

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

**EXPANSÃO DA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR CONFRONTADA COM O
ZONEAMENTO AGROAMBIENTAL UTILIZANDO ANÁLISE SUPERVISIONADA
DE IMAGEM**

THIAGO SANTOS TEÓFILO

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da Unesp - Campus de Botucatu,
para obtenção do título de Mestre em Agronomia
(Energia na Agricultura)

BOTUCATU – SP
Novembro - 2012

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

**EXPANSÃO DA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR CONFRONTADA COM O
ZONEAMENTO AGROAMBIENTAL UTILIZANDO ANÁLISE SUPERVISIONADA
DE IMAGEM**

THIAGO SANTOS TEÓFILO

Orientador: Prof. Dra. Célia Regina Lopes Zimback

Co-orientador: Prof. Dr. Zacarias Xavier de Barros

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da Unesp - Campus de Botucatu,
para obtenção do título de Mestre em Agronomia
(Energia na Agricultura)

BOTUCATU – SP
Novembro – 2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

T314e Teófilo, Thiago Santos, 1984-
Expansão da cultura da cana-de-açúcar confrontada com o zoneamento agroambiental utilizando análise supervisionada de imagem / Thiago Santos Teófilo.- Botucatu : [s.n.], 2012
vi, 69 f. : il., color., tabs.

Dissertação (Mestrado)- Universidade Estadual Paulista Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2012
Orientador: Célia Regina Lopes Zimback
Co-Orientador: Zacarias Xavier de Barros
Inclui bibliografia

1. Cana-de-açúcar. 2. Landsat (Satélites). 3. Zoneamento agroambiental. 4. Sensoriamento remoto. I. Zimback, Célia Regina Lopes. II. Barros, Zacarias Xavier de. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agronômicas. IV. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

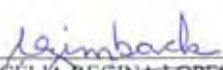
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "EXPANSÃO DA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR CONFRONTADA
COM O ZONEAMENTO AGROAMBIENTAL UTILIZANDO ANÁLISE
SUPERVISIONADA DE IMAGEM"

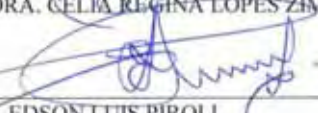
ALUNO: THIAGO SANTOS TEÓFILO

ORIENTADOR: PROFA. DRA. CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK

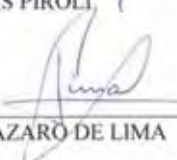
Aprovado pela Comissão Examinadora



PROFA. DRA. CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK



PROF. DR. EDSON LUIS PIROLI



PROF. DR. SERGIO LAZARO DE LIMA

Data da Realização: 26 de novembro de 2012.

Noventa por cento do sucesso se baseia simplesmente em insistir.
(Woody Allen)

Todo mundo quer ir com você na limusine, mas o importante é ter alguém disposto a lhe acompanhar no ônibus quando a limusine quebrar.
(Oprah Winfrey)

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela vida, saúde, graças concedidas e por me permitir alcançar mais este objetivo.

Aos meus pais **Miguel e Bernardete**, meus mestres, meus exemplos de vida.

À minha irmã **Mariana** pela força para que eu cursasse a pós-graduação.

À **Thais Santiago de Freitas** pela compreensão, estímulo, pelo companheirismo, pelo grande apoio nos bons e nos maus momentos e por toda a ajuda para a realização deste trabalho.

À Universidade Estadual Paulista (UNESP) e ao Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura pela seriedade, qualidade e competência no ensino.

À minha orientadora **Profª. Drª. Célia Regina Lopes Zimback** pela confiança, apoio e compreensão dedicados e pela amizade.

Ao meu co-orientador **Prof. Dr. Zacarias Xavier de Barros**, pela agradável convivência e amizade, pela confiança e por toda a ajuda prestada.

Aos professores membros da banca examinadora desta dissertação de mestrado, pelo aceite em participar da mesma e pelas suas contribuições ao trabalho.

Aos integrantes do Grupo de Estudos e Pesquisas Agrárias Georreferenciadas - GEPAG, pelos ensinamentos recebidos, pela saudável e cordial amizade. Em especial ao **Julio Cesar Demarchi**, à **Ana Paula Barbosa** e ao **Anderson Antonio da Conceição Sartori** por todo o auxílio, sugestões e contribuições ao trabalho.

Aos funcionários da biblioteca e às secretárias da Seção de Pós Graduação, pela atenção e dedicação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio e ajuda financeira, fundamentais para a realização deste trabalho.

E a todos que de maneira direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS.....	VIII
LISTA DE FIGURAS.....	IX
1 RESUMO.....	1
2 SUMMARY.....	3
3 INTRODUÇÃO.....	5
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
4.1 Cana-de-açúcar.....	8
4.1.1 Fisiologia.....	8
4.1.2 Importância econômica.....	9
4.2 Zoneamento Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro.....	11
4.3 Sensoriamento Remoto.....	20
4.3.1 Definição	20
4.3.2 Sensoriamento remoto aplicado à cultura da cana-de-açúcar.....	21
4.4 Geoprocessamento.....	22
4.5 Sistema de Informação Geográfica – SIG.....	23
4.5.1 O Sistema de Informações Geográficas Idrisi.....	25
4.6 Imagens de satélite.....	26
4.6.1 Imagens LANDSAT.....	26
4.7 Processamento digital de imagens.....	27
4.7.1 Etapas do processamento de imagens.....	28
4.7.1.1 Pré-Processamento.....	28
4.7.1.2 Realce.....	30
4.7.1.3 Classificação.....	30
4.7.1.3.1 Classificação Supervisionada.....	31
4.7.1.3.2 Classificação Não Supervisionada.....	32

4.7.1.3.3 Classificação Híbrida.....	32
4.7.2 Avaliação da Classificação.....	33
4.7.2.1 Matriz de erro.....	33
4.7.2.2 Coeficiente Kappa.....	34
5 MATERIAL E MÉTODOS.....	36
5.1 Material.....	36
5.1.1 Área de estudo.....	36
5.1.2 Equipamentos.....	38
5.1.3 Cartas Planialtimétricas.....	38
5.1.4 Imagens.....	38
5.2 Metodologia.....	39
5.2.1 Mapeamento da área.....	40
5.2.2 Processamento Digital das Imagens.....	40
5.2.3 Mapa de ocupação do solo com cana-de-açúcar.....	41
5.2.4 Validação da Classificação.....	42
5.2.5 Mapa de Zoneamento Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro.....	43
5.2.6 Mapa de conflito entre o Zoneamento Agroambiental e a área cultivada com cana-de-açúcar.....	45
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
6.1 Recorte das Imagens LANDSAT-5 TM em composição colorida RGB 543.....	46
6.2 Mapas de ocupação do solo com cana-de-açúcar.....	49
6.3 Avaliação da classificação dos mapas de ocupação do solo com cana-de-açúcar.....	52
6.4 Análise do Zoneamento Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro.....	54
6.5 Zoneamento Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro x ocupação do solo com cana-de-açúcar.....	58
7 CONCLUSÃO.....	63
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64

LISTAS DE TABELAS

	Página
Tabela 1. Características das bandas espectrais do sensor TM, do satélite Landsat 5.....	27
Tabela 2. Qualidade da classificação associada aos valores da estatística Kappa.....	35
Tabela 3. Cartas que compõem o Município de São Manuel.....	38
Tabela 4. Imagens Landsat 5 TM com órbita/ponto e datas de passagem.....	39
Tabela 5. Matriz de erro para classificação de 2002.....	53
Tabela 6. Matriz de erro para classificação de 2011.....	54
Tabela 7. Área cultivada com cana-de-açúcar em relação ao ZAA.....	60

LISTAS DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Mapa de Aptidão edafoclimática para cultura de cana-de-açúcar.....	13
Figura 2. Mapa de área de restrições à colheita mecânica.....	14
Figura 3. Mapa de qualidade do ar nas Bacias Aéreas.....	15
Figura 4. Mapa de disponibilidade de águas superficiais e vulnerabilidade das águas subterrâneas.....	16
Figura 5. Mapa das Unidade de Conservação de Proteção Integral (existentes e indicadas/ BIOTA).....	17
Figura 6. Mapa de Prioridade de Incremento da Biodiversidade (conectividade/ BIOTA).....	18
Figura 7. Mapa do Zoneamento Agroambiental para o Setor Sucroalcooleiro.....	19
Figura 8. Processo de aquisição de dados de sensoriamento remoto.....	21
Figura 9. Representação de dados nos formatos matricial e vetorial.....	25
Figura 10. Etapas do processamento de imagens digitais em sensoriamento remoto.....	28
Figura 11. Mapa de localização do município de São Manuel.....	37
Figura 12. Fluxograma metodológico do estudo.....	39
Figura 13: Mapa de Zoneamento Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro do município de São Manuel.....	44
Figura 14: Recorte (delimitando o município de São Manuel) da imagem LANDSAT-5 TM em composição colorida RGB 543, de 03/10/2002.....	47
Figura 15: Recorte (delimitando o município de São Manuel) da imagem LANDSAT-5 TM em composição colorida RGB 543, de 15/06/2011.....	48
Figura 16: Mapa das áreas cultivadas com cana-de-açúcar no município de São Manuel em 2002.....	50
Figura 17: Mapa das áreas cultivadas com cana-de-açúcar no município de São Manuel em 2011.....	51
Figura 18: Mapa das áreas cultivadas, em 2002, com cana-de-açúcar em relação ao Zoneamento Agroambiental.....	59
Figura 19: Mapa das áreas cultivadas, em 2011, com cana-de-açúcar em relação ao Zoneamento Agroambiental.....	61

1 RESUMO

A cultura da cana-de-açúcar tem significativa importância econômica no estado de São Paulo. Apesar do Estado ser o maior produtor de cana-de-açúcar do país, está ocorrendo um aumento das áreas cultivadas com cana-de-açúcar, que incorporam áreas cultivadas por outras lavouras. Entretanto, a expansão desordenada das áreas cultivadas com cana-de-açúcar pode acarretar diversos problemas ambientais. Nesse sentido visando ordenar a ocupação do solo e orientar o licenciamento ambiental foi elaborado o Mapa de Zoneamento Agroambiental para o setor sucroalcooleiro paulista, regulamentado pela Resolução Conjunta SMA/SAA nº 04/2008 e foi alterada pela Resolução Conjunta SMA/SAA nº 06/2009. Com o uso de imagens de satélite em conjunto com Sistema de Informação Geográfica (SIG) informações precisas sobre a expansão da cultura podem ser obtidas com maior rapidez, o que pode ser um grande diferencial na elaboração de estratégias de manejo, armazenamento, comercialização, no suporte de decisões governamentais e para fiscalização das áreas com cana-de-açúcar pelos órgãos ambientais. Neste trabalho foi analisado o conflito da expansão das áreas cultivadas com a cultura da cana-de-açúcar e o Zoneamento Agroambiental do Estado de São Paulo, utilizando técnicas de geoprocessamento para verificação dos impactos ambientais. A área de estudo foi o município de São Manuel/SP. O SIG – Idrisi 17 (Selva) foi

utilizado para o processamento das imagens de satélite Landsat – 5 TM, órbita/ponto 220/76, passagens de 03.10.2002 e 15.06.2011. O trabalho tem por objetivo verificar a expansão da cultura da cana-de-açúcar e se a mesma está ocorrendo de acordo com o que foi regulamentado pela Resolução Conjunta SMA/SAA nº 06/2009, por meio da sobreposição dos mapas de Zoneamento Agroambiental e do mapa de ocupação do solo pela cultura da cana-de-açúcar. O trabalho constatou que houve uma expansão da área cultivada com cana-de-açúcar no município de São Manuel nos dois períodos de estudo. Este crescimento foi de 1.326,74 ha em áreas adequadas para o cultivo da cultura, de 667,53 ha em áreas adequadas com limitação ambiental, de 2.558,25 ha em áreas adequadas com restrição ambiental e de 63,62 ha em áreas inadequadas para o cultivo da cultura.

Palavras-chave: imagens Landsat, Zoneamento Agroambiental do Estado de São Paulo, classificação supervisionada.

THE EXPANSION OF SUGARCANE CROPS CONFRONTED WITH THE AGRO-ENVIRONMENTAL ZONING USING SUPERVISED CLASSIFICATION OF IMAGE. Botucatu, 2012. 69p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: THIAGO SANTOS TEÓFILO

Adviser: Ph. D. CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK

Co-Adviser: Ph. D. ZACARIAS XAVIER DE BARROS

2 SUMMARY

The cultivation of sugarcane has significant economic importance in Sao Paulo state. Despite the state be the leading producer of sugarcane in the country, the areas cultivated with sugarcane still increasing, incorporating areas cultivated with other crops. However, the disorderly expansion of areas cultivated with sugarcane may lead to several environmental problems. The Agro-environmental Zoning Map of sugarcane in São Paulo was elaborated to order the occupation of the land and guide the environmental licensing, it was regulated by Resolution SMA/SAA nº04/2008 and amended by Resolution SMA/SAA nº 06/2009. Accurate information about the expansion of sugarcane crops can be quickly obtained with the use of satellite imagery associated with Geographic Information System (GIS). It is a huge advantage for developing strategies for the management, storage and marketing of sugarcane, to support government decisions and to assist the inspection in sugarcane crops by environmental agencies. In this study was analyzed the conflict between of the expansion of sugarcane crops and the sugarcane agro-environmental zoning in São Paulo, using geoprocessing techniques for verification of environmental impacts. The study area was the city of São Manuel, located in central-western of Sao Paulo state. It was used the GIS - Idrisi 17 (Selva) - for processing the images from Landsat - 5 TM satellite, (path-row:220/76), acquired in 03rd Oct 2002 and in 15th Jul 2011. The aim of this study is verify the expansion of sugarcane crops and if it is occurring in accordance with what has been regulated by Resolution SMA/SAA nº06/2009, by overlaying the Agro-environmental zoning map and the land use map with sugarcane. In this study, it was observed that there was an expansion of the area planted with sugarcane in São Manuel in both study's periods. The expansion was of

1326.74 ha in appropriate areas for the cultivation of the culture, it was of 667.53 ha in appropriate areas with environmental limitation, it was of 2558.25 ha in appropriate areas with environmental restrictions and it was of 63.62 ha in inadequate areas for cultivation of the culture.

Key-words: Landsat images, Agro-environmental zoning in São Paulo state, supervised classification

3 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) é uma gramínea que possui grande importância econômica para o Brasil, uma vez que o país é o maior produtor no complexo sucroalcooleiro, exercendo liderança em todos os segmentos: cana-de-açúcar, açúcar e álcool. Além disso, a tendência da indústria sucroalcooleira é de grande crescimento nos próximos anos em função da necessidade mundial do uso de fontes renováveis de energia e matérias primas industriais.

São Paulo destaca-se como maior estado produtor, o que faz com que a cadeia de produção de cana-de-açúcar no estado seja um dos principais setores do agronegócio paulista. No mesmo sentido que as indústrias sucroalcooleiras, as áreas com cana-de-açúcar do Estado estão em forte crescimento incorporando áreas de outras lavouras e, principalmente, de pastagens.

Entretanto, essa expansão da cana-de-açúcar pode acarretar diversos problemas ambientais, tais como: compactação do solo, erosão, deterioração dos recursos hídricos, destruição de matas ciliares, contaminação de solo e água por fertilizantes, problemas

relacionados às queimadas, caso a expansão ocorra de maneira desordenada e sem nenhum controle dos órgãos ambientais federais, estaduais e municipais.

Nesse sentido, foi elaborado pela Secretaria de Meio Ambiente em parceria com a Secretaria da Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo o Zoneamento Agroambiental para o setor sucroalcooleiro paulista, que foi regulamentado pela Resolução Conjunta SMA/SAA nº 04, de 18 de dezembro de 2008, que visa ordenar a ocupação do solo e orientar o licenciamento de empreendimentos sucroalcooleiros e foi alterada pela Resolução Conjunta SMA/SAA nº 06, de 25 de setembro de 2009.

Pelo fato das áreas cultivadas com cana-de-açúcar tenderem a ser cada vez maiores e em maior quantidade, é necessária a utilização de técnicas que disponibilizem informações precisas sobre a cultura com maior rapidez, pois o momento de obtenção dessas informações pode ser o diferencial na elaboração de estratégias de manejo, armazenamento, comercialização, no suporte de decisões governamentais e para fiscalização dos órgãos ambientais.

Dessa maneira, o uso de imagens de satélites aliadas aos sistemas de informação geográfica (SIG) são fundamentais, pois permitem que grandes quantidades de dados georreferenciados sejam analisados constantemente, possibilitando a aquisição de informações para o mapeamento do uso do solo em um menor tempo. O que possibilita maior eficácia no planejamento regional das terras.

Apesar do benefício proporcionado pelo uso dessa tecnologia, muitas vezes o analista que opera o SIG tem limitado conhecimento sobre a área de estudo, o que faz com que os resultados registrados por ele sejam bastante subjetivos ou ainda que a identificação dos objetos representados na superfície demande grande quantidade de esforço e tempo.

Dessa forma, o processo de classificação de imagens é de grande importância na extração de informações de imagens de Sensoriamento Remoto, pois, ele permite o mapeamento de áreas da superfície terrestre, através do reconhecimento de padrões espectrais. Existem diversos métodos de classificação de imagens, que diferem pela presença ou não de uma fase de treinamento onde o analista interage com o computador.

A classificação supervisionada é o procedimento mais utilizado para análise quantitativa de dados de imagens de sensoriamento remoto. Entre os métodos

estatísticos de classificação supervisionada tem destaque o da Máxima Verossimilhança (MAXVER), o qual utilizando parâmetros estatísticos considera a ponderação das distâncias entre médias dos níveis digitais das classes. Para utilizá-lo deve ser fornecido um conjunto de dados ou amostras que representem bem as classes de interesse para que o classificador possa definir: um diagrama de dispersão em torno da média e a distribuição das probabilidades dos *pixels* pertencerem à determinada classe.

O objetivo do presente trabalho foi verificar a expansão da cultura da cana-de-açúcar e se está ocorrendo de acordo com o que foi regulamentado pela Resolução Conjunta SMA/SAA nº 06/2009, por meio da sobreposição dos mapas de Zoneamento Agroambiental e do mapa de ocupação do solo pela cultura da cana-de-açúcar, utilizando análise supervisionada de imagens.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Cana-de-açúcar

4.1.1 Fisiologia

A cana-de-açúcar é uma espécie alógama, pertencente à família Poaceae, gênero *Saccharum* e é considerada originária da grande região da Nova Guiné e Indonésia, no Sudeste Asiático (DANIELS; ROACH, 1987). Inicialmente a espécie *Saccharum officinarum* (L.) era a principal espécie cultivada, entretanto esta espécie passou a sofrer severos danos provocados por doenças e dificuldades de adaptação ecológica. A expansão da cultura pelo mundo foi possível com programas de melhoramento genético, os quais produziram híbridos interespecíficos, resistentes e melhores adaptados a diversas condições ambientais (FIGUEIREDO et al., 1995; MATSUOKA et al., 1999). A cana-de-açúcar é cultivada em altitudes que variam do nível do mar a 1000 m de altitude e numa ampla faixa latitudinal, dos 35° N a 30° S (MAGALHÃES, 1987).

