



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/06.29.19.24-TDI

DIAGNÓSTICO DA EROSÃO E A EXPANSÃO DA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO

Grasiela de Oliveira Rodrigues Medeiros

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelos Drs. Angélica Giarolla, e Gilvan Sampaio de Oliveira, aprovada em 13 de maio de 2016.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3LUS58L>>

INPE
São José dos Campos
2016

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):

Presidente:

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

Membros:

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (CTE)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação de Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/06.29.19.24-TDI

DIAGNÓSTICO DA EROSÃO E A EXPANSÃO DA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO

Grasiela de Oliveira Rodrigues Medeiros

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelos Drs. Angélica Giarolla, e Gilvan Sampaio de Oliveira, aprovada em 13 de maio de 2016.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3LUS58L>>

INPE
São José dos Campos
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Medeiros, Grasiela de Oliveira Rodrigues.

M467d Diagnóstico da erosão e a expansão da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo / Grasiela de Oliveira Rodrigues Medeiros. – São José dos Campos : INPE, 2016.
xl + 237 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/06.29.19.24-TDI)

Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2016.

Orientadores : Drs. Angélica Giarolla, e Gilvan Sampaio de Oliveira.

1. Sistema terrestre. 2. Conservação. 3. Mudanças climáticas.
4. Cana-de-açúcar. 5. Erosão. I.Título.

CDU 631.459:633.61(815.6)



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Grasiela de Oliveira Rodrigues Medeiros**

Título: "DIAGNÓSTICO DA EROÇÃO E A EXPANSÃO DA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO".

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Doutor(a)** em
Ciência do Sistema Terrestre

Dr. Jean Pierre Henry Balbaud Ometto



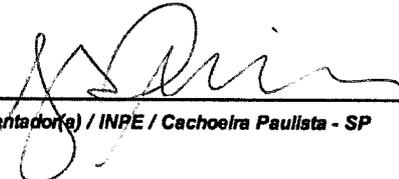
Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

Dra. Angélica Giarolla



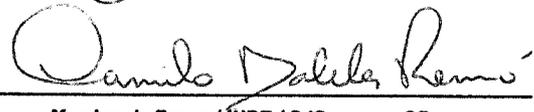
Orientador(a) / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Gilvan Sampaio de Oliveira



Orientador(a) / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Camilo Daleles Rennó



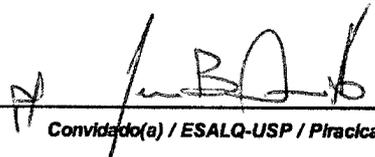
Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dra. Mara de Andrade Marinho



Convidado(a) / UNICAMP / Campinas - SP

Dr. Fabio Ricardo Marin



Convidado(a) / ESALQ-USP / Piracicaba - SP

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 13 de Maio de 2016

"A arte de viver consiste em tirar o maior bem do maior mal."

Machado de Assis

*Vó Dita,
Joaquim José Rodrigues,
Nilda Cássia Oliveira Rodrigues, que me ensinou a ler,
Douglas Ricardo de Azevedo Medeiros e
Rudy de Oliveira Rodrigues*

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus que permitiu tudo que eu vivi.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro.

A minha orientadora Dra. Angelica Giarolla, por me guiar e apoiar em toda essa jornada; por me incentivar a transpor medos e obstáculos que em alguns momentos se fizeram fortes; por ter sorrido comigo em cada conquista - palavras me faltam...

Ao meu orientador Dr. Gilvan Sampaio, pelo apoio em momentos importantes, pela preciosa orientação e por ter sempre me aconselhado e estimulado a fazer o melhor.

Ao Dr. Jean Ometto, por todo apoio e incentivo durante estes anos de Doutorado.

Ao Programa de Pós-graduação em Ciência do Sistema Terrestre, à querida Ângela Harada, por ter se desdobrado em muitas para fazer com que questões burocráticas não nos incomodassem e, mais recentemente, à querida Mariana. Ao coordenador do curso, Dr. Plínio Alvalá, pela dedicação.

À Professora Dra. Mara de Andrade Marinho da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campinas (FEAGRI/UNICAMP), a quem agradeço pelas conversas esclarecedoras, incentivos e correções.

Ao Dr. Carlos Rogério de Mello da Universidade Federal de Lavras (UFLA), por prontamente me orientar em relação às metodologias para o cálculo regionalizado da erosividade utilizado neste trabalho.

Ao Dr. Marcio Valeriano, pelo pronto auxílio em assuntos geomorfológicos.

À equipe do LUCCE/INPE, especialmente à Dra. Ana Paula Dutra de Aguiar pela orientação e disponibilidade para ajudar nos aspectos da modelagem e

também aos queridos Talita Oliveira Assis e Diego Melo pelo pronto auxílio, esclarecimentos e descontraídas conversas.

À equipe INLAND, especialmente ao Raphael Pousa, Felipe Alexandre e Marcos Sanchez pelo auxílio técnico e ao amigo Guilherme Martins que sempre esteve à disposição.

À Direção do Centro de Integração e Gerenciamento de Informações/Coordenadoria de Planejamento Ambiental (CPLA) da Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo pela disponibilização de dados.

À Dra. Luciana Soler, pelas conversas sempre tão ricas, pelo incentivo e pela amizade.

Aos meus colegas da turma CST-2011, pelo companheirismo, por compartilharmos medos e expectativas e por todos os momentos em que estivemos juntos e felizes; em especial, gostaria de agradecer pela amizade daqueles que sempre senti mais próximos: Taise Farias, Fernanda Arguello e Janaina Michelin.

A meus queridos e amados pais, Joaquim e Nilda, pelo amor, pela dedicação, por toda a confiança, por terem entendido muitas das minhas ausências e por jamais terem duvidado da carreira que eu escolhi trilhar. Ao meu irmão querido, Rudy Rodrigues, pelo incentivo.

À família Oliveira e Rodrigues, por me fazerem tão bem mesmo estando longe.

A meu querido esposo, Douglas Medeiros "Bob", pelo apoio incondicional e amoroso, pelas preocupações com minha saúde, sobretudo mental, pelas muitas tentativas de me alegrar e me distrair e, por, embora sem saber direito sobre o "universo científico", orgulha-se de mim. Amo você.

À família Azevedo Medeiros para a qual eu entrei oficialmente em dezembro, principalmente à Dona Ana, Seu Gerson, Alessandra, Vinícius Matos e Lane, agradeço pelo apoio físico e emocional, pela preocupação e pela torcida.

À família Lima, Carol, Sueli e Chico, por toda a consideração e por estarem sempre ao meu lado (literalmente).

Às amigas Iane Brito e Wanja Lamera pelos almoços e pelas conversas leves, mas profundas.

À amiga Lígia Silva pelo apoio, pela torcida e por todo o afeto.

À amiga Cássia Gama, por preciosa ajuda na reta final deste trabalho e pela companhia efeiana em São José dos Campos.

RESUMO

O solo é um componente chave para o funcionamento do Sistema Terrestre e encontra-se na superfície do planeta onde dão-se as interfaces entre a atmosfera, Pedosfera, biosfera e litosfera. No entanto, este recurso vem sofrendo pressões antrópicas que conduzem ao aumento das áreas degradadas e, conseqüentemente, abandonadas em regiões anteriormente produtivas. Esta pesquisa de caráter multidisciplinar teve como objetivo avaliar a expansão da cana-de-açúcar para o Estado de São Paulo considerando projeções climáticas e a degradação do solo por erosão. Sendo assim, a primeira fase metodológica abordou a estimativa das taxas de perda de solo para o Estado de São Paulo utilizando a Equação Universal da Perda de Solo (USLE), modelo amplamente utilizados em estudos de conservação do solo. A partir desta estimativa foi calculado o Índice do Tempo de Vida do Solo, uma ferramenta diagnóstica capaz de avaliar o nível de degradação dos solos em função das taxas estimadas de erosão hídrica e de renovação dos solos. De acordo com esta metodologia, foram consideradas duas abordagens: i) a primeira determinou o tempo remanescente para que o perfil do *solum* (horizontes A+B) fosse degradado até atingir uma profundidade crítica de 1 m; ii) a segunda, inédita, considerou o tempo remanescente para que a camada superficial de 0,25 m do solo, rica em nutrientes, fosse perdida por erosão. Os resultados dessas etapas mostraram que a taxa média estimada de perda de solo é de 30 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ e que 59 % da área do estado apresentaram taxas estimadas de perda de solo acima de 12 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, limite de tolerância médio considerado na literatura. Os resultados também mostraram que as taxas médias de perda de solo encontradas para as áreas utilizadas para o plantio de culturas anuais, semi-perenes e perenes foi de, respectivamente, 118 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, 78 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ e 38 Mg ha⁻¹ ano⁻¹. Assim, de forma geral, esta fase do estudo permitiu concluir que o Estado de São Paulo requer atenção com relação a conservação dos seus solos principalmente no que diz respeito aos usos agrícolas. A segunda fase metodológica consistiu na criação de um modelo de expansão da cana-de-açúcar capaz de simular a expansão da área cultivada com cana-de-açúcar para o Estado de São Paulo utilizando o arcabouço de modelagem LuccME, desenvolvido no Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Foram realizadas simulações para o período de 2005-2010, validação para o ano de 2012 e projeções para o ano de 2050. As projeções consideraram os dados simulados de temperatura do ar e precipitação do RCP 4.5 e 8.5 gerados pelo modelo *Hadley Centre Global Environment Model*, version 2-Earth System (HadGEM2-ES) do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5) que indicaram aumento da temperatura do ar e precipitação para os cenários analisados; além de dados de produtividade futura da cana-de-açúcar estimados via Modelo Integrado de Processos Superficiais (INLAND). Estas simulações de produtividade, por sua vez, também consideraram as projeções climáticas RCP 4.5 e 8.5 e indicaram maior aumento de produtividade para RCP 8.5. Os resultados do modelo de expansão da cana-de-açúcar indicaram um acerto de 68,89% em comparação dos dados simulados com os

dados mapeados via projeto CANASAT para o mesmo ano. Estes resultados, comparados aos resultados da primeira fase do trabalho (degradação do solo por erosão) apontaram que em 2050 a expansão da cana-de-açúcar no estado de São Paulo prevista neste trabalho considerando-se as previsões climáticas RCP 4.5 acarretará em prejuízos no que diz respeito à degradação do solo, uma vez que, se direcionará para regiões susceptíveis à erosão.

Palavras-chave: Sistema Terrestre. Conservação. Sistema Solo. Mudanças climáticas. Erosão. Cana-de-açúcar.

EROSION DIAGNOSIS AND SUGARCANE EXPANSION IN SAO PAULO STATE

ABSTRACT

The soil is a key component for the functioning of the Earth system and lies on the surface of the planet at the interfaces of the atmosphere, pedosphere, biosphere and lithosphere. However, this resource is affected by human pressures leading to an increase in degraded areas which eventually, become lost for agricultural purposes. This multidisciplinary research aimed to evaluate the expansion of sugarcane in the State of São Paulo, Brazil, considering climate projections and soil degradation resulting from erosion. Thus, the first methodological phase of this study established estimates of soil loss rates for the State of São Paulo by the Universal Soil Loss Equation (USLE), a model widely used in soil conservation studies. From this estimate, the Soil Lifetime Index was calculated, a diagnostic tool to assess the land degradation level, defined by the estimated erosion and soil renewal rates. This methodology was applied in two steps: i) first, we estimated the remaining time of degradation of the solum profile (horizons A + B) until reaching a critical depth of 1 m; ii) second, the remaining time for erosion loss of the nutrient-rich soil surface layer of 0.25 m. The results of these steps showed that the average estimated soil loss rate was $30 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ and that the estimated soil loss rates exceeded the average tolerance limit, found in the literature, of $12 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, in 59% of the area. Thus, in this part of the study, the conclusion was drawn that measures must be taken for the entire state of Sao Paulo in relation to soil conservation, especially with regard to agricultural management. The second methodological stage consisted in creating a model of sugarcane expansion to simulate the expansion of sugarcane fields in the State of São Paulo using LuccME, a modeling framework developed at the Center for Earth System Science (CCST), the National Institute for Space Research (INPE). Simulations were performed from 2005 to 2010, validation in 2012, resulting in projections for 2050. The data used were simulated air temperature and precipitation data of the Representative Concentration Pathway (RCP 4.5 and 8.5 from projections generated by the Hadley Centre Global Environment Model, version 2-Earth System (HadGEM2-ES) of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5). These projections indicated an increase in air temperature and precipitation for the scenarios analyzed, as well as higher sugarcane yields in the future *or* future sugarcane yields, estimated by the Integrated Model of Surface Processes (INLAND). The climate projections RCP 4.5 and 8.5 were also considered in the simulations and both indicated yield increases, especially for 8.5 RCP. The results of the sugarcane expansion model showed a peak *or* an extreme result of 68.89% compared with the CANASAT project for the same year. These results, compared to the results of the first phase of the work (soil degradation by erosion), indicated that by 2050, under the climate predictions of RCP 4.5, sugarcane expansion in the state of Sao Paulo will result in losses with regard to soil degradation, since the sugarcane fields will most likely have reached erosion-susceptible regions.

Keywords: Earth System. Conservation. Soil System. Climate Change. Erosion. Sugarcane.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1.1 - Fluxograma geral dessa pesquisa de doutorado	6
Figura 2.1 - Localização do estado de São Paulo no Brasil	8
Figura 3.1 - Metodologia do cálculo regionalizado do fator R para o estado de São Paulo.....	15
Figura 3.2 - Localização das estações elencadas na Tabela 3.1 e que apresentam influência geográfica no estado de São Paulo	19
Figura 3.3 - Zonas PCI, polígonos de Thiessen e tipos climáticos do estado de São Paulo.....	20
Figura 3.4 - Mapa atualizado da erosividade para o Estado de São Paulo	22
Figura 3.5 - Correlação da erosividade média anual com a) latitude, b) longitude, c) precipitação média anual e d) altitude.	25
Figura 3.6 - Erosividade média mensal ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e precipitação média mensal (mm) em algumas estações meteorológicas.....	26
Figura 4.1- Mapa da erodibilidade dos solos do Estado de São Paulo (fator K).....	39
Figura 4.2 - Mapa do fator comprimento de vertentes para o Estado de São Paulo (fator L)	41
Figura 4.3 - Mapa do fator declividade para o Estado de São Paulo (fator S) .	43
Figura 4.4 - Mapa categórico da declividade no Estado de São Paulo conforme classificação EMBRAPA (1999)	44
Figura 4.5 - Mapa do Potencial Natural de Erosão (PNE) do Estado de São Paulo	45
Figura 4.6 - Mapa do fator uso e ocupação do solo para o estado de São Paulo (fator C).....	47
Figura 4.7 - Mapa do fator práticas conservacionistas para o Estado de São Paulo (fator P)	49
Figura 4.8 - Mapa da estimativa potencial da taxa de perda de solo para o Estado de São Paulo.....	50
Figura 4.9 - Mapa categórico da estimativa potencial da taxa de perda de solo conforme limiar de $12 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$	51
Figura 5.1 - Mapa das situações de planejamento para o estado de São Paulo	66
Figura 5.2 - Mapa do ITVS para o Estado de São Paulo considerando profundidade crítica de 1 m.....	69

Figura 5.3 - TVS em função da profundidade do solo e da taxa líquida de perda de solo	70
Figura 5.4 - Histograma do ITVS considerando o tempo remanescente para atingir a profundidade crítica de 1 m	71
Figura 5.5 - Mapa do Tempo de Vida do Solo para os 25 cm superficiais de solo do Estado de São Paulo	73
Figura 5.6 - Histograma do Tempo de Vida do Solo para a perda dos 25 cm superficiais do <i>solum</i>	74
Figura 6.1 - Ciclos de Cana-de-açúcar e variações na temperatura e pluviosidade na Região Centro-sul do Brasil.....	78
Figura 6.2 - Emissões históricas de combustíveis fósseis e na era industrial (preto) comparadas com as projeções do relatório 5 do IPCC (paleta colorida)	81
Figura 6.3 - Fluxograma metodológico para a determinação das áreas aptas para o plantio da cana-de-açúcar considerando as projeções climáticas RCP 4.5 e 8.5 provenientes dos modelos HadGEM2-ES e MIROC-5	83
Figura 6.4 - Temperatura média mensal para o período de 1950 – 2000 (dados observados).....	86
Figura 6.5 - Precipitação média mensal para o período de 1950 – 2000 (dados observados).....	87
Figura 6.6 - Climatologia dos modelos HadGEM2-ES e MIROC-5 para o período 1950-2000 para o Estado de São Paulo	89
Figura 6.7 - Anomalia sazonal das temperaturas do ar (°C) para o período 1950-2000 com base nos resultados o modelo HadGEM2-ES para o Estado de São Paulo	90
Figura 6.8 - Anomalia sazonal das temperaturas (°C) para o período 1950 – 2000 com base nos resultados o modelo MIROC-5 para o Estado de São Paulo.....	91
Figura 6.9 - Anomalia sazonal das temperaturas para o período 1950 – 2000	92
Figura 6.10 - Climatologia dos modelos HadGEM2-ES e MIROC-5 para o período 1950-2000 para o Estado de São Paulo	93
Figura 6.11 - Anomalia da precipitação apresentada pelo modelo HadGEM2-ES para o Estado de São Paulo.....	94
Figura 6.12 - Anomalia da precipitação apresentada pelo modelo MIROC-5 para o Estado de São Paulo	95
Figura 6.13 - Anomalia sazonal da precipitação para o período 1950 – 2000 para o estado de São Paulo	96

Figura 6.14 - Precipitação média anual para o Estado de São Paulo correspondente ao período climatológico 1950 – 2000.....	98
Figura 6.15 - Precipitação média anual para 2050 (média do período 2041 - 2060) obtida via simulação dos modelos HadGEM2-ES e MIROC-5 para os cenários RCP 4.5 e 8.5.	99
Figura 6.16 - Incremento na precipitação média anual em 2050 com relação à média histórica (1950- 2000) para o Estado de São Paulo	99
Figura 6.17 - Temperatura média anual climatológica para o Estado de São Paulo correspondente ao período 1950 – 2000	100
Figura 6.18 - Temperatura média anual para 2050 (média do período 2041 - 2060) obtida a partir da simulação dos modelos HadGEM2-ES e MIROC-5 para os cenários RCP 4.5 e 8.5 para o Estado de SP	101
Figura 6.19 - Incremento na temperatura média anual com relação à média climatológica (1950- 2000) para o Estado de São Paulo	102
Figura 6.20 - Temperatura média mensal climatológica (1950- 2000) para o Estado de São Paulo.....	103
Figura 6.21 - Incremento da temperatura média mensal simulada via modelo HadGEM2-ES (RCP 4.5) com relação à temperatura média mensal climatológica (1950- 2000) para o Estado de São Paulo	104
Figura 6.22 - Incremento da temperatura média mensal simulada via modelo HadGEM2-ES (RCP 8.5) com relação à temperatura média mensal climatológica (1950- 2000) para o Estado de São Paulo	105
Figura 6.23 - Incremento da temperatura média mensal simulada via modelo MIROC-5 (RCP 4.5) com relação à temperatura média mensal climatológica (1950- 2000) para o Estado de São Paulo	106
Figura 6.24 - Incremento da temperatura média mensal simulada via modelo MIROC-5 (RCP 8.5) com relação à temperatura média mensal climatológica (1950- 2000)	107
Figura 6.25 - Incremento de temperatura para o ano de 2050 (1941-2060) considerando as temperaturas médias mensais climatológicas (1950-2000).....	110
Figura 6.26 - Zonas aptas para o cultivo da cana-de-açúcar com relação à precipitação média anual referente ao período 1950-2000	111
Figura 6.27 - Zonas aptas para o cultivo da cana-de-açúcar com relação à precipitação média anual de acordo com os resultados das simulações dos modelos HadGEM2-ES e MIROC-5 para os cenários RCP 4.5 e 8.5	112

Figura 6.28 - Zonas aptas para o cultivo da cana-de-açúcar com relação à temperatura para o Estado de São Paulo	113
Figura 6.29 - Zonas aptas para o período de brotamento e crescimento inicial da cana-de-açúcar com relação à temperatura de acordo com os resultados das simulações dos modelos HadGEM2-ES e MIROC-5 para os cenários RCP 4.5 e 8.5 para o Estado de São Paulo	114
Figura 6.30 - Zonas aptas para o período de maturação da cana-de-açúcar com relação à temperatura de acordo com os resultados das simulações dos modelos HadGEM2-ES e MIROC-5 para os cenários RCP 4.5 e 8.5	114
Figura 6.31 - Zonas aptas totais para o cultivo da cana-de-açúcar com relação à temperatura de acordo com os resultados das simulações dos modelos HadGEM2-ES e MIROC-5 para os cenários RCP 4.5 e 8.5	116
Figura 7.1 - Estrutura básica do modelo INLAND	122
Figura 7.2 - Índice de Área Folhear (IAF) simulado para um ciclo de produtividade de cana-de-açúcar típico da região sudeste	123
Figura 7.3 - Frações de alocação de carbono ao longo do ciclo da cana de açúcar	124
Figura 7.4 - Fluxograma geral do método para a avaliação da produtividade simulada considerando projeções climáticas	126
Figura 7.5 - Concentrações de CO ₂ utilizadas nas simulações da produtividade da cana-de-açúcar para o período de controle (histórico) e para o período 2005-2050 com base nas projeções climáticas RCP4.5 e 8.5 obtidas através do modelo HadGEM2-ES.	127
Figura 7.6 - Produtividade simulada através do modelo INLAND/AGRO utilizando dados históricos observados de concentração de CO ₂ , precipitação e temperatura (período controle) para o Estado de São Paulo.....	128
Figura 7.7 - Produtividade observada para o período 2005-2014 para o Estado de São Paulo.....	129
Figura 7.8 - Erro estimado entre a produtividade observada e a produtividade estimada para o Estado de São Paulo.....	130
Figura 7.9 - Zoneamento Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro do Estado de São Paulo.....	131
Figura 7.10 - Produtividade simulada para o ano de 2014 baseada em projeção climática para o Estado de São Paulo	132

Figura 7.11 - Incremento da produtividade simulada em relação ao ano de 2014 baseado em projeção climática RCP 4.5 para o Estado de São Paulo.....	133
Figura 7.12 - Incremento da produtividade simulada em relação ao ano de 2014 baseado em projeção climática RCP 8.5 para o Estado de São Paulo.....	134
Figura 7.13 - Evolução da produtividade média, mínima e máxima simuladas para o Estado de São Paulo considerando a projeção climática RCP 4.5.....	134
Figura 7.14 - Evolução da produtividade média, mínima e máxima simuladas para o Estado de São Paulo considerando a projeção climática RCP 8.5.....	135
Figura 8.1 - Etapas metodológicas para a construção do modelo de expansão da cana-de-açúcar para o Estado de São Paulo	140
Figura 8.2 - Grades regulares utilizadas para a escolha do tamanho das células do plano de preenchimento das células com cana-de-açúcar.	142
Figura 8.3 - Categorias cana-de-açúcar, demais uso e estática em 2005	145
Figura 8.4 - Categorias cana-de-açúcar, demais uso e estática em 2006	145
Figura 8.5 - Categorias cana-de-açúcar, demais uso e estática em 2007	146
Figura 8.6 - Categorias cana-de-açúcar, demais uso e estática em 2008	146
Figura 8.7 - Categorias cana-de-açúcar, demais uso e estática em 2009	147
Figura 8.8 - Categorias cana-de-açúcar, demais uso e estática em 2010	147
Figura 8.9 - Mapa da localização das rodovias, ferrovias e hidrovias que passam pelo estado de São Paulo, Fonte: CTBE	152
Figura 8.10 - Mapa da localização das cidades do estado de São Paulo	152
Figura 8.11 - Mapa da localização dos portos do estado de São Paulo.....	153
Figura 8.12 - Mapa da localização dos dutos paulistas existentes no período 2005-2010	153
Figura 8.13 - Mapa da localização das usinas de cana-de-açúcar com suas datas de fundação e das usinas térmicas que queimam o bagaço da cana-de-açúcar no estado de São Paulo	154
Figura 8.14 - Mapa de declividade do estado de São Paulo	154
Figura 8.15 - Mapa das áreas aptas para o plantio da cana-de-açúcar em relação à declividade.....	155
Figura 8.16 - Rede hidrográfica do Estado de São Paulo,	155

Figura 8.17 - a) Precipitação Média Anual (período 1950 – 2000), Fonte: World Clim; b) áreas aptas para a expansão da cana-de-açúcar cuja precipitação média anual varia entre 1200 e 2500 mm	156
Figura 8.18 - Dados de temperatura utilizados. a) Temperatura média mensal (Fonte: WorldClim - <i>Global Climate Data</i>); b) áreas aptas para o brotamento e crescimento da cana-de-açúcar onde a temperatura média dos meses de outubro a fevereiro é superior a 20°C; c) áreas aptas para a maturação da cana-de-açúcar onde a temperatura média para os meses de Maio a Agosto está entre 10 e 20°C; d) áreas aptas para o plantio da cana-de-açúcar (interseção das áreas mostradas em b e c)	156
Figura 8.19 - Áreas com fertilidade dos solos alta.....	157
Figura 8.20 - Áreas com boa aptidão do solo para a cana-de-açúcar.....	157
Figura 8.21 - a) Radiação Solar anual; b) Radiação solar na primavera; c) Radiação solar no verão	158
Figura 8.22 - a) Deficiência hídrica anual; b) deficiência hídrica no segundo trimestre; c) deficiência hídrica no terceiro trimestre; d) deficiência hídrica no quarto trimestre. Fonte: IAC/APTA	158
Figura 8.23 – Áreas sem pedregosidade	159
Figura 8.24 - Áreas cuja profundidade do solo é favorável ao plantio da cana-de-açúcar	159
Figura 8.25 – Localização do uso ‘pastagem’	160
Figura 8.26 - Produtividade da cana-de-açúcar para os municípios paulistas no período 2005 – 2014.	161
Figura 8.27 - Quantidade produzida de cana-de-açúcar no estado de São Paulo no período 2005 – 2014.....	162
Figura 8.28 - Área colhida de cana-de-açúcar no estado de São Paulo no período 2005 – 2014.	163
Figura 8.29 – PIB agrícola dos municípios de São Paulo	164
Figura 8.30 – Unidades de conservação.....	165
Figura 8.31 - Zonas com aptidão edafoclimática para a expansão da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo.....	166
Figura 8.32 - Valores de demandas em cada célula para o ano de 2005.	168
Figura 8.33 - Dados de área colhida e área plantada com cana-de-açúcar no estado de São Paulo. Fonte: SIDRA/IBGE	174
Figura 8.34 - Comparação entre os coeficientes da regressão linear e da regressão espacial (<i>Spatial Lag</i>) para o uso ‘cana’ sendo: a) coeficiente; b) coeficiente normalizado	181

Figura 8.36 - Comparação entre os coeficientes da regressão linear e da regressão espacial (<i>Spatial Lag</i>) para o uso 'diversos'	186
Figura 8.37 - Simulação da área cultivada com cana-de-açúcar para o ano de 2005	188
Figura 8.38 - Simulação da área cultivada com cana-de-açúcar para o ano de 2006	188
Figura 8.39 - Simulação da área cultivada com cana-de-açúcar para o ano de 2007	189
Figura 8.40 - Simulação da área cultivada com cana-de-açúcar para o ano de 2008	189
Figura 8.41 - Simulação da área cultivada com cana-de-açúcar para o ano de 2009	190
Figura 8.42 - Simulação da área cultivada com cana-de-açúcar para o ano de 2010	190
Figura 8.43 - Simulação da área cultivada com cana-de-açúcar para o ano de 2011	191
Figura 8.44 - Simulação da área cultivada com cana-de-açúcar para o ano de 2012	191
Figura 8.45 - Simulação da área cultivada com cana-de-açúcar para o ano de 2050 considerando as projeções climáticas RCP 4.5	193
Figura 8.46 - Simulação da área cultivada com cana-de-açúcar para o ano de 2050 considerando as projeções climáticas RCP 8.5	193
Figura 8.47 - Simulação da área cultivada com cana-de-açúcar de acordo com as projeções climáticas RCP 4.5 e 8.5	194
Figura 8.48 - Incremento anual da área cultivada com cana-de-açúcar considerando as projeções climáticas RCP 4.5 e 8.5	194
Figura 8.49 - Variação dos percentuais de área plantada em cada célula. Os valores negativos indicam que os percentuais de área plantada em cada célula considerando o cenário RCP 8.5 foram superiores aos percentuais considerando a área plantada simulada de acordo com o cenário RCP 4.5.	195
Figura 8.50 - Variação dos percentuais de área plantada em cada célula e sobreposição das áreas aptas considerando precipitação e temperatura utilizadas como <i>input</i> nas simulações de 2050.	196
Figura 9.1 - Estimativas das taxas de perda de solo para o Estado de São Paulo nas áreas produtoras de cana-de-açúcar	200
Figura 9.2 - Situações de planejamento das áreas produtoras de cana-de-açúcar localizadas no Estado de São Paulo	200

Figura 9.3 - Índice do Tempo de Vida do Solo (ITVS) considerando a remoção da camada superficial de 25 cm para as áreas produtoras de cana-de-açúcar localizadas no Estado de São Paulo	201
Figura 9.4 - Índice do Tempo de Vida do Solo (ITVS) de acordo com o desgaste do perfil do solo até atingir uma profundidade crítica e 1m para as áreas produtoras de cana-de-açúcar localizadas no Estado de São Paulo.....	202
Figura 9.5 - Áreas com cana-de-açúcar resultante da simulação apresentada no Capítulo 8 considerando as projeções climáticas RCP 4.5.....	204
Figura 9.6 - Mapa das estimativas de perda de solo para as áreas cultivadas com cana-de-açúcar simuladas a partir do modelo apresentado no Capítulo 8 considerando as projeções climáticas RCP 4.5..	205
Figura 9.7 - Mapa do Índice do Tempo de Vida do Solo considerando o tempo remanescente para que o perfil do solo se desgaste de modo que reste apenas 1 m para as áreas cultivadas com cana-de-açúcar simuladas a partir do modelo apresentado no Capítulo 8 considerando as projeções climáticas RCP 4.5	206
Figura 9.8 - Mapa do Índice do Tempo de Vida do Solo considerando o tempo remanescente para a camada superficial do solo (25 cm) seja removida para as áreas cultivadas com cana-de-açúcar simuladas a partir do modelo apresentado no Capítulo 8 considerando as projeções climáticas RCP 4.5	207
Figura A 1 - DEM	226
Figura A 2 - Clima Koppen para o Estado de São Paulo	227
Figura A 3 - Mapa pedológico do Estado de São Paulo.....	228
Figura A 4 - Mapa de uso e cobertura da terra do Estado de São Paulo em 2005	229
Figura A 5 - Mapa de densidade do solo do Estado de São Paulo	230
Figura A 6 - Mapa da profundidade do solo do Estado de São Paulo.....	231

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 3.1 - Equações utilizadas para a estimativa da erosividade mensal e anual EI30; r é a média de precipitação mensal no mês i (mm) e P é a média de precipitação anual (mm). Cada equação possui sua localidade ajustada e sua respectiva referência bibliográfica.	18
Tabela 4.1 - Fato k para os tipos de solo do Estado de São Paulo.	35
Tabela 6.1 - Temperaturas médias mensais climatológicas e aumentos na temperatura média mensal dos modelos HadGEM2-ES e MIROC-5 considerando os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 para o ano de 2050 (2041-2060).	109
Tabela 8.1 - Montagem dos mapas de uso e ocupação do solo (AT refere-se a área total do Estado de São Paulo).	144
Tabela 8.2 - Comparação de indicadores quantitativos da expansão da cana-de-açúcar no estado de São Paulo. O indicador apresenta o número de células de 4 x 4 km ² ocupadas pela cultura no período de 2005-2010.	148
Tabela 8.3 - Operadores utilizados no cálculo para o preenchimento do espaço celular.	167
Tabela 8.4 - Variáveis dinâmicas e respectivo período de simulação.	172
Tabela 8.5 - Projeções Regionais - 2014/2015 a 2024/2025.	175
Tabela 8.6 - Área cultivada com cana-de-açúcar e projeções (2015-2050) em km ²	176
Tabela 8.7 - Regressão linear múltipla para o uso 'cana'.	180
Tabela 8.8 - Regressão múltipla espacial (Spatial Lag) para o uso 'cana'.	180
Tabela 8.9 - Regressão múltipla clássica para o uso 'diversos'.	185
Tabela 8.10 - Regressão múltipla espacial (Spatial Lag) para o uso 'diversos' 185	
Tabela 8.11 - Validação.	192

LISTA DE QUADROS

	<u>Pág.</u>
Quadro 4.1 - Fator C para os usos e coberturas do solo presentes no Estado de São Paulo em 2005.....	37
Quadro 4.2 - Quantificação dos usos e coberturas da terra nas áreas onde a taxa estimada de perda de solo é superior a 12 Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹ para cada mesorregião do Estado de São Paulo.....	52
Quadro 8.1 - Conjunto de variáveis explanatórias potenciais (variáveis independentes) separadas por categoria	149

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Af	clima tropical sem estação seca
AIC	Critério de Informação de Akaike
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AORI	Instituto de Pesquisa Atmosférica e Oceânica
APSIM	Agricultural Productions Systems Simulator Simulador de Sistemas de Produção Agrícola
APTA	Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios
AR5	Fifth Assessment Report
Aw	clima tropical com inverno seco
BESM	Brazilian Earth System Model
C	Fator Uso e cobertura da terra da USLE
CCSR	Center for Climate System Research (The University of Tokyo)
CCST	Centro de Ciência do Sistema Terrestre
CEPEA	Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada
Cfa	clima temperado úmido com verão quente
Cfa	clima subtropical úmido oceânico sem estação seca e com verão quente
Cfb	clima subtropical úmido oceânica sem estação seca com verão temperado
CIIAGRO	Centro Integrado de Informações Meteorológicas
CLUE-S	Conversion of Land Use and its Effects at small region extent
CMIP5	Coupled Model Intercomparison Project Phase 5
CTBE	Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol
Cwa	clima temperado úmido com inverno seco e verão quente
Cwa	clima subtropical úmido com inverno seco e verão quente
Cwb	Clima temperado úmido com inverno seco e verão temperado
DEM	Digital Elevation Model
ESRI	Environmental Systems Research Institute

FAO	Food and Agriculture Organization
FEAGRI	Faculdade de Engenharia Agrícola
FRCGC	Frontier Research Center for Global Change
GCM	General Circulation Models Modelo de Circulação Global
GEE	Gases de efeito estufa
GeoTIFF	Georeferenced Tagged Image File Format
GPP	Produção Primária Bruta
HadGEM2-ES	Hadley Centre Global Environment Model, version 2-Earth System
IAC	Instituto Agrônômico
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBIS	Integrated Biosphere Simulator
INLAND	Modelo Integrado de Processos Superficiais
INLAND/AGRO	Módulo Agrícola do Modelo Integrado de Processos Superficiais
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Intergovernment Panel of Climate Change
ISRIC	International Soil Reference and Information Center
ITVS	Índice do Tempo de Vida do Solo
ITVSzero	Índice do Tempo de Vida Zero
K	Fator Erodibilidade da USLE
L	Fator Comprimento de rampa da USLE
LABSOLAR	Laboratório de Energia Solar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina
LAI	Índice de Área Folhear
LUCC	Land Use Cover Change
LuccME	Arcabouço de Modelagem de Uso da Terra Espacialmente Explícita
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MIROC5	<i>Model for Interdisciplinary Research On Climate version 5</i>
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NetCDF	network Common Data Form

