,5	0	28,0	32,0	12,765
Santo Antonio (A.Balbo)	Sertãozinho	2.193	26,4	2,5	20	20,4	27,0	3,923
Schiavon - Bellão	Santa Cruz das Palmeiras				0	0,0	0,0	2,524
Taboão	Pirassununga				0	3,9	0,0	2,831
Tamoio - Crona (Cosan)	Araraquara	982	3,6	1,3	1	17,4	24,2	3,012
Unialcol	Guararapes	2.129	3,6	2,2	0	41,9	43,4	22,283
Univalen FBA (Cosan)	Valparaíso	2.050	8,0	2,2	2	35,8	39,0	2,9206

Nome da Usina	Cidade	Moagem em 2006 (1000 t)	Moagem em 2015 (10⁶ t)	Capacidade instalada (MW)	Potência excedente (MW)	Potencial em 2006 (MW)	Potencial em 2015 (MW)	Distância mínima rede (km)
Vale do Rosário	Morro Agudo	5.493	93,0	5,5	77	24,4	24,5	9,305
Vertente	Guaraci	1.500	8,0	2,0	4	24,1	34,7	9,073
Virálcool (Toniello)	Pitangueiras	2.230	20,0	2,3	13	27,7	29,1	0,667
Vista Alegre (T.A.)	Itapetininga	622	1,2	1,2	0	12,1	24,4	8,828
XX	Pongai				0	0,0	0,0	22,252
Zanin	Araraquara	2.246	8,0	2,5	1	40,0	45,4	3,641