Para Afonsi et al. (1987), a temperatura, a luz (intensidade) e a disponibilidade de água e de nutrientes são os fatores ambientais que afetam de maneira mais marcante a produção de cana-de-açúcar. Segundo, Magalhães (1987) a cultura desenvolve-se bem em regiões de clima quente, com temperatura oscilando entre 16°C e 33°C. Entretanto, a taxa de alongamento dos colmos é reduzida e ocorre o acúmulo de sacarose na ocorrência de temperaturas inferiores a 21°C.

Segundo Fortes (2003), a cana-de-açúcar apresenta uma grande capacidade fotossintética e por ser uma planta com metabolismo fotossintético C4 responde melhor a elevadas intensidades luminosas. A cultura apresenta colmos finos e longos, quando se desenvolve sob condições de baixa luminosidade, o que provoca uma diminuição no acúmulo de matéria seca (LUCCHESI, 1995).

O plantio de cana-de-açúcar na região Centro Sul do Brasil, no geral, é realizado em duas épocas. O plantio realizado em setembro-outubro que permite a colheita da cana-de-açúcar com aproximadamente 11 a 14 meses - conhecido como “cana-de-açúcar de ano”. Já o plantio realizado em janeiro-março permite a colheita da cana-de-açúcar com aproximadamente 15 a 20 meses - conhecido como “cana-de-açúcar de ano e meio” (BARBIERI; VILLA NOVA, 1977).

Segundo Paranhos (1987) e Lingle (1998), a cultura da cana-de-açúcar tem como principais características um rápido crescimento, reprodução abundante e aproveitamento econômico de quase toda a planta. A produção da sacarose e de produtos como o etanol e o ácido acético é realizada por meio do suco da cana-de-açúcar. Como aditivo de ração animal e para produção de bebidas são formas de como é utilizado o bagaço da cana-de-açúcar. A energia utilizada nas usinas de moagem da cana-de-açúcar pode ser gerada das fibras remanescentes do bagaço, pós-extração do suco.

4.1.2 Importância econômica

É muito importante para o Brasil a cultura da cana-de-açúcar. Em 1532 os Portugueses introduziram esta cultura no país, o que trouxe grandes implicações na economia mundial, pois foi criado um modelo de produção denominado plantation – exploração intensiva de grandes áreas (premissa do colonialismo) – que posteriormente foi

copiado em territórios ingleses, holandeses e franceses por todo o Novo Mundo - tropical e subtropical - (EDGERTON, 1958; ALEXANDER, 1973; DEAN, 1996).

O Brasil tornou-se o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e de álcool no final do século XX (BASALDI et al., 1996). Um dos maiores motivos para obtenção desta liderança foi a criação de um programa governamental de incentivo à produção de álcool combustível – Proálcool - em 1975 (LEITE, 1987). Em decorrência das crises energéticas mundiais que ocorreram nesta década. Isto proporcionou ao Brasil o pioneirismo no desenvolvimento da tecnologia e logística na produção de etanol. Entretanto, no final da década de 1980, com a baixa do preço do petróleo, a alta do preço do açúcar e a falta de alguns ajustes na tecnologia dos motores dos veículos que utilizavam álcool houve uma queda no consumo de etanol. O novo ciclo no plantio da cana-de-açúcar para obtenção de álcool combustível ocorreu em 2003 com a introdução dos veículos com duplo combustível (flex) no mercado e na busca de combustíveis sustentáveis (OLIVETTE et al., 2010).

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, a estimativa de área colhida na safra 2012/13 é de 8.527,8 mil hectares, um incremento de 2,10% em relação à safra 2011/12 com previsão do total de cana-de-açúcar moída de 596,6 milhões de toneladas. A taxa de crescimento da produção de cana-de-açúcar no país foi de 6,5% na safra 2012/13 em relação à safra 2011/12. O Estado de São Paulo destaca-se como o principal Estado produtor. Na safra 2012/13 este Estado tem uma estimativa de produção de 323,124 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, o que deve representar 54,16% da produção do Brasil e 60,90% da produção da região Centro-Sul (CONAB, 2012).

Um dos principais setores do agronegócio paulista é a cadeia de produção de cana-de-açúcar, a qual incorporou área de outras lavouras e, principalmente, de pastagens (CAMARGO et al., 2008). A notável expansão da produção da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo concomitante com o significativo crescimento na instalação de novas unidades industriais de açúcar e álcool ocorre devido às condições favoráveis vividas pelo mercado internacional de açúcar e, principalmente, pelo aumento da demanda por etanol (CAMARGO Jr; TONETO Jr, 2009).

De acordo com Araldi (2010), entre as principais culturas geradoras de renda e empregos destaca-se a cana-de-açúcar. Em função da necessidade mundial do uso de fontes renováveis de energia e de matérias primas a indústria sucroalcooleira tem tendência de

grande crescimento nos próximos anos. Além do açúcar e álcool, espera-se que as unidades industriais destinadas à transformação da cana-de-açúcar produzam energia, créditos de carbono e um grande número de matérias primas industriais.

Apesar de toda a importância da cultura, Picoli (2006) afirmou que as estimativas de produtividade em usinas de cana-de-açúcar são feitas por métodos tradicionais, que não são precisos e que requerem grande quantidade de tempo, sendo de modo geral realizadas por técnicos que percorrem os canaviais, observando o desenvolvimento da cana-de-açúcar, agregando ao seu cálculo conhecimentos pessoais sobre a área cultivada e resultados registrados em safras anteriores. Como essa maneira de estimar a produtividade é subjetiva, pode ser tendenciosa e não permite uma análise do erro, sendo dessa forma passível de manipulação. Com este cenário, para que sejam executadas medidas para favorecer todo o processo produtivo, da infraestrutura até a comercialização é requisito fundamental a elaboração de estatísticas confiáveis sobre as safras agrícolas (RIZZI; RUDORFF, 2003).

As imagens de satélite de sensoriamento remoto, por propiciar o acompanhamento e o desenvolvimento da cultura ao longo do tempo, previsão de safra, determinação de novas áreas de cultivo, determinação da quantidade e da localização da área cultivada, entre outras possibilidades, tornaram-se ferramentas essenciais para o monitoramento agrícola (AGUIAR et al., 2010). Afinal, segundo Novo (2008), a escolha da cultura a ser plantada, sua comercialização e preço no mercado futuro pode ser afetada pelo conhecimento antecipado e previsão das safras agrícolas.

4.2 Zoneamento Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro

Em 18 de setembro de 2008 o Governo do Estado de São Paulo, por meio de uma parceria entre as Secretarias do Meio Ambiente e de Agricultura e Abastecimento, disponibilizou para a sociedade o Zoneamento Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro no Estado de São Paulo (ZAA), cujo principal objetivo é disciplinar e organizar a expansão e ocupação do solo pelo setor sucroenergético, além de subsidiar a elaboração de políticas públicas voltadas para as questões relacionadas ao setor, este Zoneamento foi alterado em 24 de setembro de 2009. Com a utilização de bases de dados sobre condições climáticas, qualidade do ar, relevo, solo, disponibilidade e qualidade de

águas, áreas de proteção ambiental e unidades de conservação existentes e indicadas, e fragmentos de manutenção da conectividade foi elaborado um único mapa indicando áreas adequadas e inadequadas para o cultivo de cana-de-açúcar, a partir do qual pode ser observado que em relação à área total do Estado de São Paulo na qual a atividade canavieira é efetivamente exercida, 26% está em áreas adequadas, 45% em áreas adequadas com limitações ambientais, 28% em áreas adequadas com restrições ambientais e apenas 1% em áreas inadequadas (SMA, 2012).

I - áreas adequadas: correspondem ao território com aptidão edafoclimática favorável para o desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar e sem restrições ambientais específicas;

II - áreas adequadas com limitação ambiental: correspondem ao território com aptidão edafoclimática favorável para cultura da cana-de-açúcar e incidência de Áreas de Proteção Ambiental (APA); áreas de média prioridade para incremento da conectividade, conforme indicação do Projeto BIOTA-FAPESP; e as bacias hidrográficas consideradas críticas;

III - áreas adequadas com restrições ambientais: correspondem ao território com aptidão edafoclimática favorável para a cultura da cana-de-açúcar e com incidência de zonas de amortecimento das Unidades de Conservação de Proteção Integral - UCPI; as áreas de alta prioridade para incremento de conectividade indicadas pelo Projeto BIOTA-FAPESP; e áreas de alta vulnerabilidade de águas subterrâneas do Estado de São Paulo, conforme publicação IG-CETESB-DAEE - 1997;

IV - áreas inadequadas: correspondem às Unidades de Conservação de Proteção Integral – UCPI Estaduais e Federais; aos fragmentos classificados como de extrema importância biológica para conservação, indicados pelo projeto BIOTA-FAPESP para a criação de Unidades de Conservação de Proteção Integral - UCPI; às Zonas de Vida Silvestre das Áreas de Proteção Ambiental - APAs; às áreas com restrições edafoclimáticas para cultura da cana-de-açúcar e às áreas com declividade superior a 20%.

Nas Figuras 1, 2, 3, 4, 5 e 6 podem ser observados os mapas que foram utilizados para elaboração do ZAA. Na Figura 7 pode ser observado, o mapa do ZAA, no qual consta as quatro classes de áreas com diferentes graus de aptidão agroambiental.

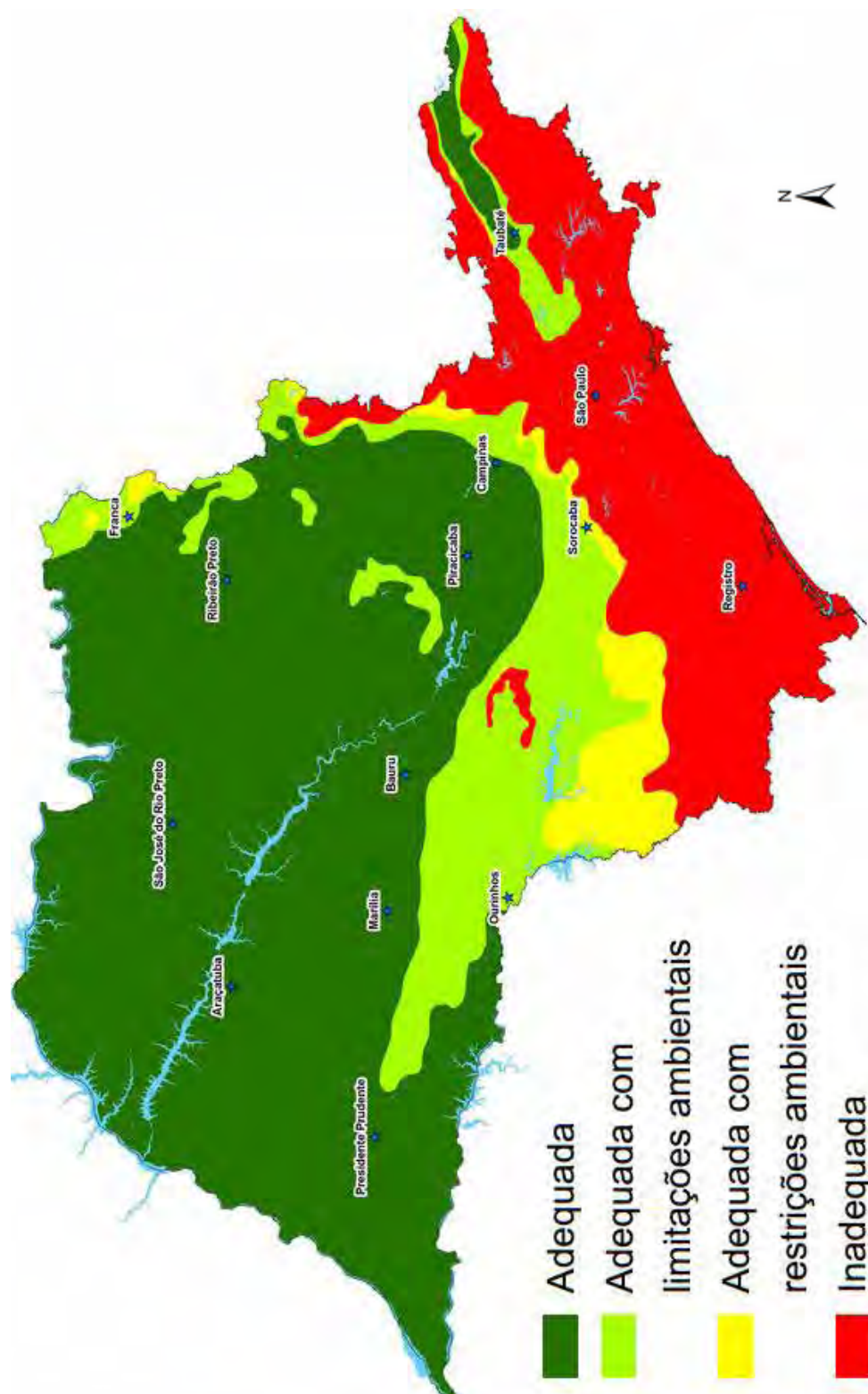


Figura 1. Mapa de Aptidão edafoclimática para cultura de cana-de-açúcar.
Fonte: SMA (2012).

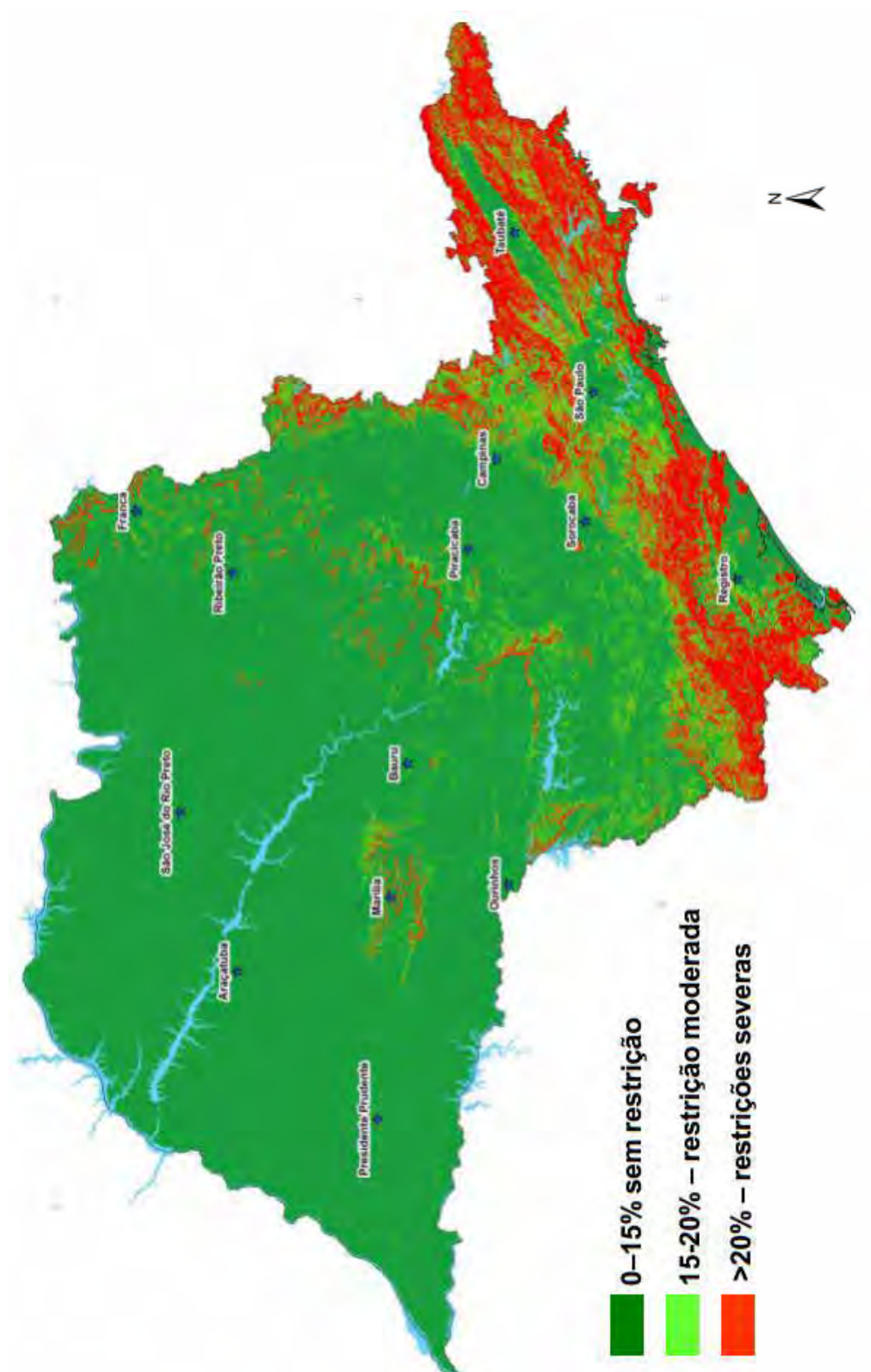


Figura 2. Mapa de área de restrições à colheita mecânica.
Fonte: SMA (2012).

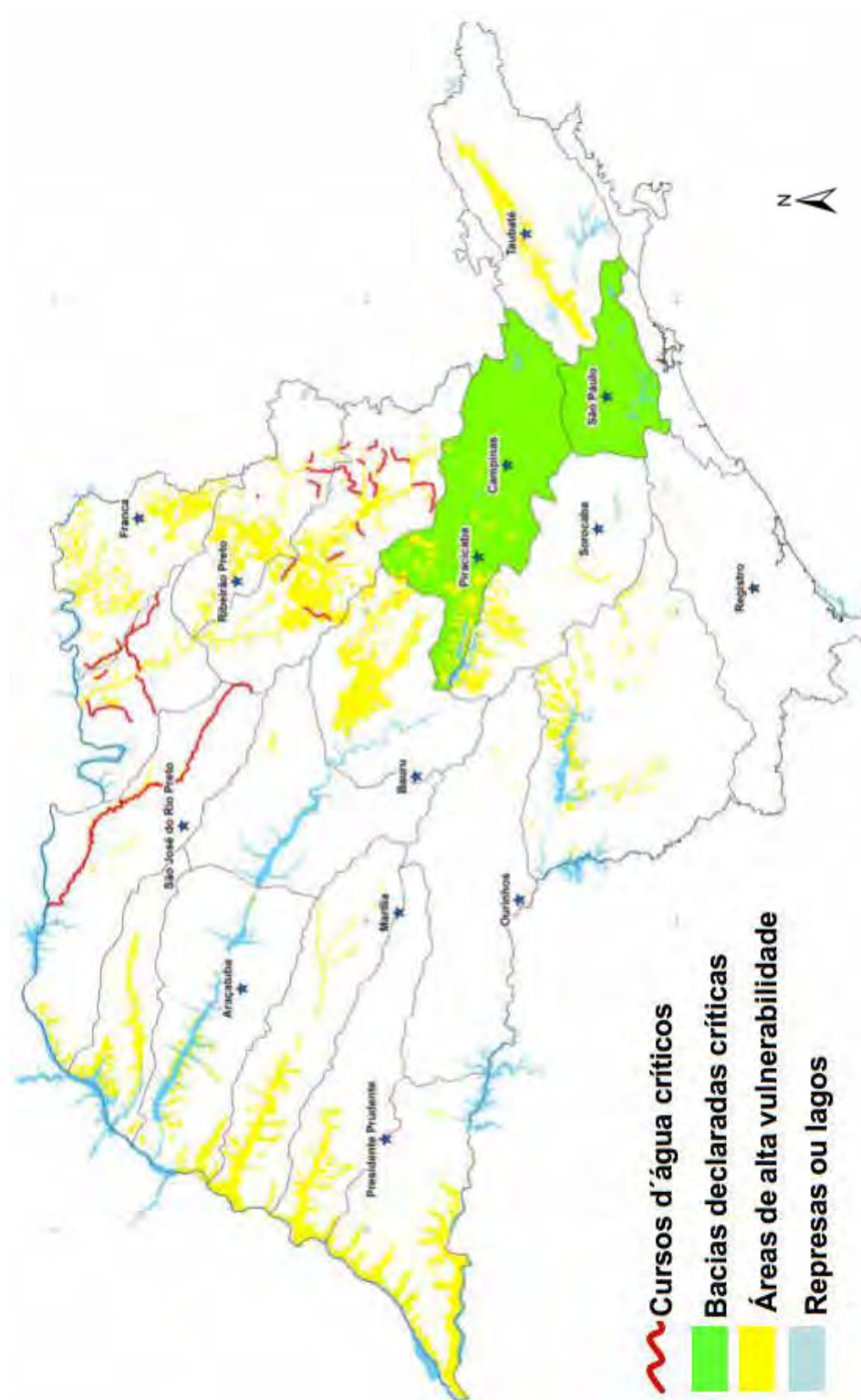


Figura 4. Mapa de disponibilidade de águas superficiais e vulnerabilidade das águas subterrâneas. Fonte: SMA (2012).