NIES	National Institute for Environmental Studies
NPP	Net Primary Production
P	Fator Práticas de Conservação da USLE
PAM	Produção Agrícola Municipal
PCI	Precipitation Concentration Index
PIB	Produto Interno Bruto
PNE	Potencial Natural de Erosão
PNLT	Plano Nacional de Logística e Transportes
R	Erosividade
RCP	Representative Concentration Pathways
S	Fator Declividade da USLE
SDGs	Sustainable Development Goals
SEPLA	Secretaria de Planejamento
SIDRA	Sistema IBGE de Recuperação Automática
SIDRA	Sistema IBGE de Recuperação Automática
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SMA-SP	Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo
SP	São Paulo
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
T	Tolerância da perda de solo
UFLA	Universidade Federal de Lavras
UFV	Universidade Federal de Viçosa
USLE	Universal Soil Loss Equation
WGS	World Geodetic System

LISTA DE SÍMBOLOS

'	minuto
"	segundo
%	porcentagem
α	declividade
.nc	extensão netCDF
.tiff	geotiff
~	equivalente a
<	menor
>	maior
\leq	menor e igual
\geq	maior e igual
°	grau
°C	graus Celsius
A	taxa estimada de perda de solo em Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹
A + B	Soma dos horizontes A e B
Ac	Área de contribuição (m ²)
ano	ano
AT	área total
C	Fator uso e cobertura da terra
Cm	centímetros
CO ₂	gás carbônico
Cos	cosseno
D	Tamanho da célula de grade
Ds	Densidade do solo em Mg m ⁻³
E	altura do solo
EI	Índice de Erosão
EI30	Erosividade média anual
G	grama
Gt	Giga toneladas (10 ⁹ t)

H	hora
H	taxa estimada de perda de solo em mm ano^{-1}
Há	hectare
hL	Taxa líquida de perda de solo em mm ano^{-1}
I	iésimo
I	coordenada na direção x
ITVS	Índice de Tempo de Vida do Solo
ITVSzero	Índice de Tempo de Vida do Solo igual a zero
J	localidade j
J	coordenada na direção y
joule	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-2}$
Km	quilômetro
km^2	quilômetro quadrado
L	Fator comprimento de vertente
Log	logaritmo na base 10
M	Mega (10^6)
m	metros
m	coeficiente determinado de acordo com a declividade (θ) que assume os valores 0,5 se $\theta \geq 5\%$; 0,4 se $3\% \leq \theta \leq 5\%$; 0,3 se $1\% \leq \theta \leq 3\%$ e 0,2 se $\theta > 1\%$
m^2	metro quadrado
m^3	metro cúbico
Mg	Mega grama
MJ	Mega joule (10^6 joule)
MJJA _{média}	temperatura média para os meses de maio a agosto
Mm	milímetro
n	número de anos
N	Norte
O	Oeste
ONDJF _{média}	temperatura média para os meses de outubro a fevereiro
P	Precipitação média anual

P	Fator práticas de conservação
$P_{\text{crítica}}$	profundidade crítica
$P_{\text{líquida}}$	profundidade líquida do solum em mm
P_{perfil}	profundidade do solum em mm
ppm	partes por milhão (concentração)
R	precipitação média mensal
R\$	Real/Reais
r^2	coeficiente de determinação
r^2 ajustado	coeficiente de determinação múltipla ajustado
S	desvio padrão
S	Fator declividade
S	Sul
Sem	seno
T	tolerância de perda de solo
T	toneladas
T	tonelada
W	Taxa de renovação do solo de $0,2 \text{ mm ano}^{-1}$
W	watt
W	W é uma matriz de pesos espaciais
WY	dependência espacial sobre Y
X	valor da direção de fluxo
X	matriz de variáveis exógenas
Y	vetor de observações de uma variável dependente
Yr	ano
B	vetor de parâmetros
E	vetor de erros
P	coeficiente auto regressivo espacial
Σ	Somatório

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Justificativa	3
1.2	Objetivos.....	3
1.2.1	Objetivo geral	3
1.2.2	Objetivos específicos.....	3
1.3	Hipótese	4
1.4	Estrutura da tese.....	4
2	ÁREA DE ESTUDO	7
3	EROSIVIDADE REGIONALIZADA E ATUALIZADA PARA O ESTADO DE SÃO PAULO.....	11
3.1	Introdução	11
3.2	Material e métodos	14
3.2.1	Material cartográfico, dados básicos e programas	14
3.2.2	Método	15
3.3	Resultados e discussões	19
3.4	Conclusão	28
4	PERDA DE SOLO NO ESTADO DE SÃO PAULO	29
4.1	Introdução	29
4.2	Materiais e método	32
4.2.1	Material Cartográfico, dados básicos e programas	32
4.2.2	Método	32
4.3	Resultados e discussões	38
4.4	Conclusões	56
5	DIAGNÓSTICO DA EROSÃO ACELERADA DO SOLO BASEADO NA METODOLOGIA DO ÍNDICE DO TEMPO DE VIDA DO SOLO (ITVS) ..	57
5.1	Introdução	57
5.2	Material e método	61
5.2.1	Material cartográfico, dados básicos e programas	61
5.2.2	Metodologia do Índice de Tempo de Vida do Solo (ITVS)	61
5.3	Resultados e Discussão	64
5.3.1	Caracterização das situações de planejamento da área de estudo (h _L).....	64
5.3.2	Índice do Tempo de Vida do Solo para profundidade crítica de 1m ..	67
5.3.3	Índice do Tempo de Vida do Solo – 25 cm superficiais	72
5.4	Conclusões	75
6	APTIDÃO CLIMÁTICA DA CANA-DE-AÇÚCAR SOBRE PROJEÇÕES CLIMÁTICAS NO ESTADO DE SÃO PAULO	77
6.1	Introdução	77
6.2	Necessidades climáticas da cana-de-açúcar	78

6.2.1	Temperatura do ar	78
6.2.2	Precipitação	79
6.3	Projeções climáticas	79
6.4	Material e Método	81
6.4.1	Material cartográfico, dados básicos e programas	81
6.4.2	Método	82
6.5	Resultados e discussões	84
6.5.1	Dados observados e simulados para o período 1950 – 2000	84
6.5.2	Avaliação das projeções climáticas dos modelos HadGEM2-ES e MIROC5 para o Estado de São Paulo	88
6.5.3	Projeções climáticas para 2050	96
6.5.4	Aptidão climática da cana-de-açúcar para o presente e para 2050	110
6.6	Conclusões	117
7	PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO BASEADA NO MODELO INTEGRADO DE PROCESSOS SUPERFICIAIS (INLAND)	119
7.1	Introdução	119
7.2	Modelo Integrado de Processos Superficiais (INLAND)	120
7.3	Modelagem da produção da cana-de-açúcar	122
7.4	Materiais e Método	124
7.4.1	Área de estudo	124
7.4.2	Softwares e banco de dados	124
7.4.3	Método	125
7.5	Resultados e discussões	127
7.6	Conclusões	135
8	MODELAGEM DA EXPANSÃO DA ÁREA CULTIVADA COM CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO	137
8.1	Introdução	137
8.2	Área de estudo	138
8.3	Softwares e banco de dados	138
8.4	Método	139
8.4.1	Definição do objetivo da aplicação do software LuccME	141
8.4.2	Definição da escala temporal	141
8.4.3	Definição da escala espacial	141
8.4.4	Definição das classes de uso e ocupação do solo	142
8.4.5	Fatores determinantes potenciais	148
8.4.6	Escolha dos componentes de demanda	168
8.4.7	Escolha dos componentes potenciais	169
8.4.8	Escolha dos componentes alocação	171
8.4.9	Implementação do modelo no LuccME e simulação para o período 2005-2010	171
8.4.10	Variáveis dinâmicas	172
8.4.11	Validação	173

8.4.12 Cenário da área cultivada com cana-de-açúcar no Estado de São Paulo para o ano de 2050	173
8.5 Resultados	178
8.5.1 Fatores determinantes para a expansão da área cultivada com cana-de-açúcar no Estado de São Paulo	178
8.5.2 Simulação para o período 2005-2010, validação para o ano de 2012 e projeções para 2050	187
8.6 Conclusões	196
9 A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR E A EROSÃO DO SOLO: ANÁLISE DO PRESENTE E PARA UM CENÁRIO FUTURO	199
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	209
APÊNDICE	225
APÊNDICE A – DADOS DE ENTRADA	225
APÊNDICE B – CÓDIGO DO "MODELO DE EXPANSÃO DA ÁREA CULTIVADA COM CANA-DE-AÇÚCAR PARA O ESTADO DE SÃO PAULO"	233
Arquivo principal (<i>main</i>)	233
Arquivo Secundário (<i>submain</i>)	235

1 INTRODUÇÃO

A degradação do solo é um problema que afeta a humanidade em escala global. Pressões antrópicas por energia, fibras e alimento conduziram o planeta a um estado de instabilidade ecológica que compromete o bem-estar da atual e das próximas gerações (SCHEFFER et al., 2001; LAPOLA et al., 2013). Como agravante, as projeções para a população mundial ameaçam ainda mais os ecossistemas já comprometidos. Neste sentido, a comunidade científica, com o intuito de fomentar tomadas de decisão via políticas públicas estabelece, à luz da Ciência do Sistema Terrestre, limites para a exploração sustentável do planeta (ROCKSTROM et al., 2009; REID et al., 2010) buscando relacionar o crescimento econômico com a sustentabilidade global (BOUMA, 2014).

Atualmente cerca de 1 milhão de pessoas encontram-se cronicamente malnutridas de modo que a segurança alimentar não está garantida e a maioria dos sistemas agrícolas estão degradando terras, água, biodiversidade e clima em escala global (FOLEY et al, 2011). Ou seja, a conversão de paisagens naturais em sistemas agrícolas e a exploração intensa dos recursos naturais, sobretudo o solo, são desafios que a humanidade precisa enfrentar uma vez que os problemas decorrentes dessas ações antrópicas comprometem o equilíbrio ambiental, social e econômico do planeta (LAL, 2007a; 2007b).

Neste contexto, a erosão acelerada é a principal forma de degradação do solo e estima-se que este problema afete atualmente cerca de 1 bilhão de hectares em escala global e que 70 % deste total esteja severamente comprometido (Lal, 2003). Para o Estado de São Paulo, na década de 1950, eram estimadas taxas anuais de perda de solo de 130 milhões de Mg (MARQUES, 1949). No entanto, estudos atuais apontaram que essas taxas tiveram aumento de 4 vezes nos anos 2000 (RODRIGUES et al., no prelo, a).

No entanto, o Estado de São Paulo é protagonista no setor agrícola, principalmente no que diz respeito à produção de cana-de-açúcar, laranja, milho, soja e café. Com relação à cana-de-açúcar, a cultura ocupou em 2015 quase 5

milhões de hectares no estado (BRASIL, 2015) e correspondeu, em 2014, a 42,55% da participação no valor da produção agropecuária e florestal total do estado, equivalente a R\$25,47 bilhões (SILVA et al., 2015).

Desse modo, a cana-de-açúcar no Estado de São Paulo é um exemplo que traduz a necessidade de se garantir a produtividade agrícola, visto que corresponde à segurança alimentar e energética, mas também, do ponto de vista da conservação do solo, de se direcionar atenção à degradação, em termos de tolerância de perda de solo, de modo que o equilíbrio entre o crescimento econômico e a sustentabilidade sejam garantidos como apontam as discussões científicas atuais em contexto global.

Neste cenário, sob aspectos da conservação do solo, diversas críticas têm sido direcionadas à Ciência do Solo pela fraca atuação em questões multidisciplinares globais (JANZEN, 2004; HARTEMINK, 2006; HARTEMINK, 2008; HARTEMINK e McBRATNEY, 2008; BOCKHEIM e GENNADIYEV, 2010; CAMARGO et al., 2010; JANZEN et al., 2011; BOUMA, 2014; McDONAGH, 2014; PUIG DE LA BELLACASA, 2015) apontando uma lacuna na compreensão de processos e interações entre os componentes do Sistema Terrestre, uma vez que os solos (Pedosfera) localizam-se nas interfaces entre a atmosfera, hidrosfera, biosfera e litosfera, fazendo parte da chamada Zona Crítica (WILDING e LIN, 2006).

Frente ao exposto, os solos são, portanto, essenciais para alcançar a segurança alimentar e nutricional (GODFRAY et al., 2010) e garantir a oferta de energia. No que diz respeito à produtividade agrícola, diversos estudos avaliaram a perda na produção agrícola em decorrência da degradação do solo (ZHAO et al., 2012; DUAN et al., 2011; TELLES, 2010; BAKKER et al., 2004; WIEBER, 2003; STINE e WEIL, 2002; PUIG DE LA ROSA et al., 2000; SCHUMACHER et al., 1999; OYEDELE e AINA, 1998) apontando perdas econômicas em decorrência da má utilização do recurso.

Assim, este trabalho considera que os solos vêm sendo explorados intensamente ao longo das últimas décadas através de diversos usos, inclusive agrícolas, e que a adoção de práticas de conservação é questão fundamental para garantir a sustentabilidade do recurso e aprecia a importância em se

promover o desenvolvimento econômico através da garantia da produtividade agrícola. Ao mesmo tempo, traz à luz das discussões científicas atuais a respeito dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODG's) ferramentas capazes de oferecer prognósticos quantitativos com base na Ciência do Solo adaptada a escala regional (Estado de São Paulo) capazes de conduzir políticas públicas com vistas à garantia da produtividade e o uso sustentável do recurso solo.

1.1 Justificativa

São previstos aumentos na produção de grãos e de culturas bioenergéticas na América Latina visando o atendimento da demanda global, potencializando assim os processos de degradação dos solos. Com base neste contexto que relaciona diretamente degradação do solo, produtividade agrícola e segurança alimentar, faz-se necessário o desenvolvimento de ferramentas com potencial operacional e com arcabouço teórico para indicar áreas cuja degradação poderá comprometer o desenvolvimento de culturas e, ao mesmo tempo, que aponte o a oscilação da produtividade agrícola no presente e no contexto de mudanças climáticas. Busca-se, nesse contexto, diferentes planos de informação em escala regional.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desse trabalho é o de avaliar a expansão da cana-de-açúcar para o Estado de São Paulo considerando projeções climáticas e o risco de degradação do solo por erosão.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- i. Avaliar a perda de solo utilizando modelo de erosão;

- ii. Estimar e avaliar o Índice do Tempo de Vida do Solo;
- iii. Avaliar as áreas aptas para o cultivo da cana-de-açúcar considerando aspectos fenológicos da mesma a partir de projeções climáticas *Representative Concentration Pathways* (RCP) do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC);
- iv. Simular a produtividade da cana-de-açúcar utilizando o Modelo Integrado de Processos Superficiais (INLAND) para o período 2005-2050;
- v. Criar um modelo capaz de simular a expansão da área cultivada com cana-de-açúcar utilizando a ferramenta LUCCE/INPE;
- vi. Identificar as áreas para onde a cana-de-açúcar possivelmente irá expandir em 2050 e verificar a susceptibilidade dos solos nessas áreas com relação à erosão.

1.3 Hipótese

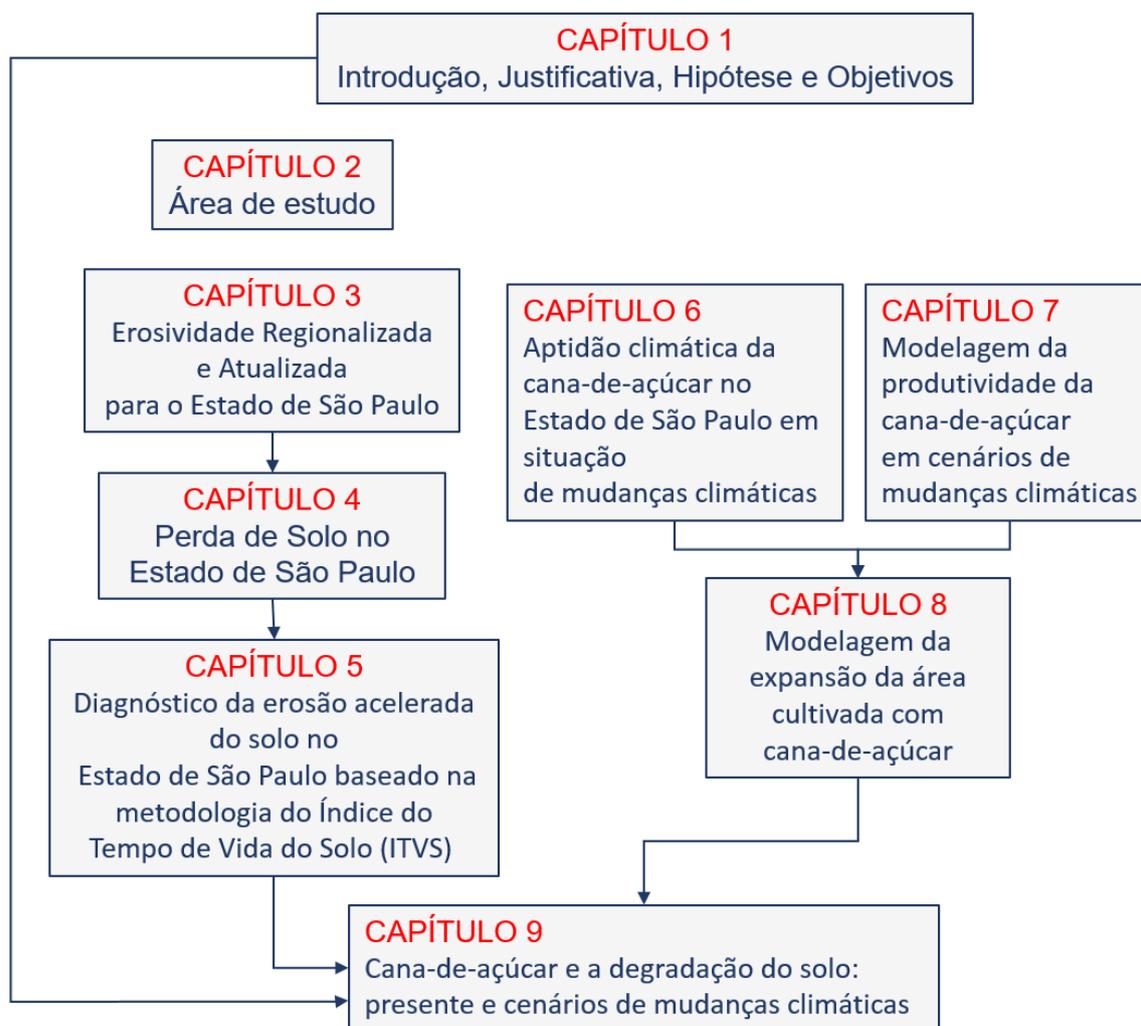
Espera-se que haja uma expansão da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo nas próximas décadas e que esta expansão poderá atingir regiões que apresentam solos com alta susceptibilidade à erosão.

1.4 Estrutura da tese

Esta pesquisa de doutorado está estruturada conforme mostra a Figura 1.1. O *Capítulo 1* abrange a Introdução, Justificativas, Hipóteses e Objetivos do trabalho. O *Capítulo 2* apresenta uma breve caracterização do Estado de São Paulo (área de estudo), investigada em todos os capítulos seguintes. O *Capítulo 3* descreve a aplicação de uma metodologia regionalizada para o cálculo da erosividade, potencial da chuva em causar erosão, cujos resultados são requeridos no *Capítulo 4* para determinar as taxas de “Perda de solo no Estado de São Paulo”. Os resultados encontrados e discutidos no *Capítulo 4* são utilizados no *Capítulo 5* para a determinação dos Índices do Tempo de Vida do

Solo (ITVS), os quais foram utilizados nas discussões apresentadas no *Capítulo 9*. Os *Capítulos 6 e 7* foram construídos de modo a subsidiar o modelo de expansão da cana-de-açúcar espacialmente explícito, apresentado no *Capítulo 8*, com variáveis determinantes à localização das áreas cultivadas com cana-de-açúcar, temperatura do ar, precipitação e produtividade da cana-de-açúcar com vistas às mudanças climáticas. Ou seja, o *Capítulo 6* apresenta uma análise climática utilizando dados de dois dos modelos do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5)* considerando as forçantes radioativas no clima (*Representative Concentration Pathways*) RCP 4.5 e 8.5 (Fuss et al., 2014) com o objetivo de gerar mapas das zonas aptas para o desenvolvimento da cana de açúcar de acordo com a temperatura do ar e precipitação, variáveis determinantes à localização da cana-de-açúcar no estado. Da mesma forma, o *Capítulo 7* descreve a obtenção de dados de produtividade da cana-de-açúcar para o futuro através do Modelo Integrado de Processos Superficiais (INLAND), pacote de superfície do Modelo Brasileiro do Sistema Climático Global (BESM). O *Capítulo 8*, por sua vez, descreve modelos estatísticos capazes de representar a localização da área cultivada com cana-de-açúcar e sua implementação no arcabouço de modelagem LUCCEME que propiciou gerar mapas espacialmente explícitos da área cultivada com cana-de-açúcar para os anos de 2050 e 2100 considerando os RCP 4.5 e 8.5 mencionados. O *Capítulo 9* tem como objetivo integrar os resultados apresentados principalmente nos *Capítulos 4, 5 e 8* e faz análises relacionadas à degradação do solo por erosão e a cana-de-açúcar.

Figura 1.1 - Fluxograma geral dessa pesquisa de doutorado



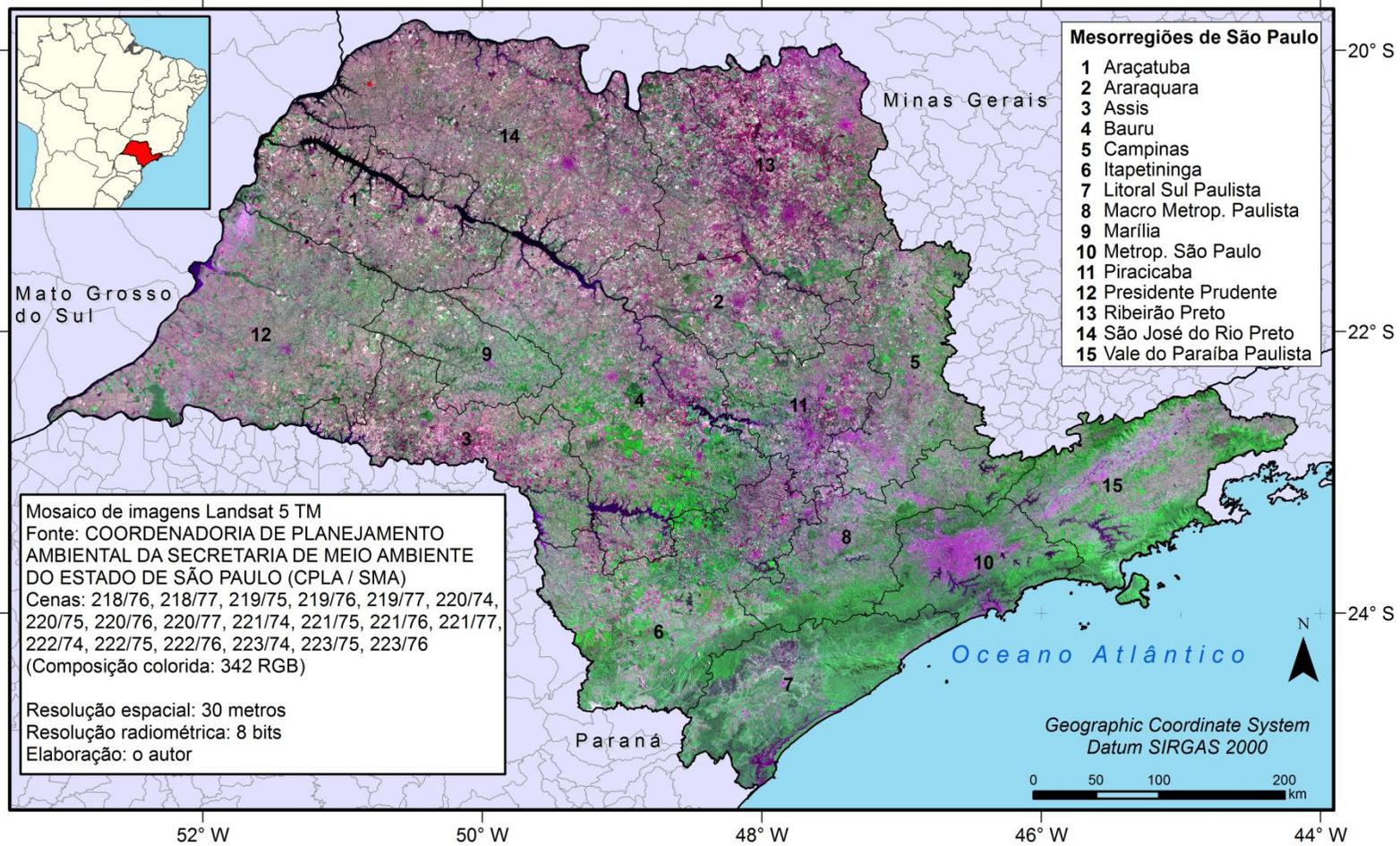
2 ÁREA DE ESTUDO

Todos os estudos e metodologias que constam nesta tese foram direcionados para o estado de São Paulo, situado entre os paralelos 19°50'S e 24°30'S e os meridianos 44°W e 53°30'W, com área de 248.209 km² e foram discutidos de acordo com os limites das mesorregiões proposto por IBGE (2002) como mostra a Figura 2.1.

Em termos gerais, o estado apresenta ampla diversidade biofísica que lhe confere extensas áreas favoráveis à exploração antrópica, fato que lhe confere protagonismo no cenário econômico, sobretudo ao que se relaciona à produtividade agrícola.

Com relação a aspectos físicos, o Estado de São Paulo faz parte do complexo regional Sudeste, que envolve extensa variedade de solos devido à localização em área de transição entre as regiões de clima semiárido (“Polígono das Secas”, ao Norte de Minas Gerais) e úmido (faixa litorânea e montanhas, incluindo as serras do Mar e da Mantiqueira) e diversidade geológica de rochas incluindo extensas áreas sedimentares nos planaltos a oeste das áreas montanhosas de embasamento cristalino. Por isso, é grande a diversidade de relevo, vegetação e material de origem nessa região (LEPSCH, 2010). Considerando a classificação climática proposta por Alvares et al. (2013), o Estado de São Paulo apresenta na sua porção norte/noroeste, nas macrorregiões de São José do Rio Preto, Araçatuba, Presidente Prudente e parte de Ribeirão Preto, clima tropical com inverno seco, Aw; na porção centro-sul, correspondente as áreas de Assis, Bauru, Itapetininga, Marília e parte do Litoral Sul Paulista e Macro metropolitana Paulista, predomina o clima subtropical úmido oceânico sem estação seca e com verão quente, Cfa; à nordeste do estado, nas mesorregiões de Araraquara, Ribeirão Preto, Piracicaba e Campinas, o clima subtropical úmido com inverno seco e verão quente, Cwa, é dominante; na região leste que abrange as mesorregiões do Vale do Paraíba Paulista, Metropolitana de São Paulo e Macro

Figura 2.1 - Localização do estado de São Paulo no Brasil



Metropolitana Paulista e como parte da mesorregião de Itapetininga, o clima predominante é subtropical úmido oceânica sem estação seca com verão temperado, Cfb, e o litoral apresenta clima tropical sem estação seca, Af.

Os tipos de solos predominantes são LATOSSOLOS e ARGISSOLOS distribuídos pelos planaltos e depressão periférica. Os LATOSSOLOS são muito evoluídos pedogeneticamente, muito profundos e dessaturados, e os ARGISSOLOS também são bem desenvolvidos, mas a característica diferencial principal é o gradiente textural em subsuperfície decorrente do acúmulo de argila no horizonte B, que predispõe tais solos aos processos erosivos. Na região serrana predominam CAMBISSOLOS e NEOSSOLOS LITÓLICOS e na faixa litorânea GLEISSOLOS, ORGANOSSOLOS e NEOSSOLOS FLÚVICOS (OLIVEIRA et al., 1999a; 1999b).

3 EROSIVIDADE REGIONALIZADA E ATUALIZADA PARA O ESTADO DE SÃO PAULO

3.1 Introdução

A erosão tem sido considerada um problema global intensificado pelas pressões antrópicas exercidas sobre o recurso solo (HOOKE, 2012; SMITH et al., 2015; SYVITSKI e KETTNER, 2015), sendo discutida em função das perdas econômicas, sociais e ambientais. Com o objetivo de despertar a atenção à conservação do solo, motivadas tanto pelo aumento de áreas agrícolas degradadas (FOLEY, 2005; FOLEY, 2011) quanto pelo reconhecimento das necessidades humanas por alimentos, fibras e energia (TSCHARNTKE et al., 2012), algumas metodologias foram desenvolvidas para verificar o nível de degradação do solo por erosão e identificar os locais onde as perdas de solo ultrapassam os limites de tolerância e requerem, portanto, adoção de práticas de conservação para controle da erosão. Assim, estimar as perdas de solo por erosão em escala regional é uma ferramenta diagnóstica importante, sobretudo em abordagens interdisciplinares, podendo subsidiar discussões sobre o planejamento sustentável do uso dos recursos naturais e a elaboração de políticas públicas, dentre outras.

Os modelos de erosão envolvem diversos parâmetros biofísicos e antrópicos para estimar a perda de solo em uma determinada área (MERRITT et al., 2003; BOARDMAN, 2006; KINNELL, 2010; VENTE et al., 2013). A Equação Universal da Perda de Solo (USLE), desenvolvida por WISCHMEIER e SMITH (1965, 1978) e suas adaptações, relaciona informações climáticas (precipitação, através da intensidade máxima em trinta minutos, I_{30}), pedológicas (tipo de solo, erodibilidade), topográficas (declividade e comprimento de vertente), uso e ocupação do solo e práticas de conservação. Em relação a aplicabilidade, trata-se de um modelo amplamente empregado em estudos de erosão por requerer dados de baixa complexidade e por estimar satisfatoriamente as taxas médias de perda do solo (KINNELL, 2010).

No caso do fator climático do modelo ou fator ativo associado à erosão, é referido por erosividade média anual da chuva. A erosividade ou fator R é expressa em MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ e exprime a capacidade da chuva em causar erosão. O fator R é função da energia cinética das gotas de chuva e da intensidade máxima consecutiva em 30 minutos (WISCHMEIER e SMITH, 1978). O fator R variabilidade em escala regional, sendo um importante parâmetro condicionante do potencial natural de erosão hídrica, tanto no contexto atual quanto futuro, considerando-se as mudanças climáticas (MELLO et al., 2015; MEUSBURGER et al., 2012; NEARING et al., 2005).

A determinação da erosividade pode ser feita empregando-se métodos pluviográficos (direto) e pluviométricos (indireto). Os métodos pluviográficos envolvem a análise de pluviogramas diários e é aplicado para a determinação da erosividade baseada no seu conceito original, proposto por WISCHMEIER e SMITH (1978), sendo a forma mais precisa existente. Contudo, é aplicável somente para os locais onde se tenham registros pluviográficos com pelo menos 15 anos de dados para obtenção do fator R médio. Assim, devido às dificuldades inerentes do método (análises individuais de eventos de chuva) e a pequena disponibilidade de estações que permitam espacialização, mesmo no estado de São Paulo, tal procedimento é restrito. Para contornar esta situação, os métodos pluviométricos têm sido mais aplicados em escala regional por serem mais simples uma vez que requerem séries históricas de precipitação que estão disponíveis para a maioria das localidades brasileiras. No entanto, a relação entre os métodos é estreita, sendo que para a utilização do método pluviométrico há a necessidade de uma equação de correlação definida pelo método pluviográfico (WALTRICK et al., 2015).

O cálculo do fator R para o estado de São Paulo, muitas vezes, é realizado empregando-se a Equação 3.1 desenvolvida por Lombardi Neto e Moldenhauer (1992) especificamente para região de Campinas.

$$EI_i = 67,355 \left(\frac{r_i^2}{p_i} \right)^{0,85} \quad (3.1)$$

sendo:

EI_i – média mensal do Índice de Erosão para o mês i (MJ ha⁻¹mm⁻¹), com $1 \leq i \leq 12$

r_i – precipitação média mensal do mês i (mm)

P_i – precipitação média anual do mês i (mm)

No entanto, esta aplicação generalizada torna-se equivocada, pois seus coeficientes foram ajustados para as condições climáticas da região de Campinas e não poderiam ser utilizados de forma ampla para outros locais, regiões ou estados os quais não apresentam as mesmas condições climáticas de Campinas, especialmente quanto ao regime hídrico. Isto ocorre porque há dificuldade em se obter a intensidade máxima da chuva em 30 minutos que, porém, apresenta variabilidades espacial e temporal que não podem ser desconsideradas. Além disto, esta equação pode ser entendida como desatualizada uma vez que os dados que originaram seus coeficientes correspondem à uma série histórica de 1954 a 1975 como descrevem os autores, embora os dados de precipitação não tenham sido comparados a dados atuais.

O cálculo regionalizado de R é a maneira mais adequada de se estimar valores de erosividade média em escala regional ou superior. Silva (2004), Oliveira et al. (2012a) e Mello et al. (2013) são exemplos de trabalhos que geraram mapas de erosividade para o Brasil considerando a aplicação regionalizada de equações de erosividade obtidas via métodos pluviográficos. Silva (2004) definiu 8 zonas uniformes de potencial de erosão das chuvas para o país e, para o estado de São Paulo, propõe apenas a utilização das equações de Lombardi Neto e Moldenhauer (1992) e Val et al. (1986). Oliveira et al. (2012a) fizeram levantamento dos resultados de erosividade presentes em 35 estudos (total de 73 equações de regressão) e geraram um mapa de erosividade para o Brasil utilizando técnicas de interpolação. Para o estado de São Paulo, Lombardi Neto et al. (1980) citado por Bertoni e Lombardi Neto (2012) geraram mapas isoerodentes dos valores médios anuais do índice de erosão da chuva para o Estado de São Paulo a partir da definição de zonas de potencial de erosão das chuvas uniforme. Os autores utilizaram um conjunto de dados de precipitação compreendido entre 1954 a 1975 e aplicaram, para cada uma das zonas, uma equação correspondente para o cálculo de R (as quais não foram publicadas). No entanto, a utilização das mesmas atualmente é inviável, pois foram definidas a partir de um conjunto de dados desatualizado.

Neste mesmo contexto, Mello et al. (2013) propõe uma metodologia prática para o cálculo regionalizado da erosividade utilizando dados pluviométricos e equações de erosividade atualizadas. Os autores definem zonas uniformes de potencial de erosão das chuvas a partir de 2 etapas que são combinadas ao final: 1) criação de polígonos de abrangência das estações/localidades para as quais foram definidas equações via método pluviográfico; 2) cálculo de Concentração de Precipitação (OLIVER, 1980) que reflete a concentração da precipitação ao longo do ano. Para cada zona é calculada a erosividade aplicando-se a equação correspondente. Esta metodologia é diferenciada, pois permite considerar a variabilidade espacial da erosividade mesmo sem dispor de dados pluviográficos.

Portanto, o objetivo deste capítulo é apresentar um mapa atualizado de erosividade para o estado de São Paulo utilizando um conjunto de dados observados mensais de precipitação para o período de 1991 a 2014 e empregando-se a metodologia de cálculo regionalizado proposta por Mello et al. (2013).

3.2 Material e métodos

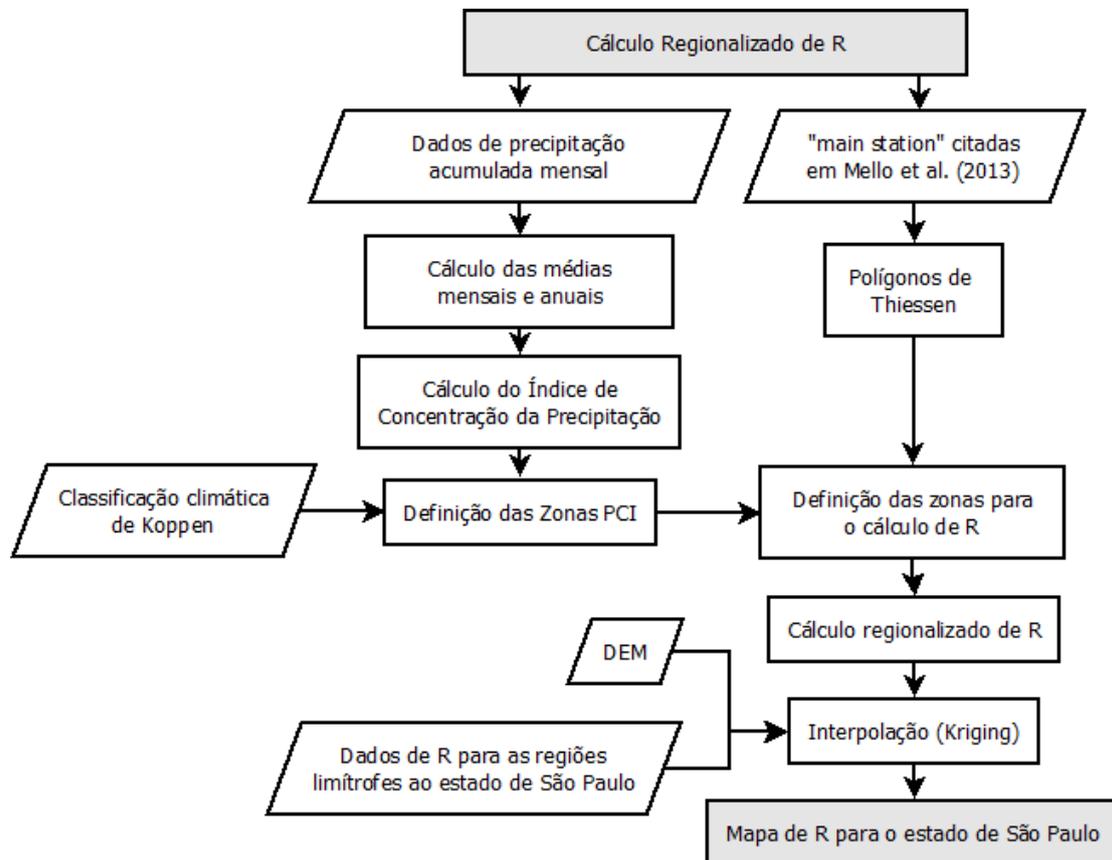
3.2.1 Material cartográfico, dados básicos e programas

No programa *ArcGIS versão 10.1* (ESRI, 2014), foi criado um banco de dados em plataforma digital para realização das análises e espacialização dos resultados (mapeamento). Os materiais cartográficos e dados básicos incluíram: 1) Dados mensais observados de precipitação (mm) do Centro Integrado de Informações Meteorológicas do Instituto Agrônomo de Campinas e da Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (CIIAGRO-IAC/APTA) para o período de 1991 a 2014 de 174 estações de coleta de dados distribuídas pelo território paulista; 2) Modelo Digital de Terrenos (DEM, do inglês *Digital Elevation Model*) do Projeto “Topodata” (VALERIANO, 2008), por ser um conjunto de dados com resolução de 30 m (Figura A1 do Apêndice A) e 3) Classificação Climática de Köppen (1936) (Figura A2 do Apêndice A) obtida do banco de dados Forest GIS (www.forest-gis.com).

3.2.2 Método

O cálculo regionalizado de R empregado neste trabalho é apresentado de forma geral no Fluxograma da Figura 3.1 e foi baseado em Mello et al. (2013). A metodologia foi dividida em três etapas: a) cálculo das médias mensais e anuais dos dados observados de precipitação do CIIAGRO (IAC/APTA); b) cálculo do Índice de Concentração da Precipitação - PCI e definição dos polígonos de Thiessen para identificação das zonas com potencial erosão das chuvas uniforme e c) cálculo de R e interpolação.

Figura 3.1 - Metodologia do cálculo regionalizado do fator R para o estado de São Paulo.



3.2.2.1 Cálculo das médias mensais e anuais dos dados observados de precipitação do CIIAGRO (IAC/APTA) para o período de 1991 - 2014

Dados observados mensais de precipitação foram obtidos via domínio de *internet* do Centro Integrado de Informações Meteorológicas do Instituto Agrônomo de Campinas e da Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (CIIAGRO-IAC/APTA) (disponível em <http://www.ciiagro.sp.gov.br/ciiagroonline/>). Estes dados foram inseridos no *software* Excel (versão 2010) e organizados em planilhas de modo que cada uma representou um mês (total de 12, de janeiro a dezembro). Em cada planilha as linhas representaram as 174 estações consideradas inicialmente e as colunas os dados mensais de precipitação p_i para cada ano do período de 1991 a 2014. Foram calculados as médias mensais (r) e o desvio padrão (s) de modo que as localidades que apresentaram p_i fora do intervalo $r - s \leq r < r + s$ fossem descartadas para evitar a utilização de dados inconsistentes e novas médias calculadas.

3.2.2.2 Zonas com potencial erosão das chuvas uniforme: Cálculo do Índice de Concentração da Precipitação (PCI) e definição dos polígonos de Thiessen

O Índice de Concentração de Precipitação (PCI), calculado a partir das médias mensais de precipitação resultantes da etapa anterior, representa a concentração da precipitação ao longo do ano (Equação 3.2).

$$PCI_{\text{anual}} = \frac{\sum_{i=1}^{12} (r^2)}{(\sum_{i=1}^{12} r)^2} \quad (3.2)$$

sendo:

PCI_{anual} – o Índice de Concentração da Precipitação

r - média mensal de precipitação na localidade j (mm)

Baseando-se nas divisões dos tipos climáticos presentes no estado de São Paulo (Figura A2 do Apêndice A) foram determinadas *zonas PCI* de modo que

os seus limites coincidisse com as divisões entre os climas do Estado de São Paulo. Em seguida foram criados polígonos de Thiessen para definir a área de influência das localidades para as quais existem equações desenvolvidas pelo método pluviográfico e são atualizadas. A Tabela 3.1 e a Figura 3.2 mostram as localidades que potencialmente possuem influência no estado de São Paulo e que, portanto, foram consideradas neste trabalho.

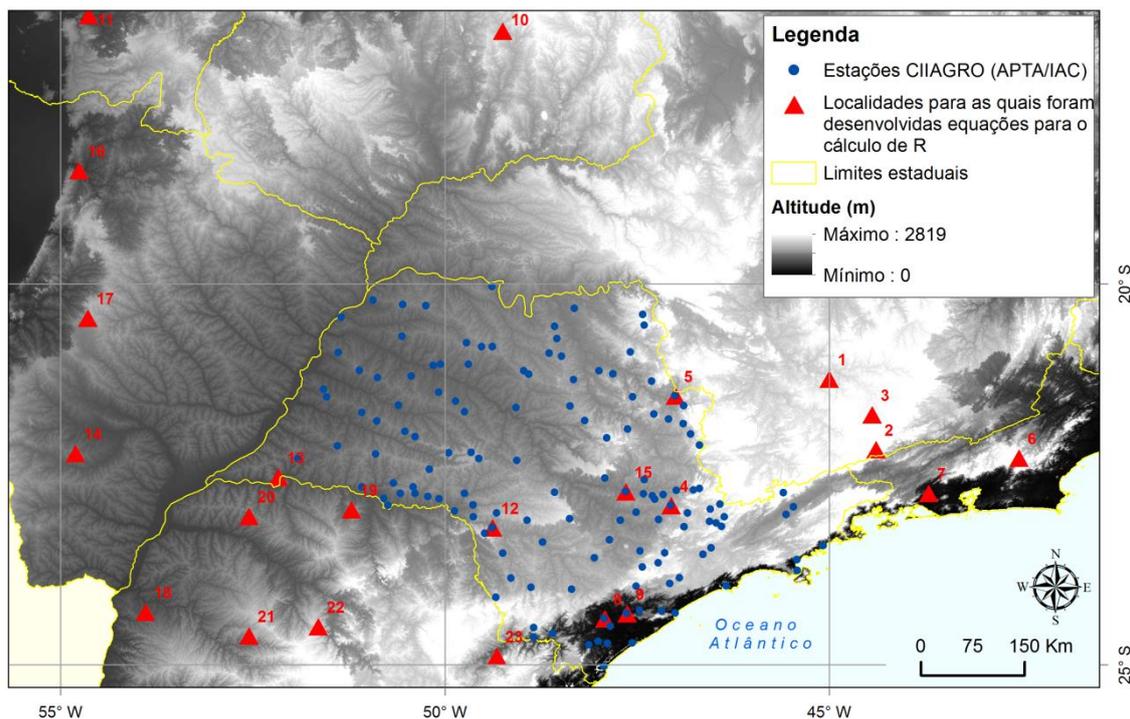
Determinadas as zonas PCI e os polígonos de Thiessen, estes arquivos vetoriais foram cruzados e os polígonos resultantes, semelhantes àqueles definidos em Mello et al. (2013), foram denominados de zonas com potencial erosão das chuvas uniforme.

Tabela 3.1 - Equações utilizadas para a estimativa da erosividade mensal e anual EI_{30i} ; r é a média de precipitação mensal no mês i (mm) e P é a média de precipitação anual (mm). Cada equação possui sua localidade ajustada e sua respectiva referência bibliográfica.

Localidade/ Estação	Localidade	Equação	Referência
1	Lavras	$EI_{30i} = 85,672 * \left(\frac{r^2}{P}\right)^{0,6556}$	Aquino et al. (2012)
2	Bocaina de Minas	$EI_{30i} = 102,53 * \left(\frac{r^2}{P}\right)^{0,7586}$	Mello et al. (2012)
3	São Vicente de Minas	$EI_{30i} = 72,8 * \left(\frac{r^2}{P}\right)^{0,7783}$	Mello et al. (2012)
4	Campinas	$EI_{30i} = 68,73 * \left(\frac{r^2}{P}\right)^{0,841}$	Lombardi Neto e Moldenhauer (1992)
5	Mococa	$EI_{30i} = 111,173 * \left(\frac{r^2}{P}\right)^{0,7982}$	Carvalho et al. (1989)
6	Nova Friburgo	$EI_{30i} = 67,991 + \left(33,856 * \left(\frac{r^2}{P}\right)\right)$	Carvalho et al. (2005)
7	Seropédica	$EI_{30i} = 64,866 + \left(38,138 * \left(\frac{r^2}{P}\right)\right)$	Carvalho et al. (2005)
8	Sete Barras	$EI_{30i} = 316,2 + \left(55,4 * \left(\frac{r^2}{P}\right)\right)$	Silva et al. (2009)
9	Juquiá	$EI_{30i} = 207,21 + \left(40,65 * \left(\frac{r^2}{P}\right)\right)$	Silva et al. (2009)
10	Goiânia	$EI_{30i} = 216,15 + \left(30,69 * \left(\frac{r^2}{P}\right)\right)$	Silva et al. (1997)
11	Rondonópolis	$EI_{30i} = 167,16 * \left(\frac{r^2}{P}\right)^{0,567}$	Almeida (2009)
12	Pirajú	$EI_{30i} = 72,549 * \left(\frac{r^2}{P}\right)^{0,849}$	Roque et al. (2001)
13	Teodoro Sampaio	$EI_{30i} = 106,818 + 46,96 * \frac{r^2}{P}$	Colodro et al. (2002)
14	Dourados	$EI_{30i} = 80,305 * \left(\frac{r^2}{P}\right)^{0,8966}$	Oliveira et al. (2012b)
15	Piracicaba	$EI_{30i} = 7,278 * \left(\frac{r^2}{P}\right)^{0,807}$	Pereira (1983)
16	Coxim	$EI_{30i} = 138,33 * \left(\frac{r^2}{P}\right)^{0,7431}$	Oliveira et al. (2012b)
17	Campo Grande	$EI_{30i} = 139,44 * \left(\frac{r^2}{P}\right)^{0,6784}$	Oliveira et al. (2012b)
18 ¹	Paraná/Região 1	$EI_{30i} = 18,64 + \left(5,73 * \left(\frac{r^2}{P}\right)\right)$	Rufino et al. (1993)
19	Paraná/Região 3	$EI_{30i} = 22,05 + \left(4,21 * \left(\frac{r^2}{P}\right)\right)$	Rufino et al. (1993)
20	Paraná/Região 4	$EI_{30i} = 16,73 + \left(4,02 * \left(\frac{r^2}{P}\right)\right)$	Rufino et al. (1993)
21	Paraná/Região 5	$EI_{30i} = 19,55 + \left(4,94 * \left(\frac{r^2}{P}\right)\right)$	Rufino et al. (1993)
22	Paraná/Região 7	$EI_{30i} = 9,51 + \left(4,2 * \left(\frac{r^2}{P}\right)\right)$	Rufino et al. (1993)
23	Parana/Região 8	$EI_{30i} = 3,39 + \left(4,15 * \left(\frac{r^2}{P}\right)\right)$	Rufino et al. (1993)

¹ Comunicação pessoal Dr. Jeferson Dieckow, em 21 de agosto de 2015, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil - recebida por correio eletrônico. Comunicação pessoal Paulo César Waltrick em 21 de agosto de 2015, Secretaria de Estado da Educação do Paraná, Curitiba, Brasil - recebida por correio eletrônico. Ambos são autores de Waltrick et al. (2015) e informaram que os coeficientes apresentados por Rufino et al. (1993) (equações/estações 18 a 23 deste quadro) devem ser multiplicados pela aceleração da gravidade ($g = 9,8 \text{ m s}^{-2}$)

Figura 3.2 - Localização das estações elencadas na Tabela 3.1 e que apresentam influência geográfica no estado de São Paulo



3.2.2.3 Cálculo de R e interpolação

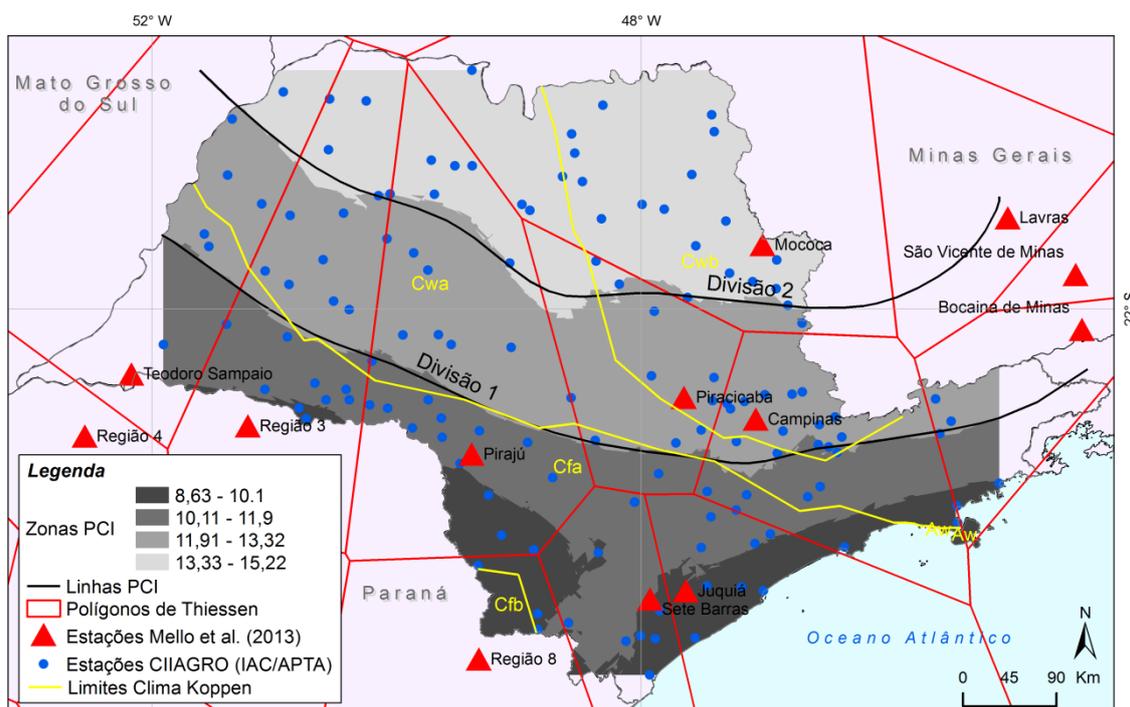
O arquivo correspondente às *zonas com potencial erosão das chuvas uniforme* foi cruzado com o arquivo vetorial que contém a localização das estações do CIIAGRO (IAC/APTA) (triângulos vermelhos da Figura 3.2) de modo que as mesmas fossem separadas de acordo com o polígono ao qual pertencem. Os resultados foram inseridos no *software* Excel para aplicação das equações de erosividade (ver Tabela 3.1). O resultado desta etapa, médias mensais e anuais de erosividade para cada estação do CIIAGRO (IAC/APTA), foi espacializado no *software* ArcGIS e interpolado utilizando o método *co-kriging* utilizando a altitude (Figura A1 do Apêndice A) como variável secundária.

3.3 Resultados e discussões

A Figura 3.3 apresenta os polígonos de Thiessen (polígonos vermelhos) que representam as áreas de influência das estações mostradas na Tabela 3.1

(triângulos vermelhos). As zonas PCI, definidas a partir dos dados observados do CIIAGRO (IAC/APTA) (pontos pretos) e categorizada conforme os tipos climáticos de Köppen para o estado de São Paulo. Também na Figura 3.3 encontram-se as divisões PCI que foram geradas a partir do limite das classes PCI.

Figura 3.3 - Zonas PCI, polígonos de Thiessen e tipos climáticos do estado de São Paulo



O uso deste índice PCI favorece a análise da variabilidade espacial da precipitação. De forma geral, de acordo com o período dos dados utilizado, os valores deste índice variaram entre 8,63 e 15,22 indicando uma sazonalidade na distribuição das chuvas no Estado de São Paulo. Resultados semelhantes foram encontrados por Siqueira (2015) que utilizou dados observados de precipitação correspondentes ao período 1970 - 2010 e constataram a sazonalidade a partir de valores que oscilaram entre 10,0 e 15,0. De acordo com Oliver (1980) os valores inferiores a 10 representam uma distribuição de precipitação uniforme (baixa concentração de precipitação); valores entre 11 e 15 denotam uma concentração de precipitação moderada; valores entre 16 e 20 denotam uma

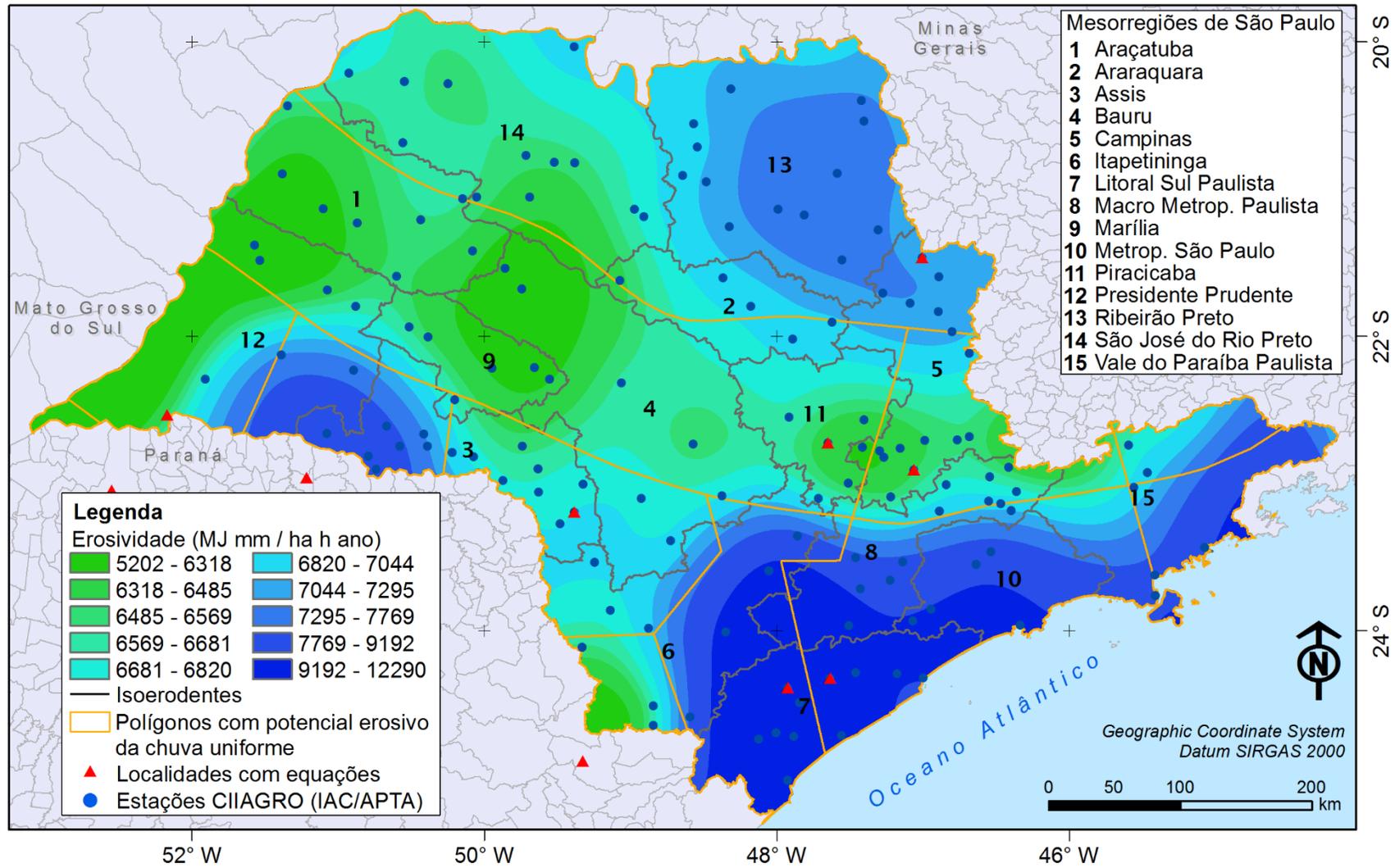
distribuição irregular e valores acima de 20 representam uma forte irregularidade.

Os valores obtidos para o estado de São Paulo neste estudo mostram que nas regiões que apresentam os maiores valores de PCI como ocorre ao norte do estado, representadas pelas Mesorregiões de Ribeirão Preto e de São José do Rio Preto, a maior parte da precipitação ocorre em apenas alguns meses do ano, como sugere também Siqueira (2015). Conforme descreve Luis et al. (2011), os menores valores de PCI é 8,3 e indica uma uniformidade perfeita na distribuição da precipitação (baixa concentração da precipitação) e correspondem às regiões localizadas no litoral e no sudoeste do estado.

Nota-se que a linha designada por 'Divisão 1', que separa as zonas PCI b e c, coincide com a linha de divisão entre os tipos climáticos Cfa (clima temperado úmido com verão quente) e Cwa (clima temperado úmido com Inverno seco e verão quente). Porém, a linha indicada por 'Divisão 2' não representa variação entre tipos climáticos presentes no estado, indicando que somente a precipitação não é capaz de responder pela diferença entre os climas Cwa (clima temperado úmido com Inverno seco e verão quente) e Cwb (clima temperado úmido com inverno seco e verão temperado), os quais são de fato semelhantes no tocante à distribuição temporal da chuva. Desse modo, testes utilizando somente dados de temperatura média anual foram realizados e não representaram esta divisão.

As zonas com potencial de erosão das chuvas uniforme são apresentadas na Figura 3.4 (polígonos na cor laranja). Estes polígonos podem ser comparados com aqueles definidos por Lombardi Neto et al. (1980) citado por Bertoni e Lombardi Neto (2012), trabalho pioneiro para os cálculos regionalizados de erosividade no estado de São Paulo, porém as equações definidas e empregadas para o cálculo da erosividade desenvolvida por eles não foram publicadas. Como já mencionado, ocorre também que as equações foram determinadas a partir de um conjunto de dados observados diferente do aplicado neste trabalho e, por esta razão, impossibilitaria sua utilização. No entanto, mesmo tendo sido definidos em períodos diferentes, os polígonos deste trabalho apresentam semelhanças com os definidos por Lombardi Neto et al. (1980) citado por Bertoni e Lombardi Neto (2012).

Figura 3.4 - Mapa atualizado da erosividade para o Estado de São Paulo



Os valores de erosividade para o estado de São Paulo variaram entre 5202 e 12290 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ apresentando amplitude de 7088 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹. Identificou-se menores valores de R no interior do estado e na porção oeste com variação entre 5202 e 6600 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹. Os extremos superiores de R ocorreram nas áreas localizadas no litoral e no nordeste do estado para as quais os índices variaram entre 7000 a 12000 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹.

De forma geral, como também constataram Oliveira et al. (2012a), a correlação entre a os resultados de R obtidos e a latitude e longitude, respectivamente, indicam que R decresce no sentido norte-sul e leste-oeste em escala regional como ser verificado a partir da das Figuras 3.5a e 3.5b. Nestes casos, os coeficientes de determinação (r^2) encontrados para estes conjuntos de dados foram de 0,27 para a latitude e de 0,09 para a longitude. Ou seja, a variável dependente (R, erosividade), de acordo com os valores encontrados, é fracamente explicada pelas variáveis independentes (latitude e longitude): 9% dos valores de R podem ser explicados pela longitude e 27% pela latitude. Os coeficientes de correlação encontrados são positivos, 0,52 e 0,31, respectivamente, para a latitude e a longitude e isso implica que os maiores valores de R encontram-se nas maiores latitudes e longitudes.

De acordo com a correlação entre a erosividade média anual e a precipitação média anual, Figura 3.5c, foi encontrado coeficiente de determinação (r^2) encontrado entre a foi de 0,33, Figura 3.5c, e indica fraca explicação da erosividade média anual pela precipitação média anual, fato também constatado por Oliveira et al. (2012a) ao considerar o território brasileiro em seu estudo. Neste caso, 33% da erosividade é explicada pela precipitação considerando o conjunto de dados utilizado neste trabalho. Neste mesmo contexto, alguns estudos sugerem que elevadas médias mensais de precipitação não correspondem necessariamente a elevada erosividade média anual (Mello et al., 2007; Oliveira et al., 2012a e Lee e Heo, 2011). O coeficiente de correlação (r) encontrado foi de 0,58 e indica que a dependência entre as variáveis é considerada moderada considerando estes dados.

Analisando-se a correlação entre a erosividade e a altitude, o coeficiente de determinação (r^2), Figura 3.5d, obtido foi de 0,11, ou seja, indica que apenas

11% da erosividade é explicada pela altitude. A Figura 3.5d mostra também que de acordo com o conjunto de dados analisados, a correlação entre essas duas variáveis é negativa e fraca ($r = 0,34$) e o gráfico apontar que alguns dos maiores valores de altitude se encontram nas localidades com menores altitude (correspondentes ao litoral). Verificou-se que os maiores valores de R são encontrados na região nordeste, nas Serras do Mar e Mantiqueira e no litoral do Estado, com uma tendência de diminuição com a redução da altitude e o afastamento do litoral, assim como sugerem Moreira et al. (2006). Ainda com relação ainda sobre essa variável, a maior parte das localidades das estações encontram-se em altitudes que variam de 500 a 1000 metros e apresentam erosividade média anual entre 6000 e 10000 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹.

Na Figura 3.6 é mostrado, para 12 localidade (estações) pertencentes ao estado o comportamento da precipitação média mensal e da erosividade média mensal ao longo do ano. Os dados base utilizados para a construção dos gráficos são, portanto, pontuais. Verifica-se que os maiores valores de erosividade encontram-se nos meses onde a precipitação também é elevada assim como foi apontado na Figura 3.5c.

Figura 3.5 - Correlação da erosividade média anual ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) com a) latitude, b) longitude, c) precipitação média anual e d) altitude.

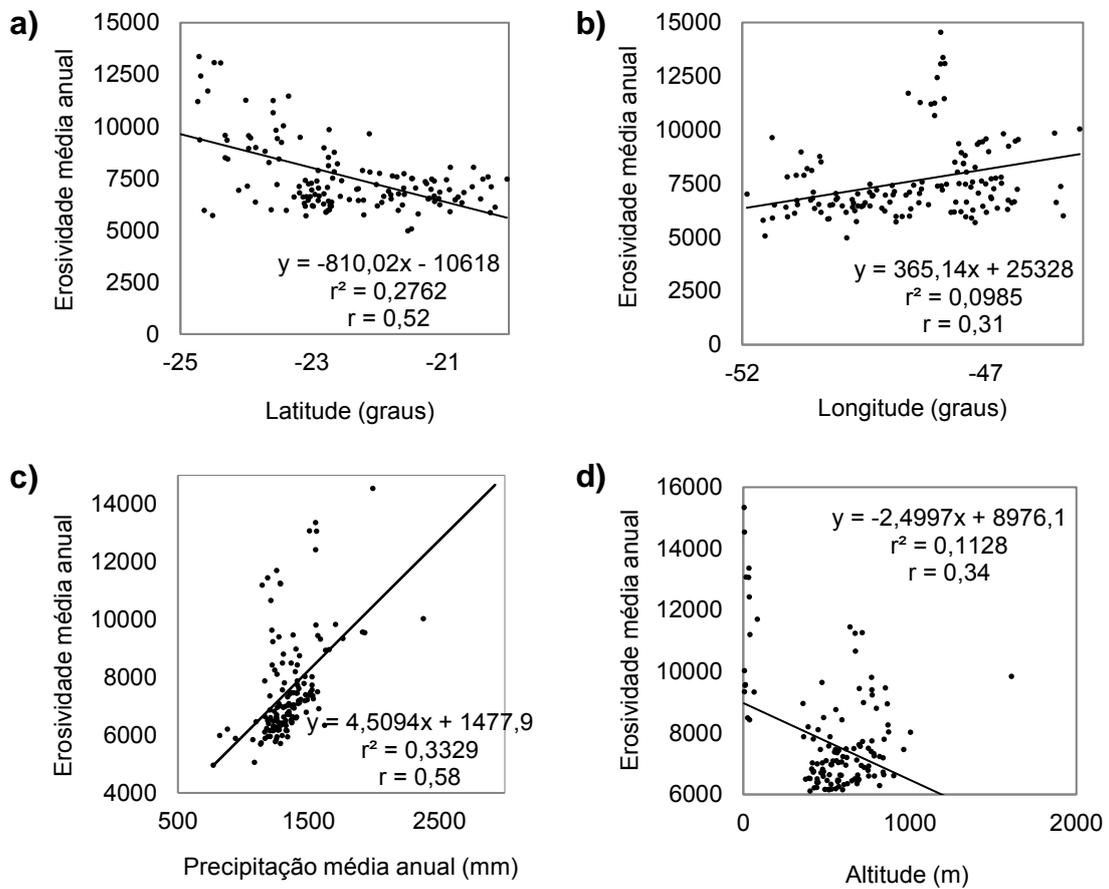
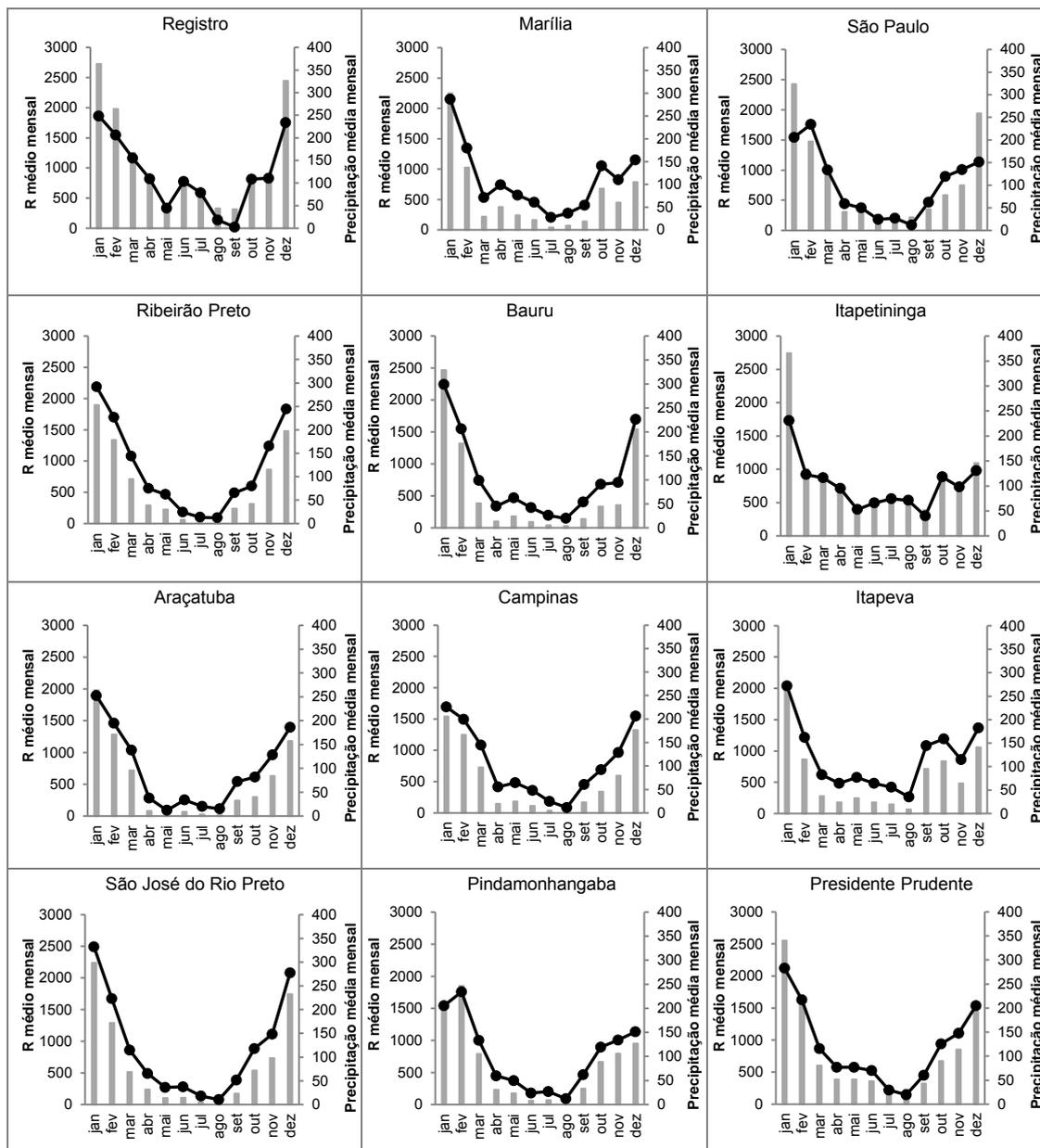


Figura 3.6 - Erosividade média mensal ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e precipitação média mensal (mm) em algumas estações meteorológicas



O estado apresentou padrões de distribuição espacial em concordância com os resultados encontrados por Lombardi Neto et al. (1980) citado por Bertoni e Lombardi Neto (2012), que utilizaram dados pluviométricos de 115 estações para um período de 20 anos, e com os resultados obtidos por Sant'Anna Neto (1995), que empregou dados de 394 estações distribuídos entre 1971 a 1993. Os autores atribuem as pequenas diferenças à utilização dados observados de

precipitação pertencentes a períodos distintos empregados neste trabalho que fez uso de uma série de dados mais atualizada, visto que os períodos dos dados utilizados nos trabalhos mencionados são distintos.