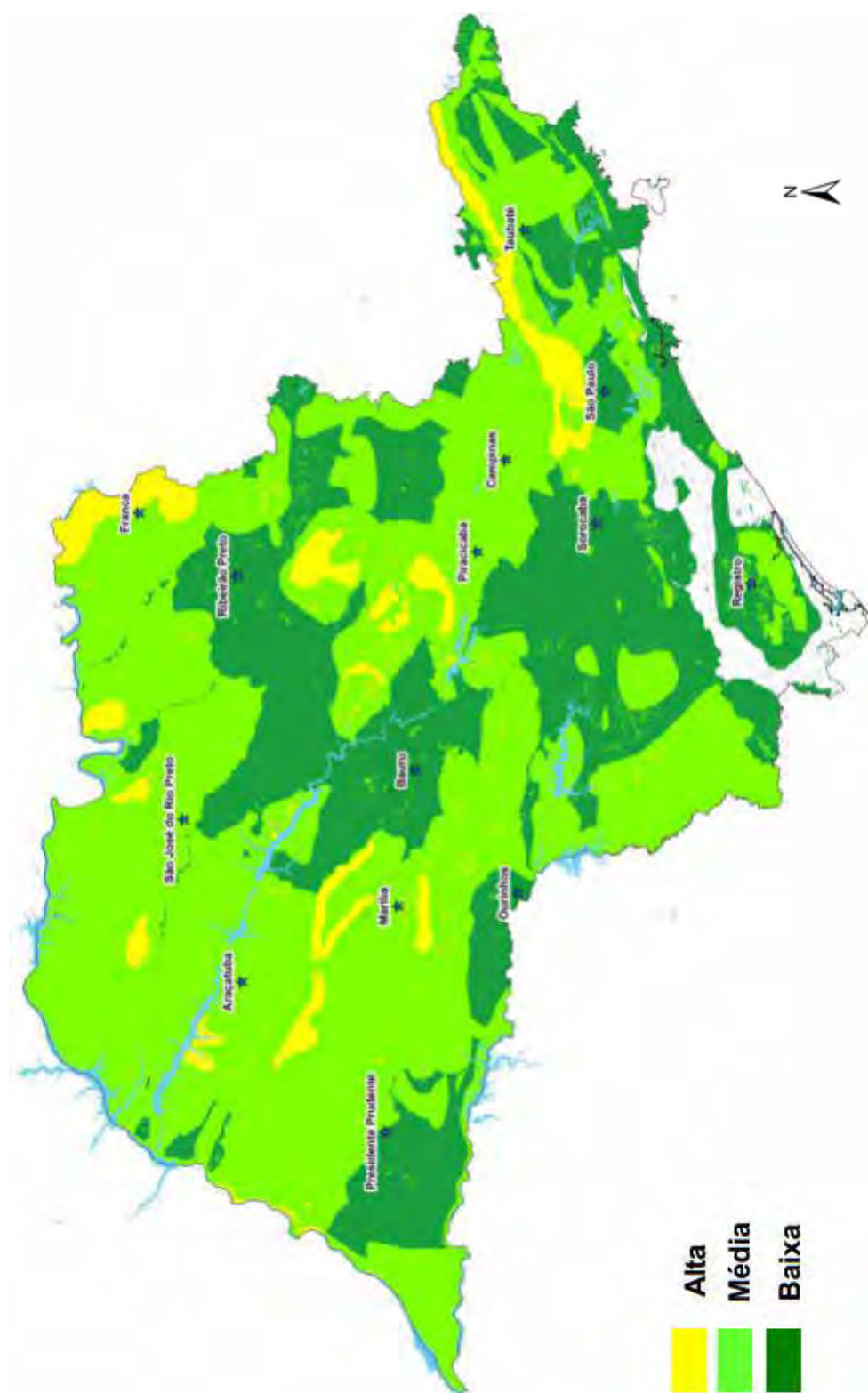


Figura 6. Mapa de Prioridade de Incremento da Biodiversidade (conectividade/BIOTA).
Fonte: SMA (2012).

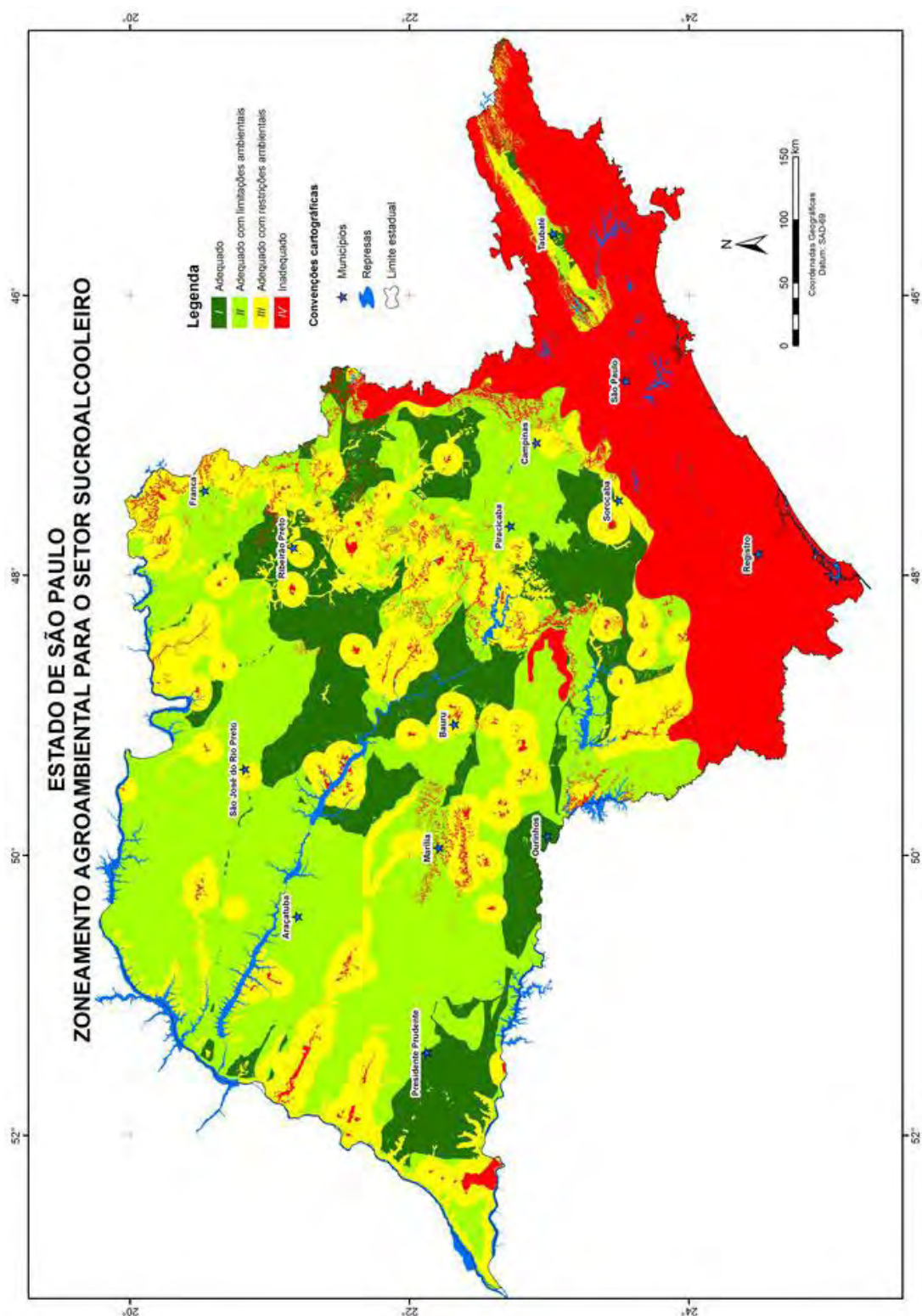


Figura 7. Mapa do Zoneamento Agroambiental para o Setor Sucroalcooleiro.
Fonte: SMA (2012).

Para a elaboração da Resolução SMA nº 88, de 19 de dezembro de 2008, que define parâmetros e diretrizes para o licenciamento ambiental de unidades agroindustriais com o objetivo de criar condições sustentáveis para o desenvolvimento do setor no Estado de São Paulo, foi utilizado como base o mapa do ZAA, que foi regulamentado pela Resolução Conjunta SMA/SAA nº 04/2008, alterada pela Resolução Conjunta SMA/SAA nº 06/2009. Para as três primeiras classes – supracitadas - são definidos parâmetros específicos de acordo com cada área para a obtenção de licenças e operação dos empreendimentos e para a última classe não são aceitos pedidos de licenciamento para instalação ou ampliação de empreendimentos.

4.3 Sensoriamento Remoto

4.3.1 Definição

O termo Sensoriamento Remoto surgiu na comunidade científica internacional apenas em 1960, segundo Barrett e Curtis (1992). Na literatura encontram-se várias definições de sensoriamento remoto, porém todas vão ao encontro de um objetivo comum. Moreira (2005) resumiu como “um conjunto de atividades utilizado para a obtenção de informações a respeito dos recursos naturais, renováveis e não renováveis, através da utilização de dispositivos sensores colocados em aviões, satélite ou até mesmo na superfície”.

Para Lillesand e Kiefer (1994), sensoriamento remoto é definido como “a ciência e a arte de se obter informações sobre um alvo (objeto, área ou fenômeno) por meio da análise de dados adquiridos por meio de um dispositivo que não esteja em contato com o alvo sob investigação”.

Barbosa (2009) afirmou que na agronomia, o sensoriamento remoto é restringido apenas à radiação eletromagnética, visto que mede as taxas energéticas entre os objetos e o meio ambiente.

São chamados de sensores passivos, os que captam energia refletida e/ou emitida pelos alvos, que provém de uma fonte externa ou do próprio ambiente, ou seja, não emitem energia. A maioria dos sensores dos satélites de sensoriamento remoto são passivos. A energia solar que incide sobre o planeta terra é a principal fonte de energia

disponível, sendo a mesma captada pelos sensores após ter interagido com a superfície e a atmosfera (LILLESAND, KIEFER, 1994).

Na Figura 8 observa-se o processo de aquisição de dados de sensoriamento remoto e os elementos envolvidos, que incluem a fonte de energia, representado pelo sol, a propagação da energia através da atmosfera, as interações da energia com as características da superfície terrestre, ou seja, as diferentes coberturas da superfície terrestre (vegetação, água, solo, etc.) que absorvem e/ou refletem a energia. Essa energia refletida é retransmitida através da atmosfera e são registradas por sensores que podem estar acoplados em aeronaves ou satélites. Essas informações registradas pelo sensor são processadas para análise posterior. Como resultados são obtidos dados na forma de imagem e/ou fotografias.

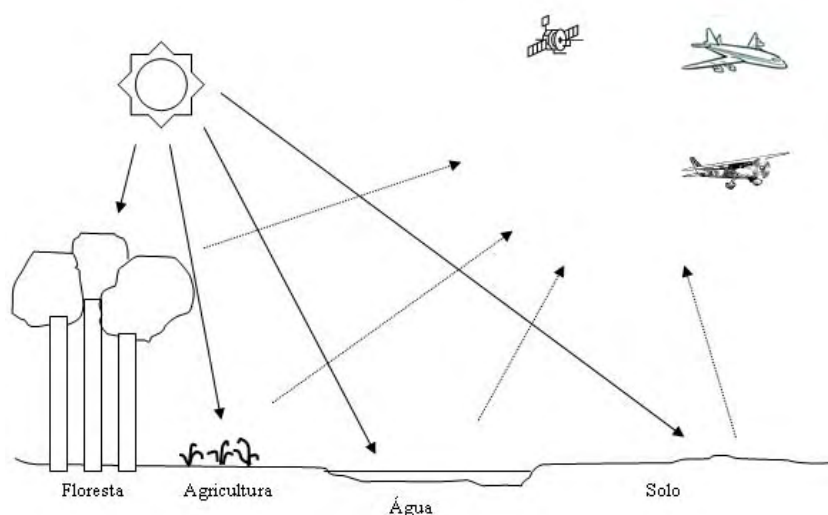


Figura 8. Processo de aquisição de dados de sensoriamento remoto.
Fonte: Noguchi, 2004.

4.3.2 Sensoriamento remoto aplicado à cultura da cana-de-açúcar

Um aspecto fundamental que promove o uso de imagens de sensoriamento remoto para aplicações em cana-de-açúcar é o fato da cultura ser semiperene, atingindo seu crescimento máximo em Abril e por sua safra estender-se até Dezembro em nosso país. Portanto, a longa permanência da cultura no campo aumenta a chance de aquisição de imagens livres de nuvens, o que é fundamental para mapear as áreas cultivadas, o

acompanhamento da colheita e avaliação da mudança dinâmica de uso da terra (RUDORFF et al., 2010).

Uma grande quantidade de trabalhos de sensoriamento remoto tem utilizado a cultura da cana-de-açúcar como objeto de estudo em diferentes contextos. A comparação entre um modelo agrometeorológico, um modelo com Índice de Vegetação (IV) e um híbrido dos dois anteriores elaborado por Rudorff e Batista (1990), apontou o modelo híbrido como o mais apropriado para estimativa da produtividade de áreas cultivadas com cana-de-açúcar.

Estudos do comportamento espectraltemporal da cultura de cana-de-açúcar em diferentes escalas de análise foram realizado por Simões et al. (2003) e Pontes et al. (2005). Os primeiros tentaram distinguir o comportamento espectral de diferentes variedades de cana-de-açúcar em talhões do município de Araras/SP. Já Pontes et al. (2005) tentaram associar os dados espectrais a parâmetros agrônômicos de 2.029 talhões no mesmo município.

O uso de sensores de resolução hiperespectral para discriminar variedades de cana-de-açúcar foi realizado por Galvão et al. (2005). Já o emprego de imagens do sensor MODIS (composições 16 dias de IV) para classificar a cultura da cana-de-açúcar por meio de análise de cluster e métodos de classificação não supervisionada foi feito por Xavier et al. (2006).

Rudorff et al.(2004) realizaram o mapeamento anual da área plantada com cana-de-açúcar na região Centro-Sul por meio de técnicas de classificação não supervisionada e interpretação visual de imagens dos satélites Landsat e China-Brazil Earth Resources Satellite (CBERS).

4.4 Geoprocessamento

Para Moreira (2005), o geoprocessamento pode ser entendido como a utilização de técnicas matemáticas e computacionais para tratar dados obtidos de objetos ou fenômenos geograficamente identificados ou exibir informações desses objetos ou fenômenos, quando eles são observados por um sistema sensor. O geoprocessamento representa um potencial enorme em países de grandes dimensões e com carência de informações adequadas

para a tomada de decisões, principalmente, quando baseado em tecnologias de baixo custo (CÂMARA; MEDEIROS, 1998a).

O geoprocessamento constitui um importante conjunto de tecnologias de apoio ao desenvolvimento da agricultura, por permitir analisar grandes quantidades de dados georreferenciados, independentemente de serem estatísticos, dinâmicos, atuando de maneira isolada ou em conjunto e, ainda, permitir o tratamento destes dados, gerando informações e possibilitando soluções por meio de simulações de cenários e modelagem (BUCENE, 2002).

Um ponto importante que deve ser mencionado, conforme afirmou Barbosa (2009), é que a ferramenta principal deste conjunto de técnicas é o Sistema de Informação Geográfica (SIG), tecnologia esta que muitas vezes é confundida com o termo em questão.

4.5 Sistema de Informação Geográfica – SIG

A base do geoprocessamento são programas computacionais chamados SIGs, os quais permitem análises complexas integrando dados de diversas fontes e montagem de bancos de dados georreferenciados. Sua principal característica é flexibilidade quanto às fontes geradoras e formatos de dados apresentados (CÂMARA; MEDEIROS, 1998a).

SIG é um instrumento que expressa uma espécie de matemática, em que qualquer dado que possua um componente espacial, uma localização determinável, pode ser manuseado, armazenado e analisado, mais corretamente, é como se fosse uma extensão do pensamento analítico. Tecnicamente seria como uma caixa de ferramentas digital para coleta, armazenamento, busca, análise, transformação e exposição de dados espaciais, com uma posição x, y e z. Assim, como a estatística, esse sistema é apenas uma ferramenta auxiliar para descrever e inferir. As possibilidades de solução dependem de um objetivo bem definido sobre o problema ambiental (SILVEIRA, 2004).

Câmara (1995) afirmou que devido à ampla gama de aplicações do SIG, que inclui temas como agricultura, floresta, cartografia, cadastro urbano e redes de concessionárias (água, energia e telefonia), há pelo menos três maneiras de utilizar um SIG: como ferramenta para produção de mapas; como suporte para análise espacial de fenômenos; e

como banco de dados geográficos, com funções de armazenamento e recuperação de informação espacial.

Moreira (2005) afirmou que, de modo abrangente, são cinco os principais componentes independentes de um SIG, porém, estes são interligados uns aos outros por funções específicas. Os componentes do SIG são: entrada e integração de dados, funções de consulta e análise espacial, visualização e plotagem e banco de dados geográficos.

O formato de representação digital dos dados é uma característica distintiva do SIG. Basicamente, um SIG dispõe de dois tipos de dados da superfície terrestre: as definições topológicas de uma estrutura do terreno e os atributos e qualidades que esta estrutura possui. Essa representação geralmente é feita por dois tipos de formato digital: raster ou vetorial, conforme o observado na Figura 9.

O SIG-vetorial possui uma representação gráfica mais elaborada, permitindo uma visualização mais eficiente das localidades tendo, além disso, uma maior eficiência na utilização conjunta com uma base de dados relacionais (banco de dados). A informação topológica é mais eficiente, permitindo a utilização de redes para acesso e análise a locais específicos.

O SIG-raster é um modelo indicado para análises ambientais, pois possui uma estrutura de dados mais simples, permitindo operações de análises diretamente sobre os dados, cuja variabilidade espacial é mais bem representada, uma vez que os fenômenos ambientais não têm limites fixos, considerando-se difusa a transição entre eles. A unidade espacial é representada pelo *pixel*, o qual possui a mesma forma e tamanho, possibilitando uma análise mais eficiente em ambientes contínuos, em que dados como biomassa vegetal, o tipo de solo, a pluviosidade e a temperatura mudam constantemente em função do espaço e do tempo (SILVEIRA, 2004).