Em se tratando do cálculo de R em escala regional é adequado ilustrar a diferenciação dos métodos. Muitos trabalhos, incluindo Lombardi et al. (1980), Rufino (1983), Oliveira (2009), Almeida (2009), Cantalice et al. (2009), Silva et al. (2010) e Mello et al (2012), obtiveram mapas de R em escala regional a partir de equações ajustadas conforme as características do regime de precipitação das suas respectivas áreas de estudos. Como já mencionado, trata-se do método pluviográfico ou direto.

Outro conjunto de estudos obtiveram mapas de erosividade de forma indireta como é o caso de Silva (2004), Mello et al. (2007), Oliveira et al. (2012a), Viola et al. (2014) e Waltrick et al. (2015) que consideraram a variabilidade espacial da precipitação utilizando equações determinadas em outros trabalhos que foram ajustadas conforme o regime de precipitação da sua respectiva região. É nesse segundo grupo metodológico que este trabalho se insere.

O terceiro grupo de trabalhos em escala regional que se propõe a calcular a erosividade faz a utilização generalizada (para toda a área de trabalho) – e não regionalizada como este trabalho – da equação desenvolvida por Lombardi Neto e Moldenhauer (1992). Embora esta aplicação seja frequente, só pode ser utilizada com êxito se o regime de precipitação da área estudada for semelhante ao regime de precipitação da região de Campinas.

Em se tratando de aplicações em escala local, inúmeros trabalhos que realizam cálculo de erosividade em território brasileiro empregam a equação de Lombardi Neto e Moldenhauer (1980) sem avaliar se as condições de precipitação são semelhantes às de Campinas. Acredita-se também que as principais razões para que isto ocorra sejam a falta de conhecimento em relação a definição das equações para o cálculo de erosividade e a ausência de dados pluviográficos.

3.4 Conclusão

Foi apresentado um mapa atualizado de erosividade para o estado de São Paulo empregando-se a metodologia de cálculo regionalizado de R desenvolvida por Mello et al. (2013) e utilizando dados observados mensais de precipitação disponibilizados pelo Centro Integrado de Informações Meteorológicas do Instituto Agrônomo de Campinas e da Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (CIIAGRO-IAC/APTA) para o período de 1991 a 2014.

4 PERDA DE SOLO NO ESTADO DE SÃO PAULO

4.1 Introdução

Discussões científicas recentes evidenciam a preocupação em se estabelecer limites para a exploração dos recursos naturais com vistas à erradicação da pobreza, segurança alimentar e crescimento econômico (ROCKSTRÖM et al., 2009; REID et al., 2010). Neste sentido, os problemas decorrentes da conversão de paisagens naturais em sistemas agrícolas e a exploração intensa do recurso solo, além do seu limite de tolerância, motivados pela demanda crescente por alimento, energia e fibras e pelas projeções populacionais para as próximas décadas, são algumas das consequências das pressões antrópicas exercidas sobre o recurso solo (LAL, 2007a; 2007b).

A erosão é a principal forma de degradação do solo. Para o Estado de São Paulo estima-se que 80% das terras cultivadas estejam passando por processos erosivos além dos limites de recuperação natural do solo (BELLINAZZI et al., 1981). Estima-se que este problema afete atualmente cerca de 1 bilhão hectare em escala global e que 70 % deste total esteja severamente comprometido (LAL, 2003). Como consequência desta exploração intensa do recurso solo cerca de 12 milhões ha de terras aráveis são abandonadas no mundo anualmente (PIMENTEL et al., 1995).

Os problemas ocasionados pela erosão apresentam implicações em escalas que vão desde interferências nos processos hidrológicos locais/regionais, fluxo de sedimentos, até padrões de mudanças climáticas (DOTTERWEICH, 2013), além de apresentarem prejuízos socioeconômicos (TELLES, 2010). Normalmente verifica-se desde perda de nutrientes, matéria orgânica, queda na qualidade do solo e perdas de produtividade *in locu*, até sedimentação, assoreamento de lagos e rios, perda de biodiversidade, redução da oferta e aumento dos preços de alimentos em escalas local, regional e global (LAL, 1998). Como agravante para locais como o Brasil, devido à alta intensidade dos eventos de precipitação e a presença de solos suscetíveis à degradação, os processos erosivos são

significativamente mais acelerados quando comparados aos das áreas temperadas (STOCKING, 2003).

Estimar as taxas de perda de solo é uma medida inicial importante para se conhecer a intensidade dos processos erosivos e abordá-los como problemas econômicos, ambientais e sociais (D'AGOSTINI, 1999). Neste contexto, os modelos de erosão são ferramentas capazes de fornecer diagnósticos da degradação do recurso solo, imprescindíveis à condução de políticas públicas como: estabelecer prioridades para as áreas de aplicação de investimentos, orientar a expansão urbana, indicar práticas de conservação para áreas agrícolas, dentre outras. Estes modelos envolvem parâmetros biofísicos e antrópicos (MERRITT et al., 2003; BOARDMAN, 2006; KINNEL, 2010; VENTE et al., 2013) cuja facilidade para obtenção nos últimos anos, favorecida pelo desenvolvimento de Sistemas de Informação Geográfica e avanços na aquisição de dados por Sensoriamento Remoto, propiciou a disseminação de métodos e análises tornando possíveis aplicações em escalas regionais (RENSCHLER e HARBOR, 2002). Por esta razão, a Ciência do Solo, reconhecida desde o final do século XIX como uma ciência independente, com objeto de estudo (solo) e metodologias próprias, vem sendo cada vez mais requisitada nas questões de Ciência do Sistema Terrestre (JANZEN, 2004; BOCKHEIM e GENNADIYEV, 2010; JANZEN et al., 2011) que se apoiam em abordagens interdisciplinares para a discutir problemas principalmente em escalas regionais e globais. Além disso, a Pedosfera, componente do Sistema Terrestre que representa o recurso solo, encontra-se na superfície do planeta, nas interfaces entre a atmosfera, biosfera, pedosfera e litosfera e fazendo parte da Zona Crítica (WILDING e LIN, 2006), região onde ocorrem muitos desses processos de interação. Portanto, os estudos sobre erosão e conservação do solo possuem uma demanda atual e iminente de direcionar para aplicações interdisciplinares em escala regional e global e fomentar discussões no contexto sistêmico da sustentabilidade global, indo além da abordagem original (PUIG DE LA BELLACASA, 2015; DÍAZ-FIERROS, 2015; BOUMA, 2014; CAMARGO et al., 2010; HARTEMINK, 2008; HARTEMINK e MCBRATNEY, 2008).

Neste contexto, propiciado pelos avanços tecnológicos mencionados anteriormente, tem sido possível a realização de trabalhos voltados à

Conservação do Solo em âmbito regional a partir da implementação em ambiente computacional de modelos capazes de estimar a perda de solo (ver LU et al., 2004; LINO, 2010; PULIDO-GOMEZ, 2012; ROCHA, 2013). Para o Estado de São Paulo, as estimativas da perda de solo estão desatualizadas visto que, nas últimas décadas, os processos de conversão dos usos naturais em usos antrópicos foram intensos. Quintiliano et al. (1961) e Kertzman et al. (1995) fizeram estudos de erosão importantes para o estado embora na época houvessem limitações no que se diz respeito a plataformas e dados digitais, assim como Bertoni e Lombardi Neto (2012) e outros pesquisadores do Instituto Agrônomo, instituição pioneira na investigação da erosão na região.

Outro aspecto importante relacionado à erosão diz respeito à tolerância da perda de solo, T , definida por Wischmeier e Smith (1978) como sendo “... a taxa máxima anual de erosão do solo que pode ocorrer e ainda permitir um alto nível de produtividade das culturas”. Lombardi e Bertoni (1975) estabeleceram padrões de tolerância de perda de solo para o Estado de São Paulo considerando a profundidade em conjunto com outras propriedades físicas ao investigarem 75 perfis de solo e os resultados encontrados variaram de 4,5 a 13,4 $\text{Mg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ e 9,6 a 15 $\text{Mg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$, respectivamente, para solos com B textural e com B latossólico. Para o Estado de Santa Catarina, Bertol e Almeida (2000) encontraram limites de tolerância que variaram entre 14,5 e 1,88 $\text{Mg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ para Terra Bruna Estruturada e Litólicos, respectivamente. Sob aspectos gerais, a tolerância da perda de solo considera que uma perda média de até 12,5 $\text{Mg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ é tolerável para solo profundos, permeáveis e bem drenados, ao passo que perdas médias de 2 a 4 $\text{Mg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ são admissíveis em solos com subsolo desfavorável ou mais rasos (BERTONI e LOMBARDI NETO; 2012).

Considerando-se, portanto, que estudos relacionados à perda de solos para o Estado de São Paulo devem ser realizados à luz dos avanços tecnológicos dos Sistemas de Informações Geográficas e aquisição de dados por Sensoriamento remoto e que, de acordo com a literatura citada, há uma necessidade iminente de se estimar as taxas de perda de solo para fundamentar limites para a exploração do solo, recurso finito, no que diz respeito à segurança energética e alimentar (ROCKSTRÖM et al., 2009), diagnósticos sobre erosão no estado de São Paulo devem ser realizados de modo que possam colaborar com discussões

no âmbito da conservação baseando-se no princípio de que este é um recurso finito.

Dessa forma, o objetivo desta etapa do trabalho é estimar taxas de perda de solo para o Estado de São Paulo via Equação Universal da Perda de Solo (WISCHMEIER e SMITH, 1965, 1978), em escala regional utilizando Sistemas de Informação Geográfica e dados de média resolução (30 m).

4.2 Materiais e método

4.2.1 Material Cartográfico, dados básicos e programas

Os dados digitais utilizados neste estudo foram armazenados e tratados no programa *ArcGIS versão 10.1* (ESRI, 2014) para a composição do banco de dados, processamento e apresentação das análises e incluíram: 1) Mapa Pedológico vetorial (OLIVEIRA et al., 1999a) em escala 1:500.000 (Figura A3 do Apêndice A) para o Estado de São Paulo; 2) Mapa vetorial do uso e cobertura do solo do ano 2005 elaborado pela Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo na escala de 1:100.000 (Figura A4 do Apêndice A - São Paulo, 2013) e 3) Modelo Digital de Terrenos (DEM, do inglês *Digital Elevation Model*) do Projeto TOPODATA (VALERIANO, 2008), com resolução espacial de 30 m (Figura A1 do Apêndice A).

4.2.2 Método

Diversos são os métodos capazes de exprimir taxas de perda de solo (MERRIT et al., 2003). A escolha do modelo adequado muitas vezes se dá pela facilidade na obtenção dos dados e aplicação do mesmo, bem como pelo seu desempenho (KINNELL, 2010). Nesta pesquisa, a Equação Universal da Perda de Solo (USLE, do inglês *Universal Soil Loss Equation*) desenvolvida por Wischmeier e Smith (1965, 1978) foi o método escolhido para estimar as taxas anuais de perda de solo ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) em um contexto regional. Este modelo empírico é caracterizado pela aplicação e requisição de dados relativamente simplificados, além de apresentar eficiência preditiva da erosão em vertentes quando

comparados a métodos mais robustos (CHAVES, 2010). Embora originalmente a equação se destine à estimativa potencial da erosão em parcelas homogêneas (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2012), tem sido adotada com êxito para estimar taxas de erosão em relevos complexos e em escala regional (FU et al., 2005; MARTÍN-FERNÁNDEZ e MARTÍNEZ-NÚÑEZ, 2011; TETZLAFF et al., 2013; GALDINO et al., 2015).

A aplicação da USLE em escala regional, favorecida pelo manuseio de dados digitais nos SIG's, implica em generalizações. Além disso, é conhecido que a USLE não faz menção à deposição do material erodido nas encostas (ZHANG et al., 1995), mas apenas à estimativa potencial da erosão em entressulcos e sulcos pequenos, deficiência que limita abordagens voltadas para o planejamento e transporte de nutrientes, por exemplo. Outro aspecto importante a ser considerado é que seus resultados referem-se às taxas potenciais de perda de solo com base em valores médios de erosividade (R) calculados para uma série grande de dados, não sendo aplicável a um evento em particular de chuva (MERRIT et al., 2003), mas que, porém, indicam satisfatoriamente as áreas mais críticas com relação à necessidade de controle da erosão.

Conforme descrita pela Equação 4.1, a USLE considera parâmetros naturais como clima (R), solo (K) e topografia (L e S) e fatores antrópicos como o uso e ocupação do solo (C) e as práticas conservacionistas (P). Quando a USLE engloba apenas os parâmetros naturais, ou seja, quando as perdas de solo ocorrem em uma área mantida continuamente descoberta, exprime o Potencial Natural de Erosão (PNE) e pode ser interpretado conforme a classificação de Lagrotti (2000): muito baixo (até 250 Mg ha⁻¹ano⁻¹), baixo (250 – 500 Mg ha⁻¹ano⁻¹), moderado (500 – 750 Mg ha⁻¹ano⁻¹), alto (750 – 1000 Mg ha⁻¹ano⁻¹) e muito alto (acima de 1000 Mg ha⁻¹ano⁻¹). A equação da USLE que exprime a estimativa da perda de solos (Mg ha⁻¹ ano⁻¹) é apresentada a seguir:

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (4.1)$$

sendo:

A – taxa de perda de solo (Mg ha⁻¹ano⁻¹)

- R – fator erosividade da chuva ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{ano}^{-1}$)
- K – fator erodibilidade do solo ($\text{Mg h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$)
- L – fator comprimento de rampa (adimensional)
- S – fator declividade (adimensional)
- C – fator uso e manejo (adimensional)
- P – fator práticas conservacionistas (adimensional)

4.2.2.1 Erosividade (R)

Com relação aos fatores da USLE, a *erosividade (R)* expressa a capacidade da precipitação de causar erosão em uma área sem proteção da cobertura vegetal e é diretamente proporcional ao valor do produto de duas características da chuva: a energia cinética total (E_c) e a sua intensidade máxima em trinta minutos (I_{30}) (Bertoni e Lombardi Neto, 2012). Neste trabalho foram utilizados os resultados de erosividade média anual apresentados no Capítulo 3.

4.2.2.2 Erodibilidade (K)

A erodibilidade considerada na USLE (fator K) retrata a propriedade intrínseca do solo que representa a solo por unidade do índice de erosão (WISCHMEIER e SMITH, 1978).

Os valores de K empregados neste trabalho (Tabela 4.1) constam em Silva e Alvares (2005) que compilaram os resultados obtidos por Denardin (1990) e Manningel et al. (2002). Estes autores, por sua vez, consideraram a diversidade dos solos paulistas a partir das suas classes e subclasses para a determinação direta de valores de K.

Tabela 4.1 - Fato k para os tipos de solo do Estado de São Paulo.

Tipos de Solo em Oliveira et al. (1999b)	Média do Fator k (t.ha ⁻¹ .MJ ⁻¹ .mm ⁻¹)
Argissolo	0,0425
Cambissolo	0,0508
Chernossolo	0,0309
Espodossolo	0,0592
Gleissolo	0,0361
Latossolo	0,0162
Neossolo	0,0351
Nitossolo	0,0237
Organossolo	0,0610
Planossolo	0,0134

Fonte: Adaptado de Silva e Alvares (2005)

4.2.2.3 Comprimento e declividade das vertentes (L e S)

Os atributos topográficos relacionados na USLE, *comprimento* e a *declividade das vertentes*, fatores L e S, respectivamente, foram obtidos a partir do DEM do Estado de São Paulo disponibilizado pelo Projeto TOPODATA (VALERIANO, 2008). Com relação à adequação da USLE em escala regional, os cálculos dos fatores L e S são os principais responsáveis por tornar viável esta adaptação (local-regional). Isto, deve-se principalmente ao desenvolvimento dos SIG's ocorrido nas últimas décadas que possibilitou a implementação de métodos e manipulação de dados em plataformas digitais para grandes áreas e aos avanços na aquisição de dados por Sensoriamento Remoto, sobretudo topográficos.

Em se tratando das metodologias disponíveis para o cálculo do fator L, as mais utilizadas são as propostas por Wischmeier and Smith (1978), Moore and Burch (1986), McCool et al. (1987), Moore and Wilson (1992) e Desmet and Govers (1996). No presente trabalho foi adotado o algoritmo de Desmet e Govers (1996), Equação 4.2, por empregar o conceito de área acumulada e direções de fluxo (Moore et al., 1991), atributos que carregam propriedades hidrológicas e se adequam ao cálculo do fator L em relevos complexos.

$$L_{i,j} = \frac{(Ac_{i,j-i,n} + D^2)^{m+1} - (Ac_{i,j-i,n})^{m+1}}{(D^{m+2}) * (x_{i,j}^m) * (22,13)^m} \quad (4.2)$$

onde:

$L_{i,j}$ – comprimento da vertente de uma célula com coordenadas (i,j)

$Ac_{i,j-i,n}$ – área de contribuição de uma célula com coordenadas (i,j)

D – tamanho da grade da célula (m)

$x_{i,j}$ – direção do fluxo

m – coeficiente determinado de acordo com a declividade (α) que assume os valores 0,5 se $\alpha \geq 5\%$; 0,4 se $3\% \leq \alpha \leq 5\%$; 0,3 se $1\% \leq \alpha \leq 3\%$ e 0,2 se $\alpha > 1\%$.

O modelo de Desmet e Govers (1996), ao empregar o conceito de área acumulada, simula melhor as condições de fluxo de superfície e a geometria das vertentes não se limitando às condições de glebas homogêneas considerada originalmente pela USLE (JÚNIOR e GUIMARÃES, 2001).

O fator S foi calculado a partir das Equações 4.3 e 4.4 propostas por McCool et al. (1987) considerando um limiar de declividade (α) de 9%. O mapa de declividade utilizado foi obtido a partir da manipulação dos dados topográficos do Projeto TOPODATA no ArcGIS.

$$S = 10,8 * \text{sen}(\alpha) + 0,03; \text{ se } \alpha < 9\% \quad (4.3)$$

$$S = 16,8 * \text{sen}(\alpha) - 0,5; \text{ se } \alpha \geq 9\% \quad (4.4)$$

onde:

S - fator inclinação da vertente (adimensional)

α - ângulo de inclinação ou declividade (graus)

4.2.2.4 Uso e manejo do solo (C)

O fator C representa o efeito do *uso e manejo do solo*, C, na estimativa das taxas de erosão. Trata-se da relação esperada entre as perdas de solo de um terreno cultivado em determinadas condições e as perdas correspondentes de um terreno mantido continuamente descoberto (BERTONI E LOMBARDI NETO, 2012). Por esta razão, é resultado de experimentos que consideram, para cada cultura, diversos aspectos como o preparo do solo, efetividade do manejo, chuva,

fertilidade e o estágio de desenvolvimento da cultura. Frente à impossibilidade de se obter estas informações em escala regional em decorrência da variabilidade espacial dos usos do solo e da complexidade metodológica (obtenção experimental), é comum a associação às categorias mapeadas de uso e ocupação do solo em 2005 (Figura A4 do Apêndice A) valores médios do fator C presentes na literatura, conforme Quadro 4.1. Este procedimento introduz generalizações, porém viabiliza a aplicação da USLE em escala regional.

Quadro 4.1 - Fator C para os usos e coberturas do solo presentes no Estado de São Paulo em 2005

Uso do Solo	Fator	Referência
Cultura Anual	0,4238	Lino (2010)
Cana-de-açúcar	0,3066	Weill (1999)
Cultura Perene	0,1318	Lino (2010)
Pastagem	0,0610	Galdino (2012)
Reflorestamento	0,0030	Bertoni e Lombardi Neto (2012) e Resende e Almeida (1985)
Mata	0,0001	Adaptado de Bertoni e Lombardi Neto (2012)
Mata Ciliar	0,0001	
Campos Úmidos	0,0001	Adaptado de De Maria (1995)
Mangues	0,0010	De Maria (1995)
Restingas	0,0007	Rio de Janeiro (2000)
Cerrado	0,1500	Pulido-Gómez (2012)

4.2.2.5 Práticas de conservação (P)

O fator *práticas conservacionistas*, P, é a “*relação entre a intensidade esperada de tais perdas com determinadas práticas conservacionistas e aquelas quando a cultura está plantada no sentido de declive*” (morro abaixo) (BERTONI E LOMBARDI NETO, 2012).

De forma direta Marques et al. (1961), pertencentes à Seção de Conservação do Solo do Instituto Agrônomo, determinaram diretamente valores de P para algumas práticas de conservação (plantio morro abaixo = 1; plantio de contorno = 0,5; alternância de campinas + plantio em contorno = 0,4; cordões de vegetação permanente = 0,2) vastamente utilizados. No caso do Estado de São Paulo pode-se pressupor de forma genérica que em grande parte o manejo é

desenvolvido, com mecanização motorizada em todas as fases da produção agrícola, mas não é possível determinar as práticas de conservação para cada parcela produtiva.

Por isto este trabalho utilizou a metodologia empregada em Oliveira et al. (2007) que considera a declividade (α) como o principal atributo influente nas práticas de conservação do solo. Assim, os valores de P obedecem às seguintes relações: se $0 \leq \alpha \leq 5\%$, então $p=0,6$; se $5\% < \alpha \leq 20\%$, então $P=0,69947 - 0,08991 \alpha + 0,01184 \alpha^2 - 0,00035 \alpha^3$ e se $\alpha > 20\%$, $P=1$.

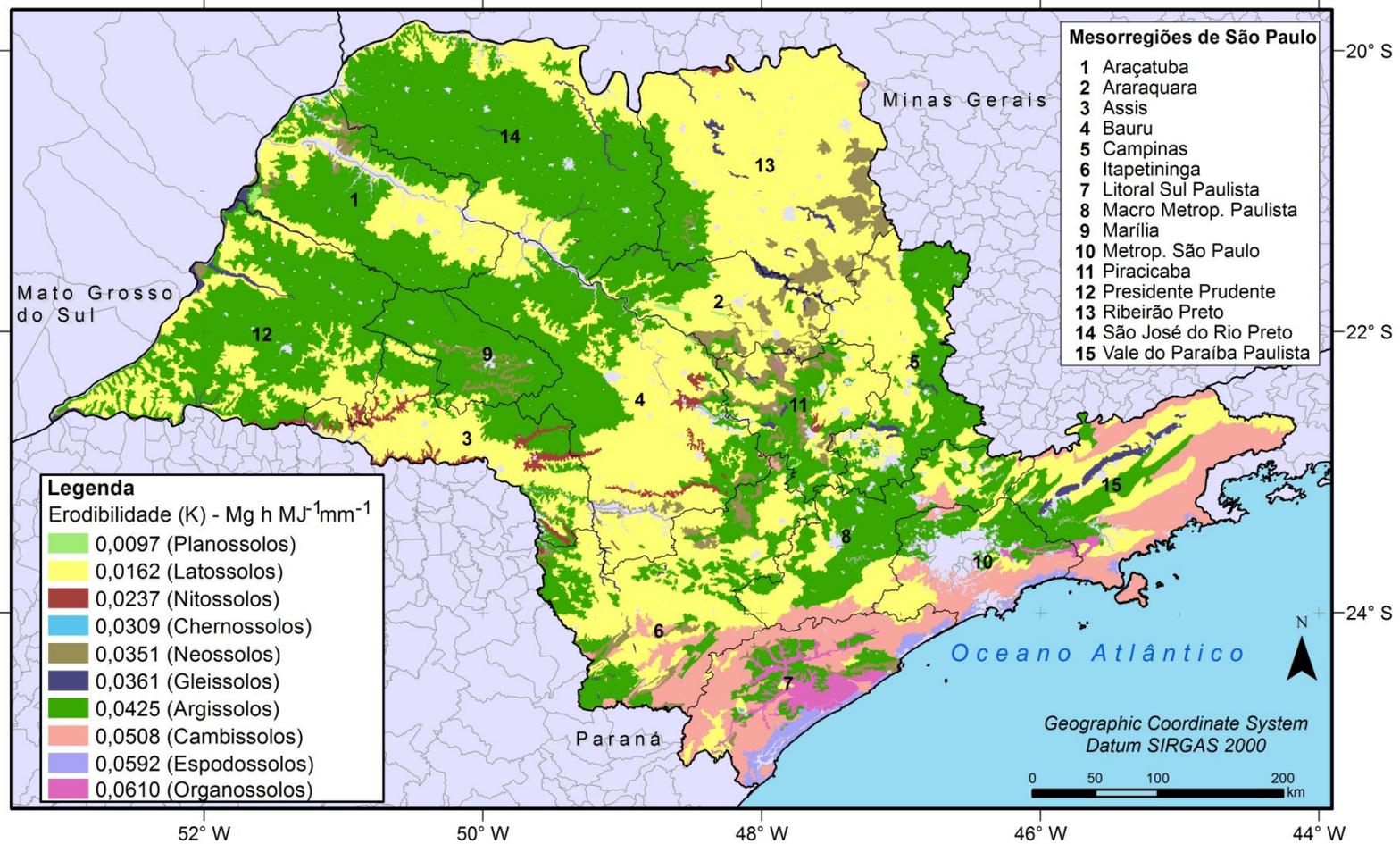
O produto dos fatores apresentados anteriormente resultou na estimativa das taxas de perda de solo para o Estado de São Paulo ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), considerando o uso e ocupação do solo em 2005 (Figura A4 do Apêndice A).

4.3 Resultados e discussões

Com o objetivo de facilitar as discussões, os resultados foram analisados segundo a divisão mesoeconômica do Estado de São Paulo proposta pelo IBGE (2002), conforme pode ser visto em cada uma das figuras apresentadas à seguir.

Em relação à *erodibilidade* (K), o Estado de São Paulo apresentou alta variabilidade espacial, com muitas áreas susceptíveis à erosão (Figura 4.1) e esta caracterização deve-se à ocorrência de Argissolos, cujo valor médio de erodibilidade chega a atingir $0,0425 \text{ Mg h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, em 43% do seu território. Isso ocorre pois o horizonte A é geralmente arenoso (Lepsch, 2010) o que favorece a erosão hídrica pois os espaços porosos absorvem a água que carregam grandes quantidades de solo. Além disso, durante chuvas de maior duração, o fluxo de água no perfil saturado atinge o horizonte B no qual há presença de um horizonte B textural com acúmulo de argila em profundidade devido à mobilização.

Figura 4.1- Mapa da erodibilidade dos solos do Estado de São Paulo (fator K)



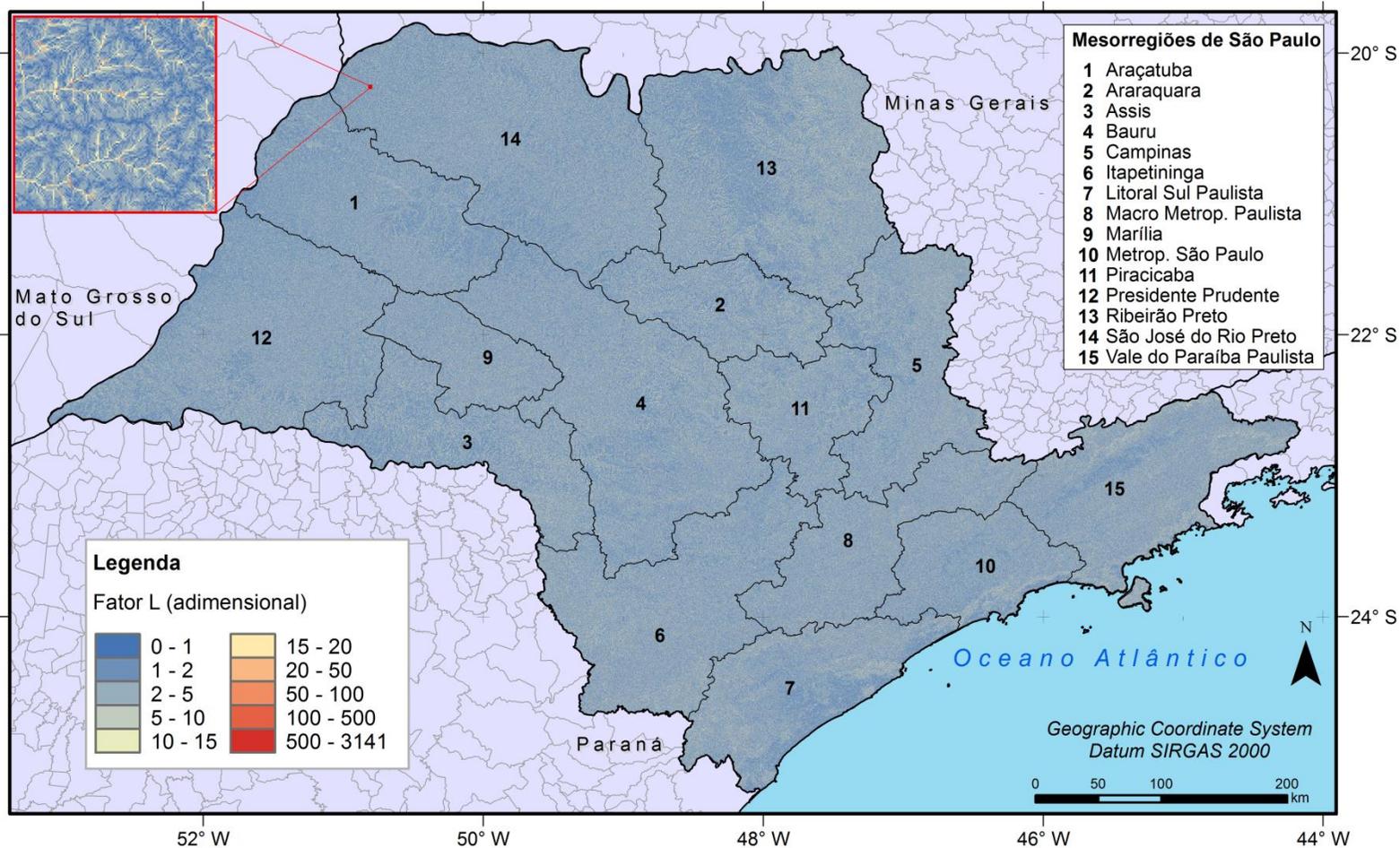
Os Latossolos são solos desenvolvidos e intensamente intemperizados que normalmente são resistentes aos processos erosivos devido às condições físicas desfavoráveis à perda de solo e predomínio em relevos suaves. O valor da erodibilidade para este tipo de solo é baixo, $0,0162 \text{ Mg ano}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$. Estes solos ocorrem em 43% do Estado de São Paulo e predominam nas áreas com declividade favorável às atividades agrícolas.

Índices de erodibilidade nos solos paulistas acima de $0,0508 \text{ Mg h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ encontram-se na porção sul do estado onde há presença de Cambissolos, Espodossolos e Organossolos. Os Cambissolos, solos pouco desenvolvidos com horizonte B incipiente ocorrem em aproximadamente 4% da superfície área do estado; os Espodossolos, caracterizados por textura predominantemente arenosa, presença de horizonte de impedimento e baixa fertilidade, apresentam erodibilidade média de $0,0592 \text{ Mg h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ e correspondem a menos de 1% da área do estado; por fim, os Organossolos, solos cujo material originário é predominantemente orgânico, apresentam erodibilidade igual a $0,0610 \text{ Mg h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ e ocorrem em menos de 1% do estado.

O fator L variou entre 0 (zero) e 3.141 (Figura 4.2) sendo os menores ocorreram nos interflúvios (topos de morros) e os maiores no sentido do fundo do vale, justamente onde há distâncias significativas do divisor de águas e de convergência de fluxo, além de altas declividades (mesmo comportamento da área acumulada), condições semelhantes àquelas encontradas por Silva (2003) e Michette (2015). O detalhe da Figura 4.2 revela que, quanto maior o fator L, maiores serão a velocidade e a concentração do escoamento superficial, o que permite inferir que estas são as áreas mais propícias à ocorrência a erosão laminar.

Os resultados da determinação automática de L de acordo com o método de Desmet e Govers (1996) utilizaram dados com resolução espacial de 30 m. Wu et al. (2005) afirmam que as taxas de perda de solo apresentam grande sensibilidade em função do fator L, de modo que quanto mais refinado o dado topográfico utilizado, maior a confiabilidade dessas estimativas.

Figura 4.2 - Mapa do fator comprimento de vertentes para o Estado de São Paulo (fator L)



O fator declividade (S) variou entre 0,03 e 9,89 (Figura 4.3). Conforme o mapa de declividade gerado a partir dos dados de altitude do Projeto TOPODATA, os quais foram filtrados com o objetivo de eliminar as falhas ("*sinks*"), os valores mínimos de S correspondem à regiões com relevo plano e suavemente ondulado e que totalizaram 60% do estado conforme o mapa categórico da declividade apresentado na Figura 4.4. Os valores máximos foram encontrados nas áreas onduladas, montanhosas, fortemente onduladas e escarpadas que totalizam 40% do estado. Os valores extremos superiores predominaram nas porções sul e sudeste, regiões que correspondem aos domínios geomorfológicos da Serra do Mar, em algumas áreas das mesorregiões de Marília, Araraquara e Piracicaba e na porção leste do estado que faz divisa com o estado de Minas Gerais. No contexto do uso agrícola, a declividade é um atributo topográfico preditor de usos e ocupações do solo, sobretudo agropecuários, uma vez que limitações químicas do solo relacionadas à concentração de cálcio (Ca^+), ferro (Fe^{+++}), magnésio (Mg^{++}), potássio (K^+), dentre outros nutrientes, podem ser minimizadas através de técnicas de manejo e de correção da acidez e fertilidade do solo. Sendo assim, pode-se dizer que nas áreas planas e suavemente onduladas, aptas para o desenvolvimento de atividades agropecuárias, frequentemente ocorrem usos intensivos de maquinário agrícola ou outras práticas de manejo e, portanto, podem corroborar com os processos erosivos.

O PNE é apresentado na Figura 4.5, desconsidera a cobertura do solo e as práticas de conservação e estima a perda de solo potencial (máxima) para uma determinada área. Para o Estado de São Paulo os resultados indicaram que 45% possui PNE muito baixo; 19% apresenta PNE baixo; 11% possui PNE moderado; 6% apresentada PNE alto e 20% apresenta PNE muito alto. As terras com PNE alto e muito alto concentram-se nas regiões sul e sudeste do estado. Embora em grande parte destas áreas a cobertura florestal original esteja preservada (ao sul da mesorregião de Itapetininga, Vale do Paraíba Paulista e ao sul da mesorregião Metropolitana de São Paulo, Figura A.4 do Apêndice A), fatores como a presença de solos frágeis do ponto de vista da erodibilidade (como Cambissolos Háplicos, solos rasos e pedregosos), relevo acidentado e alta erosividade corroboram para muito alto PNE.