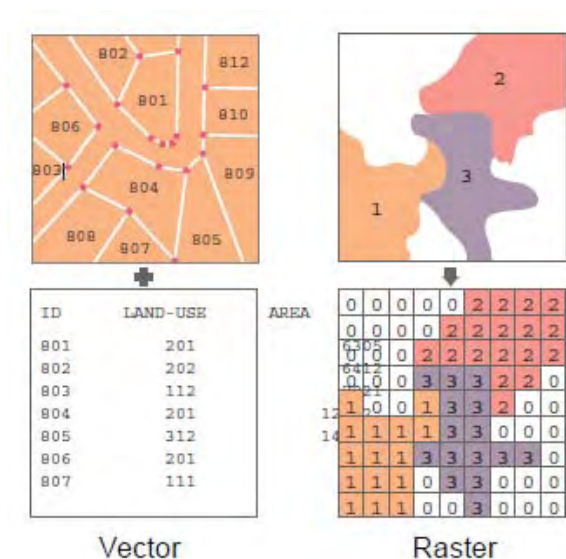


Figura 9. Representação de dados nos formatos matricial e vetorial.

Fonte: Eastman (2006).

A capacidade de inserir e integrar, numa única base de dados, informações espaciais provenientes de dados cartográficos, dados censitários e cadastro urbano e rural, imagens de satélite, redes e modelos numéricos de terreno; oferecer mecanismos para combinar as várias informações através de algoritmos de manipulação e análise, bem como para consultar, recuperar, visualizar e plotar o conteúdo da base de dados georreferenciados são as principais características do SIG (CÂMARA; MEDEIROS, 1998b).

4.5.1 O Sistema de Informações Geográficas Idrisi

O Idrisi é um sistema de informação geográfica e um software para processamento de imagens que inclui mais de 300 módulos de análise e visualização da informação espacial, desenvolvido pela Graduate School of Geography da Clark University. É baseado na forma raster de representação de dados e, desde sua introdução em 1987, vem crescendo e se tornando um SIG bastante difundido (EASTMAN, 2006).

As principais aplicações deste sistema são: Cartografia de ocupação do solo; Planejamento do uso do solo; Análise de alterações ambientais; Gestão de recursos naturais; Modelação ambiental; e Apoio à decisão e gestão da incerteza (SULSOFT, 2012).

Segundo Eastman (2006), o sistema Idrisi é adequado às atividades de pesquisa e ensino devido ao seu custo relativamente baixo e a sua estrutura modular, o que permite o desenvolvimento de novos módulos com o conhecimento mínimo da estrutura interna de funcionamento.

4.6 Imagens de satélite

4.6.1 Imagens LANDSAT

As imagens utilizadas nesta pesquisa são oriundas do satélite *Land Remote Sensing Satellite 5* (Landsat 5) que possui órbita polar heliossíncrona com altitude nominal de 705 km e inclinação orbital de aproximadamente 98°. Possui resolução temporal de 16 dias. A bordo do Landsat 5 existem 2 sensores: o *Multispectral Scanner Subsystem - MSS* e o *Thematic Mapper –TM* (EMBRAPA,2012).

O sensor TM possui separação espectral adequada ao seu principal propósito (oferecer subsídios para mapeamentos temáticos na área de recursos naturais). Opera com 7 bandas nas regiões do visível, infravermelho próximo, médio e termal (Tabela 1). Possui resolução espacial de 30 m x 30 m nas bandas do visível, infravermelho próximo e médio, e de 120 m x 120 m na banda do infravermelho termal (EMBRAPA,2012).

Tabela1 . Características das bandas espectrais do sensor TM, do satélite Landsat 5

Bandas Espectrais	Faixa Espectral (μm)	Aplicações
		Mapeamento de águas costeiras
(B1) Azul	0,45 – 0,52	Diferenciação entre solo e vegetação
		Diferenciação entre vegetação de coníferas e decíduas
(B2) Verde	0,50 – 0,60	Reflectância de vegetação verde e sadia
		Absorção da clorofila
(B3) Vermelho	0,63 – 0,69	Diferenciação de espécies vegetais
(B4) Infravermelho Próximo	0,76 – 0,90	Levantamento de biomassa
		Delineamento de corpos d'água
(B5) Infravermelho Médio	1,55 – 1,75	Medidas de umidade de vegetação
		Diferenciação entre nuvens e neve
(B6) Infravermelho Termal	10,4 – 12,5	Mapeamento de estresse térmico em plantas
		Outros mapeamentos térmicos.
(B7) Infravermelho Médio	2,08 – 2,35	Mapeamento hidrotermal

Fonte: Adaptado de Moreira, 2005.

4.7 Processamento digital de imagens

De acordo com Gonzalez e Woods (2000), o processamento digital de imagens envolve o uso e o desenvolvimento de técnicas, equipamentos e algoritmos com a finalidade de melhorar ou modificar aspecto visual de imagens ou de interpretação do conteúdo destas imagens com o uso de máquinas.

No mesmo sentido, Crosta (1992) afirma que o processamento digital é a análise e a manipulação de imagens por computador, para identificar e extrair informações destas imagens, de modo que os resultados sejam facilmente discerníveis a um analista humano.

Entretanto, as imagens orbitais contêm distorções que devem ser corrigidas antes de ser realizado o processamento digital das imagens. Apesar de algumas distorções serem previamente corrigidas na estação de recepção das imagens, é necessário o pré-processamento para realizar algumas correções antes da fase de extração de informação (FONSECA, 2000).

4.7.1 Etapas do processamento de imagens

Existem muitas etapas de processamento de imagens, entretanto não é sempre que é necessária a aplicação de todas estas etapas. Existem autores clássicos de Sensoriamento Remoto, como Lillesand e Kiefer (1994), que definiram os estágios de processamento de imagens de forma simplificada, conforme apresentado na Figura 10.

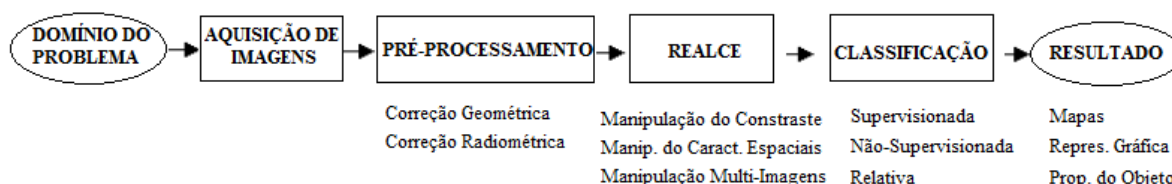


Figura 10. Etapas do processamento de imagens digitais em sensoriamento remoto.
Fonte: Adaptado de Noguchi, 2004.

4.7.1.1 Pré-Processamento

As técnicas de pré-processamento de imagens orbitais visam à melhoria dos dados para interpretação visual humana, bem como para o processamento dos dados via computador (GONZALEZ; WOODS, 2000). Estas técnicas, também, são chamadas de procedimentos de retificação e restauração de imagens, pois, de modo geral, antecedem a

manipulação e análise dos dados da imagem para extrair informações específicas. O objetivo destas técnicas é corrigir distorções ou degradações da imagem que foram originadas no processo de sua aquisição, para que seja gerada uma representação mais fidedigna da cena original. Dessa forma, a natureza de todo o processo de restauração depende de fatores tais como o tipo de aquisição da imagem digital (câmera digital ou scanner), plataforma (avião ou satélite) e o campo de visão total. As correções geométricas, as correções radiométricas e a remoção de ruídos destacam-se como os procedimentos mais utilizados (LILLESAND; KIEFER, 1994).

Segundo Jensen (1996), o objetivo da correção radiométrica de imagens é converter os números digitais dos pixels em unidades de reflectância, o que proporciona a eliminação dos fatores que alteram a reflectância dos alvos, tais como distorções na calibração dos detectores do sistema sensor e influências atmosféricas.

De acordo com Stein et al. (1999), de modo geral, para correção de erros oriundos da curvatura da Terra e do terreno imageado, da inclinação do eixo de rotação da Terra e das diferentes forças centrífugas que afetam o movimento da plataforma, além dos erros provenientes do próprio sistema de sensoriamento remoto, incluindo distorções sistemáticas são utilizadas técnicas de correção geométrica. Segundo, Prado (2009), das técnicas existentes, a mais usual é o georreferenciamento (registro), onde são utilizadas funções polinomiais que permitem estabelecer relações matemáticas entre as localizações de pixels em uma imagem e as coordenadas correspondentes desses pontos na superfície terrestre, por meio da utilização de pontos de controle (PCs). A obtenção dos PCs ocorre por meio de sistemas de posicionamento por satélites (GPS, GLONASS etc.), métodos topográficos, ou, ainda, diretamente sobre um documento cartográfico georreferenciado.

Uma das técnicas mais comumente empregada em sistemas de processamento de imagens para remoção de ruído é a substituição do valor da radiância do pixel no local do ruído pela média da radiância dos pixels das linhas superior e inferior da imagem. Na imagem digital, o ruído corresponde à falta de informações da energia refletida em uma área no terreno, a qual foi provocada por uma falha, momentânea, no sistema de registro de energia, no momento do imageamento da área pelo sensor orbital (MOREIRA, 2005).

4.7.1.2 Realce

O objetivo do realce é melhorar a interpretação visual de uma imagem aumentando a distinção aparente entre as características da cena (LILLESAND; KIEFER, 1994). Uma das maneiras de melhorar essa interpretação é através do aumento de contraste, no qual ocorre uma redistribuição dos valores de pixel de forma a ocupar toda a escala de valores digitais possíveis em determinada imagem. É uma maneira bastante eficaz, entre outras, de se realçar as feições (alvos) de uma imagem, melhorando a qualidade visual dela, sem, no entanto, alterar a quantidade de informação inicial (NOGUCHI, 2004).

As imagens de sensoriamento remoto tendem a ser escuras e apresentar baixo contraste, principalmente às bandas adquiridas no intervalo do visível, isto acontece porque os comprimentos de onda dessas bandas são os que sofrem maior interferência dos efeitos atmosféricos (PRADO, 2009);

4.7.1.3 Classificação

A classificação é uma das técnicas mais frequentes usadas para a extração de informações de dados de sensoriamento remoto (JENSEN, 1996) e implica no reconhecimento de padrões e feições homogêneas em uma imagem.

Segundo Schowengerdt (2007), a classificação de imagens é o processo utilizado para produzir mapas temáticos. De acordo com Di Gregorio (2004), para que essa finalidade seja alcançada é necessário previamente definir qual o sistema de classificação será o mais adequado para o estudo que se pretende desenvolver. O sistema utilizado deve especificar de maneira clara quais as classes de informação que constarão no mapeamento temático e quais os critérios utilizados para distingui-las. Portanto, a classificação de imagens, necessariamente, deve envolver a definição dos limites das classes, os quais devem ser claros, possivelmente quantitativos e baseados em critérios objetivos. Os métodos de classificação digital são agrupados em três tipos: supervisionados (que serão abordadas com maior ênfase, pelo fato de ser o método de classificação que foi utilizado no trabalho), não supervisionados e híbridos.

4.7.1.3.1 Classificação Supervisionada

O procedimento mais utilizado para análise quantitativa de dados de imagens de sensoriamento remoto é a classificação supervisionada. Neste processo são utilizados algoritmos para nomear os pixels em uma imagem de forma a representar tipos específicos de cobertura terrestre, ou classes que são conhecidas a priori (RICHARDS; JIA, 1999; LILLESAND; KIEFER, 1994).

Segundo Noguchi (2004), para que o processo classificatório seja bem sucedido é essencial a seleção das amostras de treinamento, que devem ser bastante homogêneas e devem representar toda a variação possível dentro da classe. Além disso, as amostras de treinamento devem ser grandes o suficiente para que possa ser realizada a estimativa das características espectrais da classe de interesse. Assim, no processo de classificação, todos os pixels (pertencentes ou não às amostras de treinamento) deverão ser designados à classe para qual a probabilidade de pertencerem é maior.

Alguns dos métodos estatísticos de classificação supervisionada mais conhecidos são: paralelepípedo, distância mínima e máxima verossimilhança - MAXVER (JENSEN, 1996 e CURRAN, 1992). Entre todos os métodos, optou-se neste trabalho pela máxima verossimilhança, o qual será detalhado nos próximos parágrafos.

No método da máxima verossimilhança - considerando que os dados de cada classe estão normalmente distribuídos (distribuição *gaussiana*) - é calculada, inicialmente, a média dos níveis de cinza de cada classe dos dados de treinamento em cada banda, a variância e a correlação de cada classe de cobertura terrestre nos dados de treinamento. A partir destas informações, o desvio dos *pixels* ao redor de cada vetor médio pode ser descrito, com o uso da função de probabilidade (CURRAN, 1992).

Então, é calculada – pelo classificador - estatisticamente a probabilidade de cada *pixel* pertencer à determinada classe de treinamento, designando-o àquela cuja probabilidade é maior, porém se os valores de probabilidade encontrados estiverem abaixo de um limiar definido pelo analista o pixel pode ser rotulado como “desconhecido” (CURRAN, 1992; LILLESAND e KIEFER, 1994).

O classificador de máxima verossimilhança é executado assumindo igual probabilidade de ocorrência e custo de erro de classificação para todas as classes.

Entretanto, é possível especificar fatores de peso para classes particulares, no caso de haver um conhecimento a priori de que as probabilidades não são iguais para todas as classes. Chama-se regra de decisão *Bayesiana* esta variante da regra de decisão (NOGUCHI, 2004; BARBOSA, 2009).

Segundo, Queiroz *et al.* (2004), o método MAXVER é o mais utilizado no Sensoriamento Remoto dentro da abordagem estatística, uma vez que envolve parâmetros da distribuição gaussiana multivariada, e ainda é supervisionado, pois estima estes parâmetros por meio de treinamento.

4.7.1.3.2 Classificação Não Supervisionada

Segundo Richards e Jia (1999), a classificação não supervisionada abrange algoritmos, os quais nomeiam os pixels em uma imagem às classes espectrais, sem que o usuário tenha conhecimento prévio dos nomes dessas classes. Neste tipo de classificação, frequentemente, são utilizados métodos de agrupamento (*clustering*). Estes procedimentos utilizam determinado algoritmo, conforme alguns critérios definidos, para determinar o número e localização das classes espectrais. O operador identifica essas classes *a posteriori*, analisando as assinaturas espectrais para determinar o que cada classe é ou representa, podendo ser necessária a verificação através de dados de referência disponíveis que poderiam incluir mapas e visitas a campo (JENSEN, 1996). Quando a área investigada é desconhecida, ou quando suas características não estão bem definidas a classificação não supervisionada é a opção mais adequada (JENSEN, 1996; LILLESAND; KIEFER, 1994).

4.7.1.3.3 Classificação Híbrida

De acordo com Eastman (2006), os classificadores híbridos protelam uma decisão definitiva sobre a associação de qualquer *pixel* a uma classe. Assim, diferentemente dos outros classificadores que produzem uma imagem de saída, eles produzem como resultado um conjunto de imagens (uma por classe), que avaliam o grau com o qual um *pixel* pertence a uma classe ou a combinação de classes.

Dentre os vários métodos de classificação híbrida existentes os que são comumente utilizados são os baseados na teoria *Bayesiana*, na teoria *Dempster-Shafer* e na teoria de conjunto *Fuzzy* (BARBOSA, 2009). Estes métodos de classificação tratam da análise de misturas, avaliação de evidências em suporte às classes envolvidas, reconhecimento de conhecimento incompleto e presença de classes desconhecidas (EASTMAN, 2006).

4.7.2 Avaliação da Classificação

4.7.2.1 Matriz de erro

A exatidão do resultado é avaliada por meio de uma matriz de erros de classificação (chamada também de matriz de confusão ou tabela de contingência) na maioria dos estudos de classificação. A matriz de erro compara os dados resultantes de uma classificação com os dados de referência - verdade terrestre (os quais são obtidos a partir de verificação em campo, da interpretação de fotografias aéreas ou de informações geográficas a respeito do terreno). Os dados de referência conhecidos devem abranger outros conjuntos de dados diferentes dos utilizados para treinar o classificador, quando é executada a avaliação do classificador. Entretanto quando se deseja avaliar se as amostras foram corretamente classificadas, podem ser utilizadas as amostras de treinamento como dados de referência (LILLESAND; KIEFER, 1994)

De acordo com Noguchi (2004), várias características sobre o desempenho de classificação são expressas em uma matriz de erro. Por exemplo, pode-se estudar os vários erros de classificação de omissão ou exclusão. Erros de omissão ocorrem quando um pixel não é atribuído à classe à qual pertence. Erros de inclusão ocorrem quando o pixel é atribuído a uma classe à qual não pertence. Todos os elementos não contidos na diagonal da matriz representam erros de omissão ou comissão. Cada erro representa uma omissão da classe correta e uma comissão para uma classe incorreta. Por meio da matriz de erro, podem ser avaliados vários índices de exatidão como: global (proporção de todos os *pixels* de referência que foram classificados corretamente), do usuário (probabilidade de um *pixel* classificado em uma determinada classe, realmente pertencer àquela cobertura terrestre)

e do produtor (probabilidade de um pixel de determinada cobertura terrestre dos dados de referência ser corretamente classificado).

A forma mais comum para representar a exatidão de mapas elaborados a partir de imagens MSS Landsat é por meio de matrizes de erros (CARD, 1982).

Há dois tipos de técnicas que são utilizadas para a estimativa da exatidão de mapas temáticos: a análise de variância e a análise multivariada discreta. A análise de variância utiliza os elementos da diagonal da matriz e a análise multivariada discreta permite que a matriz de erro possa ser mais criteriosamente estudada. O que torna esta última técnica mais apropriada, pois os dados são de natureza discreta (não contínuos) e encontram-se multinomialmente distribuídos (CONGALTON et. al.,1983).

4.7.2.2 Coeficiente Kappa

Ao interpretar a exatidão de classificação, até mesmo uma atribuição arbitrária de pixels pode produzir porcentagem de valores corretos na matriz de erro. Na realidade, tal tarefa arbitrária poderia gerar um resultado de classificação aparentemente bom (LILLESAND; KIEFER, 1994). A matriz de confusão permite o cálculo de vários índices de precisão. O mais conhecido e indicado para classificações temáticas por representar toda a matriz confusão (análise multivariada discreta) é o coeficiente Kappa (k). Este índice considera todos os elementos da matriz de confusão, ao invés de somente utilizar os elementos da diagonal, como ocorre com a maioria dos índices. O caso ideal ocorre quando o resultado do índice k aproxima-se de 1, como pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2. Qualidade da classificação associada aos valores da estatística Kappa

Valor de Kappa	Qualidade do mapa temático
< 0,00	Péssima
0,00 - 0,20	Ruim
0,20 – 0,40	Razoável
0,40 – 0,60	Boa
0,60 – 0,80	Muito Boa
0,80 – 1,0	Excelente

Fonte: Adaptada de Landis e Koch, 1977 citado por MOREIRA (2005).

Para a determinação do valor Kappa emprega-se a seguinte equação:

$$k = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \cdot x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \cdot x_{+i})}$$

Onde: r = número de linhas na matriz de erro; x_{ii} = o número de observações na linha i e coluna i (na diagonal principal); x_{i+} = total de observações na linha i (mostrado como total da margem direita da matriz); x_{+i} = total de observações na coluna i (mostrado como total da margem de baixo da matriz); N= número total de observações incluídas na matriz.