Figura 4.3 - Mapa do fator declividade para o Estado de São Paulo (fator S)

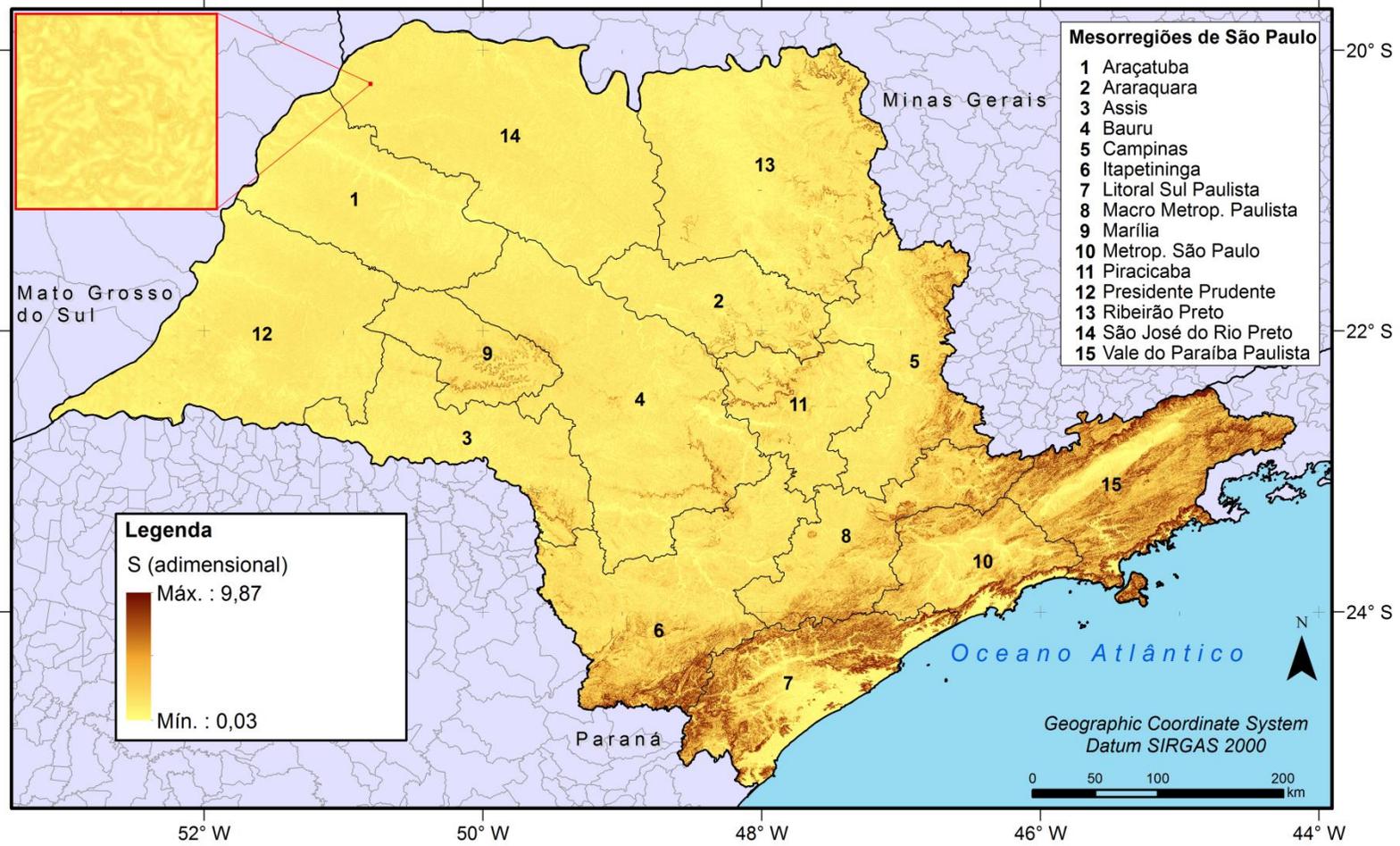


Figura 4.4 - Mapa categórico da declividade no Estado de São Paulo conforme classificação EMBRAPA (1999)

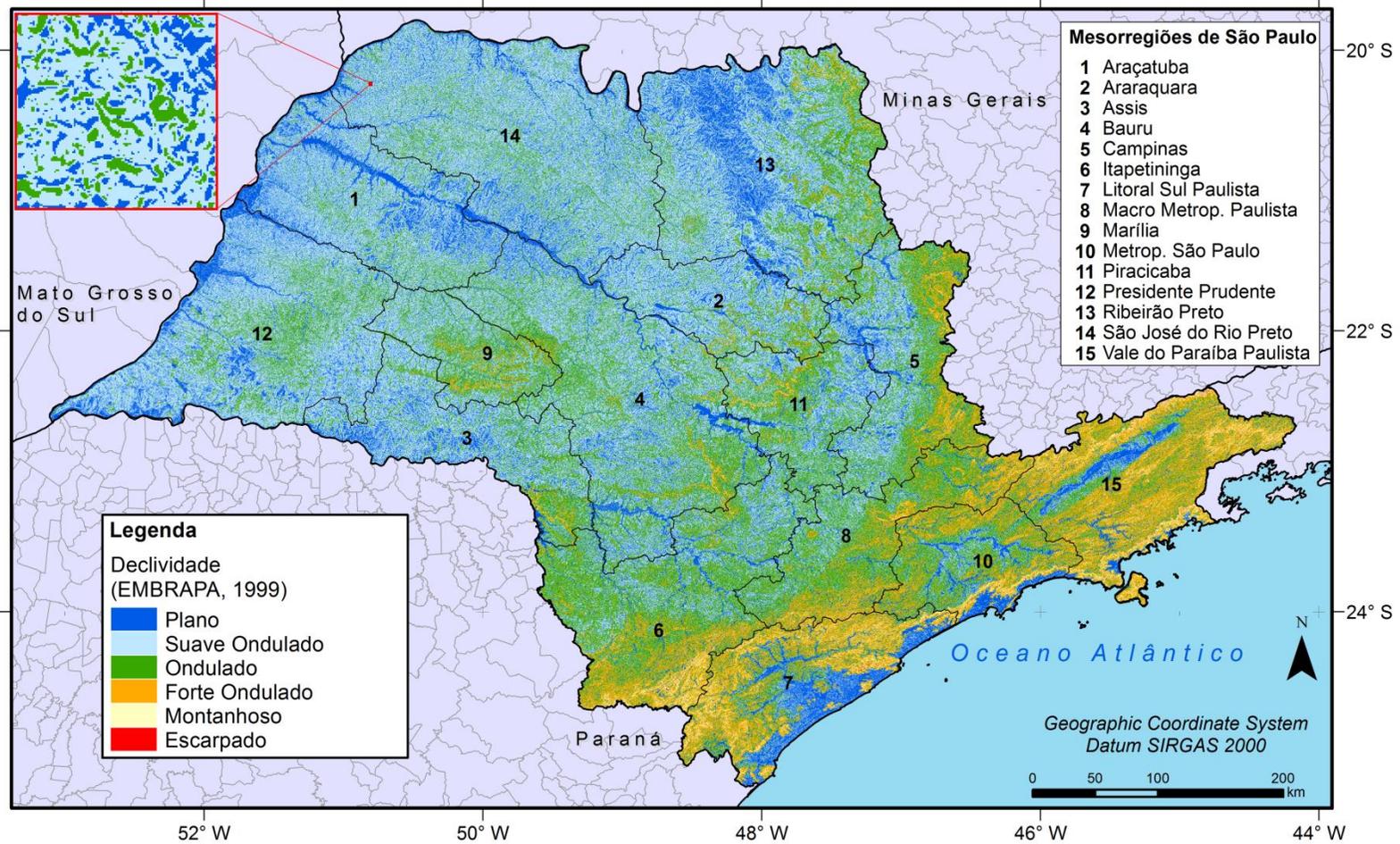
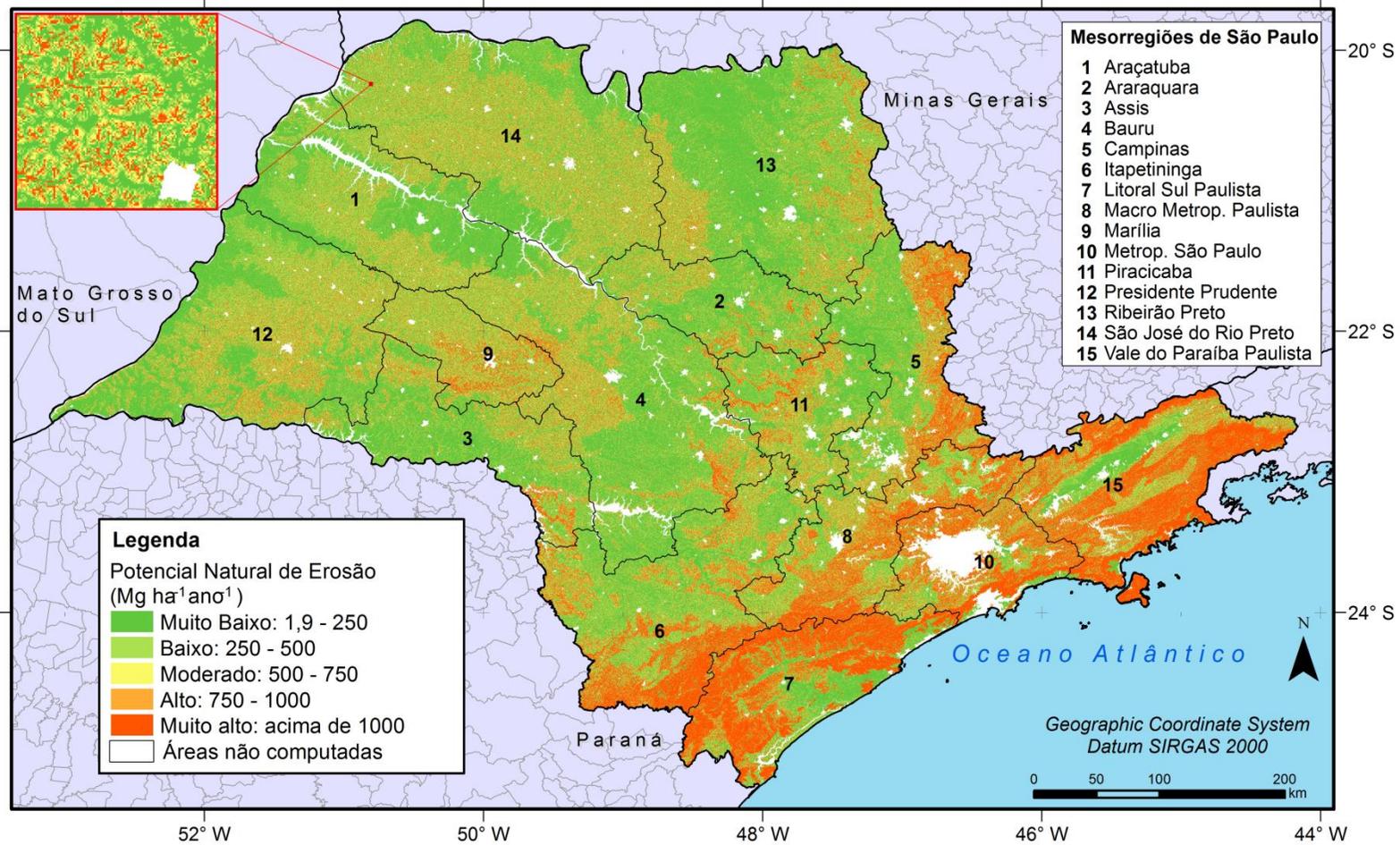
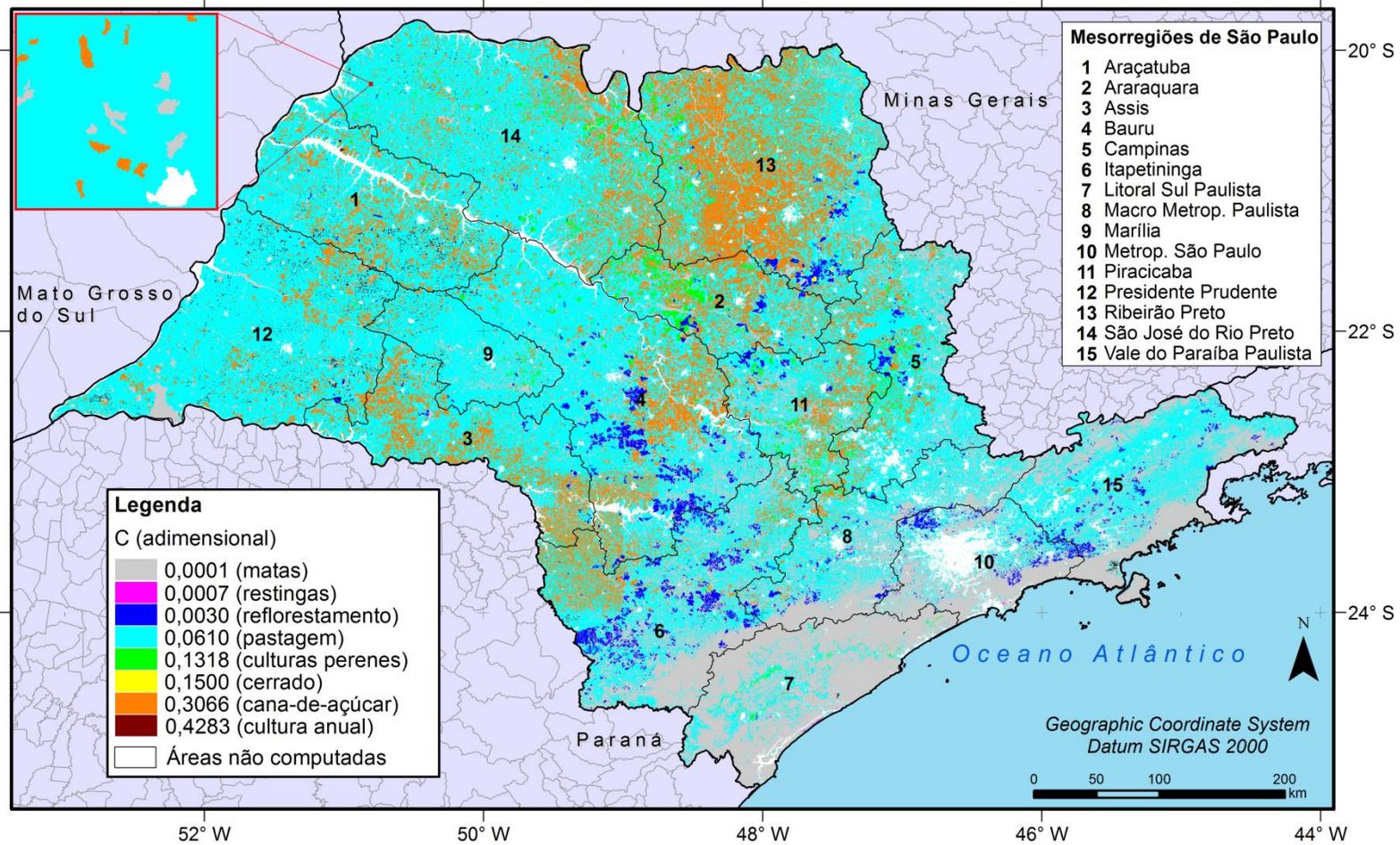


Figura 4.5 - Mapa do Potencial Natural de Erosão (PNE) do Estado de São Paulo



Com relação ao fator C, Figura 4.6, verifica-se variação no intervalo de 0 (zero) a 1 e indica a contribuição de cada uso e ocupação do solo para o processo erosivo, ou seja, quanto mais prejudicial à conservação do recurso, maior o valor de C. Assim, nas regiões predominantemente agrícolas foram atribuídos os maiores valores (superiores a 0,3) conforme levantamentos feitos na literatura, destacando-se vastas áreas das mesorregiões de Ribeirão Preto, Araraquara, Bauru e Assis. Como mencionado anteriormente, a abordagem regional proposta neste estudo não permite tecer considerações apuradas acerca do manejo agrícola. No entanto, de acordo com o Censo Agropecuário de 2006 (IBGE, 2006), em se tratando do sistema de preparo do solo, 76% dos estabelecimentos agropecuários adotam o cultivo convencional (com arações e gradagens), prática que contribui significativamente com o processo erosivo. Esta prática de preparo do solo está distribuída em todo o estado, exceto nas áreas montanhosas como na mesorregião do litoral sul paulista e apenas 24% dos empreendimentos agrícola utilizam o cultivo mínimo segundo este levantamento sistemático. Com relação ao valor de C para as áreas com pastagem, assumimos que todo o Estado de São Paulo apresenta pastagens com alto grau de degradação, $C = 0,0610$, valor este encontrado por Galdino (2012) através de estudos experimentais. Embora o mesmo estudo também tenha analisado parcelas de pastagem não degradadas e com baixo/médio níveis de degradação (respectivamente, 0,0070 e 0,0143 para C) e apesar do Censo Agropecuário de 2006 apontar que metade das áreas de pastagem do estado são pastagens naturais e a outra metade corresponde a pastagens plantadas e que, do total de área de pastagem plantada, apenas 4% estão degradadas, não se pode atribuir explicitamente a localização de cada tipo de pastagem (se natural, ou plantada degradada ou plantada em boas condições), visto que o Censo apresenta valores por município.

Figura 4.6 - Mapa do fator uso e ocupação do solo para o estado de São Paulo (fator C)



Com relação ao fator P (Figura 4.7), os padrões de distribuição seguem os valores de declividade uma vez que o método de cálculo utilizado nesse estudo assume que este é o atributo topográfico determinante para as práticas de conservação. Para as regiões da divisa do estado de Minas Gerais e mesorregiões de Itapetininga, Litoral Sul Paulista, Metropolitana de São Paulo e Vale do Paraíba Paulista com relevo escarpado e fortemente ondulado, o fator P foi próximo de 1. Os valores mínimos de P encontrados ocorrem em todo o norte e centro do estado onde a declividade é plana e suavemente ondulada (Figura 4.7) indicando, em termos de práticas de conservação, maior efetividade da aplicação, embora a determinação deste fator seja feita de forma indireta.

A estimativa das taxas de perda de solo para o Estado de São Paulo variou entre 0 (zero), em regiões ao sul do estado, e 216 mil Mg ha⁻¹ ano⁻¹, em diversas áreas distribuídas na maior parte do estado, e a taxa média de perda de solo o estado é de 30 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ (Figura 4.8). Para o Estado de São Paulo, Lombardi e Bertoni (1975) estabeleceram padrões de tolerância de perda de solo considerando a profundidade e algumas propriedades físicas ao investigarem 75 perfis de solo. Os resultados encontrados variaram de 4,5 a 13,4 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ e 9,6 a 15 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente, para solos com B textural e com B latossólico. Sob aspectos gerais, a tolerância da perda de solo considera que uma perda média de até 12 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ é tolerável para solo profundos, permeáveis e bem drenados, ao passo que perdas médias de 2 a 4 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ são admissíveis em solos com subsolo desfavorável, mais rasos (Bertoni e Lombardi Neto; 2012).

Assim, os resultados da Figura 4.8 foram classificados em duas categorias: 0 a 12 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ e acima de 12 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ (Figura 4.9). Pelo fato do modelo não estima a deposição nas encostas, essas taxas representam valores potenciais de perda de solo, sendo indicativas da intensidade do processo erosivo nas diferentes regiões do estado. Este resultado revela que 44% dos solos paulistas apresentam processos erosivos acentuados e que as perdas de solo se dão além do limite médio de tolerância à perda de solo (12 Mg ha⁻¹ ano⁻¹). Notou-se também altas taxas dos processos erosivos que estão distribuídos em todo o estado, exceto na Região Serrana devido a cobertura vegetal.

Figura 4.7 - Mapa do fator práticas conservacionistas para o Estado de São Paulo (fator P)

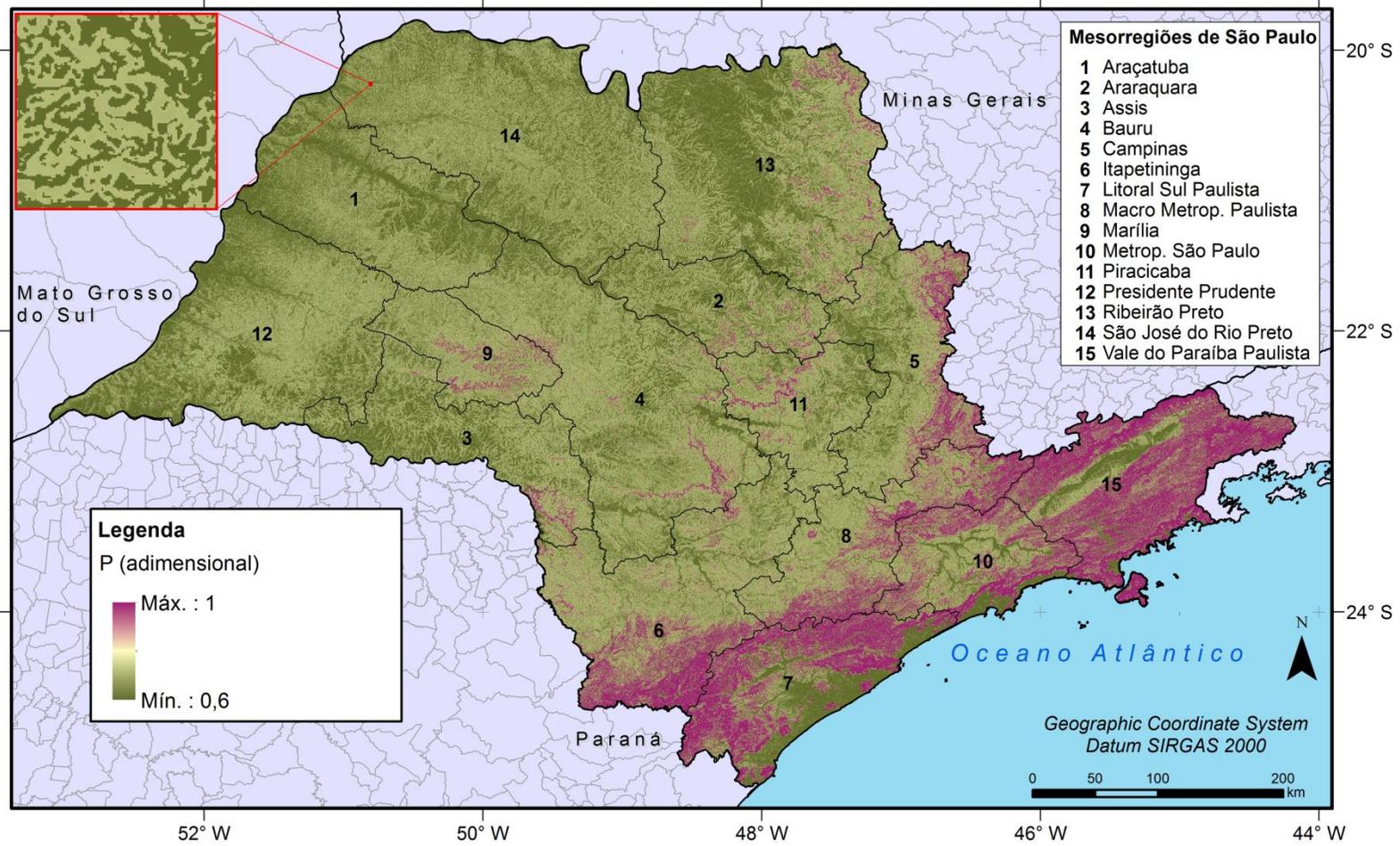


Figura 4.8 - Mapa da estimativa potencial da taxa de perda de solo para o Estado de São Paulo

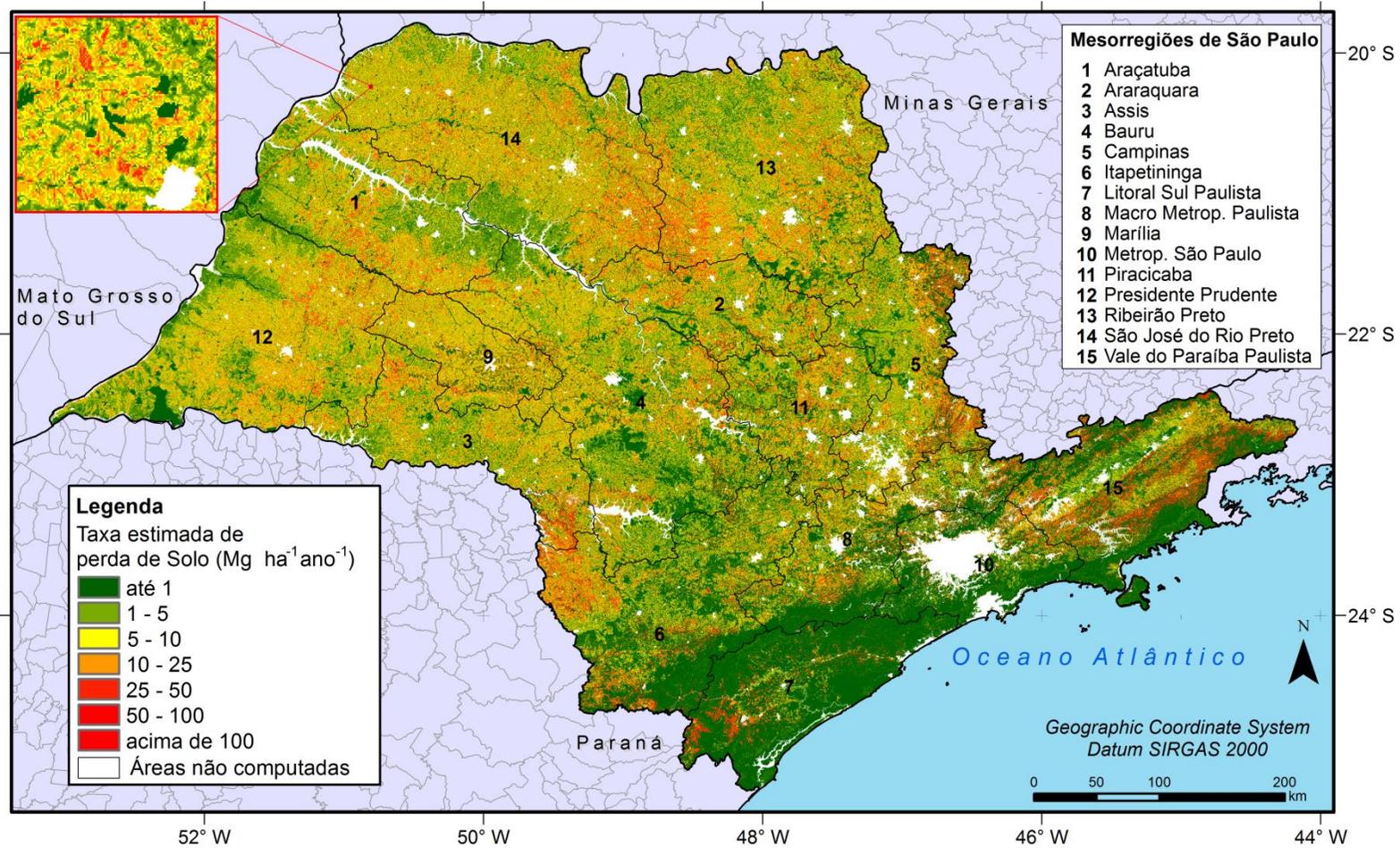
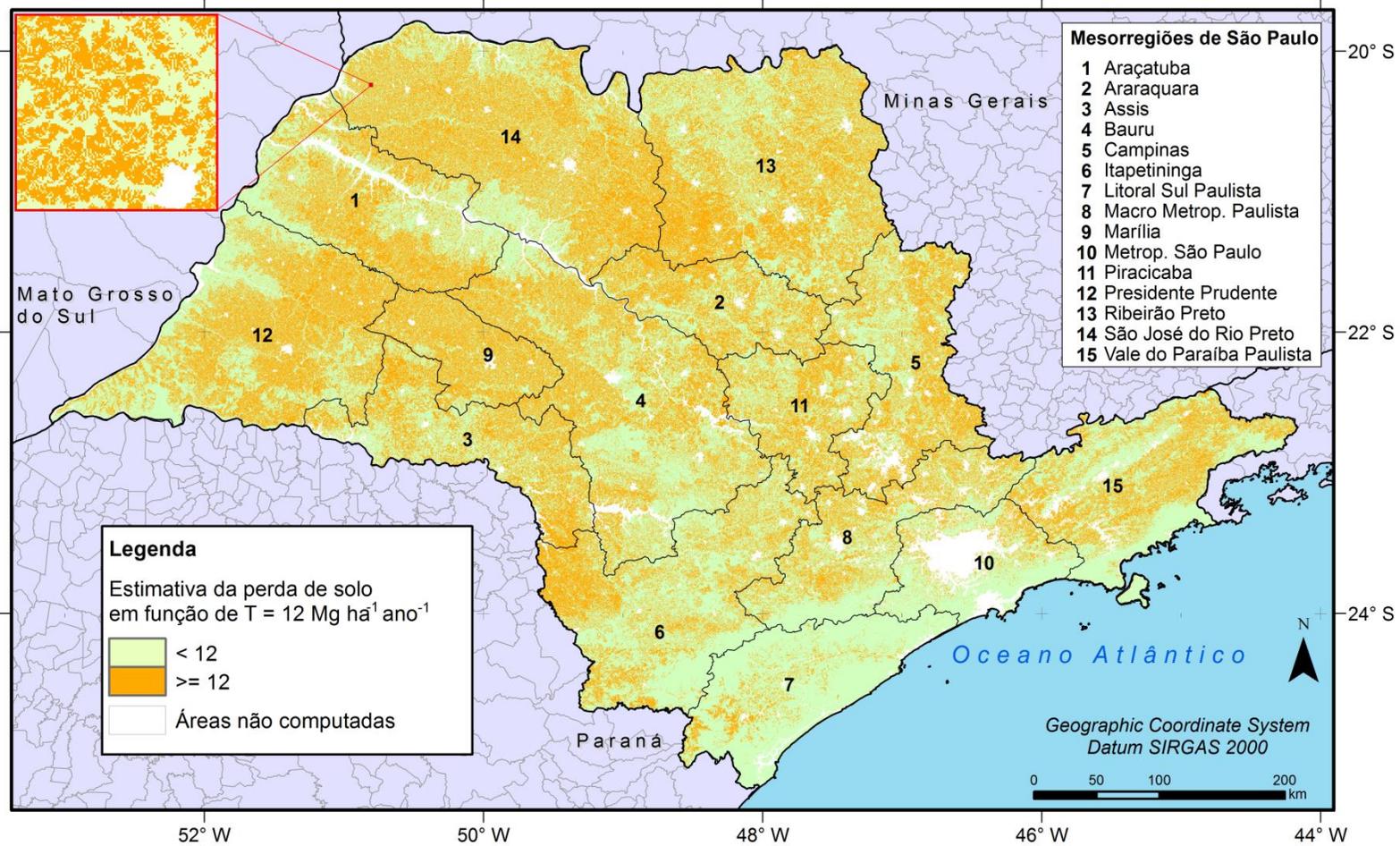


Figura 4.9 - Mapa categórico da estimativa potencial da taxa de perda de solo conforme limiar de 12 Mg ha⁻¹ ano⁻¹



Das áreas que apresentaram maiores estimativas das taxas de perda de solo, acima de 12 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, 30% é utilizada para o plantio de cana-de-açúcar e 67% por pastagem que correspondem a 29 mil km² e 65 mil km², respectivamente. No Quadro 4.2 pode ser visto a quantificação das áreas cuja estimativa potencial da taxa da perda de solo é maior que 12 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ e também que os usos predominante e secundário nessas áreas são pastagem ou cana-de-açúcar para 12 das 15 regiões analisadas. As áreas cujas taxas estimadas de perda de solo se destacaram pela grande intensidade dos processos de perda de solo localizam-se principalmente no norte e nordeste do estado, áreas que correspondem às mesorregiões de Ribeirão Preto, São José do Rio Preto, Assis, Itapetininga e Piracicaba, e nas regiões central e sudoeste, como na mesorregião de Assis e Itapetininga. Estas regiões são historicamente exploradas por atividades agrícolas.

Quadro 4.2 - Quantificação dos usos e coberturas da terra nas áreas onde a taxa estimada de perda de solo é superior a 12 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ para cada mesorregião do Estado de São Paulo

Nome Mesorregião	ID	Área Total km ²	Área onde > 12 Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹		Uso e cobertura da terra onde A > 12 Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹			
			km ²	%	Predominante	Secundário %	%	
São José do Rio Preto	1	29545	14593	41	Pastagem	66	Cana-de-açúcar	29
Ribeirão Preto	2	27569	13036	47	Cana-de-açúcar	60	Pastagem	37
Araçatuba	3	16897	6572	39	Pastagem	62	Cana-de-açúcar	34
Bauru	4	26809	10442	39	Pastagem	70	Cana-de-açúcar	29
Araraquara	5	9483	4454	47	Cana-de-açúcar	47	Pastagem	43
Piracicaba	6	9057	3839	42	Pastagem	60	Cana-de-açúcar	33
Campinas	7	14229	6108	43	Pastagem	74	Cana-de-açúcar	21
Presidente Prudente	8	24292	10488	43	Pastagem	80	Cana-de-açúcar	16
Marília	9	7209	4205	58	Pastagem	89	Cana-de-açúcar	8
Assis	10	12798	5673	44	Pastagem	53	Cana-de-açúcar	46
Itapetininga	11	20224	6063	30	Pastagem	72	Cana-de-açúcar	72
Macro Metrop. Paulista	12	12307	3679	30	Pastagem	92	Cana-de-açúcar	7
Litoral Sul Paulista	13	13223	1229	9	Pastagem	94	Cultura perene	4
Metropolitana de São Paulo	14	9300	1271	14	Pastagem	94	Reflorestamento	4
Vale do Paraíba Paulista	15	16172	5337	33	Pastagem	97	Reflorestamento	1

Com relação às taxas médias de erosão estimadas para cada uso do solo, este estudo mostra que os usos relacionados à agricultura apresentaram as maiores perdas médias de solo, conforme também apontaram os resultados de Weill e Sparovek (2008) e Lino (2010). As culturas anuais, semi-perenes e perenes apresentaram médias estimadas de perda de solo de 118, 78 e 38 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente, muito além da taxa média de tolerância à perda de solos de 12 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ e reforçam a adoção de técnicas de manejo do solo mais eficazes para as áreas onde já existe produção agrícola para o Estado de São Paulo, assim como para as áreas de expansão, caso nenhuma medida de controle da erosão esteja sendo adotada. Políticas podem ser formuladas de modo que a aptidão natural dos solos seja considerada como fator primordial para a exploração desse recurso natural. Como exemplo, pode ser citada a Resolução Estadual da Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo número 88 a qual define as diretrizes técnicas para o licenciamento de empreendimentos do setor sucroalcooleiro no Estado de São Paulo. Este instrumento apoia-se no Zoneamento Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro do estado realizado pelo Instituto Agrônomo, onde as terras paulistas são classificadas em 4 categorias de aptidão para o cultivo da cana-de-açúcar, a saber: i) adequada, ii) adequada com limitações, iii) adequada com restrições e iv) inadequadas. Assim, a partir de 2008, nas áreas classificadas como inadequadas não foram mais aceitos pedidos de licenciamento ambiental para instalação ou ampliação de empreendimentos existentes do setor sucroalcooleiro (São Paulo, 2008).

O fator de aceleração da erosão se relaciona principalmente com a elevada intensidade de uso das terras, com o uso em desacordo com a aptidão agrícola e com o manejo inadequado de solos mais frágeis. Grande parte das áreas cujas taxas de perda de solo estimadas são altas localizam-se nas regiões onde IPT (1995, 1997) e Kertzman et al. (1995) indicaram alta susceptibilidade à erosão para ravinas e voçorocas. Embora o objeto desses estudos não ser erosão hídrica exclusivamente, os indicativos destes autores relacionam-se à susceptibilidade natural do solo a ser erodido. Kertzman et al. (1995) fizeram uma análise integrada da paisagem ponderando o comportamento da água e a ocorrência de processos erosivos (interpretação de fotografias aéreas) em

relação a dados geológicos, geomorfológicos e pedológicos e indicaram que estas áreas são altamente susceptíveis e apresentam condições naturais muito favoráveis ao desenvolvimento da erosão independentemente das formas de uso e ocupação do solo, constatações estas que podem ser extrapoladas para o presente estudo, fato esse que corrobora com a localização das áreas cujas taxas de erosão estimadas por este estudo são altas.

Pesquisas relacionadas à erosão do solo utilizando informações detalhadas em escala regional são escassas. Lino (2010) estimaram taxas de perda de solo para o Estado de São Paulo utilizando a USLE e apontaram variação entre 0 (zero) e 179 Mg ha⁻¹ ano⁻¹. Este autor relatou que em 35% do estado as taxas estimadas de perda de solo variaram de 0 e 9 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, 50% de 9 a 118 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ e 15% acima de 118 Mg ha⁻¹ ano⁻¹. Em comparação, respectivamente para os mesmos intervalos, o presente estudo encontrou 53, 41 e 6%. Estas diferenças podem ser atribuídas às divergências metodológicas como, por exemplo, no cálculo da erosividade onde esse autor utilizou apenas a equação desenvolvida para a região de Campinas para a determinação de R e divergências no fator C adotados para cada classe de uso do solo. Rocha (2013) fez uma análise de perda de solo também utilizando a USLE para todo o território brasileiro. Embora haja também muitas diferenças metodológicas no que diz respeito à obtenção dos fatores do modelo e não ser possível a comparação quantitativa com o presente trabalho, qualitativamente verifica-se concordâncias nas regiões onde as estimativas de taxa de perda de solo são elevadas.

Considerar apenas o limite de tolerância de perda do solo de 12 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ como referência para a exploração do solo, no entanto, é ineficaz frente à diversidade da área de estudo sob aspectos pedológicos, climáticos, entre outros. Por isso, a relação entre a estimativa potencial da taxa de perda, taxa de renovação do solo e tolerância pode ser a diretriz para determinar os estágios de degradação. Em outras palavras, a tolerância à perda de solo deve ser compreendida como um conceito dinâmico no espaço e no tempo, uma vez que pode ser definida em função das taxas de perda e de renovação do solo. Na prática, em pesquisas científicas, a dinâmica da erosão na paisagem condicionada pela variação espaço-temporal em escala regional é limitada pela disponibilidade de dados. No caso deste trabalho, é considerada apenas a

variação espacial da estimativa da perda de solo baseada nos usos de 2005, data do mapa de uso e de ocupação do solo mostrado na Figura A4 do Apêndice A.

O resultado deste trabalho é o diagnóstico do potencial de erosão e de perda de solo nas terras paulistas, que pode alimentar discussões - atualmente urgentes - sobre a adoção de práticas de conservação e políticas de uso do solo fundamentadas no esgotamento do recurso. O Estado de São Paulo apresenta um histórico de atividades agropecuárias que atua como protagonista nos cenários econômicos do país e do mundo e, por estas razões, é uma área estratégica do ponto de vista da segurança alimentar e atendimento das demandas por energia e fibras no futuro. Então, dar prosseguimento à exploração desmedida do solo sem considerar a aptidão dos mesmos, bem como utilizar práticas de conservação e de manejos insuficientes, pode conduzir a humanidade a um estado ainda mais profundo de crise ambiental nas próximas décadas e favorecer a expansão das fronteiras agrícolas para áreas de interesse social, comprometendo políticas de preservação da biodiversidade e abastecimento hídrico, por exemplo.

A aplicação da USLE em escala regional, favorecida pelo manuseio de dados digitais nos SIG's, implica em generalizações como citado especialmente com relação aos fatores C e P. Além disso, é conhecido que a USLE não faz menção à deposição do material erodido nas encostas (ZHANG et al., 1995), mas apenas à estimativa potencial da erosão em entressulcos e sulcos pequenos, deficiência que limita abordagens voltadas para o planejamento e transporte de nutrientes, por exemplo. Outro aspecto importante a ser considerado é que seus resultados se referem às taxas potenciais de perda de solo com base em valores médios de erosividade (R) calculados para uma série grande de dados, não sendo aplicável a um evento em particular de chuva (MERRIT et al., 2003), mas que, porém, indicam satisfatoriamente as áreas mais críticas com relação à necessidade de controle da erosão.

Em termos metodológicos, no que diz respeito às generalizações inerentes da adaptação local-regional, este estudo deve ser compreendido como uma iniciativa para introduzir a Ciência do Solo à uma agenda de discussões globais como apontam Hartemink (2008), Bockheim e Gennadiyev (2010), Camargo et

al. (2010) e Bouma (2014). Em outras palavras, a Ciência do Solo, na sua concepção original, não tem sido amplamente contemplada nas discussões atuais voltadas para as Ciências do Sistema Terrestre e o solo tem sido abordado principalmente em termos de mudanças de uso da terra (*Land Use Cover Change* – LUCC), mas pouco relacionado em termos de recurso natural finito se não manejado corretamente – em escala temporal humana – pode ser esgotado.

4.4 Conclusões

A taxa média de perda de solo estimada para o estado de São Paulo foi de 30 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ e ultrapassa os limites médios de tolerância considerado neste estudo como sendo de 12 Mg ha⁻¹ ano.

Cerca de 59 % da área de estudo, descontadas superfícies hídricas e áreas urbanas, apresentam taxas de perda de solo superiores à 12 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ e os usos predominantes nestas áreas são de cana-de-açúcar, culturas semi-perenes e pastagens. As taxas médias de perda de solo encontradas para as áreas utilizadas para o plantio de culturas anuais, semi-perenes e perenes foi de, respectivamente, 118, 78 e 38 Mg ha⁻¹ ano⁻¹.

O Estado de São Paulo requer atenção quanto à conservação dos seus solos no que diz respeito à aptidão dos solos principalmente para fins agrícolas.

5 DIAGNÓSTICO DA EROÇÃO ACELERADA DO SOLO BASEADO NA METODOLOGIA DO ÍNDICE DO TEMPO DE VIDA DO SOLO (ITVS)

5.1 Introdução

O Estado de São Paulo é o mais populoso e industrializado do Brasil e é caracterizado por uma economia diversificada e expressiva que responde por 28% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional (SÃO PAULO, 2016). Dentre suas diversas atividades, o setor agrícola representado pelos cultivos de cana-de-açúcar, laranja, milho, soja e café, principalmente, teve um significativo alcance de 12% do PIB do estado em 2013 (CEPEA, 2013).

Entretanto, o desenvolvimento econômico baseado na exploração agrícola da terra, ao longo das últimas décadas, vem demonstrando a ocorrência de severas consequências para o planeta (CAMARGO et al., 2010; PUIG DE LA BELLACASA, 2015). Como agravante, projeções de demandas por alimento, fibras e energia indicam que as pressões pelos recursos naturais, sobretudo pelo solo, serão intensificadas além da capacidade de resiliência do planeta e que poderá conduzir a humanidade a uma crise ecológica ainda mais profunda (ROCKSTRÖM et al., 2009; REID et al., 2010). Neste contexto, estima-se que cerca de 1 bilhão ha de terras no mundo já estão degradados e que 70% desse total esteja com suas funções ecossistêmicas severamente comprometidas (LAL, 2003).

Assim, o uso agrícola intensivo dos solos sem os cuidados necessários com o manejo e com a conservação é apontado como sendo a principal causa da erosão acelerada e apresenta-se como um desafio quando leva-se em conta à preservação, o crescimento econômico e o uso sustentável dos ecossistemas (BERTOL et al., 2014; BOUMA, 2014). Além da degradação do solo e da água, os processos erosivos ocasionam sérios prejuízos econômicos e ambientais (MANZATTO et. al, 2002; TELLES, 2010). Dados publicados pela Seção de Conservação do Solo do IAC/APTA na década de 1950 indicaram uma perda atual de 130 milhões de Mg de solo para o Estado de São Paulo (Marques, 1949),

o que representa cerca de 25% da perda de solo de todo o território brasileiro (BERTONI E LOMBARDI NETO, 2012). Rodrigues et al. (no prelo) atualizaram esta informação de perda de solo para esse estado e os autores relatam que a perda anual do estado alcance cerca de 600 milhões Mg ano⁻¹. Ainda, estima-se que em 80% das áreas cultivadas os processos erosivos estão acima dos limites de tolerância (CDA, 2014).

Como agravante aos processos erosivos tem-se que, embora as áreas agrícolas possam apresentar diferentes níveis de degradação, muitas vezes não exibem variação correspondente na produtividade, uma vez que o manejo agrícola consegue compensar aspectos da degradação do solo por erosão, como no caso da reposição de minerais pela adubação (TELLES, 2010), que pode mascarar por algum tempo a diminuição da qualidade do solo. Por esta razão, associar degradação do solo com perda de produtividade nem sempre é possível e se constitui uma tarefa complexa (STOCKING, 2003). Estudos em diversas regiões do mundo tiveram como objetivo atribuir um valor médio de perda da produção de culturas agrícolas associado à erosão (ZHAO et al., 2012; DUAN et al., 2011; TELLES, 2010; BAKKER et al., 2004; WIEBER, 2003; STINE E WEIL, 2002; DE LA ROSA et al., 2000; SCHUMACHER et al., 1999; OYEDELE E AINA, 1998). Bakker et al. (2004), por exemplo, afirmaram que a perda de 0,10 m superficiais do solo em ecossistemas agrícolas representa, em média, 4% de perda na produtividade. No Brasil, por diversas razões, poucas evidências foram encontradas, em especial pela complexidade dos sistemas agrícolas tropicais (SPAROVEK et al., 1993; PUGLIESI et al., 2011), com destaque para Albuquerque et al. (1996) que encontraram, para argissolos localizados em um sítio experimental na região do município de Santa Maria/RS, uma relação direta entre a espessura do horizonte A e a produtividade dos grãos de milho onde, para cada perda de 1 cm da camada superficial, houve um decréscimo de 42,9 Kg ha⁻¹ ano⁻¹.

O conceito de tolerância de perda de solo ou valor T, definida por Wischmeier e Smith (1978) como sendo “... a taxa máxima anual de erosão do solo que pode ocorrer e ainda permitir um alto nível de produtividade das culturas”. Trata-se de um critério qualitativo, estático, definido por tipo (classe) de solo, concebido para interpretar as taxas de perda de solo estimadas pela Equação Universal da

Perda do Solo (USLE, do inglês, *Universal Soil Loss Equation*). Para o estado de São Paulo, Lombardi e Bertoni (1975) investigaram limites para a perda de solo a partir de propriedades físicas, inclusive profundidade para 75 perfis de solo. Os resultados mostraram amplitude de 4,5 a 13,4 Mg ha⁻¹ano⁻¹ e 9,6 a 15 Mg ha⁻¹ano⁻¹ para solos com B textural e com B latossólico, respectivamente. De forma geral, a tolerância da perda de solo considera que uma perda média de até 12,5 Mg ha⁻¹ano⁻¹ é tolerável para solo profundos, permeáveis e bem drenados, ao passo que perdas médias de 2 a 4 Mg ha⁻¹ano⁻¹ são admissíveis em solos com subsolo desfavorável, ou seja, mais rasos (BERTONI E LOMBARDI NETO; 2012). Por isso, o valor médio utilizado frequentemente gira em torno de 12 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ para o estado de São Paulo.

Neste contexto, o *Índice de Tempo de Vida do Solo* - ITVS (WEILL E SPAROVEK, 2008), desenvolvido a partir dos trabalhos de Stamey e Smith (1964), Skidmore (1982) e Sparovek e van Lier (1997) e do conceito operacional de sustentabilidade apresentado por Hansen (1996) e Kruseman et al. (1996), é, por sua vez, um critério operacional desenvolvido a partir do conceito de tolerância de perda de solo e descrito como uma função que varia no tempo.

No âmbito conceitual, o ITVS é uma ferramenta com potencial diagnóstico quantitativo importante frente às abordagens atuais das Ciências Ambientais. Muitos cientistas engajados em prever as necessidades e o futuro da Ciência do Solo acreditam que abordar o solo da forma convencional, focando em estudos com objetivos agrícolas e aumento da capacidade produtiva, não é adequado frente aos problemas que o planeta, sobretudo o solo, apresentam atualmente (MCDONAGH, 2014; PUIG DE LA BELLACASA, 2015). Esta visão voltada para abordagens mais tradicionais não é suficiente porque o contexto ecológico e as necessidades mudaram, ou seja, o planeta tem apresentado oscilações climáticas significativas (PARMESAN et al., 2013) as quais poderão ser agravadas em um futuro próximo pelo aumento da população mundial e pelo esgotamento dos recursos naturais para suprir as demandas por alimento, comida e energia. Considerando este quadro ambiental grave e as previsões pessimistas para o futuro do planeta (BOUMA, 2014), o ITVS pode ser uma ferramenta diagnóstica fundamental para embasar a adoção de medidas de

proteção do solo e controle da erosão para garantir um planeta habitável e com suprimentos à atual e às futuras gerações.

A abordagem original do ITVS remete ao *tempo remanescente*, em anos, para que a situação de impacto permanente previamente definida seja atingida. Esta condição ocorre quando a degradação do solo por erosão conduz à diminuição da sua espessura de modo que atinja uma profundidade considerada crítica. Assim, esta metodologia pode ser compreendida como uma medida espacialmente explícita com potencial diagnóstico do nível de sustentabilidade do solo. Os trabalhos de Weill e Sparovek (2008) e Rocha (2013) são exemplos da aplicação do conceito original do ITVS em escala de bacia hidrográfica e regional, respectivamente, onde foram obtidos resultados aplicáveis ao planejamento do uso e manejo agrícola a curto, médio e longo prazos para os locais estudados.

Neste mesmo contexto, no entanto, caracterizar o solo como desgastado apenas quando o perfil atinge determinada profundidade pode conduzir a interpretações equivocadas. Ou seja, diversas áreas, muito antes de atingirem uma profundidade considerada crítica, podem estar degradadas e serem abandonadas principalmente devido à perda do seu horizonte superficial, porção do solo rica em matéria orgânica. Esta faixa superficial do solo é fonte primária de nutrientes, influencia processos hidrológicos, é sensível às modificações pelo manejo do solo (GREGORICH et al.,1994) e sua ausência está diretamente relacionada à susceptibilidade à erosão.

Nesse sentido, aplicar a metodologia do ITVS para calcular o tempo remanescente para que ocorra a perda da camada superficial do solo é um indicador complementar à abordagem original do ITVS e adequado do ponto de vista do estabelecimento de horizontes de planejamento visando a promoção da conservação dos solos e da sustentabilidade da produtividade agrícola. Esta nova abordagem tem como foco ressaltar as situações mais críticas em que essa camada de solo superficial rica em nutrientes está sendo perdida com muita rapidez, associar os usos e traduzir os resultados em informações capazes de orientar políticas públicas para estimular a conversão para manejos mais

conservacionistas. Por isso, as duas abordagens são complementares e trazem informações distintas a serem aplicadas no planejamento sustentável.

Frente ao que foi exposto, o objetivo deste estudo foi calcular, para o Estado de São Paulo, o ITVS considerando: i) a abordagem original, onde calcula-se o tempo remanescente para que o solo atinja uma profundidade crítica que, neste trabalho, foi considerada como sendo de 1 m e ii) uma abordagem inédita que mostra o tempo remanescente para que a camada superficial de 0,25 m seja perdida por erosão.

5.2 Material e método

5.2.1 Material cartográfico, dados básicos e programas

Dados digitais foram utilizados no Sistema de Informação Geográfica (SIG) *ArcGIS versão 10.1* (ESRI, 2014) para a composição do banco de dados, realização das análises e apresentação dos resultados, tais como: 1) Mapa vetorial do uso e cobertura do solo do ano 2005 elaborado pela Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, na escala de 1:100.000 (Figura A4 do Apêndice A, São Paulo, 2013); 2) Mapa de densidade do solo com resolução de 1 km do INTERNATIONAL SOIL REFERENCE AND INFORMATION CENTER (2014) conforme (Figura A5 do Apêndice A); e, 3) Dados de profundidade do *solum* (horizontes A e B) de 387 unidades de mapeamento descritas por Oliveira (1999b) representando as classes de solo encontradas no Estado de São Paulo (Figura A6 do Apêndice A). Estas informações pontuais relativas à profundidade do solo, foram espacializadas no *software* ArcGIS e interpoladas a partir do método *cokriging* utilizando a altitude como variável secundária e deram origem a um *raster* com grade regular de 30 m.

5.2.2 Metodologia do Índice de Tempo de Vida do Solo (ITVS)

Este estudo considerou as estimativas das taxas de perda de solo ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) para o Estado de São Paulo em média resolução (30 m) obtidas previamente

por Rodrigues et al. (no prelo), Figura 4.8, cujos resultados foram obtidos empregando-se a Equação Universal da Perda de Solo (USLE) (WISCHMEIER E SMITH, 1965, 1978). Em se tratando da aplicação do ITVS, são duas as etapas metodológicas: a primeira, "*Caracterização das situações de planejamento*" tem por objetivo apontar as situações de planejamento com base na relação entre as taxas estimadas de perda e a taxa de renovação do solo; a segunda, "*Índice do Tempo de Vida do Solo*", calcula o ITVS de acordo com a abordagem original empregada em Weill (1999) e Weill e Sparovek (2008) e propõe o cálculo para uma nova abordagem, inédita, que estima o tempo remanescente para que a camada superficial do solo de 25 cm seja removida.

5.2.2.1 Caracterização das situações de planejamento

Inicialmente converteu-se as taxas de perda de solo (A , em $\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) estimadas por Rodrigues et al. (no prelo) em espessura de solo perdido (h , em mm ano^{-1}) empregando-se a densidade do solo (D_s , em Mg m^{-3}), Figura A5 do Apêndice A. Ou seja, a espessura do solo perdido (h) é o quociente entre as taxas de perda de solo (A) e a densidade do solo (D_s).

Em seguida calculou-se a taxa líquida de perda de solo (h_L , em mm ano^{-1}) pela diferença entre a taxa de perda de solo (h , em mm ano^{-1}) e a taxa de renovação do solo (w , em mm ano^{-1}) de $0,2 \text{ mm ano}^{-1}$ (SKIDMORE, 1982).

A partir da relação entre h e w foram identificadas três situações de planejamento:

- i. *Situação de TVS zero* - onde a profundidade do solo é inferior a profundidade crítica;
- ii. *Situação de Conservação do Recurso* – ocorre nos locais onde $r > w$, indicativa de que não está havendo desgaste do solo;
- iii. *Situação de Degradação do Recurso* – ocorre nos locais onde $h > w$, e aponta que o solo está sendo degradado por erosão.

5.2.2.2 Índice do Tempo de Vida do Solo (ITVS)

Para as áreas em *Situação de Degradação de Recursos* foi calculado o ITVS que aponta o tempo remanescente (anos) para que o solo atinja uma profundidade crítica pré-definida ($P_{crítica}$) em função das estimativas das taxas de erosão. A profundidade crítica pode ser interpretada como sendo um limiar que, uma vez atingido, indica a necessidade de controle efetivo da erosão sob pena de degradação irreversível do recurso solo, como continua a ocorrer perdas por erosão e diminuição da profundidade efetiva. Adotou-se neste trabalho a profundidade crítica ($P_{crítica}$) de 1 m e, portanto, os resultados mostraram o tempo remanescente, em anos, para que o solo se degrade até que reste apenas 1 m.

No entanto, é importante ressaltar que se uma área encontra-se em *Situação de Degradação de Recurso* quer dizer que o recurso solo vem sendo explorado além dos limites de tolerância e que práticas de conservação devem ser reforçadas e/ou adotadas.

No cálculo convencional do ITVS, a profundidade do *solum* (A+B) é considerada como 'estoque'. Foram utilizados dados de profundidade do *solum* dos principais perfis de solo representativos das unidades taxonômicas do Estado de São Paulo, conforme descritos em Oliveira (1999a, 1999b), aqui referidos por P_{perfil} (profundidade do *solum*). Desse modo, a profundidade líquida do *solum* ($P_{líquida}$) é a diferença entre P_{perfil} e $P_{crítica}$ (1 m). Assim, para as áreas onde P_{perfil} é inferior a $P_{crítica}$ o ITVS é zero ($ITVS_{zero}$) e já encontram-se em estado de degradação permanente.

Então, se h_L expressa a perda líquida estimada de profundidade do solo por erosão ($mm\ ano^{-1}$), o ITVS convencional é obtido a partir do quociente entre a profundidade líquida do *solum*, $P_{líquida}$, e h_L .

Complementando a abordagem convencional do ITVS, neste trabalho é apresentado um novo enfoque para o ITVS, ou seja, calculou-se o tempo remanescente (anos) para que os 25 cm superficiais do solo fossem totalmente perdidos por erosão. Esta abordagem é importante para estimar o tempo para que a camada do solo mais fértil, rica em matéria orgânica e nutrientes, pode ser perdida se não adotadas medidas para conservação. Tal consideração é válida

porque os solos, muito antes de atingirem a profundidade crítica, já se encontram permanentemente degradados. Porém, deve-se salientar ainda que a variabilidade espacial da profundidade dos solos paulistas foi considerada porque uma perda de 25 cm do horizonte superficial para um determinado solo pode ser muito expressiva, enquanto para outros mais profundos é menos representativa, porém importante porque trata-se do horizonte superficial.

Portanto, o ITVS nesse caso (nova abordagem) é o quociente entre a espessura da camada superficial, L (25 cm), e a taxa líquida de perda do solo, h_L .

5.3 Resultados e Discussão

Os resultados das estimativas das taxas de perda de solo utilizados neste trabalho foram obtidos por Rodrigues et al. (no prelo). Estes autores discorrem sobre as limitações da USLE e generalização de alguns fatores em função da adaptação metodológica para escala regional. Sabe-se que este modelo empírico foi concebido originalmente para estudos de erosão em escala local e não faz menção à deposição de sedimentos, mas sim apenas às estimativas potenciais de perda de solo requeridas pela metodologia do ITVS. Ainda sobre a USLE, os autores encontraram uma taxa média de perda de solo de $30 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e os usos diretamente ligados às altas estimativas de erosão são agrícolas (cultura anual, semi-perene e perene).

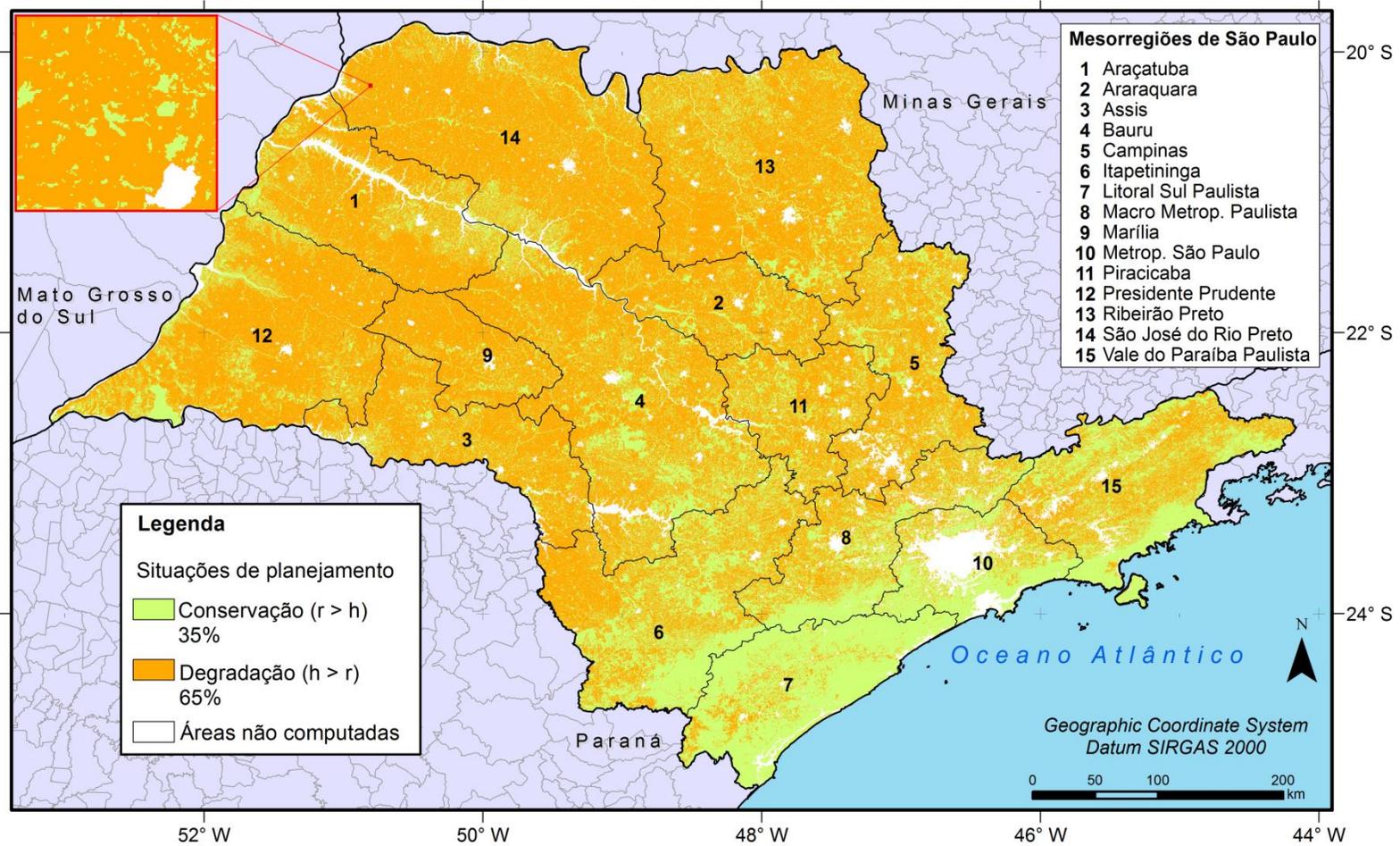
5.3.1 Caracterização das situações de planejamento da área de estudo (h_L)

As situações de planejamento, definidas a partir da relação entre a taxa de perda (h) e da taxa de renovação dos solos (w) são mostradas na Figura 5.1. Apenas 35% da área do estado de São Paulo encontra-se em *estágio de conservação*, ou seja, locais onde a taxa de renovação do solo é maior que a taxa estimada de perda de solo. Nestes locais ocorre, portanto, formação do solo e não degradação por erosão. Estas áreas correspondem a cerca de 84 mil km^2 e os usos e coberturas predominantes são mata e pastagem recobrando 62% e 25%, respectivamente. É contabilizada neste total grande parte dos remanescentes

florestais da Mata Atlântica que recobrem a região serrana do estado. Em se tratando do tipo de solo, predominam nessas áreas de conservação os Latossolos, Argissolos e Cambissolos em 43%, 29% e 18%, respectivamente. Investigando a profundidade do solo nas áreas em estágio de conservação verificou-se que em 17% da área o solo apresenta profundidade de até 1m; em 12% possui profundidade entre 1 e 2 m e em 71% a profundidade é superior a 2 m.

As áreas em *estágio de degradação*, nas quais a taxa de renovação é menor que a taxa estimada de perda de solo, correspondem a 65% do estado de São Paulo, equivalente a aproximadamente 154 mil km² e são caracterizadas pelo predomínio de pastagens e de plantações de cana-de-açúcar. Os tipos de solos dominantes nessas áreas são os Argissolos em 51% da área, e os Latossolos, em 41%. Em relação à profundidade do *solum*, a maior parte apresenta solos profundos, acima de 2 m, totalizando 90%; 5% apresenta solos com profundidade de até 1 m e 5% profundidades entre 1 e 2 m. Estas áreas necessitam urgentemente de atenção uma vez que, se a taxa de renovação de 0,2 mm ano⁻¹ é menor que as taxas de perda de solo calculadas, sabe-se que futuramente haverá esgotamento do solo em termos de quantidade de solo disponível se mantidas as taxas atuais de exploração. O tempo em que este esgotamento vai ocorrer foi definido através do cálculo do ITVS nas duas abordagens a serem apresentadas e discutidas a seguir.

Figura 5.1 - Mapa das situações de planejamento para o estado de São Paulo



Este levantamento das situações de planejamento é um resultado preliminar importante para discussões sobre limites de exploração tanto no âmbito local, visto que a resolução dos dados utilizados permite análises em pequenas regiões (microbacias, por exemplo), quanto em âmbito regional. Em relação às escalas regionais, o objetivo conceitual desta aplicação metodológica consiste em colocar a pedologia, em termos quantitativos, nas discussões sobre mudanças ambientais globais, Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (SDGs, do inglês *Sustainable Development Goals*) (BOUMA, 2014) e de limites planetários (ROCKSTRÖM et al., 2009), visto que existem muitas críticas em relação à não atuação da Ciência do Solo nestas questões (HARTEMINK, 2008; BOCKHEIM E GENNADIYEV, 2010; AMUNDSON et al., 2015).

Neste contexto da exploração do recurso com implicações não somente ambientais, mas sociais e econômicas, diagnosticar que 154 mil km² de terras no estado de São Paulo estão caminhando para um estado de esgotamento é uma situação preocupante. Este diagnóstico indica que em um futuro determinado (ITVS) vastas áreas anteriormente produtivas poderão ser abandonadas se não controladas as taxas de erosão e alterados os sistemas de plantio para técnicas mais sustentáveis.

5.3.2 Índice do Tempo de Vida do Solo para profundidade crítica de 1m

A primeira consideração a ser feita com relação ao ITVS é a respeito da profundidade dos solos. Vale ressaltar que, em se tratando de uma abordagem em escala regional (todo o Estado de São Paulo), representar a profundidade do solo a partir da interpolação de dados obtidos para 387 pontos como foi feito neste trabalho não permite exprimir toda a variabilidade de espessura que os solos apresentam (Figura A6 do Apêndice A), mas isto não compromete totalmente os resultados uma vez que estes dados correspondem às classes mais representativas.

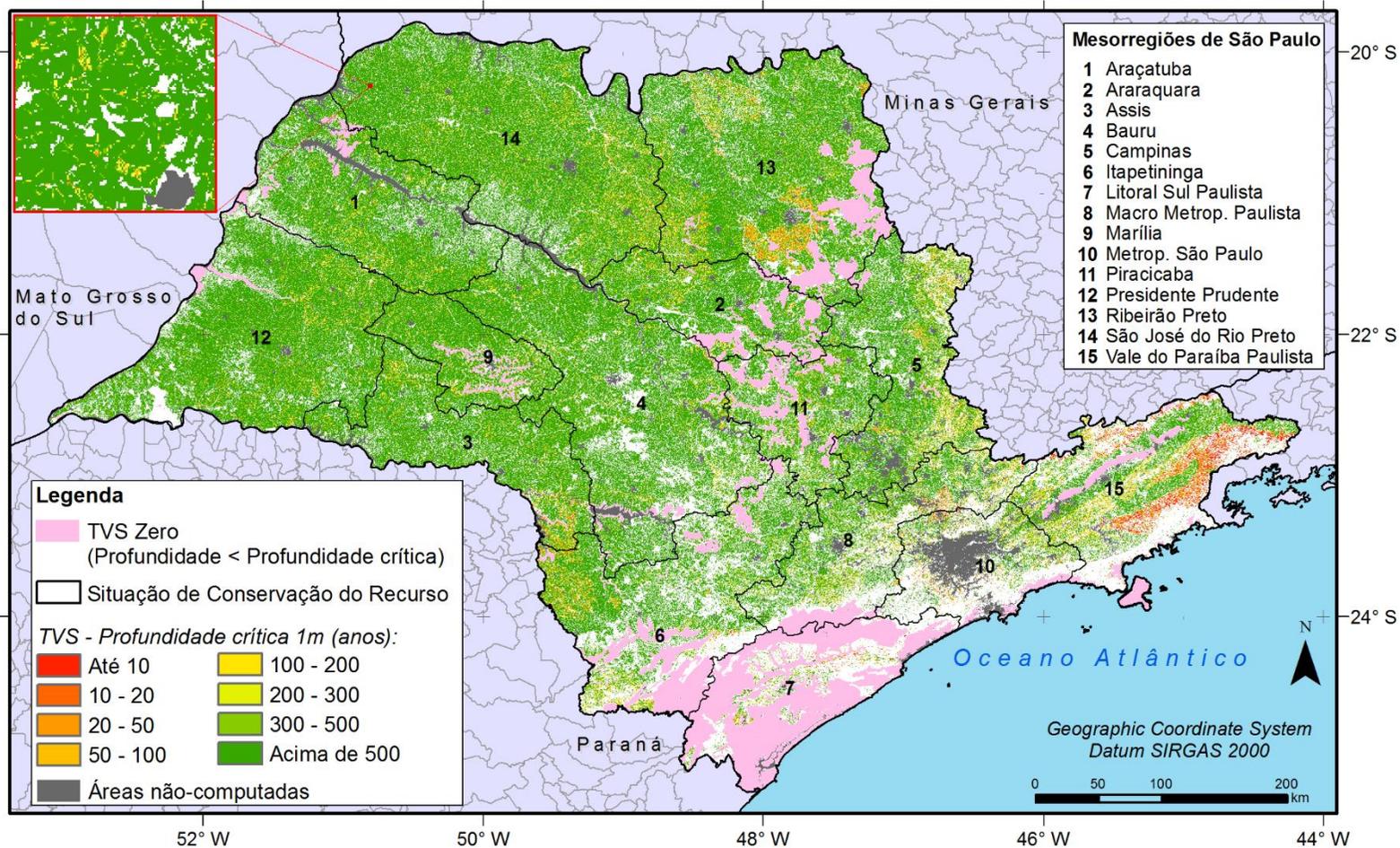
No geral, os solos do estado de São Paulo são profundos. Segundo os dados espacializados de profundidade do *solum* amostrados por Oliveira (1999a, 1999b) e mostrados na Figura A6 do Apêndice A, 10% do estado apresenta

solum com profundidades inferiores a 1 m; 49% possui profundidade entre 1 e 2 m e 41% apresentam de 2 a 4 m de profundidade. Considerando-se uma profundidade crítica de 1 m, o ITVS correspondente é apresentado na Figura 5.2.

As áreas que já apresentam profundidade do *solum* inferior a profundidade crítica (destacadas em rosa), chamadas de ITVS_{zero}, totalizam 9% do estado e ocorrem na mesorregião do Vale do Paraíba Paulista e sul da mesorregião de Itapetininga, na região serrana do estado (onde há o predomínio de Cambissolos e cobertura florestal, porém solos rasos) e no interior do estado, nas mesorregiões de Araraquara e Piracicaba e no sul e sudoeste da mesorregião de Ribeirão Preto, com ocorrência de Neossolos Litólicos Distróficos, Neossolos Quartzênicos Óticos e Óticos Distróficos e Neossolos Litólicos Eutróficos, além do uso dominante de pastagens. A metodologia prevê, nesta situação de planejamento onde o ITVS é zero, que o uso passe a ser de tal forma que a taxa de perda de solo seja reduzida à taxa de renovação do solo, para que nada mais de solo possa ser perdido. Isto é, a recomendação é estancar o uso agrícola e partir para a preservação da área (recomposição da vegetação natural). Neste caso, solos rasos geralmente apresentam forte limitações para fins agrícolas em função do crescimento limitado das raízes das plantas e da baixa capacidade de armazenamento de água e tendem a ter um decréscimo acentuado também na capacidade de infiltração.