O valor da estatística Kappa, determinado pela equação é comparado aos valores contidos na Tabela 2. Segundo Barbosa (2009), a tabela (referência para classificar mapas resultantes da utilização de dados de sensoriamento remoto) tem apresentado resultados satisfatórios, dentro de certas restrições.

Segundo Ponzoni e Almeida (1996), o valor de k, quando é utilizada como referência a verdade terrestre, expressa a concordância entre a realidade de campo e a interpretação ou classificação dos dados contidos nos produtos de sensoriamento remoto considerados. No caso da referência ser outro mapa temático, o valor de k expressa o grau de concordância entre dois mapas.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Material

5.1.1 Área de estudo

O município de São Manuel localiza-se na região Centro Oeste do Estado de São Paulo (Figura 11), a uma distância de aproximadamente 284 km da cidade de São Paulo, situado entre os paralelos de 22°31'07" e 22°51'20" de latitude S e entre os meridianos 48°21'22" e 48°44'40" de longitude W Gr, em uma altitude de aproximadamente 700 metros. Faz divisa com os seguintes municípios: ao norte com Igarapu do Tietê, Barra Bonita e Mineiros do Tietê; ao sul com Pratânia; a leste com Botucatu e Dois Córregos e a oeste com Lençóis Paulista e Areiópolis.

Segundo o Censo do ano de 2010, o município de São Manuel possui uma área de aproximadamente 65.100 ha, com aproximadamente 38.342 habitantes e sendo encontrados em seu território remanescentes da vegetação nativa da Mata Atlântica e do Cerrado no município (IBGE, 2012).

O clima da região conforme a classificação de Köppen é do tipo Cwa: tropical de altitude, com três meses mais secos e frios (junho/julho/agosto), chuvas predominantes no verão, temperatura média anual de 20,8° C e precipitação média de 1.464,8 mm anual (CEPAGRI, 2012).

De acordo com Oliveira et al. (1999), foram encontrados na região os seguintes solos: NITOSSOLOS VERMELHOS Eutroféricos, LATOSSOLOS VERMELHOS Eutroféricos e Distroféricos e LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELOS Distróficos.

A área cultivada com cana-de-açúcar foi de 36.692 ha, na safra 2011/12, sendo 32.035 ha com cana-de-açúcar soca e 3.397 ha estão em reforma, ou seja, não foram colhidos. O município destaca-se por possuir a 22ª maior área cultivada com cana-de-açúcar no estado (CANASAT, 2012).

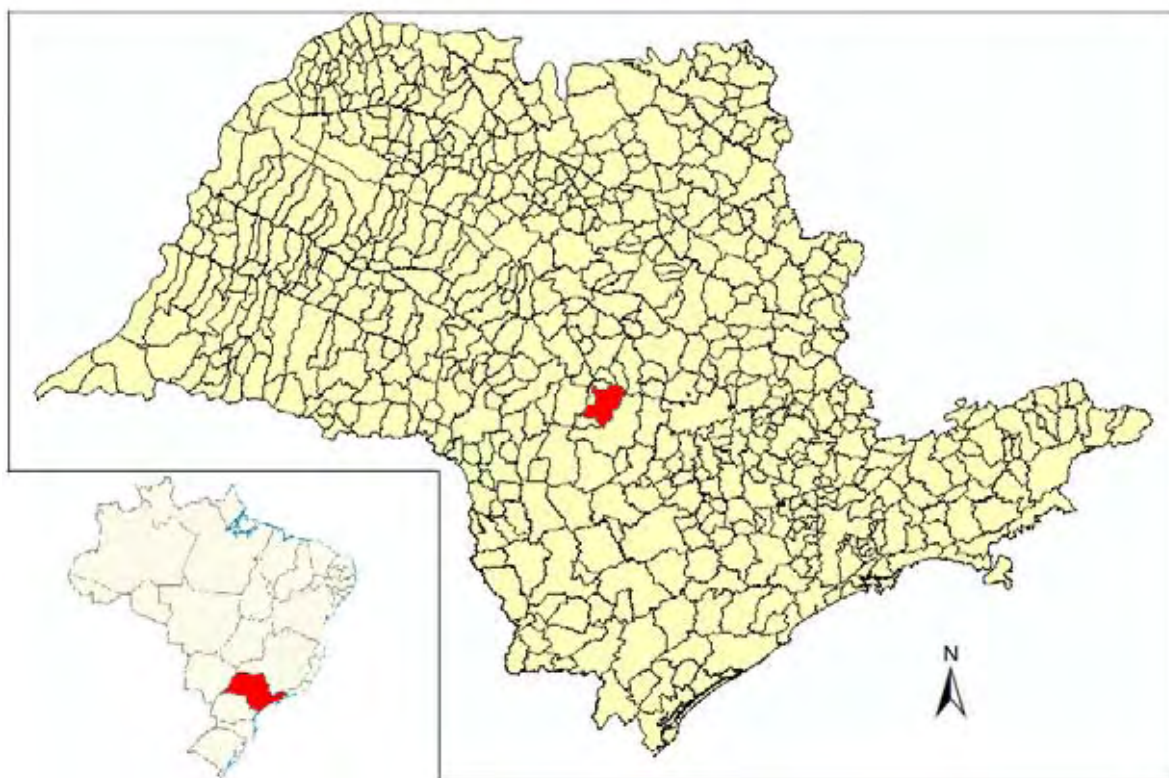


Figura 11. Mapa de localização do município de São Manuel.

5.1.2 Equipamentos

O trabalho foi desenvolvido com a utilização um microcomputador com processador Intel Core i5 2.410M (2.30 GHz, 3 MB); 6.0 GB de memória RAM; winchester de 640 GB; com sistema operacional Windows 7.

Foi utilizado o Sistema de Informação Geográfica (SIG) Idrisi Selva 17.0, desenvolvido pelo *Clark Labs© for Cartographic Technology and Analysis*.

5.1.3 Cartas Planialtimétricas

Foram utilizadas cartas planialtimétricas digitalizadas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, em escala de 1:50.000 (Tabela 3).

Tabela 3. Cartas que compõem o Município de São Manuel.

Cartas do Brasil 1:50.000	Quadrícula	Ano
São Manuel – SP	SF – 22 – Z – B – V – 2	1973
Botucatu – SP	SF – 22 – R – IV – 3	1973
Pratânia – SP	SF – 22 – Z – B – V – 4	1973
Rio Palmital – SP	SF – 22 – Z – B – V – 3	1973

5.1.4 Imagens

O satélite *Land Remote Sensing Satellite 5* (Landsat 5) possui 2 sensores: o *Multispectral Scanner Subsystem* - MSS e o *Thematic Mapper* –TM (EMBRAPA,2012), neste trabalho foram utilizadas as imagens do sensor TM.

As imagens do satélite Landsat 5 TM foram utilizadas no formato digital. Na tabela 4 podem ser observadas a órbita/ponto e as datas de passagem das imagens, que são disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. As bandas utilizadas foram a 3, a 4 e a 5.

Tabela 4. Imagens Landsat 5 TM com órbita/ponto e datas de passagem

Sensor	Órbita/ Ponto	Data de passagem
TM	220/76	03.10.2002
TM	220/76	15.06.2011

No trabalho foram utilizadas imagens com datas de passagem de meses diferentes, pois a imagem de 15.06.2011 é a que apresenta melhor qualidade (possui menores quantidades de erros provocados pelas condições atmosféricas e por defeitos no funcionamento do sensor) quando comparada com as demais imagens de 2011 com datas próximas ao mês de outubro, disponibilizadas no site do INPE, que contêm o município de São Manuel.

5.2 Metodologia

O procedimento metodológico utilizado para a obtenção dos mapas de uso e ocupação do solo e de conflito entre o Zoneamento Agroambiental e a cana-de-açúcar está apresentado de modo resumido na Figura 12.



Figura 12. Fluxograma metodológico do estudo.

A metodologia para o processamento das imagens foi realizada de acordo com o descrito por Eastman (2006). Os módulos utilizados no processamento das imagens foram *Display* (STRETCH e COMPOSITE) e *Reformat* (RESAMPLE e WINDOW); no processo de classificação foram utilizados *Image Processing* (MAXLIKE) e *Gis Analysis* (RECLASS); para conversão dos arquivos vetoriais para raster foi utilizado *Reformat* (RASTERVECTOR); na obtenção do índice Kappa foram utilizados *Image Processing* (SAMPLE e ERRMAT); no cruzamento entre o mapa de ocupação do solo com cana-de-açúcar e o mapa de zoneamento agroambiental do município foi utilizado *Gis Analysis* (CROSSTAB).

5.2.1 Mapeamento da área

As cartas planialtimétricas do IBGE digitalizadas foram vetorizadas utilizando-se o AutoCad Map (software CAD - ferramenta de desenho), onde foi extraído o limite do município. O arquivo foi salvo no formato dxf para ser importado pelo SIG.

Para fazer esta importação no IDRISI foi utilizado o módulo *Import* (*Desktop Publishing Formats >DXFIDRIS*).

5.2.2 Processamento Digital das Imagens

Esta fase do trabalho é importante, pois melhora a qualidade dos dados das imagens, com o emprego de algumas técnicas, como: correção geométrica, realce; e redimensionamento das imagens. Dessa forma, as imagens foram preparadas para realização da próxima fase (classificação).

Para realização do processamento digital, as imagens de 2002 e de 2011 foram importadas para o SIG Idrisi Selva, pelo módulo *Import* (*Desktop Publishing Formats >GEOTIFF/TIFF*) e processadas de acordo com as seguintes etapas:

Pré-processamento – no qual foi feita a correção geométrica (registro) da imagem Landsat TM do ano de 2011, através da utilização de pontos de controle (PCs), utilizando como base a imagem Landsat TM do ano 2002 (a qual já estava georreferenciada) para obtenção dos PCs;

Realce – onde foram ajustados os tons de cinza e foi realizada a composição da imagem com as bandas 5R, 4G e 3B, visto que as imagens de sensoriamento remoto tendem a ser escuras e apresentar baixo contraste, em especial as bandas adquiridas no intervalo do visível, cujos comprimentos de onda são os que mais sofrem interferência dos efeitos atmosféricos (PRADO, 2009);

Redimensionamento da imagem - para restringir apenas a área de estudo, o que diminuiu o tempo de processamento da imagem - para realização desta etapa foi utilizado o mapa do limite do município, o qual foi obtido a partir da vetorização das cartas do IBGE e posteriormente importado para o Idrisi, onde foi criada uma imagem de valor zero pelo módulo INITIAL (*Data Entry > Initial*), com valores máximos e mínimos pré-definidos e resolução espacial X e Y de 30 m. O limite do município foi *rasterizado* sobre esta imagem de valor zero, adquirindo valor 1, pelo módulo RASTERVECTOR (*Reformat > RASTERVECTOR*).

Em seguida as bandas (TM3, TM4 e TM5) das imagens dos dois períodos foram georreferenciadas (registro) através do módulo RESAMPLE (*Reformat > RESAMPLE*), tendo como parâmetros de saída (limites mínimo e máximo X e Y e resolução espacial, medida pelo número de linhas e colunas) os mesmos parâmetros da imagem de valor zero (na qual foi rasterizado o limite do município).

Após deixar todas as imagens com os mesmos limites e resoluções, as bandas das imagens foram cruzadas com a imagem do limite do município através do módulo OVERLAY (*Gis Analysis > Database Query > OVERLAY* – opção multiplicação). Em seguida, foi elaborado as composições coloridas, falsa-cor, 5R/4G/3B dos dois períodos, através do módulo COMPOSITE (*Display > COMPOSITE*).

5.2.3 Mapa de ocupação do solo com cana-de-açúcar

Por corresponderem às regiões do espectro eletromagnético que melhor representam alvos agrícolas foram selecionadas para realização da classificação as bandas TM3, TM4 e TM5.

A escolha do método de classificação MAXVER levou em consideração que neste trabalho foram utilizadas imagens de média resolução espacial, situação na qual geralmente aplica-se este método de classificação.

Foram localizadas inicialmente, oito classes de uso do solo nas imagens recortadas: cana-de-açúcar, hidrografia, cidade, reflorestamento, pastagem, café, solo exposto e floresta nativa. Dessa forma, foram digitalizados polígonos em torno destas áreas, atribuindo um identificador para cada tipo de cobertura. Considerando que é recomendado que o número de *pixels* de cada conjunto de treinamento (todas as áreas de treinamento para uma mesma classe de cobertura do solo) não deve ser menor do que dez vezes o número de bandas classificadas, as classes foram definidas com número mínimo de 30 *pixels* para cada classe de treinamento.

Depois de definidas as áreas de treinamento, os pixels nelas contidos foram analisados e assinaturas espectrais foram criadas para cada objeto. Então, foi executado o classificador, por meio do módulo *Image processing (hard classifiers > MAXVER)*, onde todos os pixels foram classificados com igual probabilidade para cada classe de uso.

Dessa forma foram obtidos dois mapas de uso do solo do município pela classificação das imagens Landsat 5 TM redimensionadas de 2002 e de 2011.

Então, em cada um dos mapas, foram identificadas as classes espectrais referentes à classe de uso cana-de-açúcar, estas foram agrupadas e as demais classes foram desconsideradas, por meio do módulo RECLASS (*Gis Analysis > Databse Query > RECLASS*), o que resultou em uma imagem binária (cana-de-açúcar e não cana-de-açúcar) para cada classificação.

5.2.4 Validação da Classificação

Para avaliar os resultados da classificação de imagens MAXVER (Máxima Verossimilhança) foi criado um arquivo vetorial de pontos de amostragem (em um *grid* regular) para cada período, por meio do módulo SAMPLE (*Image processing > Accuracy Assessment > SAMPLE*), que foram verificados (por meio de fotografias aéreas de 2000 de São Manuel e com as imagens (de 25/07/2010) do município obtidas no Google Earth) para

confirmação do tipo de uso do solo. Em seguida, criou-se um arquivo de valores relacionando os pontos amostrais à verdade, por meio do módulo EDIT (*Data entry* > EDIT).

O arquivo de valores foi então exportado e criou-se uma imagem *raster* dos pontos amostrais com a verdade terrestre, para isto foram executados, respectivamente, os seguintes módulos: ASSIGN (*Edit* > ASSIGN), para associar os usos do solo corretos os quais foram obtidos no módulo EDIT, aos pontos de amostragem gerados no módulo SAMPLE, então foi criada uma imagem zero pelo módulo INITIAL (*Data entry* > INITIAL) com os parâmetros das imagens resultantes da classificação MAXVER, depois foi rasterizado o arquivo obtido no módulo ASSIGN usando o módulo RASTERVECTOR (*Reformat* > RASTERVECTOR).

O módulo ERRMAT (*Image Processing* > *Accuracy Assessment* > ERRMAT) foi utilizado para analisar estatisticamente a classificação supervisionada de cada período confrontando-as com os pontos de campo, dessa forma foi obtido uma matriz de erros e um índice Kappa para cada classificação.

5.2.5 Mapa de Zoneamento Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro

O mapa de Zoneamento Agroambiental para o setor sucroalcooleiro do estado de São Paulo em formato shp (*shapefile*), que foi obtido por meio do site do Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas, foi importado para o Idrisi por meio do módulo *Import* (*Software- Specific Formats,ESRI Formats* > SHAPEIDRI).

Em seguida, este mapa foi redimensionado para a obtenção do Mapa de Zoneamento Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro do município de São Manuel (como pode ser visto na Figura 13), para isso foi utilizado o mapa do limite do município de São Manuel (elaborado a partir da vetorização das cartas digitalizadas do IBGE).

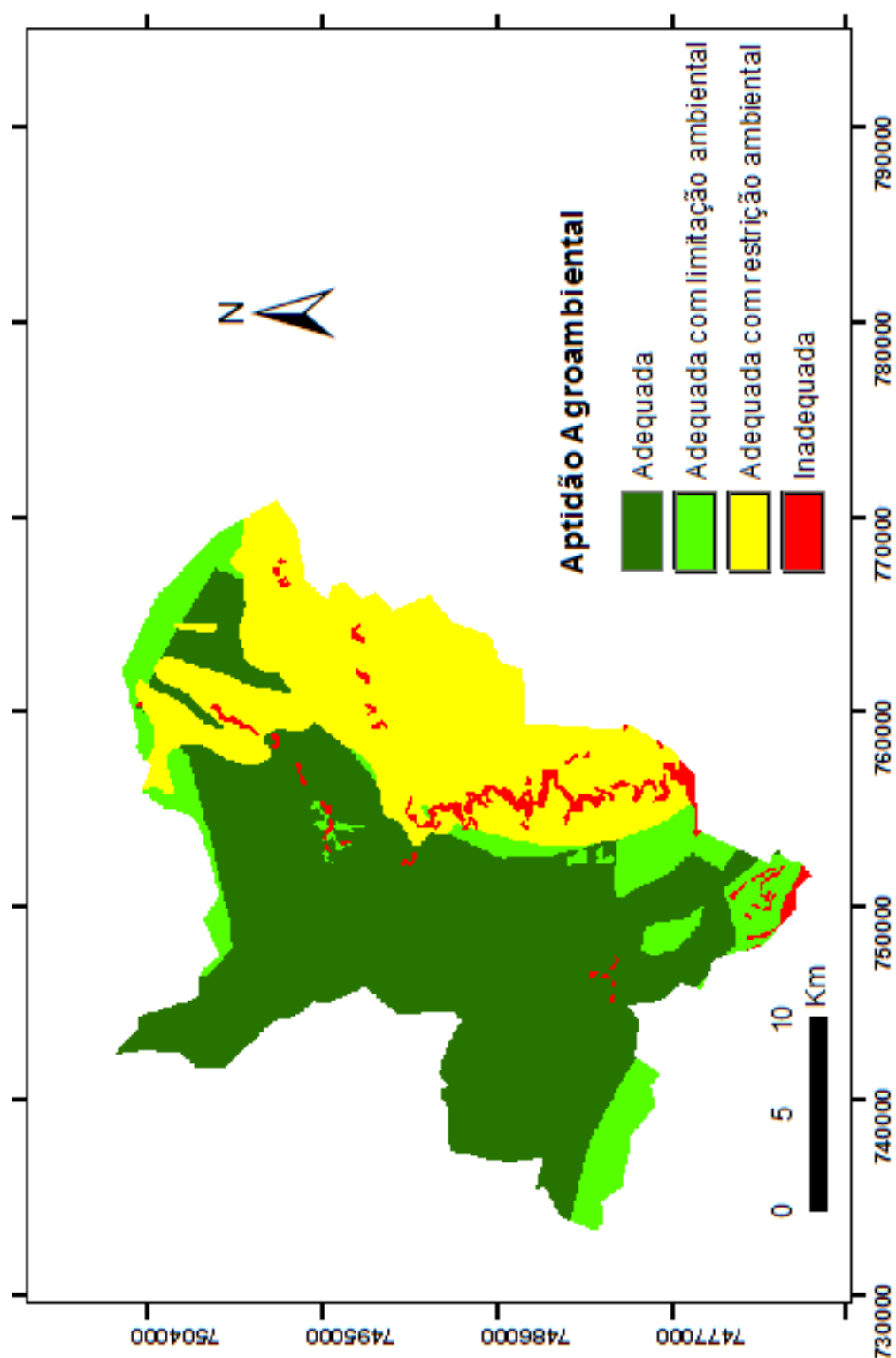


Figura 13: Mapa de Zoneamento Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro do município de São Manuel, obtido com dados extraídos do mapa ZAA do Estado de São Paulo.

5.2.6 Mapa de conflito entre o Zoneamento Agroambiental e a área cultivada com cana-de-açúcar

Para obtenção dos mapas de conflito Zoneamento Agroambiental e cana-de-açúcar dos dois períodos (2002 e 2011) foi realizada a sobreposição do mapa de Zoneamento Agroambiental redimensionado e dos mapas de ocupação do solo pela cultura da cana-de-açúcar redimensionado de cada um dos períodos, para isto foi utilizado o módulo CROSSTAB (*Gis Analysis > Database Query > CROSSTAB*). Depois foi utilizado o módulo RECLASS (*Gis Analysis > Database Query > RECLASS*) para reclassificação dos mapas, levando em consideração as classes espectrais de interesse;

Assim foram obtidos os mapas onde é possível fazer a verificação da quantidade de cana-de-açúcar do município que se encontra em área adequada, em área adequada com restrição ambiental, em área adequada com limitação ambiental e em área inadequada para o plantio de cana-de-açúcar, segundo o Zoneamento Agroambiental do Estado de São Paulo e é possível verificar como ocorreu o aumento da área cultivada com cana de 2002 até 2011 no município.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Recorte das Imagens LANDSAT-5 TM em composição colorida RGB 543

As bandas (TM 3, TM 4 e TM 5) das imagens datadas de 2002 e de 2011 do Satélite LANDSAT- 5, do sensor TM, foram submetidas às técnicas de correção geométrica, de realce e de redimensionamento das imagens. Após estas fases, foi elaborada a composição colorida (falsa-cor 543) das bandas citadas para cada período.

Observou-se que as imagens recortadas dos dois períodos não apresentaram problemas com distorções ou com influências atmosféricas, conforme pode ser verificado nas Figuras 14 e 15.

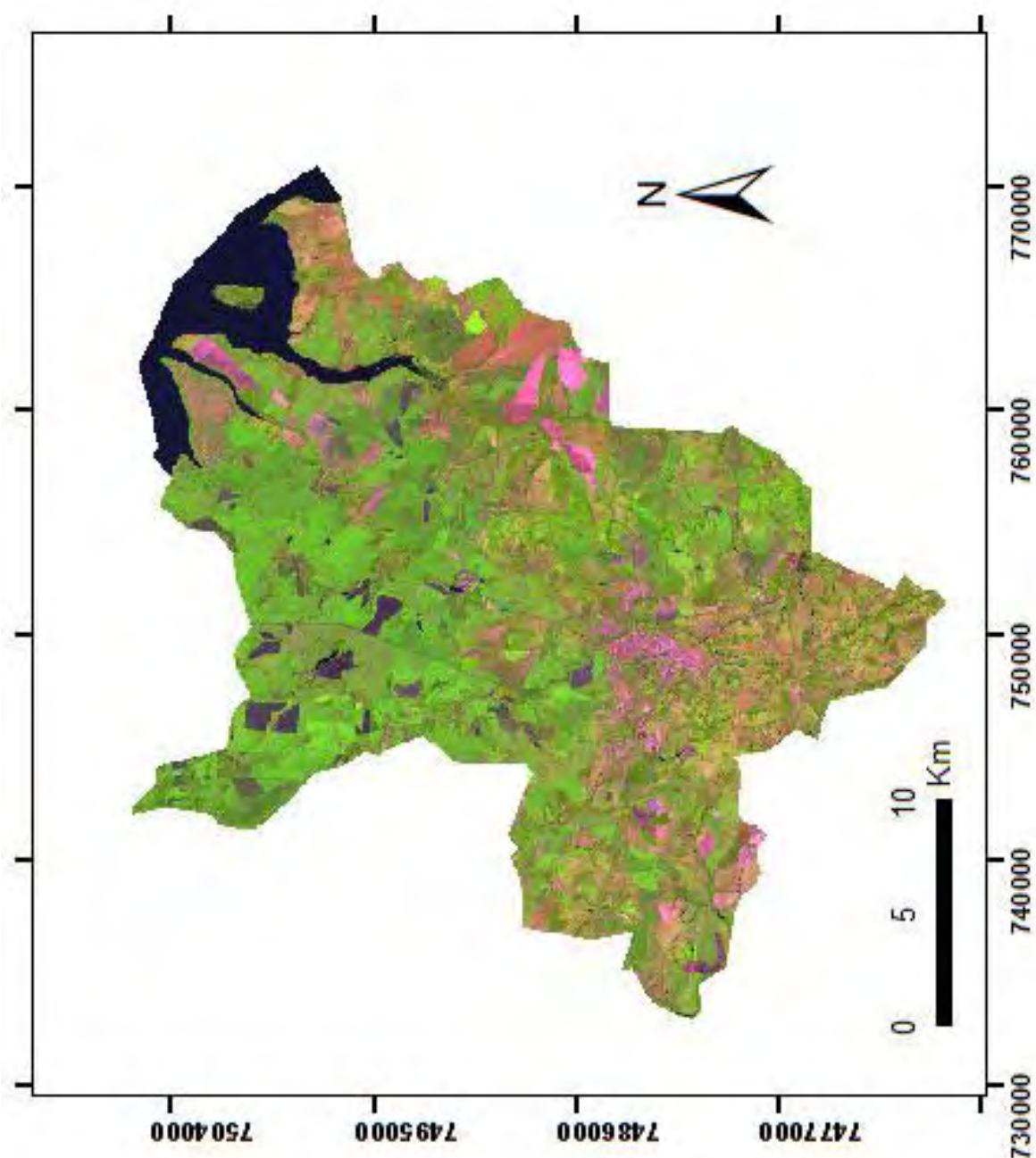


Figura 14. Recorte (delimitando o município de São Manuel) da imagem LANDSAT-5 TM em composição colorida RGB 543, de 03/10/2002.

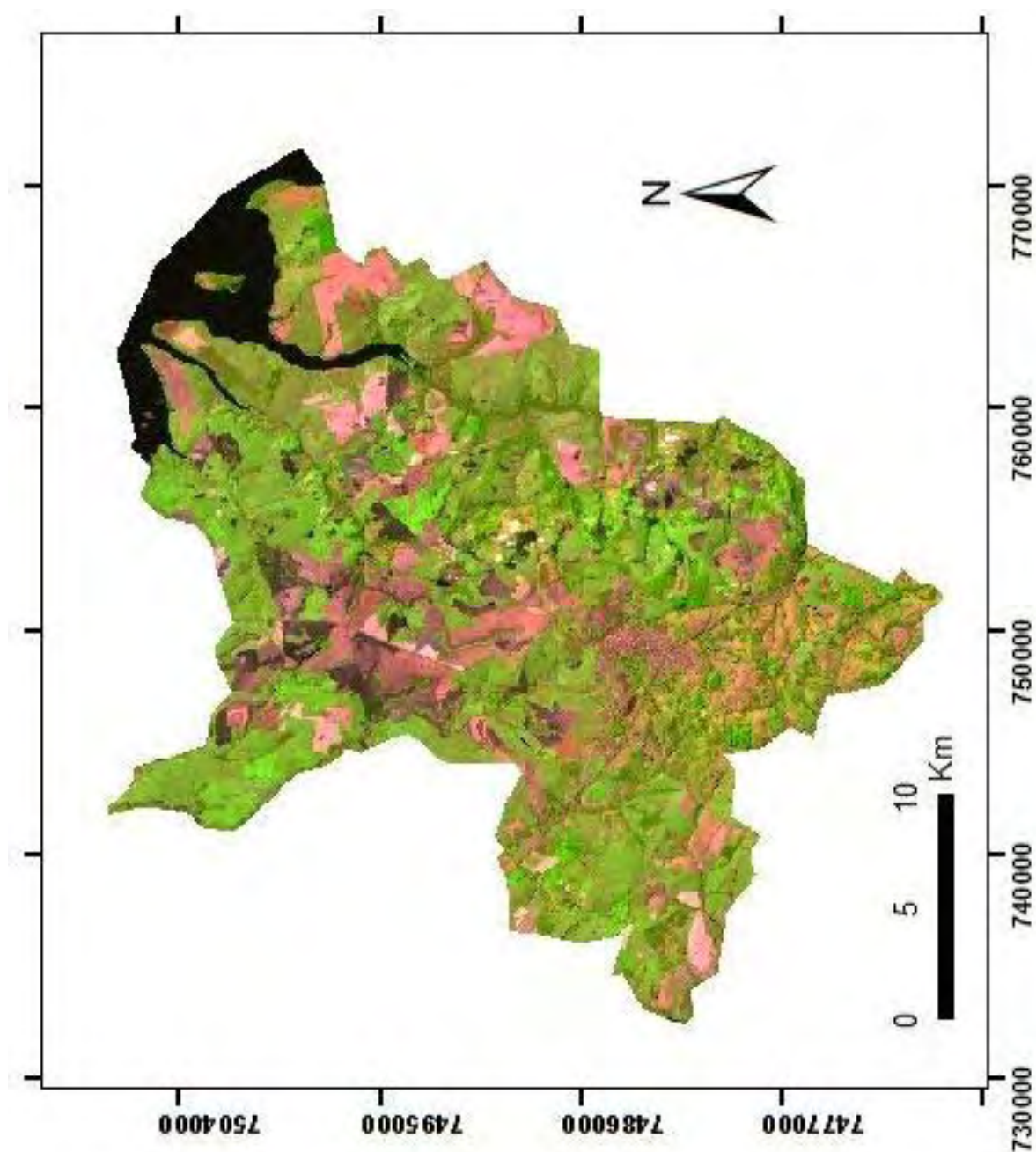


Figura 15. Recorte (delimitando o município de São Manuel) da imagem LANDSAT-5 TM em composição colorida RGB 543, de 15/06/2011.

6.2 Mapas de ocupação do solo com cana-de-açúcar

Os mapas de ocupação do solo com cana-de-açúcar dos dois períodos foram obtidos por meio de classificação MAXVER. Este é um dos classificadores mais eficientes, consequentemente um dos mais utilizados, desta forma está presente nos principais programas de processamento digitais.

A área cultivada com cana-de-açúcar no município de São Manuel em 2002, a qual pode ser observada na Figura 16, obtida pelo classificador MAXVER foi de 29.242,07 ha. O que representava 45,20% da área do município.

Em 2011, a área cultivada com cana-de-açúcar no município de São Manuel, a qual pode ser observada na Figura 17, foi de 33.858,14 ha, também obtida pelo classificador MAXVER. O que representava 52,33% da área do município.

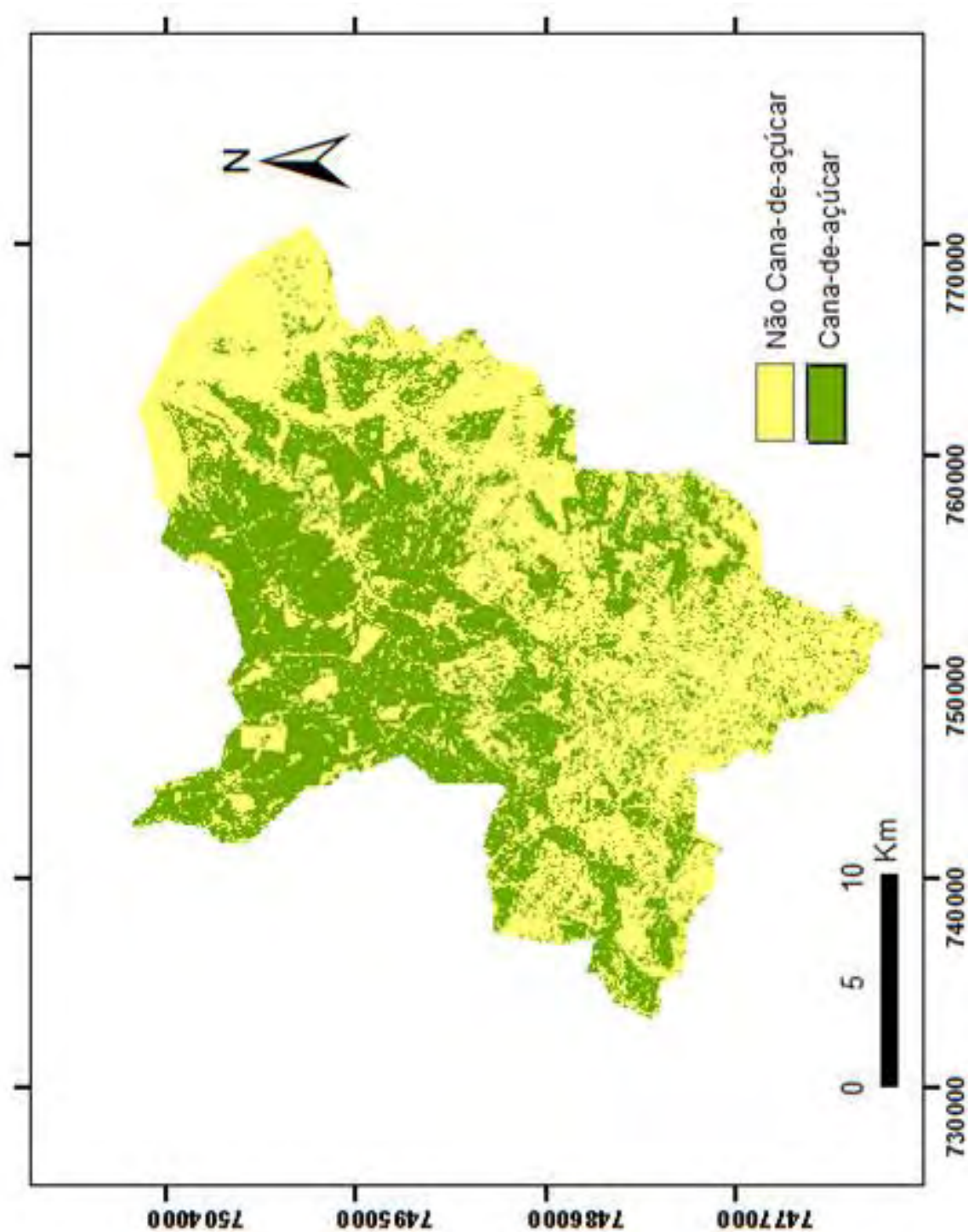


Figura 16. Mapa das áreas cultivadas com cana-de-açúcar no município de São Manuel em 2002.

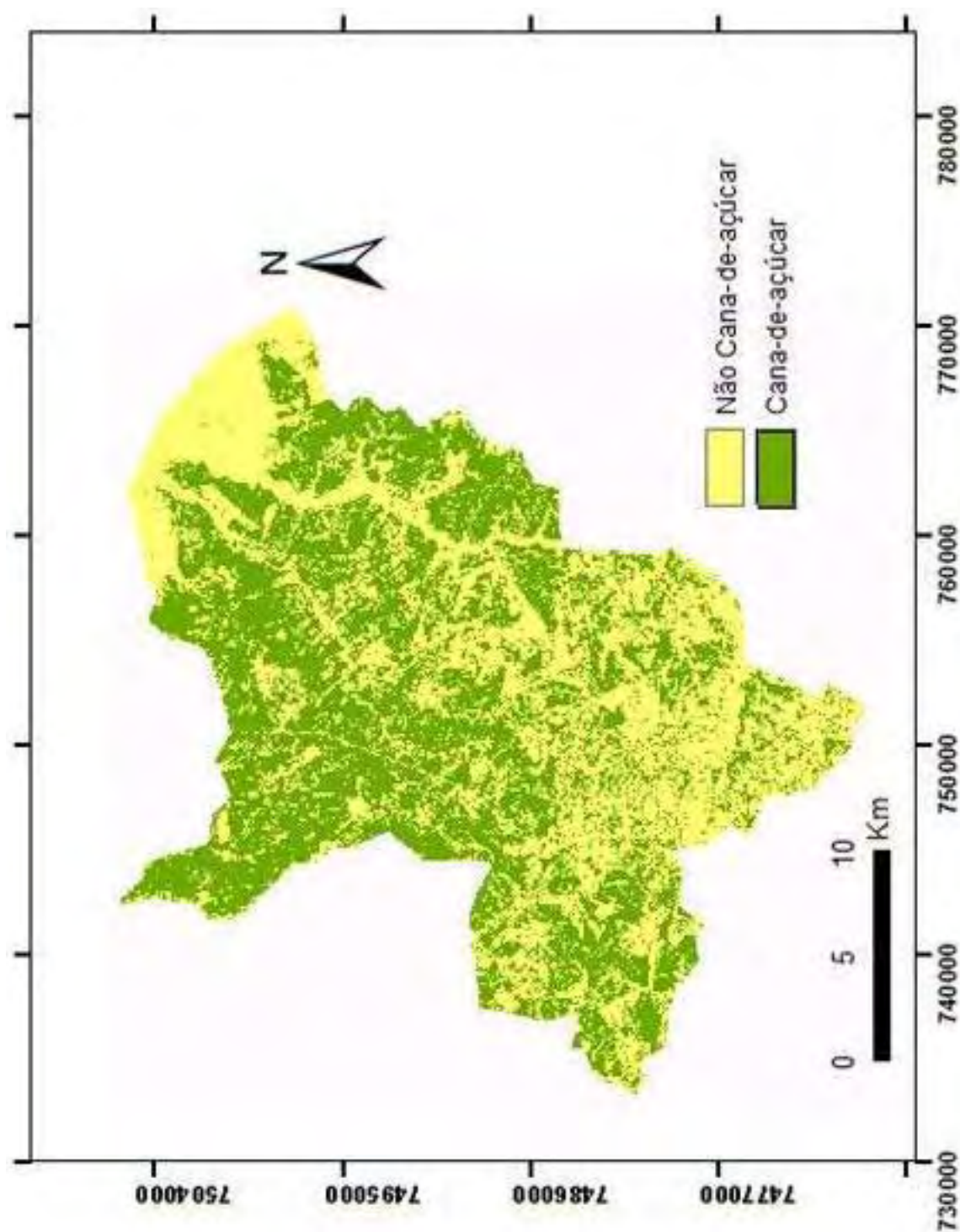


Figura 17. Mapa das áreas cultivadas com cana-de-açúcar no município de São Manuel em 2011.

Conforme esperado a área cultivada com cana-de-açúcar no município de São Manuel em 2011 foi maior do que em 2002, tendo um aumento de 4.616,07 ha, ou seja, a cultura de cana-de-açúcar incorporou 7,1% da área do município que era utilizada com outras culturas.

Uma das razões que contribuíram em um primeiro momento para o aumento da produção da cana-de-açúcar no município, assim como, para o aumento da produção no país foi quando os carros equipados com motor *flex fuel*, ou seja, que funcionavam com mais de um combustível ao mesmo tempo (gasolina e álcool) passaram a ser comercializados no Brasil, o que aumentou a demanda por cana-de-açúcar. Isto ocorreu em 2003. Desde então a área cultivada com cana-de-açúcar aumentou tanto no município de São Manuel, no Estado de São Paulo e no Brasil (CANASAT, 2012).