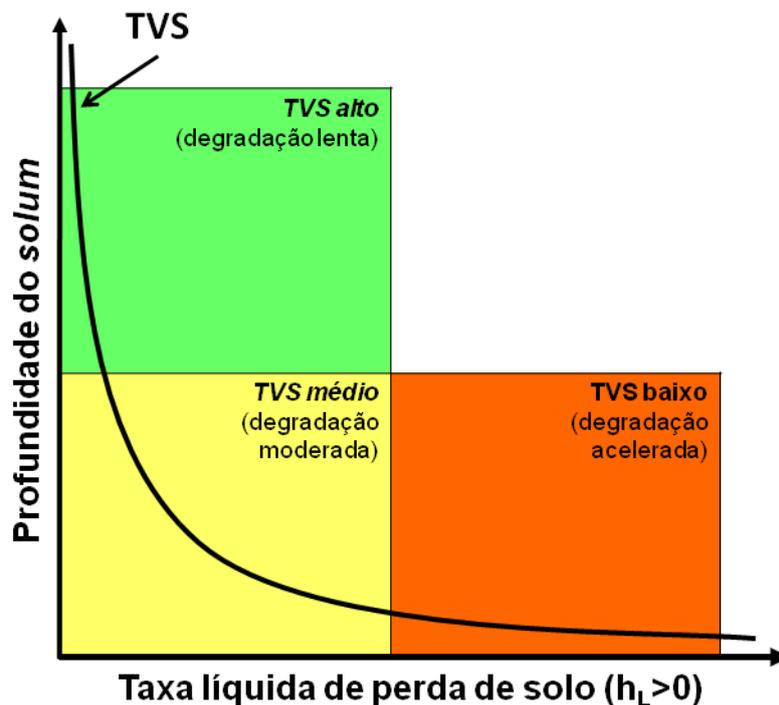
O ITVS considerando a degradação do solo por erosão até atingir a profundidade crítica de 1 m variou de valores muito baixos, próximos a zero, até cerca de 200 mil anos (Figura 5.2). Os pontos mais críticos do estado encontram-se onde os usos agrícolas são consolidados para os quais Rodrigues et al. (no prelo) encontraram estimativas médias de perda de solo para culturas anuais, semi-perenes e perenes de, respectivamente, 118 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, 78,09 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ e 38 Mg ha⁻¹ ano⁻¹. Este é o caso, principalmente, de grande parte da mesorregião de Ribeirão Preto, do leste da mesorregião de São José do Rio Preto, em partes das mesorregiões de Araçatuba e de Presidente Prudente, dentre outras.

Figura 5.2 - Mapa do ITVS para o Estado de São Paulo considerando profundidade crítica de 1 m.



Tais resultados podem ser discutidos conforme modelo conceitual do ITVS, Figura 5.3, que é função da profundidade e da taxa líquida de perda de solo. Para áreas onde os solos são rasos e a taxa líquida de perda de solo é elevada, o ITVS é baixo, ou seja, o tempo remanescente para que o solo se desgaste até atingir a profundidade mínima de 1 m é curto. Estes locais apresentam graves problemas relacionados à degradação do recurso por erosão e são áreas prioritárias para a adoção de medidas que visem diminuir e erradicar os processos erosivos. Por outro lado, áreas onde a perda de solo apresenta níveis mais baixos que, somados a presença de solos profundos, o ITVS é alto e o controle dos processos erosivos é menos urgente que na situação anterior, embora requeiram atenção.

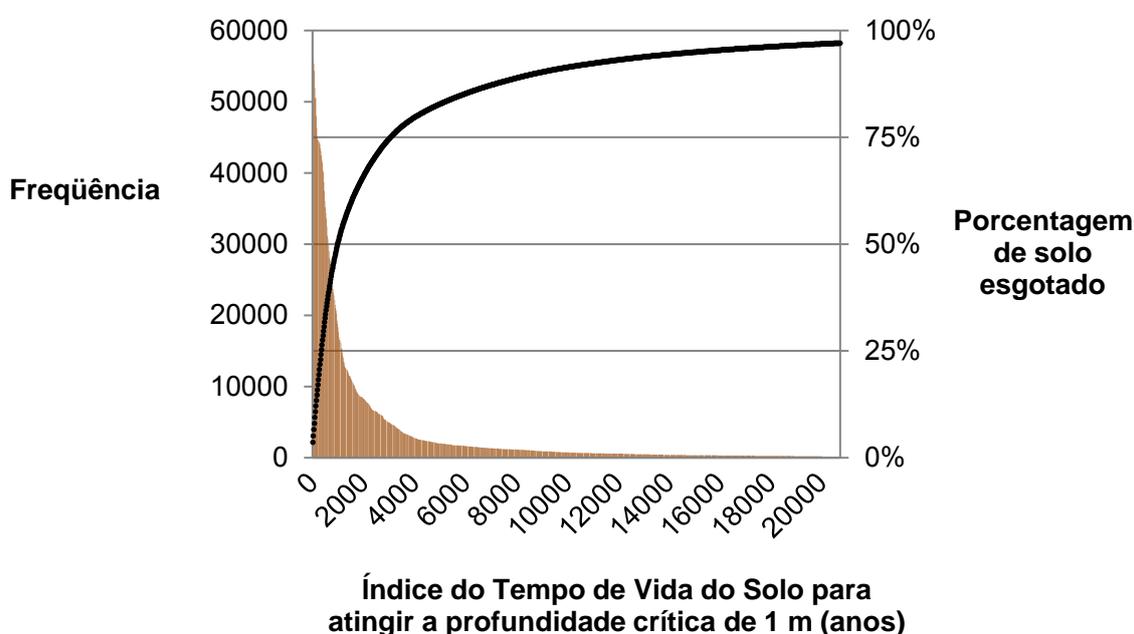
Figura 5.3 - TVS em função da profundidade do solo e da taxa líquida de perda de solo



A Figura 5.4 mostra o gráfico da quantificação do Índice do Tempo de Vida do Solo para o Estado de São Paulo considerando a profundidade crítica de 1 m. Para um tempo curto de 100 anos, verificou-se que 13% das áreas onde a estimativa potencial da taxa de perda de solo é superior à taxa de renovação

atingirão a profundidade crítica. Estas áreas equivalem a quase 20 mil km², aproximadamente, e estão distribuídas por todo o Estado, com destaque para as mesorregiões de Ribeirão Preto e de São José do Rio Preto que, apesar de apresentarem solos profundos, característica de grande parte do estado, as taxas estimadas de perda de solo são elevadas. Ao mesmo tempo, a mesorregião do Vale do Rio Paraíba Paulista apresenta muitas áreas com tempo de vida curto devido, pois no geral são solos rasos.

Figura 5.4 - Histograma do ITVS considerando o tempo remanescente para atingir a profundidade crítica de 1 m



A partir do conhecimento desses resultados duas considerações são pertinentes. A primeira aponta para a necessidade de atenção para os solos paulistas frente à gravidade dos problemas de erosão. A segunda é que, embora determinar o Índice do Tempo de Vida do Solo para que o perfil do *solum* atinja uma profundidade crítica de 1 m seja uma abordagem diagnóstica importante para representar a atual situação dos solos, esta pode mascarar a gravidade dos problemas relacionados à conservação do solo. Isto é, para muitas áreas, como já mencionado, mesmo antes de atingir uma profundidade crítica, já se

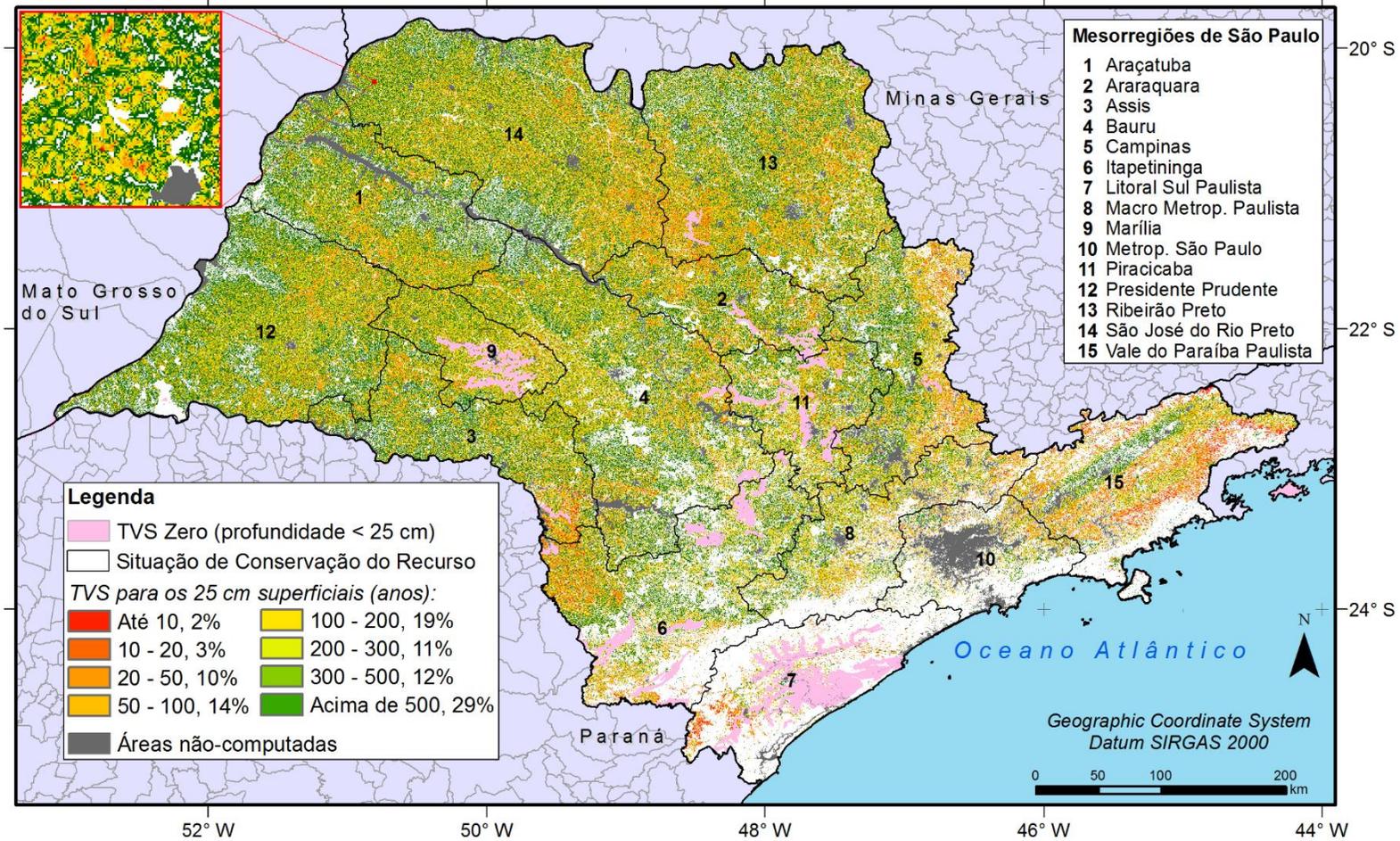
encontram em estágio sérios de degradação com perda parcial ou total das suas funções ecossistêmicas. Então, apesar de importante para estudos sobre uso sustentável dos solos, esta abordagem é uma medida limitada e requer atenção na sua interpretação. Assim, de forma complementar, considera-se a abordagem do Índice do Tempo de Vida do Solo para que a camada de 25 cm superficial do solo seja perdida cujos resultados são descritos a seguir.

5.3.3 Índice do Tempo de Vida do Solo – 25 cm superficiais

É apresentado na Figura 5.5 o Índice do Tempo de Vida do Solo para a perda dos 25 cm superficiais do solo. Nota-se que a situação dos solos paulistas torna-se ainda mais preocupante do ponto de vista da conservação do solo, uma vez que esta abordagem evidencia que o tempo de vida para a remoção da camada mais fértil do solo é baixo para a grande parte do estado. Os resultados apontam, por exemplo, que em 100 anos cerca de 40 mil km² terão a camada mais fértil do solo removida e que em 200 anos esta área praticamente dobra. A Figura 5.6 quantifica este diagnóstico e mostra que em 70% das áreas onde a taxa estimada de perda de solo é superior à taxa de renovação estarão sem a camada mais fértil em apenas 500 anos.

As implicações desta nova abordagem são inúmeras pois a remoção da camada superficial do solo sugere limitação da capacidade de fornecer nutrientes para a produção vegetal e pode influenciar na diminuição da produtividade agrícola afetando o abastecimento alimentar e tornando dispendiosa a reposição de nutrientes e minerais nas áreas cujos processos de degradação do solo por erosão são graves.

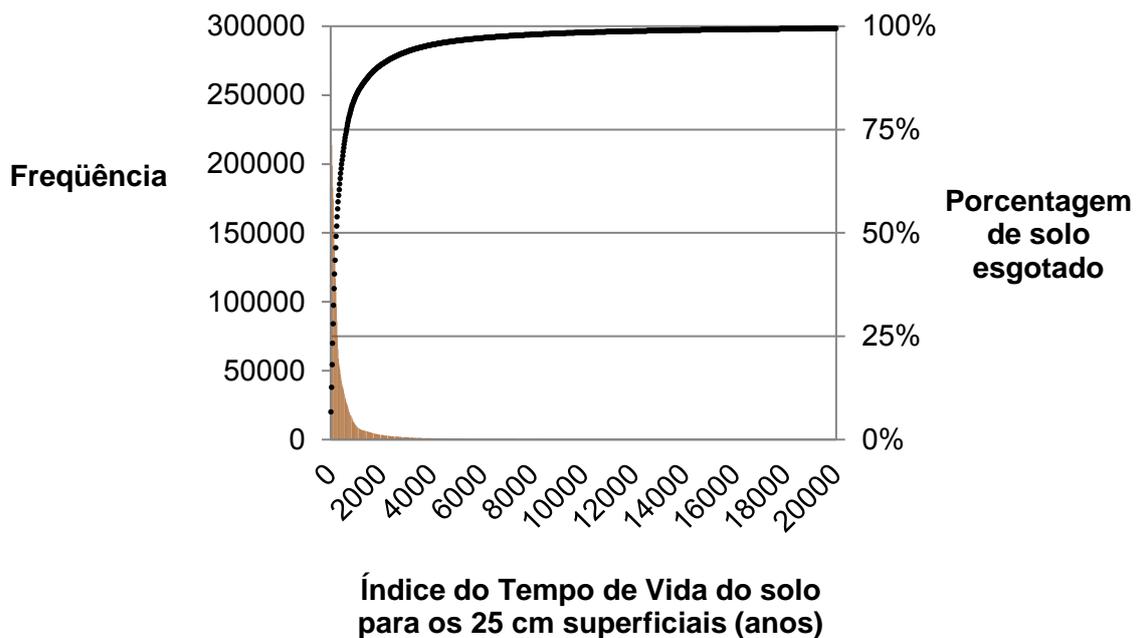
Figura 5.5 - Mapa do Tempo de Vida do Solo para os 25 cm superficiais de solo do Estado de São Paulo



Estes resultados implicam em uma visão diagnóstica quantitativa da exploração dos solos paulistas com o intuito de alertar o poder público e a iniciativa privada voltada para o uso agrícola do solo sobre a aplicação urgente de práticas conservacionistas nas áreas indicadas pelo ITVS. No caso de não haver compromisso sob estes aspectos da conservação e recuperação do solo, cada vez mais áreas serão abandonadas e novas fronteiras agrícolas serão utilizadas além dos seus limites de tolerância corroborando, assim, ao esgotamento dos solos sem medidas capazes de reverter o processo em um futuro não muito distante.

O ITVS pode ser considerado uma tentativa importante de uma abordagem conjunta de várias disciplinas para fundamentar a real necessidade de se repensar a exploração do solo, sobretudo no que se refere às práticas agrícola. Assim, a aplicação do ITVS, além de ser um a medida de degradação do solo por erosão, constitui-se também de uma ferramenta eficaz para alertar às pressões antrópicas que o recurso vem sofrendo.

Figura 5.6 - Histograma do Tempo de Vida do Solo para a perda dos 25 cm superficiais do *solum*



5.4 Conclusões

As situações de planejamento permitiram destacar que 65% do estado de São Paulo encontram-se em estágio de degradação e necessitam intervenção para diminuir as taxas de perda de solo. Estas intervenções estão relacionadas à utilização das terras de acordo com a aptidão, adoção de sistemas de manejo sustentáveis e substituição de usos agrícolas por vegetação natural. Neste contexto, destacam-se principalmente as mesorregiões de Ribeirão Preto, Bauru, Assis, Itapetininga e Araraquara.

Considerando a abordagem original do tempo de vida e sabendo-se que o estado apresenta área de 248.209 Km², para um ITVS igual a 100 anos, 20 mil km² estarão em estágio de degradação permanente.

Com relação ao ITVS para a perda da camada superficial de 25 cm a situação é mais crítica, já que em 100 anos cerca de 40 mil km² terão a camada superficial removida e que em 200 anos esta área praticamente irá dobrar.

6 APTIDÃO CLIMÁTICA DA CANA-DE-AÇÚCAR SOBRE PROJEÇÕES CLIMÁTICAS NO ESTADO DE SÃO PAULO

6.1 Introdução

A cana-de-açúcar é uma cultura altamente sensível às variações climáticas (ZHAO e Li, 2015; MARIN et al., 2013; MARIN e CARVALHO, 2012) e o grau de impacto para esta cultura a eventos extremos depende da localização geográfica e da capacidade de adaptação da cultura (ZHAO e LI, 2015).

De modo geral, as projeções climáticas apontam aumento da produtividade da cultura (SANTOS e SENTELHAS, 2014; SINGELS et al., 2014; MARIN et al., 2013; MARIN et al., 2011) e estima-se, inclusive, que a área cultivada poderá dobrar nas próximas décadas (ASSAD et al., 2008). Este panorama favorável para a produtividade pode ser tanto pela resposta direta da fotossíntese à elevação na concentração do dióxido de carbono quanto pelo aumento da eficiência de uso da água (MARIN e NASSIF, 2013).

Neste contexto, procurar compreender o comportamento de culturas agrícolas em cenários de alterações no clima e, além disso, poder indicar formas de adaptação e de gestão com o objetivo de garantir a produtividade e a sustentabilidade do ambiente é uma necessidade iminente para a comunidade científica atualmente, principalmente no que diz respeito ao desenvolvimento de cultivares capazes de resistir às novas condições climáticas, de forma geral.

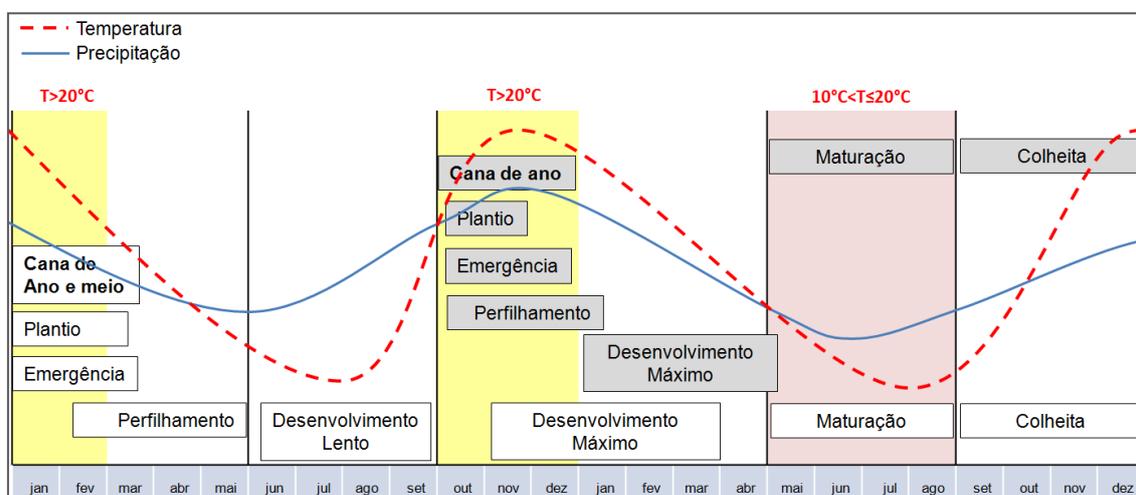
Assim, os objetivos deste estudo foram: i) o de verificar, para o Estado de São Paulo o potencial de dois dos modelos do CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*), HadGEM2-ES e MIROC5, em representar o padrão da precipitação e da temperatura; ii) o de analisar as projeções climáticas considerando os cenários RCP 4.5 e 8.5 para o ano de 2050 (2041-2060) e verificar as implicações da variação da temperatura e da precipitação na localização das áreas aptas para o cultivo da cana-de-açúcar considerando a fenologia dessa cultura no futuro.

6.2 Necessidades climáticas da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar requer um período quente e úmido, com alta radiação solar durante a fase de brotamento e crescimento, seguido por um período seco, ensolarado e mais frio durante as fases de maturação e colheita como mostra a Figura 6.1 (CASTRO, 1999).

Embora Marin e Carvalho (2012) afirmem que os fatores climáticos explicam cerca de 43% da variabilidade da eficiência produtiva da cana-de-açúcar no estado de São Paulo e que os principais são a radiação solar, a deficiência hídrica, a temperatura mínima e máxima do ar e a precipitação, este estudo optou por avaliar as variáveis temperatura do ar e precipitação em decorrência da disponibilidade de dados para o período 1950-2000 e simulados para 2050 (2041-2060).

Figura 6.1 - Ciclos de Cana-de-açúcar e variações na temperatura e pluviosidade na Região Centro-sul do Brasil.



6.2.1 Temperatura do ar

Os estudos sobre o zoneamento da aptidão climática da cana-de-açúcar, no entanto, divergem quanto às necessidades climáticas da cultura ao longo do ciclo da planta: Manzatto et al. (2009) consideram que a temperatura média anual

deve ser superior a 19°C para que a planta se desenvolva adequadamente (estudo desenvolvido par ao Brasil); SÃO PAULO (2008) consideraram para o Zoneamento de Culturas Bioenergéticas do Estado de São Paulo que temperaturas médias anuais entre 20 e 21°C são marginais e superiores a 21°C são ótimas para a cultura.

Este trabalho considerou que a temperatura média necessária para o desenvolvimento da cana-de-açúcar em suas fases iniciais (brotamento e crescimento inicial) é de 20°C para os meses referentes ao período outubro a dezembro (plantio da cana de ano) e janeiro e fevereiro (cana de ano e meio).

6.2.2 Precipitação

Com relação à precipitação, a água é o principal fator limitante para a produção de cana-de-açúcar e a sua baixa disponibilidade afeta negativamente o crescimento dos cultivos agrícolas (INMAN-BAMBER e SMITH, 2005). Normalmente esta variável climática é considerada em termos de deficiência hídrica, a qual indica a quantidade de água do solo disponível para o desenvolvimento da planta e que varia de acordo com cada espécie.

Alguns estudos consideram que a necessidade hídrica da cana-de-açúcar varia de 1.500 a 2.500 mm e deve ser distribuída uniformemente durante o período de desenvolvimento vegetativo (DOORENBOS e KASSAM, 1979), entretanto pesquisas recentes afirmam que a cultura pode atingir o potencial máximo com uma oferta hídrica em torno de 1.200 a 1.300 mm (EMBRAPA, 2015). Sendo assim, este estudo considerou que as áreas aptas para o desenvolvimento da cana-de-açúcar, em se tratando de exigências hídricas, são aquelas que apresentam precipitação média anual entre 1200 e 2500 mm.

6.3 Projeções climáticas

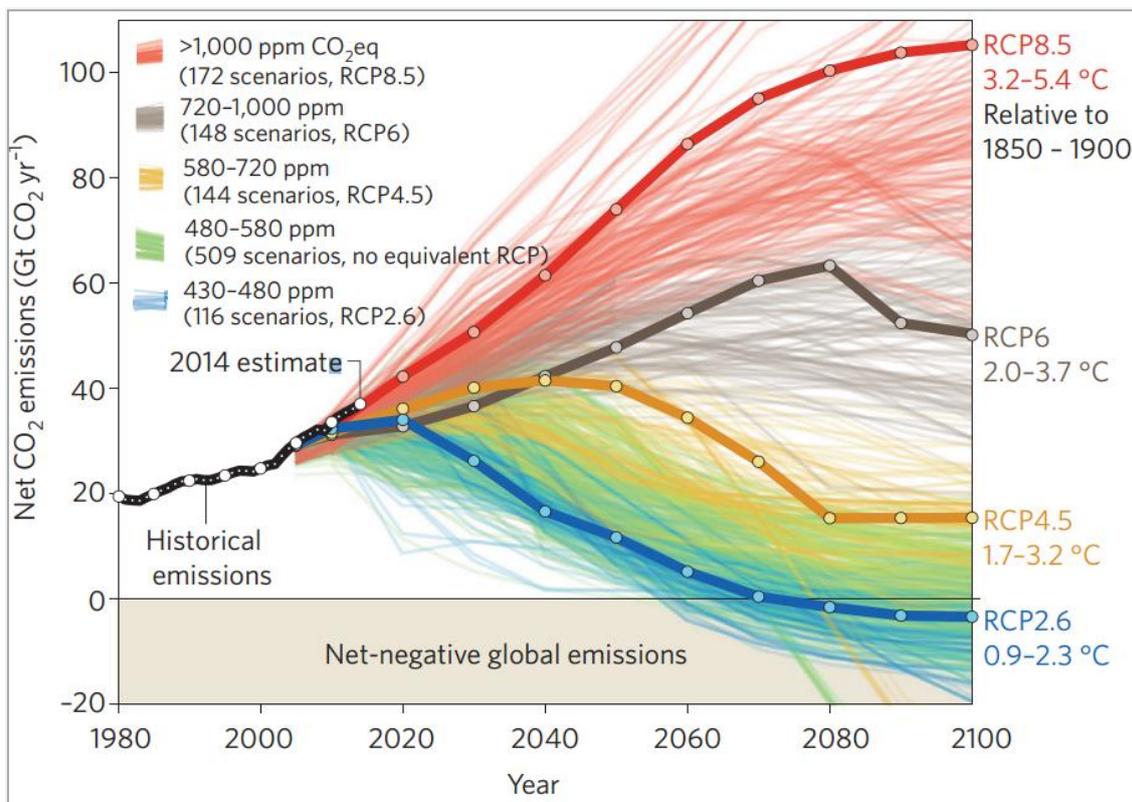
O quinto relatório (AR5, do inglês *Fifth Assessment Report*) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, do inglês

Intergovernment Panel of Climate Change) reúne os resultados das simulações provenientes de um conjunto de 23 modelos de circulação global (GCMs) denominado *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5). Este relatório considera nesta quinta versão mudanças climáticas baseadas em projeções de concentrações dos gases de efeito estufa (GEE) e suas forçantes radiativas no clima, chamados de *Representative Concentration Pathway* (RCPs) (IPCC, 2013). Segundo este relatório, as projeções climáticas indicaram aumento na temperatura média global de 0,3°C a 1,7°C no período 2010-2100 para o cenário mais otimista (RCP 2.6) e aumento de 2,6°C a 4,8 °C no cenário mais pessimista (RCP 8.5) como mostra a Figura 6.2. Para os cenários intermediários, RCP 4.5 e 6, são previstos aumentos médios de temperatura global entre 1,7°C e 3,2°C e 2,0°C e 3,7°C, respectivamente (FUSS et al., 2014).

Dentre os modelos pertencentes ao CMIP5, são empregados usualmente para estudos na América do Sul os modelos *Hadley Centre Global Environment Model, version 2-Earth System* (HadGEM2-ES) (MOURÃO et al., 2015; SANTOS, 2015; CHOU et al., 2014) e o *Model for Interdisciplinary Research on Climate, version 5* (MIROC5) (CHOU et al., 2014) uma vez que representam satisfatoriamente os padrões climáticos da América do Sul.

O HadGEM2-ES é um modelo físico desenvolvido no *Hadley Centre* localizado no Reino Unido e fornece resultado com resolução de 1,3 ° x 1,9 °. A família de modelos HadGEM2-ES inclui componentes da atmosfera, oceano e gelo e a versão *Earth System* (ES) inclui ainda componentes do ciclo do carbono terrestre e oceânico, bem como química atmosférica (COLLINS et al., 2011; MARTIN et al., 2006).

Figura 6.2 - Emissões históricas de combustíveis fósseis e na era industrial (preto) comparadas com as projeções do relatório 5 do IPCC (paleta colorida)



Fonte: Fuss et al. (2014)

O modelo MIROC-5, desenvolvido em colaboração entre o Centro para Pesquisas em Mudanças Climáticas (CCSR, do inglês *Center for Climate System Research*); Instituto Nacional para Estudos Ambientais (NIES, do inglês *National Institute for Environmental Studies*) e Centro de Fronteiras em Pesquisa para Mudanças Climáticas (do inglês *Frontier Research Center for Global Change*) tem sido bem avaliado para simulações na América do Sul como aponta Santos (2015).

6.4 Material e Método

6.4.1 Material cartográfico, dados básicos e programas

Este estudo foi desenvolvido utilizando o Sistema de Informação Geográfica (SIG) ArcGIS (ESRI, 2014) versão 10.1. Os dados utilizados, originalmente no

formato NetCDF (".nc"), foram convertidos em GeoTIFF (".tiff") e manipulados utilizando ferramentas de geoprocessamento específicas presentes no ArcGIS.

Os dados utilizados neste trabalho foram:

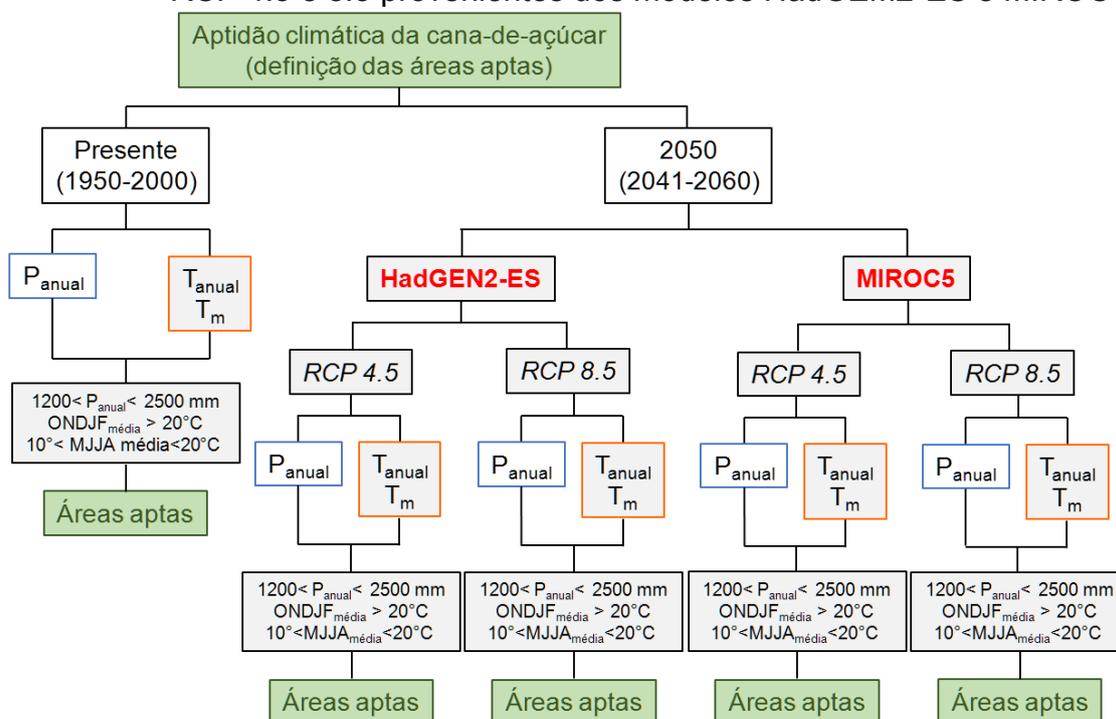
- Dados observados de precipitação (mm) e temperatura do ar (°C) (médias anuais e médias mensais) com resolução espacial de 0,5° (~54 km), em formato NetCDF (".nc") (MOSS et al., 2010);
- Dados observados de precipitação (mm) e temperatura do ar (°C) (médias anuais e médias mensais) com resolução espacial de 0,0083° (~1 km), resultantes de interpolação utilizando dados topográficos da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) como variável secundária (Hijmans et al. (2005) obtidos via banco de dados da *World Clim Organization* (<http://www.worldclim.org/current>) em formato NetCDF (".nc");
- Dados simulados de precipitação (mm) e temperatura do ar (°C) (médias anuais e médias mensais) com resolução espacial de 0,5° (~54 km) dos modelos do CMIP5, HadGEM2-ES e MIROC5 em formato NetCDF (".nc");
- Dados simulados de precipitação (mm) e temperatura do ar (°C) (médias anuais e médias mensais) com resolução espacial de 0,0083° (~1 km), resultantes de interpolação utilizando dados topográficos SRTM como variável secundária (Hijmans et al. (2005) obtidos do banco de dados da *World Clim Organization* em formato NetCDF (".nc").

6.4.2 Método

Este estudo foi dividido em 3 partes (Figura 6.3). A primeira refere-se à comparação entre os resultados das simulações, considerando as projeções climáticas RCP 4.5 e 8.5, provenientes dos modelos HadGEM2-ES e MIROC-5 juntamente com os dados observados referentes ao período climatológico de 1950-2000. O objetivo desta etapa foi o de analisar a representação do padrão climático do Estado de São Paulo por parte de cada modelo no que diz respeito aos regimes de precipitação e temperatura do ar. Para esta fase foram utilizados dados com resolução espacial de 0,5°.

A segunda etapa consistiu em analisar os cenários climáticos para o ano de 2050 (2041-2060) com o objetivo de comparar as simulações obtidas a partir dos modelos HadGEM2-ES e MIROC-5 para as projeções climáticas RCP 4.5 e 8.5 e de obter os incrementos de precipitação e temperatura de modo a fomentar análise a respeito da aptidão cana-de-açúcar no Estado de São Paulo em cenários de mudanças climáticas. Esta fase fez uso dos dados de precipitação e temperatura obtidos via *World Clim Organization*, os quais possuem resolução espacial de 0,0083°.

Figura 6.3 - Fluxograma metodológico para a determinação das áreas aptas para o plantio da cana-de-açúcar considerando as projeções climáticas RCP 4.5 e 8.5 provenientes dos modelos HadGEM2-ES e MIROC-5



A terceira fase buscou determinar as áreas aptas para o desenvolvimento da cana-de-açúcar a partir de dados resultantes das simulações dos modelos HadGEM2-ES e MIROC-5, considerando as projeções climáticas RCP 4.5 e 8.5.

Inicialmente foram delimitadas as zonas aptas para o desenvolvimento da cana-de-açúcar de acordo com as condições climáticas do período histórico de 1950-2000. No caso da precipitação, o critério utilizado consistiu em apontar as regiões

cuja precipitação média anual estaria entre 1200 e 2500 mm ($1200 < P < 2500$ mm), limiares referidos anteriormente (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, 2016; MARIN et al., 2016). Em relação à temperatura do ar, o estudo diferenciou as fases de desenvolvimento da cultura, ou seja, procurou apontar as necessidades térmicas da planta nas fases de brotamento, crescimento inicial e maturação, as quais apresentam exigências térmicas diferenciadas para o crescimento e desenvolvimento da planta. Assim, para o período de brotamento e crescimento inicial, identificou-se as regiões nas quais a média dos meses outubro, novembro, dezembro, janeiro e fevereiro foi superior a 20°C ($\text{ONDJF}_{\text{média}} > 20^{\circ}\text{C}$) e para o período de maturação foram identificadas as áreas nas quais a temperatura média dos meses maio, junho, julho e agosto encontra-se no intervalo compreendido entre 10 e 20°C ($10^{\circ} < \text{MJJA}_{\text{média}} < 20^{\circ}\text{C}$).

Assim, ao término foram verificadas as influências das mudanças climáticas na delimitação das zonas aptas para o desenvolvimento da cana-de-açúcar e discutidas estas áreas sob o aspecto das mudanças climáticas previstas para o ano de 2050 (2041-2060).