Apesar de num primeiro momento o álcool ter sido o grande responsável pelo aumento da produção de cana-de-açúcar, ele não foi o único produto responsável pelo aumento da produção, o açúcar também tem sua importância. Isto pode ser observado, principalmente, nestes últimos anos em que ocorreu um aumento do preço internacional de açúcar. Dessa forma, as usinas aumentaram a produção de açúcar e passaram a produzir menor quantidade de álcool, ou seja, a quantidade de cana-de-açúcar que foi processada para produzir açúcar aumentou.

6.3 Avaliação da classificação dos mapas de ocupação do solo com cana-de-açúcar

A avaliação da classificação supervisionada feita neste trabalho foi realizada por meio do confronto com amostras de treinamento.

Na matriz de erro, a probabilidade de uma unidade amostral de referência estar corretamente classificada é indicada pelo erro de omissão e a probabilidade que um *pixel* classificado no mapa represente a categoria no terreno é representada pelo erro de inclusão. Erros de inclusão ocorrem quando um ponto é identificado como da classe “A”, quando na realidade pertence a outra classe, enquanto que os erros de omissão ocorrem quando um ponto é identificado como pertencente a outra categoria, quando, na realidade, é membro da classe “A”.

Apesar dos mapas de ocupação solo com cana-de-açúcar só apresentarem duas classes: cana-de-açúcar e não cana-de-açúcar (na qual foi incluída a classe hidrografia). Para avaliação da classificação supervisionada foram utilizadas 3 classes, ou seja, a classe hidrografia foi separada da classe não cana-de-açúcar.

Podemos observar a matriz de erro, referente à imagem de 2002 na Tabela 5. A matriz de erro compreendeu 52 pontos classificados, 3 como hidrografia, sendo todos corretamente classificados; 27 como não cana-de-açúcar, dos quais 25 foram corretamente classificados e 2 foram erroneamente classificados como cana-de-açúcar; e 22 classificados como cana-de-açúcar, dos quais 20 foram corretamente classificados e 2 foram erroneamente classificados como não cana-de-açúcar. O índice Kappa obtido para esta classificação foi de 0,8596. O qual pode ser considerado excelente, segundo a tabela de Qualidade da classificação associada aos valores da estatística Kappa (Tabela 2).

Tabela 5. Matriz de erro para classificação de 2002

	Hidrografia	Não cana-de-açúcar	Cana-de-açúcar	Total	Erro de inclusão
Hidrografia	3	0	0	3	0,00
Não cana-de-açúcar	0	25	2	27	0,0741
Cana-de-açúcar	0	2	20	22	0,0909
Total	3	27	22	52	
Erro de omissão	0,0000	0,0741	0,0909		0,0769

Índice Kappa = 0,8596

A matriz de erro, referente à imagem de 2011 pode ser observada na Tabela 6. A matriz de erro, também, compreendeu 52 pontos classificados, 3 como hidrografia, sendo todos corretamente classificados; 21 como não cana-de-açúcar, dos quais 18 foram corretamente classificados e 3 foram erroneamente classificados como cana-de-açúcar; e 28 classificados como cana-de-açúcar, dos quais 25 foram corretamente classificados e 3 foram erroneamente classificados como não cana-de-açúcar. O índice Kappa obtido para esta classificação foi de 0,7878, o qual pode ser considerado muito bom, segundo a tabela de Qualidade da classificação associada aos valores da estatística Kappa (Tabela 2).

Tabela 6: Matriz de erro para classificação de 2011

	Hidrografia	Não cana-de-açúcar	Cana-de-açúcar	Total	Erro de inclusão
Hidrografia	3	0	0	3	0,0000
Não cana-de-açúcar	0	18	3	21	0,1429
Cana-de-açúcar	0	3	25	28	0,1071
Total	3	21	28	52	
Erro de omissão	0,0000	0,1429	0,1071		0,1154

Índice Kappa = 0,7878

Os erros de omissão e de inclusão apresentaram os mesmos resultados, pois só foram utilizadas 3 classes para avaliar a classificação e em uma das classes (hidrografia) não houve erro, desta forma quando um ponto foi identificado como da classe cana-de-açúcar e na verdade ele pertencia a outra classe, esta necessariamente era a classe não cana-de-açúcar e quando um ponto pertencia a classe cana-de-açúcar era identificado como pertencente a outra categoria, esta necessariamente era a classe não cana-de-açúcar, assim os valores dos erros de omissão e de inclusão foram idênticos.

6.4 Análise do Zoneamento Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro (ZAA)

A criação do ZAA teve as seguintes justificativas: grande demanda internacional pelo etanol, a expectativa da expansão das áreas cultivadas com cana-de-açúcar e a necessidade de proteção dos recursos naturais (fauna, flora, solo, recursos hídricos superficiais e subterrâneos) por meio do planejamento e gestão de áreas protegidas (Unidades de Conservação) que servem como subsídios para a definição de ações diferenciadas a serem utilizadas para áreas com sensibilidade ambiental.

Conforme já informado, o ZAA foi utilizado como base para elaboração da Resolução SMA nº 88/09. Esta tem como objetivo aprimorar os procedimentos de licenciamento ambiental dos empreendimentos sucroalcooleiros. Por isso, os procedimentos do licenciamento são diferenciados, conforme a categoria de cultivo, definida no ZAA. Isso acontece em função das características próprias do território onde se pretende instalar o empreendimento. Assim, os critérios técnicos são definidos para a fixação de condicionantes e exigências nos Processos de Licenciamento.

Segundo Ranieri et al. (2005), de maneira geral os zoneamentos são formados por análise na escala de paisagem, uma vez que tratam de questões relacionadas às interações entre o homem e a natureza visando o ordenamento territorial, considerando as fragilidades e potencialidades dos componentes do meio ambiente. Dessa forma, é necessário o conhecimento prévio das dinâmicas ambientais e das atividades produtivas existentes no território.

Quando este instrumento é utilizado são produzidos resultados no sistema ecológico e no econômico, visto que na maior parte das vezes são políticas públicas que atuam dentro da lógica econômica predominante visando ajustar as falhas de mercado, uma vez que estas geram consequências na qualidade ambiental de territórios, ou seja, o zoneamento tem como objetivo reduzir as externalidades negativas do processo econômico das atividades agrícolas (sistemas econômicos e ecológicos baseados em grandes propriedades com atividade agrícola monocultura, que causam impactos negativos e alterações no território em direção de uma diminuição da resiliência ecossistêmica que estas atividades proporcionam). No caso específico do ZAA, para a redução das externalidades negativas do cultivo de cana-de-açúcar e de suas atividades agroindustriais associadas foi criada uma política que indica as melhores localizações para a atividade, considerando critérios físicos e biológicos que indicam as fragilidades do meio.

O zoneamento agroambiental do setor sucroalcooleiro tem como importância disciplinar a atividade canavieira que apesar de já estar amplamente consolidada, continua se expandindo pelo Estado de São Paulo. Ainda que o zoneamento não tenha a competência de proibir a existência da atividade em determinados lugares ou de permitir em outros, ele contribui para que a localização de novos empreendimentos e cultivos da cultura ocorram preferencialmente em locais com aptidão agrícola e sem restrições do ponto de vista ambiental.

Dessa forma, é esperado que os empreendimentos canavieiros (usinas e suas áreas cultivadas com a cultura da cana-de-açúcar) localizem-se preferencialmente nas áreas indicadas como adequadas e na impossibilidade nas áreas adequadas com limitações e com restrições, desde que obedeçam as devidas medidas técnicas de minimização dos impactos, as quais são determinadas no licenciamento ambiental.

O zoneamento é um instrumento de controle ambiental que visa alterar as pressões antrópicas decorrentes da atividade, as quais provocam alterações ambientais nos locais, onde se encontra instalada a atividade. Uma das justificativas para a criação do ZAA foi a necessidade de definição de ações diferenciadas para serem utilizadas nas áreas que já tiveram suas condições alteradas pela presença da atividade no território. Assim, para que o zoneamento agroambiental seja capaz de diminuir a vulnerabilidade ambiental dos territórios com cana-de-açúcar deve levar em consideração os recursos naturais (qualidade do solo, da água e do ar e a vazão dos cursos d'água), a paisagem (cobertura vegetal natural e a presença de outras culturas agrícolas) e a biodiversidade (Reserva Legal, Área de Preservação Permanente, diversidades de espécies e proximidade da monocultura com a Unidade de Conservação).

Para obtenção das classes de aptidão, constante no mapa de Zoneamento Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro, foi realizado o cruzamento dos mapas de Aptidão Edafoclimática para cultura de cana-de-açúcar, de área de restrições à colheita mecânica, de qualidade do ar nas Bacias Aéreas, de disponibilidade de águas superficiais e vulnerabilidade das águas subterrâneas, das Unidades de Conservação de Proteção Integral (existentes e indicadas/ BIOTA) e de Prioridade de Incremento da Biodiversidade (conectividade/ BIOTA).

Entretanto é possível constatar que o critério que foi atribuído maior peso para obtenção do mapa do ZAA foi a aptidão edafoclimática, o que pode ser verificado observando que a maior parte da área considerada como inadequada para a expansão da cana-de-açúcar são as áreas sem aptidão edafoclimática (localizadas na porção sul de São Paulo), as demais áreas são unidades de conservação de proteção integral, em que é proibida a atividade agrícola.

Isto gerou controvérsia sobre o mapa de zoneamento agroambiental, uma vez que é problemático um zoneamento que privilegia as potencialidades territoriais para a atividade canavieira em detrimento das vulnerabilidades. Afinal, segundo Ranieri et al. (2005) a função dos zoneamentos é indicar aptidões do território para possibilidade de intervenção, entretanto deve ser considerado para isso a capacidade de suporte do meio.

Para Jordão (2011), o ZAA não realizou de forma plena sua função, uma vez que os elementos que compõem a sensibilidade do ambiente (Recursos naturais –

qualidade do solo, qualidade da água, vazão dos cursos d'água-; Paisagem – cobertura vegetal natural, presença de outras culturas agrícolas -; Biodiversidade – Reserva Legal, Área de Preservação Permanente, Diversidade de Espécies, Proximidade da monocultura com Unidades de Conservação) não foram plenamente atendidos para realização do zoneamento.

Isto aconteceu porque com relação aos recursos naturais: qualidade do solo - não foram incluídas questões relacionadas às condições de qualidade dos solos, como a suscetibilidade à erosão e compactação e a situação de contaminação; com relação à qualidade da água faltou relacionar a capacidade de suporte das bacias hidrográficas em receber grandes áreas de cana-de-açúcar; com relação à vazão dos cursos da água não foi considerada a capacidade das bacias suportarem a expansão do cultivo de cana.

Quanto a Paisagem: cobertura vegetal natural não foi considerada a quantidade de cobertura vegetal existente fora de unidade de conservação; com relação à presença de outras culturas agrícolas não foi considerado nenhuma forma a existência ou potencial existência de outras culturas agrícolas que competem espacialmente com a cana de açúcar.

Em relação à Biodiversidade: Reserva Legal (RL) não foi considerada a baixa porcentagem de RL em relação às áreas rurais dos municípios; com relação às Áreas de Preservação Permanente (APP) elas não foram delimitadas, portanto não foram consideradas; com relação à diversidade de espécies que é afetada pela existência de grandes áreas contínuas de cana-de-açúcar; e com relação à proximidade da monocultura com Unidades de Conservação não foram consideradas as unidades de conservação municipais, assim como as áreas de amortecimento das unidades de conservação foram consideradas apenas como um fator de restrição à atividade canavieira, não indicando essas áreas como inadequadas para o cultivo da cana.

Restringindo a análise do ZAA ao município de São Manuel, as áreas inadequadas para o cultivo de cana-de-açúcar ocorreram principalmente por causa das restrições à mecanização do cultivo da área, por estas áreas apresentarem declividade superior a 20%, por estarem localizadas na região da Cuesta do município.

As áreas adequadas com restrição no município não apresentam limitação edafoclimática, entretanto parte das mesmas encontram-se em áreas de

amortecimento da APA Corumbataí-Botucatu-Tejupá e o restante das áreas são de recarga de aquíferos e de biodiversidade.

As áreas adequadas com limitação no município possuem ligeiras restrições climáticas e apresentam aspectos de síntese de biodiversidade e de aquíferos.

A maior parte das áreas adequadas do município não possuem qualquer tipo de limitação edafoclimática ou ambiental, o restante destas áreas apesar de não possuir nenhuma restrição edafoclimática apresentam ligeiras limitações de clima durante a estação de repouso da cultura, que podem atrasar a maturação da cana-de-açúcar.

6.5 Zoneamento Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro x ocupação do solo com cana-de-açúcar

Conforme já mencionado as restrições do Zoneamento Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro no município de São Manuel acontecem principalmente devido à existência da Cuesta e da Unidade de Conservação de Proteção Integral (Corumbataí-Botucatu-Tejupá) e suas zonas de amortecimento existentes no município.

Na Figura 18 pode ser verificada a localização das áreas com cana-de-açúcar no município de São Manuel em 2002, em relação ao Zoneamento Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro. Foi observado que a área cultivada com cana-de-açúcar era de 29.242,07 ha e a área restante do município (35.449,48 ha) estavam com um uso diferente do solo.

Da área cultivada com cana-de-açúcar, em 18.674,97 ha a cultura estava localizada em área adequada para o cultivo, em 2.115,7 ha a cultura estava em área adequada com limitação ambiental, em 8.038,95 ha a cultura estava em área adequada com restrição ambiental e em 412,38 ha a cultura estava em área inadequada para o cultivo.

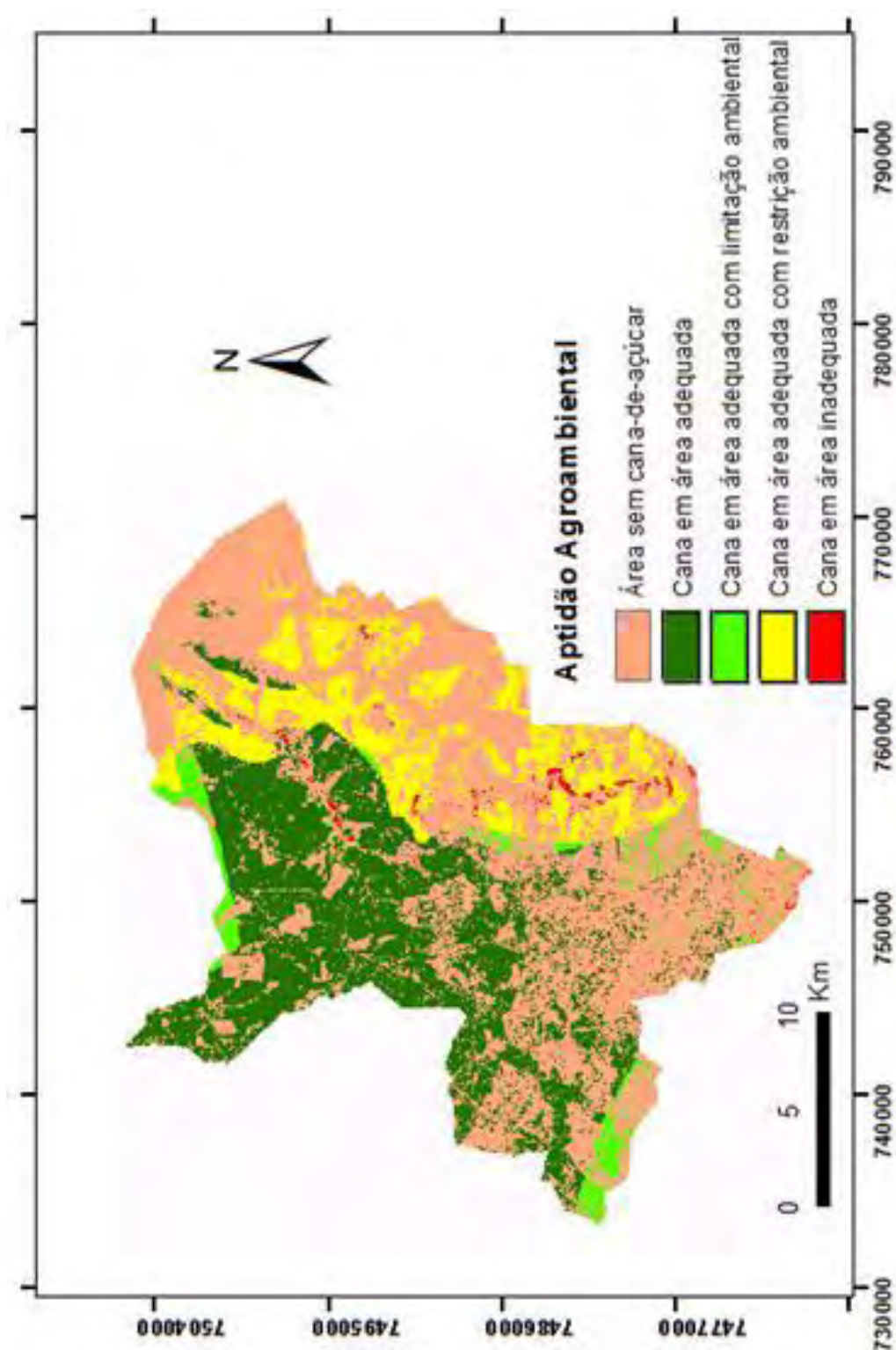


Figura 18. Mapa das áreas cultivadas, em 2002, com cana-de-açúcar em relação ao Zoneamento Agroambiental.

Pode ser verificada, na Figura 19, a localização das áreas com cana-de-açúcar no município de São Manuel em 2011, em relação ao Zoneamento Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro. Foi observado que a área cultivada com cana-de-açúcar era de 33.858,14 ha e a área restante do município (30.833,41 ha) estava com um uso diferente do solo.

Da área cultivada com cana-de-açúcar, em 20.001,71 ha a cultura estava localizada em área adequada para o cultivo, em 2.783,23 ha a cultura estava em área adequada com limitação ambiental, em 10.597,20 ha a cultura estava em área adequada com restrição ambiental e em 476,00 ha a cultura estava em área inadequada para o cultivo.

Na Tabela 7 pode ser observado como aconteceu o crescimento das áreas cultivadas com cana-de-açúcar no município de São Manuel nos períodos estudados.

Tabela 7. Área cultivada com cana-de-açúcar em relação ao ZAA

Classes do Zoneamento Agroambiental	Área total (ha)	Área cultivada com cana-de-açúcar (ha) em 2002	Área cultivada com cana-de-açúcar (ha) em 2011
Adequada	35.285,22	18.674,97	20.001,71
Adequada com limitações ambientais	8.415,48	2.115,7	2.783,23
Adequada com restrições ambientais	20.130,10	8.038,95	10.597,20
Inadequadas	1.681,64	412,38	476,00

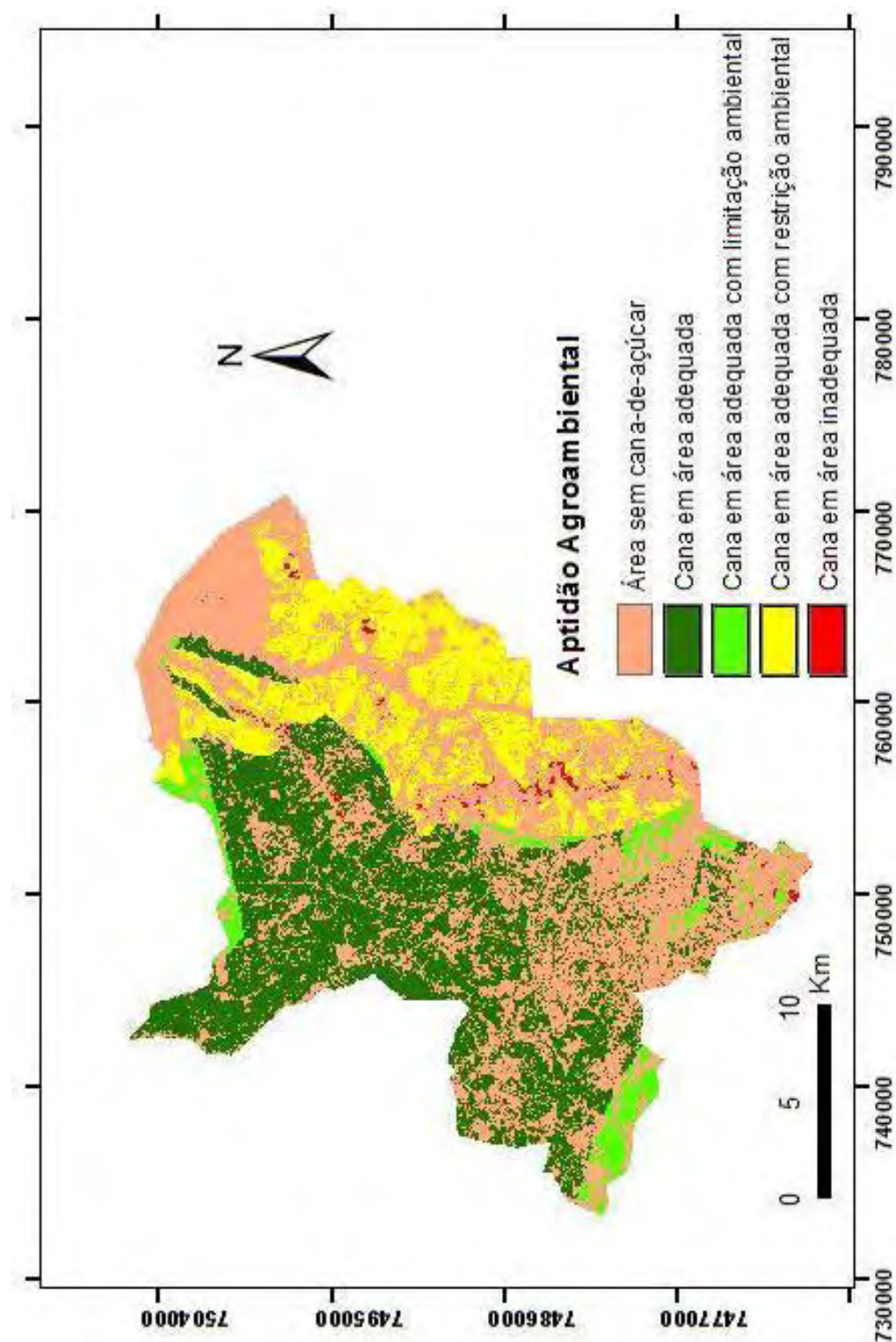


Figura 19. Mapa das áreas cultivadas, em 2011, com cana-de-açúcar em relação ao Zoneamento Agroambiental.

A partir da análise dos mapas dos dois períodos e da Tabela 7 pode ser observado que o crescimento das áreas cultivadas com cana-de-açúcar aconteceu tanto nas áreas adequadas, quanto inadequadas para o cultivo da cultura. Este crescimento foi de 1.326,74 ha em áreas adequadas para o cultivo da cultura, de 667,53 ha em áreas adequadas com limitação ambiental, de 2.558,25 ha em áreas adequadas com restrição ambiental e de 63,62 ha em áreas inadequadas para o cultivo da cultura.

O crescimento da área cultivada com a cultura foi maior nas áreas adequadas com restrição ambiental e adequadas para o cultivo da cultura, o que é justificado por estas áreas já apresentarem uma grande área cultivada com cana-de-açúcar em 2002, dessa forma a expansão da cultura tende a ocorrer nos imóveis lindeiros às áreas cultivadas com a cultura. Além disso, estas áreas apresentam uma maior quantidade de área remanescente para expansão da cultura. A expansão da cultura nas áreas adequadas com limitação ambiental foi menor uma vez que o município dispõe de poucas áreas nestas condições.

Apesar de terem sido criadas em 2008 Resoluções específicas determinando as áreas adequadas e inadequadas para o cultivo da cana-de-açúcar, comparando as áreas cultivadas com a cultura em 2011 e em 2002 foi constatado aumento da área cultivada com cana-de-açúcar em áreas inadequadas.

Embora o aumento tenha sido pequeno, esta situação é muito preocupante, pois estas áreas são destinadas a proteção e conservação da qualidade ambiental e dos sistemas naturais existentes, proteção dos ecossistemas regionais e da biodiversidade, dessa forma a ocupação destas áreas pode provocar diversos impactos ambientais.

7 CONCLUSÃO

O método utilizado para discriminação de áreas cultivadas com cana-de-açúcar apresentou desempenho excelente na classificação da imagem de 2002 e desempenho muito bom na imagem de 2011.

O aumento constatado da área cultivada com cana-de-açúcar aconteceu tanto nas áreas adequadas quanto nas áreas inadequadas para o cultivo da cultura.

O uso de imagens de satélite em conjunto com SIG permitiu a obtenção de informações precisas e com rapidez sobre a expansão da cultura, que podem ser utilizadas pelos órgãos ambientais para o efetivo cumprimento da legislação ambiental estadual e para a produção sustentável da cana-de-açúcar que respeite os recursos naturais.

Apesar dos problemas do Zoneamento Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro, isso não o invalida como instrumento de política pública. Afinal, o ZAA disciplina a atividade canavieira no estado de São Paulo, por meio do licenciamento ambiental dos empreendimentos canavieiros, o qual cria condições sustentáveis para o desenvolvimento do setor no Estado de São Paulo.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, D. A. ; RUDORFF, B. F. T. ; SILVA, W. F. ; CARVALHO, M. A. ; Goltz, E. ; AULICINO, T. L. I. N. ; Brandão, D. ; ADAMI, M. ; SUGAWARA, L. M. ; MELLO, M. P. . **Monitoramento do modo de colheita da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo - ano safra 2009/2010**. São José dos Campos: INPE, 2010,154p.

ALEXANDER, A. G. **Sugarcane physiology**: a comprehensive study of the saccharum source-to-sink system. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Scientific, 1973. 752 p.

ALFONSI, R. R. PEDRO JÚNIOR, M.J. BRUNINI, O; BARBIERI, V. Condições climáticas para a cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S.B. **Cana-de-açúcar**: cultivo e utilização. Campinas, fundação Cargill, 1987, v.1, p.42-55.

ARALDI, R. **Avaliação da absorção do Amicarbazone e Intoxicação em cana-de-açúcar e plantas daninhas**. 2010. 83f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2010.

BARBIERI, V.; VILLA NOVA, N. A. **Climatologia e a cana-de-açúcar**. Araras: PLANALSUCAR – Coordenadoria Regional Sul – COSUL. Climatologia, 1977. p. 1-22.

BARBOSA, A. P. **Comparação de métodos de classificação de imagens, visando o gerenciamento de áreas citrícolas**. 2009. 65f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2009.

BASALDI, O.V.; FARIA, C.A.C.; NOVAES FILHO, R. Considerações sobre a dinâmica recente do complexo sucroalcooleiro no Estado de São Paulo, **Informações Econômicas**, São Paulo, SP, v. 26, n.4, p.21-29, 1996.

BARRETT, E. C.; CURTIS, L. F. **Introduction to environmental remote sensing**. London, UK. Chapman & Hall. 3ª Ed. 1992. 426p.

BUCENE, L. C. **Sistemas de informação geográfica na classificação de terras para irrigação, em Pardinho - SP**. 2002. 177f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.

CÂMARA, G. **Modelos, linguagens e arquiteturas para bancos de dados geográficos**. 264 f. Tese (Doutorado em Computação Aplicada). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1995. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/teses/gilberto/>>. Acesso em: 26 jun. 2012.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. **Princípios básicos do geoprocessamento**. In: ASSAD, E. D.; SANO, E. E. **Sistemas de Informações Geográficas. Aplicações na Agricultura**, 2.ed. Brasília: Embrapa SPI/ Embrapa, CPAC, 1998a. p.3-8.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. **Geoprocessamento em Projetos Ambientais**. 1ª. ed. São José dos Campos: INPE, 1998b. v. único. 190 p.

CAMARGO, A.M.P., CASER, D.V., CAMARGO, F.P., OLIVETTE, M.P.A., SACHS, R.C.C., TORQUATO, S.A. Dinâmica e tendência da expansão da cana-de-açúcar sobre as demais atividades agropecuárias. **Informações econômicas**, v.38, p.47-61, 2008.

CAMARGO Jr, A.S.; TONETO, Jr, R. Indicadores sócio-econômicos e a cana-de-açúcar no estado de São Paulo. **Informações econômicas**. v.39, p.57-67, 2009.

CANASAT. **Monitoramento da cana-de-açúcar via imagens de satélite**: via imagens de satélite. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat/>>. Acesso em: 18 out. 2012.

CARD, D.H. Using known map category marginal frequencies to improve estimates of thematic map accuracy. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.48, n.3, p. 431-439, 1982.

CEPAGRI. Unicamp. **Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura**: Clima dos Municípios Paulistas. Disponível em: <http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_563.html>. Acesso em: 25 jun. 2012.

CONAB- COMPANHIA NACIONAL DO ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira**: Cana-de-açúcar safra 2012/2013. Disponível em:

<http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12_09_05_09_11_59_boletim_cana_portugues_-_agosto_2012_2o_lev.pdf>. Acesso em: 18 out. 2012.

CONGALTON, R.G.; ODERWALD, R.G.; MEAD, R.G. Assessing Landsat classification accuracy using discrete multivariate statistical techniques. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.49, n.12, p. 1671-1678, 1983.

CRÓSTA, A.P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas, SP IG/UNICAMP, 1992. 170 p.

CURRAN, P.J. **Principles of Remote Sensing**. 2.ed. New York: Longman Scientific & Technical, 1992. 282p.

DANIELS, J.; ROACH, B. T. Taxonomy and evolution. In: HEINZ, D. J. (Ed.) **Sugarcane improvement through breeding**. Amsterdam: Elsevier Science, 1987. 612p.

DEAN, W. **A ferro e fogo: a história e a devastação da Mata Atlântica brasileira**. São Paulo: Companhia das Letras, 1996. 483p.

DI GREGORIO, A. **Land cover classification system (LCCS)**, version 2: classification concepts and user manual. Rome: FAO, 2004. 208p.

EASTMAN, J.R. **Idrisi 15: The Andes Edition**. Worcester, MA: Clark University, 2006.

EDGERTON, C. W. **Sugarcane and its diseases**. Baton Rouge, L.A.: Louisiana State University, 1958. 301p.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Monitoramento por Satélite. LANDSAT – Land Remote Sensing Satellite**. Disponível em: <<http://www.sat.cnpm.embrapa.br/conteudo/landsat.htm>>. Acesso em: 24 jun. 2012.

FIGUEIREDO, P.; LANDELL, M.G.A.; CAMPANA, M.P. **IAC Boletim 200: Cana-de-açúcar-de açúcar**. 6. ed. Campinas: IAC, 1995. CD-ROM.

FONSECA, L. M. G. **Processamento digital de imagens**. São José dos Campos: INPE, 2000.

FORTES, C. **Discriminação varietal e estimativa de produtividade agroindustrial de cana-de-açúcar pelo sensor orbital ETM+/LANDSAT 7**. 2003. 131 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003

GALVÃO, L. S. ; FORMAGGIO, A. R. ; TISOT, D. A. Discrimination of sugarcane varieties in southeastern Brazil with EO-1 Hyperion data. **Remote Sensing of Environment**, v. 94, n. 4, p. 523-534, May. 2005.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento de Imagens Digitais**. 1.ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 2000. 528p.

IBGE, INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **IBGE cidades@**:São Manuel. Disponível em: < <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1> >. Acesso em: 27 jun. 2012.

JENSEN, J. R. **Introductory digital image processing: a remote sensing perspective**. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1996. 316p.

JORDÃO, C. O. **Análise da vulnerabilidade ambiental no planejamento espacial do cultivo de cana-de-açúcar no estado de São Paulo**. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. Disponível em: < <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-09122011-133549/pt-br.php> >. Acesso em 20 jun 2012.

LEITE, R.C.C. **Pro-álcool**: a única alternativa para o future. 1. ed. Campinas: UNICAMP, 1987. 86p.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote sensing and image interpretation**. 3. ed. New York John Wiley & Sons, 1994. 1040 p.

LINGLE, S. E. Sugarcane. In: Smith, D. L.; Hamel, C. (eds.) **Crop Yield: physiology and processes**. Canadá: Mc Gill University, 1998. cap. 9, p 287 – 306. 504p.

LUCCHESI, A. A. Processos fisiológicos da cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*). **Boletim Técnico ESALQ/CENA**, n.7, p.1-50, 1995.

MAGALHÃES, A. C. N. Ecofisiologia da cana-de-açúcar: aspectos do metabolismo do carbono da planta. In: Castro, P. R. C.; Ferreira, S. O.; Yamada, T. **Ecofisiologia da Produção Agrícola**. Piracicaba: Associação Brasileira para pesquisa do Potássio e do Fósforo, 1987. p. 113-118.

MATSUOKA S.; LAVORENTI, N. A.; MENEZES, L. L. SALIBE, A. C.; GHELLER, A. C. A.; ARIZONO, H. Novas variedades de cana-de-açúcar para a região Oeste do Estado de São Paulo. In. Congresso Nacional da Stab, 7., Londrina, 1999. **Anais**. Piracicaba: STAB, 1999. P.34-39.

MOREIRA, M.A.**Fundamentos de Sensoriamento Remoto e metodologias de aplicação**.3.ed.Viçosa: Ed. UFV, 2005.320p.

NOGUCHI, M. T. G.. **Um sistema baseado em regras fuzzy para classificação supervisionada de imagens multiespectrais de alta resolução**. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Informática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004. Disponível em:

<<http://dspace.c3sl.ufpr.br/dspace/bitstream/handle/1884/660/dissertacao.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 03 jul. 2012.

NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. São Paulo: Ed. Edgard Blucher, 3ª ed.. 2008. 388p.

OLIVEIRA, J.B. de. Solos do Estado de São Paulo: descrição das classes registradas no mapa pedológico. **Boletim Científico nº 45 IAC**. Campinas, 1999. 108p.

OLIVETTE, Mário P. de ; NACHILUK, Kátia e FRANCISCO, Vera L. F. dos S. Análise comparativa da área plantada com cana-de-açúcar frente aos principais grupos de culturas nos municípios paulistas, 1996-2008. **Revista Informações Econômicas** 40 (2): 42-59. 2010.

PARANHOS, S.B. **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v.1.431 p.

PICOLI, M. C. A. **Estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar: Estudo de caso Usina Catanduva**. 2006. 90f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2006.

PONTES, P. P. B.; ROCHA, J. V.; LAMPARELLI, R. A. C. Análise temporal de índices de vegetação como subsídio à previsão de safras de cana-de-açúcar. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XII, 2005, Goiânia, Brasil. **Anais...** São José dos Campos, INPE, 2005. p. 217-224. 2005.

PONZONI, F. J. ALMEIDA, E. S. A estimativa do parâmetro kappa (k) da análise multivariada discreta no contexto de um SIG. In: Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto, 8, 1996, Salvador. **Anais...** São José dos Campos : INPE, 1996. p. 729-733.

PRADO, F. A. **Sistema hierárquico de classificação para mapeamento da cobertura da terra nas escalas regional e urbana**. 2009. 168f. Dissertação. (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, Presidente Prudente. 2009.

QUEIROZ, R.B.;SEVERINO, P.A.R.; RODRIGUES, A.G.;GÓMEZ, A.T. Redes Neurais: Um comparativo com Máxima Verossimilhança Gaussiana na Classificação de Imagens CBERS 1. In: II Workshop de Tecnologia da Informação aplicada ao Meio Ambiente, 2004 Itajaí. **Anais...** Itajaí: CBCOMP 2004.

RANIERI, V. E. L.; MONTAÑO, M; FONTES, A. T.; OLIVEIRA, I. S.; SOUZA, M. P. O Zoneamento Ambiental como Instrumento de Política e Gestão Ambiental. In: X Simpósio do PPG-SEA: Trajetórias e Perspectivas de um Curso Multidisciplinar (Programa de Pós-Graduação em Ciências de Engenharia Ambiental), 2005. **Anais...** São Carlos. PPG-SEA.2005

RICHARDS, J. A.; JIA, X. **Remote sensing digital image analysis: an introduction**. 3. ed. New York: Springer-Verlag, 1999. 363p.

RIZZI, R. ; RUDORFF, B. F. T. Imagens Landsat na estimativa da área plantada com soja em municípios do Rio Grande do Sul. In: XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2003, Belo Horizonte. **Anais XI SBSR**. São José dos Campos : INPE, 2003. p. 231-238.

RUDORFF, B. F. T.; BATISTA, G. T. Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological-spectral models. **Remote Sensing of Environment**, v. 33, n 3, p. 183-192. Sept. 1990.

RUDORFF, B. F. T.; BERKA, L. M. S.; MOREIRA, M. A.; DUARTE, V.; ROSA, V. G. C. **Estimativa de área plantada com cana-de-açúcar em municípios do estado de São Paulo por meio de imagens de satélites e técnicas de geoprocessamento: ano safra 2004/2005**. São José dos Campos. INPE, 2004. 54 p. (INPE-11421-RPQ/762).

RUDORFF, B. F. T.; AGUIAR, D.A.; SILVA, W. F.; SUGAWARA, L.M.; ADAMI, M.A. Studies on the Rapid Expansion of Sugarcane for Ethanol Production in São Paulo State (Brazil) Using Landsat Data. **Remote Sensing**. 2010, 2, p. 1057-1076.

SCHOWENGERDT, R. A. **Remote sensing: models and methods for image processing**. 3. ed. San Diego: Elsevier, 2007. 558p.

SILVEIRA, V. F. **Geoprocessamento como instrumento de gestão ambiental**. In: PHILIPPI JR.; ROMÉRIO, M.A.; BRUNA, G.C. Curso de gestão ambiental. Barueri, SP: Nanole, 2004. p. 945-958.

SIMÕES, M. S.; ROCHA, J. V.; LANPARELLI, R. A. C. Análise do comportamento espectral de uma área comercial de cana-de-açúcar em duas safras por meio de radiometria de campo. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11., 2003. Belo Horizonte, Brasil. **Anais...** São José dos Campos, INPE. 2003, p. 2367-2374.

SMA – SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE. **Etanol Verde** - Zoneamento Agroambiental do Estado de São Paulo para o setor Sucroalcooleiro. Disponível em: <<http://www.ambiente.sp.gov.br/etanolverde/zoneamentoAgroambiental.php>>. Acesso em: 24 junho, 2012.

STEIN, A.; MEER, F. V. D.; GORTE, B. **Spatial Statistics for Remote Sensing**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999. 284 p.

SULSOFT. **Idrisi Selva**: GIS and Image Processing Software. Disponível em: <<http://www.idrisi.com.br>>. Acesso em: 24 jun. 2012.

XAVIER, A. C.; RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; BERKA, L. M. S. B.; MOREIRA, M. A. Multi-temporal analysis of MODIS data to classify sugarcane crop. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n 4, p. 755-768. Feb. 2006.