6.5 Resultados e discussões

6.5.1 Dados observados e simulados para o período 1950 – 2000

De forma geral, devido ao seu relevo acidentado, localização geográfica e diferentes influências de massas de ar, o estado de São Paulo apresenta grande diversidade climática como apontam os estudos de ROLIM et al. (2007) e ALVARES et al. (2013).

São apresentadas nas Figuras 6.4 e 6.5 as médias climatológicas observadas de temperatura e precipitação, respectivamente, para o período 1950 – 2000, no Estado de São Paulo. Com relação à temperatura do ar, verifica-se, de maneira geral, que a temperatura diminui nos meses de abril, maio, junho e julho e agosto para todo o estado. Porém, para as regiões norte e nordeste do estado esta diminuição é menos acentuada. Assim nota-se que o estado apresenta duas regiões distintas no que diz respeito à temperatura do ar, uma caracterizada por temperaturas mais altas localizada na região central, norte e nordeste, áreas

inclusive onde há predomínio do cultivo de cana-de-açúcar e a segunda corresponde à faixa litorânea onde se encontram os domínios da Serra do Mar, Paranabiaca, Itatins e os morros do Vale do Ribeira, caracterizada por temperaturas mais baixas em todos os meses do ano.

Com relação à precipitação média mensal no período 1950-2000 (Figura 6.5) observa-se estações úmidas e secas bem definidas na maior parte do estado, com exceção às encostas da Serra do Mar onde o período seco é breve. Os índices pluviométricos máximos ocorrem nos meses de dezembro e janeiro nas regiões norte, central e leste do estado. É importante notar os totais pluviométricos nos meses de abril a setembro, os quais correspondem à maturação da cana-de-açúcar, onde a cultura requer baixas temperatura e pouca umidade no solo.

Figura 6.4 - Temperatura média mensal para o período de 1950 – 2000 (dados observados)

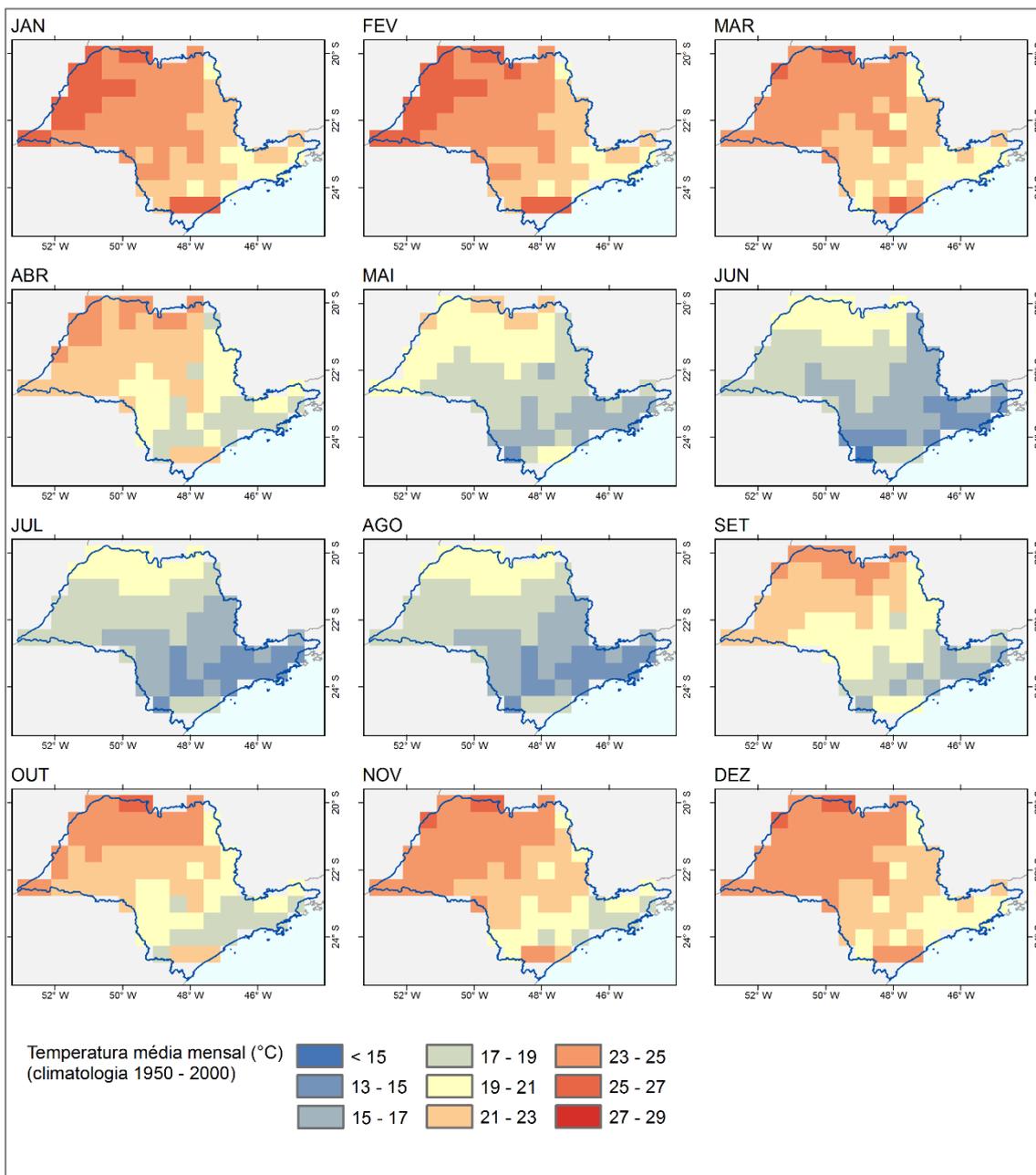
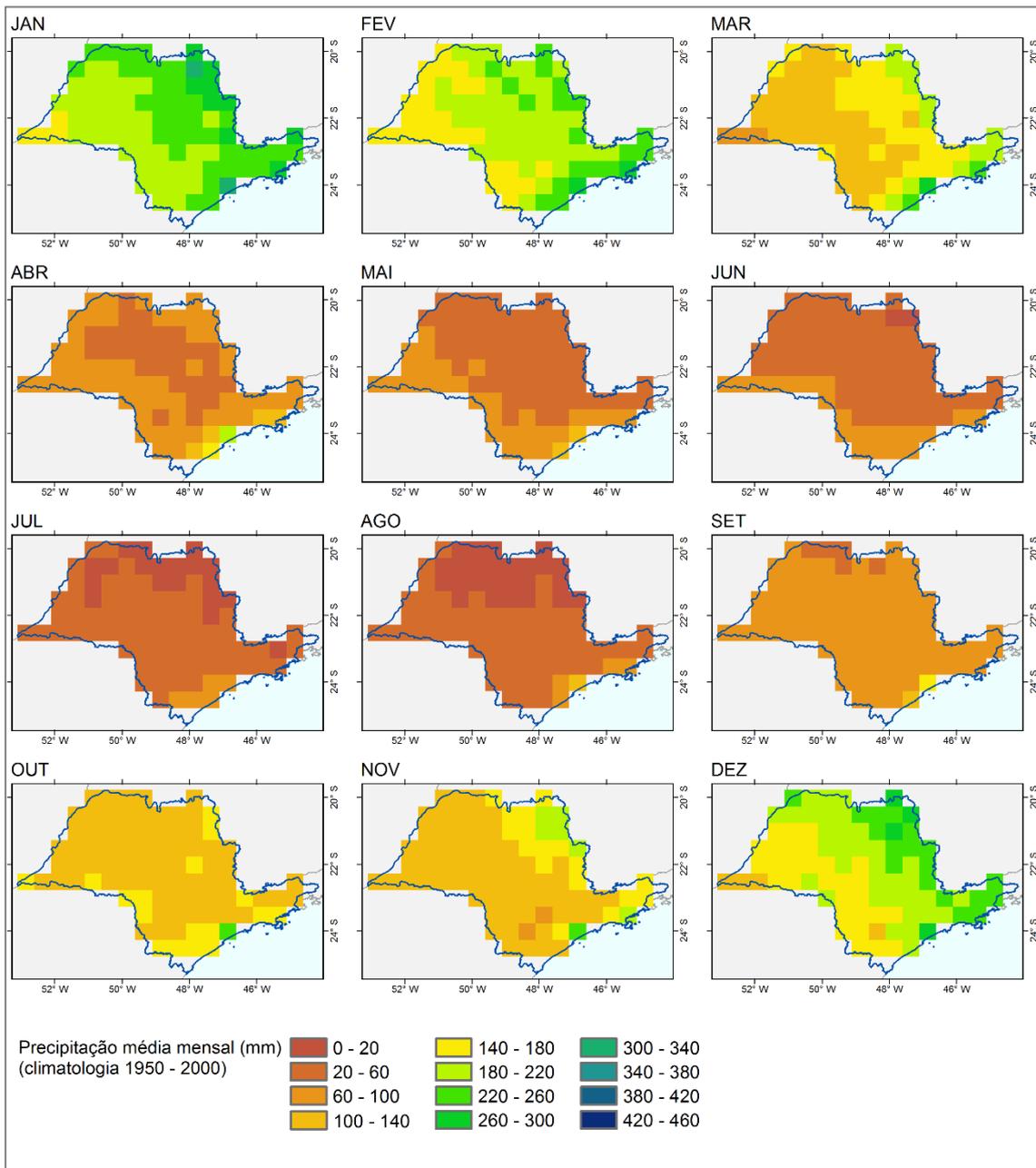


Figura 6.5 - Precipitação média mensal para o período de 1950 – 2000 (dados observados)



6.5.2 Avaliação das projeções climáticas dos modelos HadGEM2-ES e MIROC5 para o Estado de São Paulo

6.5.2.1 Temperatura do ar

A Figura 6.6 apresenta a comparação dos resultados de temperatura média simulados pelos dois modelos com os dados observados (Figura 6.4) que revelam que, para todo o período, o modelo MIROC-5 superestima a temperatura média do Estado. A média desta diferença é de, aproximadamente, 2,1 °C. Por outro lado, o modelo HadGEM2-ES subestima a temperatura para todos os meses quando comparado aos dados observados. No entanto, a diferença média entre os resultados desta simulação e os dados observados é 1,2 °C, inferior à obtida pelo modelo MIROC-5. Portanto, em termos gerais, a temperatura resultante da simulação do modelo HadGEM2-ES representa melhor o padrão térmico do Estado de São Paulo.

As anomalias sazonais da temperatura dos modelos HadGEM2-ES e MIROC-5 são apresentadas nas Figuras 6.7 e 6.8, respectivamente. O modelo HadGEM2-ES subestima a temperatura no estado de modo geral, porém, a anomalia indica que as subestimativas ocorrem principalmente nas regiões central, norte, oeste e extremo sul do Estado de São Paulo. Para estas regiões, o período que apresentou as maiores variações compreendeu os meses maio, junho, julho e agosto. As áreas correspondentes à região litorânea, Vale do Paraíba Paulista e demais pertencentes aos domínios da Serra do Mar, no entanto, apresentaram superestimativas em todos os meses e as maiores estimativas ocorreram de fevereiro a maio.

O modelo MIROC-5, por sua vez, apresentou, de modo geral, temperaturas do ar mais elevadas. Embora ocorra superestimativas em grande parte do estado como mostra a Figura 6.8, poucas regiões como algumas áreas no extremo sul e ao norte apresentaram subestimativas.

De forma geral, o modelo HadGEM2-ES apresentou melhor desempenho ao representar o padrão da temperatura no Estado de São Paulo como é apontado

na Figura 6.9. Os meses que mostraram melhores ajustes em relação aos dados observados foram outubro, novembro, dezembro, janeiro e fevereiro, cujas diferenças médias foram 0,75, 0,23, 0,52, 0,95, 0,84°C, respectivamente. Já os meses de junho, julho e agosto, no entanto, apresentaram diferenças médias em relação aos dados observados superiores a 2°C.

Figura 6.6 - Climatologia dos modelos HadGEM2-ES e MIROC-5 para o período 1950-2000 para o Estado de São Paulo

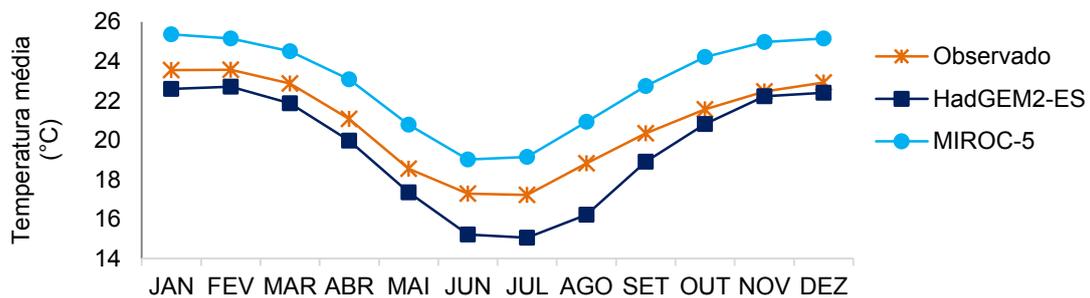


Figura 6.7 - Anomalia sazonal das temperaturas do ar ($^{\circ}\text{C}$) para o período 1950-2000 com base nos resultados o modelo HadGEM2-ES para o Estado de São Paulo

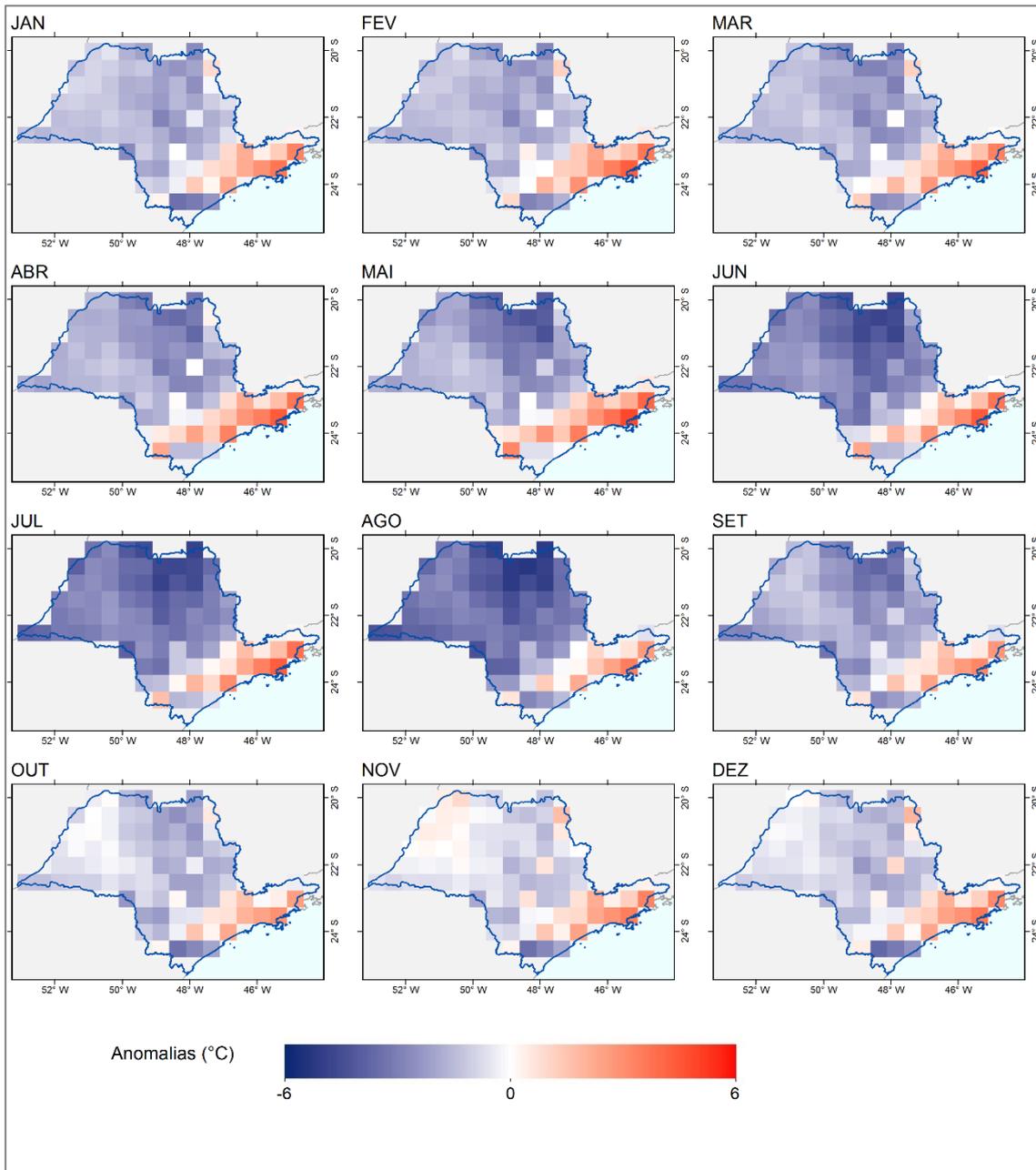


Figura 6.8 - Anomalia sazonal das temperaturas (°C) para o período 1950 – 2000 com base nos resultados o modelo MIROC-5 para o Estado de São Paulo

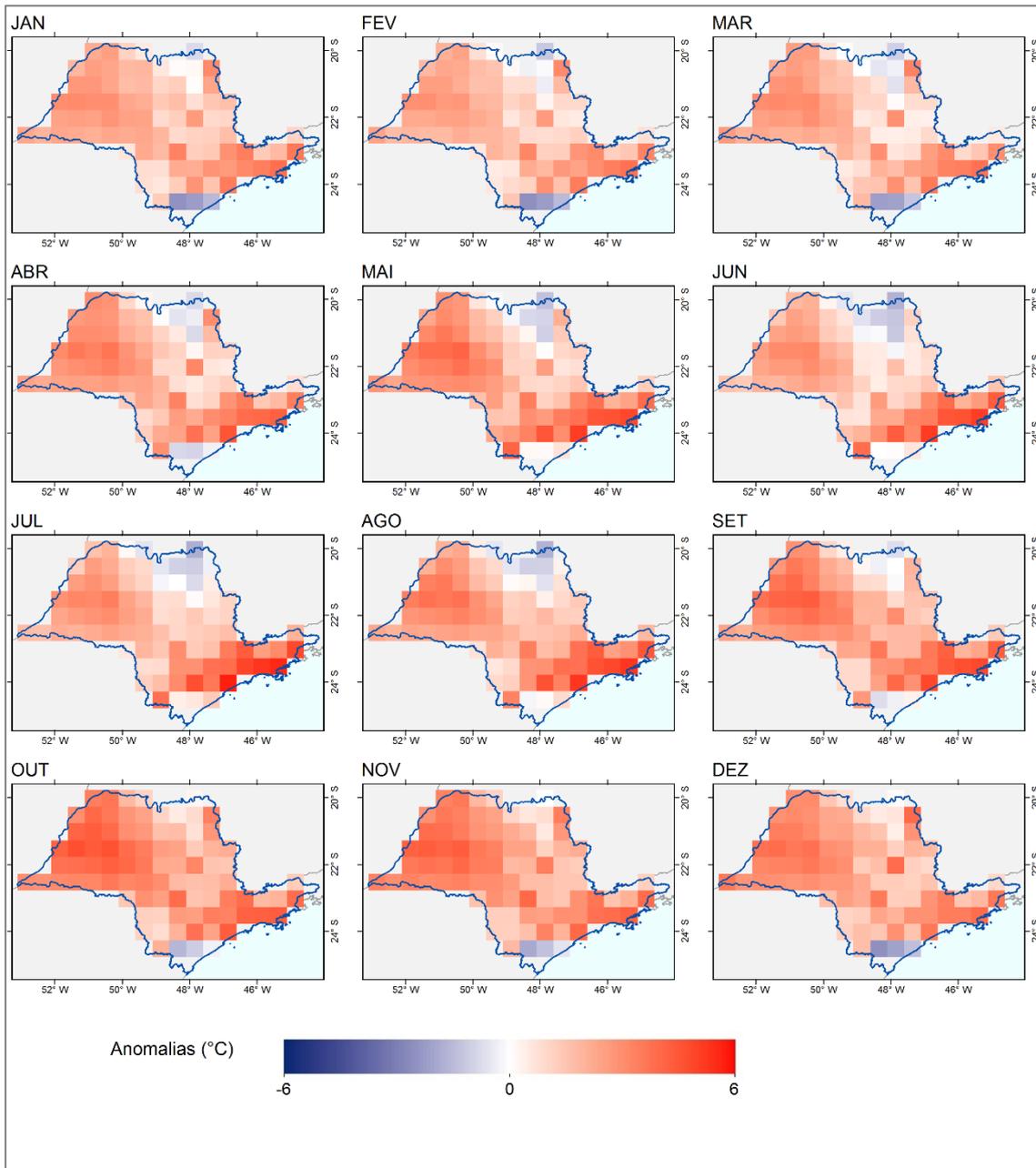
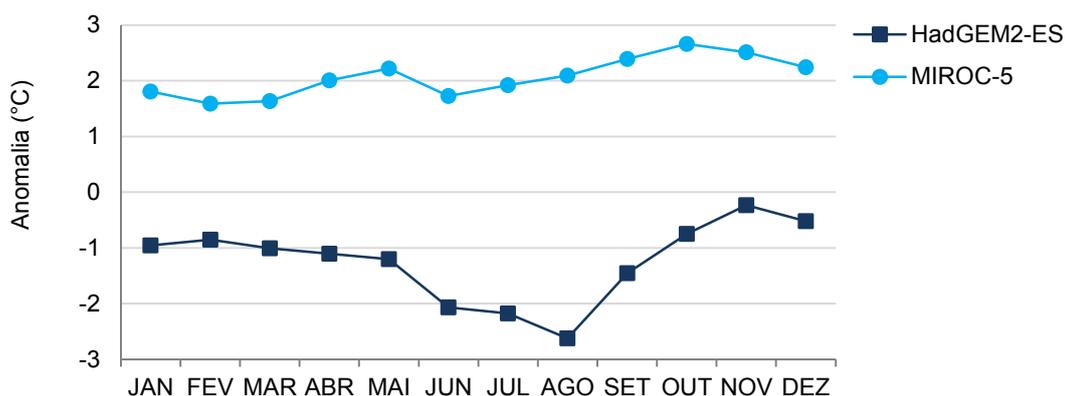


Figura 6.9 - Anomalia sazonal das temperaturas para o período 1950 – 2000



6.5.2.2 Precipitação

Ao avaliar as médias mensais climatológicas de precipitação (Figura 6.10) verificou-se que o modelo HadGEM2-ES apresentou valores de precipitação média climatológica elevados para todo o estado. Embora não corresponda a mesma área de estudo, Silveira et al. (2013) avaliaram o desempenho de alguns modelos do CMIP5 para representar o padrão climático da Bacia do Rio Prata, compreendida entre 16,5°S e 36°S de latitude e 44°O e 64°O de longitude, e constatam também que modelo HadGEM2-ES superestimou a precipitação climatológica em todos os meses, resultando em um total anual de 30% acima do valor observado. Para o estado de São Paulo foi constatado, para o mesmo modelo, um aumento de até 43% em relação aos dados observados para o mesmo período.

O modelo MIROC-5, no entanto, apresentou valores elevados de precipitação média climatológica apenas no período chuvoso e subestimou a precipitação no período de estiagem, ou seja, nos meses de maio, junho, julho e agosto. Dessa forma, constatou-se que o modelo MIROC subestimou a precipitação em até 28% do total esperado para o Estado de São Paulo quando comparado aos dados observados.

Considerando-se a anomalia da precipitação climatológica do modelo HadGEM2-ES (Figura 6.11) verifica-se que os meses de novembro à fevereiro apresentaram valores acima de 50 mm por mês; já os meses de março a

novembro apresentaram variações inferiores a 50 mm com destaque para o mês de outubro que apresentou variação de apenas 1 mm. Assim, da mesma forma que a temperatura do ar, a área da região litorânea e Serra do Mar, ao sul do estado, apresentaram subestimativas e estas ocorreram em quase todos os meses, exceto em junho, julho, agosto e setembro. Houveram subestimativas também ao norte do estado para os meses maio e outubro.

Observando os resultados provenientes das simulações do modelo MIROC-5, (Figura 6.12), verificou-se valores altos de precipitação também nos meses de novembro a fevereiro, embora aqueles apontados pelo modelo HadGEM2-ES tenham sido superiores. No entanto, para o período compreendido entre os meses de maio a agosto, o modelo MIROC-5 indicou subestimativas das temperaturas médias climatológicas para praticamente todo o estado com poucas exceções, divergindo do modelo HadGEM2-ES (Figura 6.13).

Figura 6.10 - Climatologia dos modelos HadGEM2-ES e MIROC-5 para o período 1950-2000 para o Estado de São Paulo

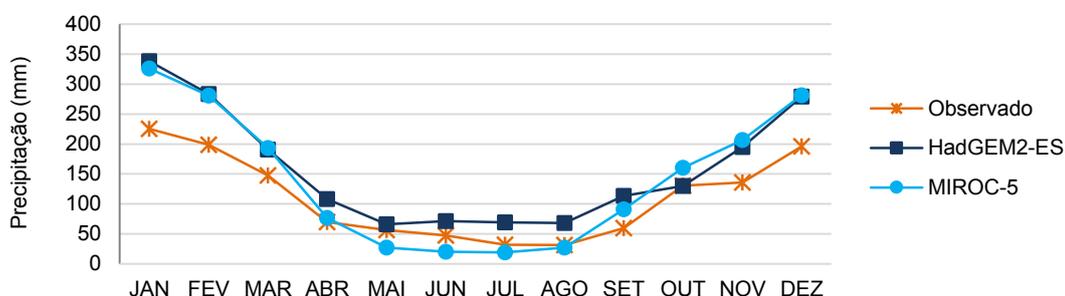


Figura 6.11 - Anomalia da precipitação apresentada pelo modelo HadGEM2-ES para o Estado de São Paulo

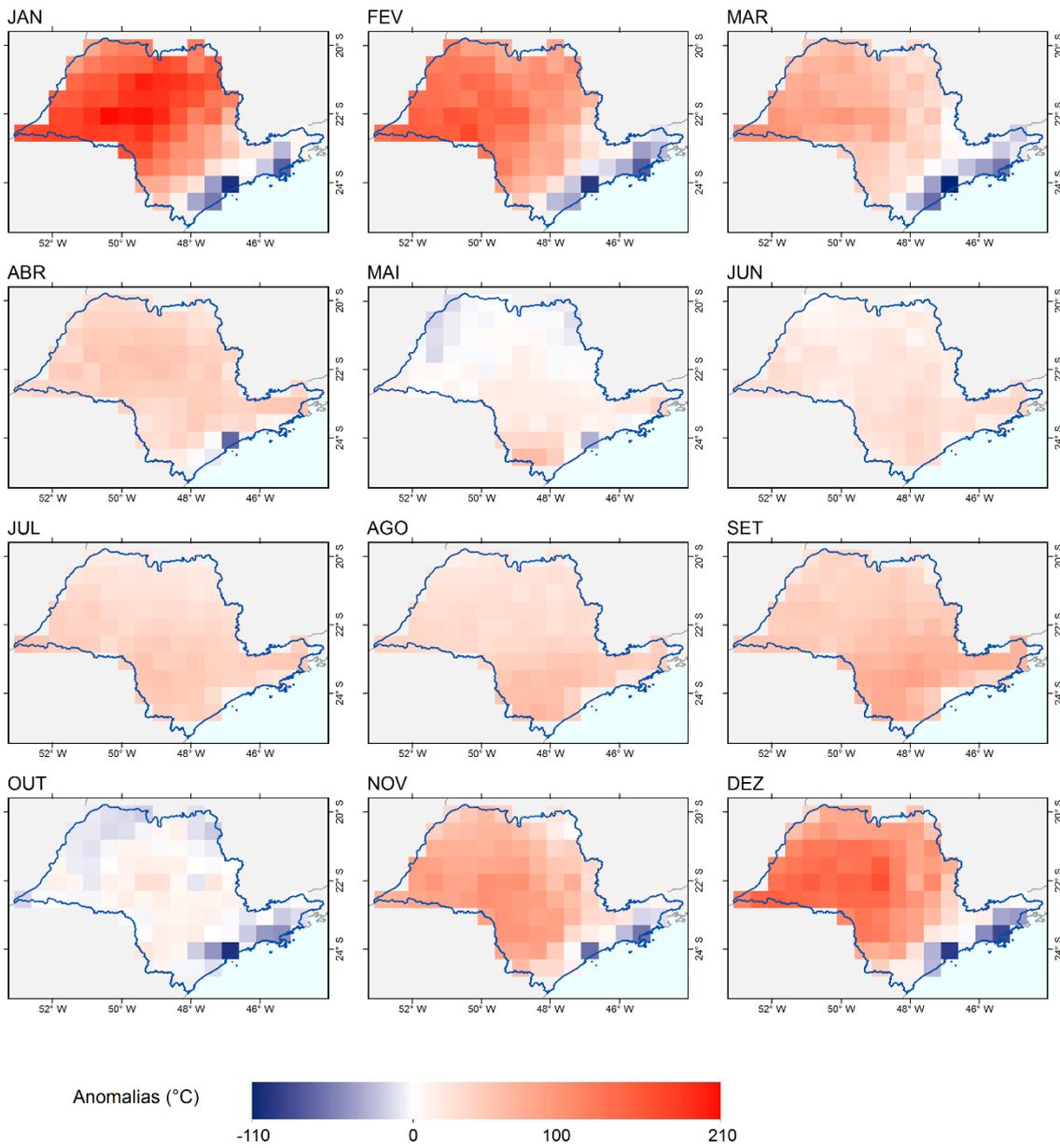


Figura 6.12 - Anomalia da precipitação apresentada pelo modelo MIROC-5 para o Estado de São Paulo

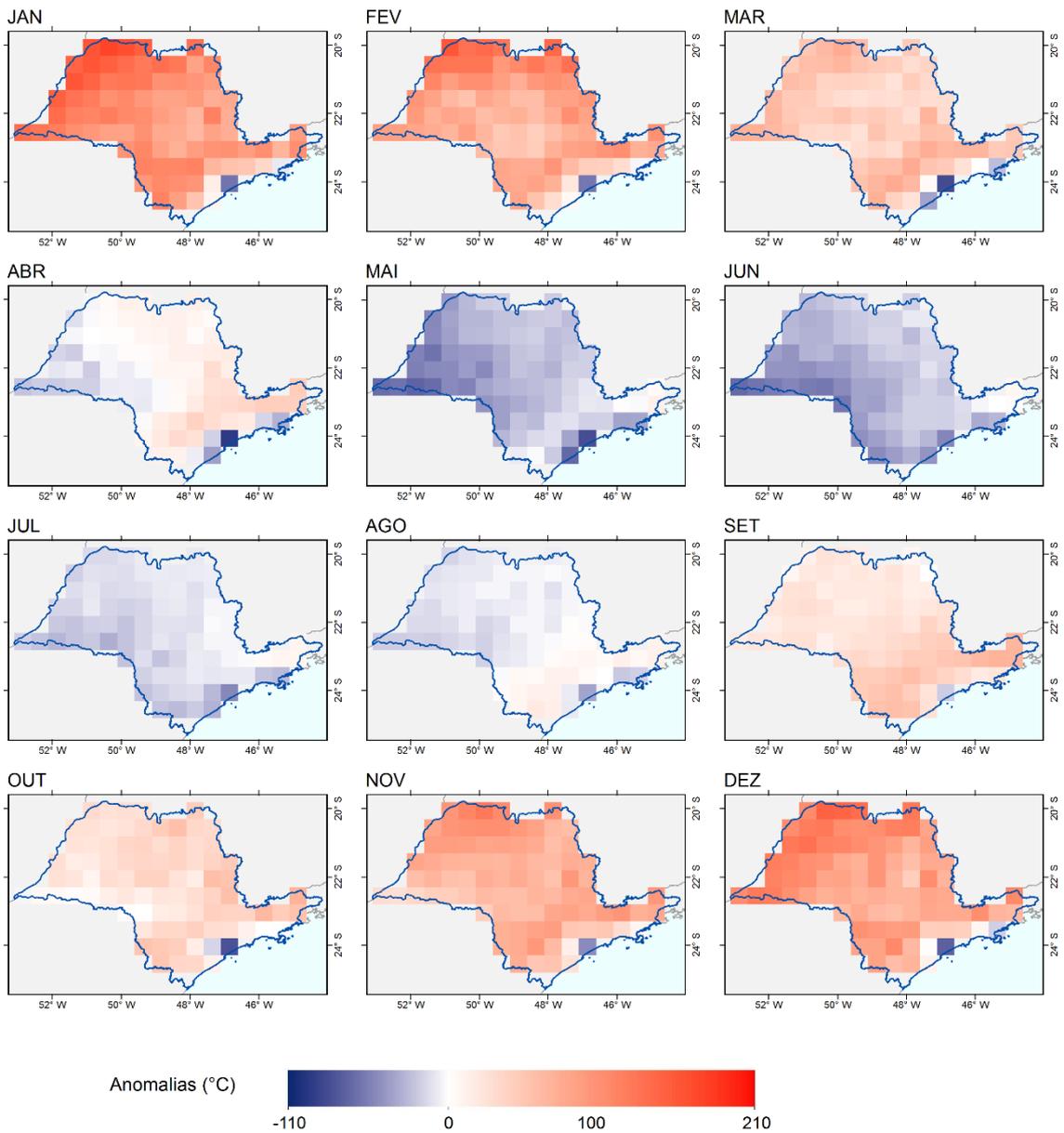
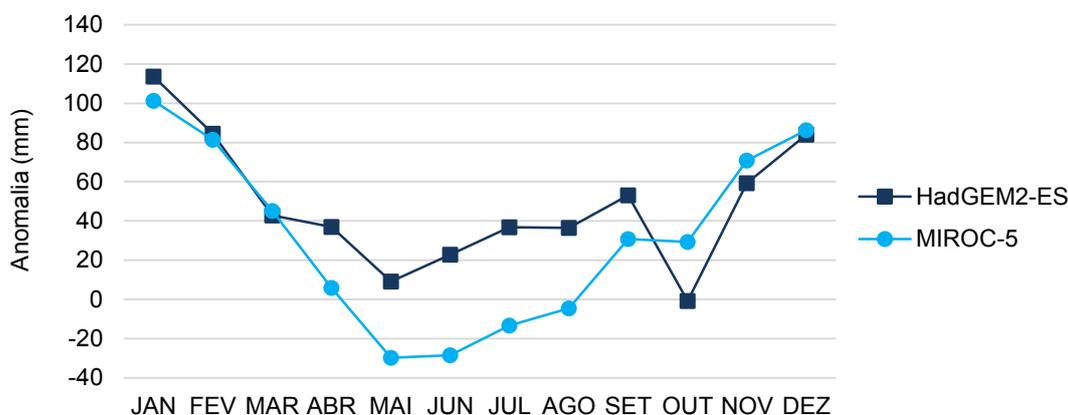


Figura 6.13 - Anomalia sazonal da precipitação para o período 1950 – 2000 para o estado de São Paulo



Com base no que foi exposto, os dois modelos considerados apresentam bom desempenho para representar os padrões espaciais do clima do estado de São Paulo, porém o modelo HadGEM2-ES simula melhor a temperatura do ar enquanto para o modelo MIROC-5 simula melhor a precipitação.

6.5.3 Projeções climáticas para 2050

Como mencionado, os dados utilizados para a determinação das zonas aptas para o cultivo da cana-de-açúcar são resultantes da interpolação das simulações dos modelos HadGEM2-ES e MIROC-5 para a resolução espacial de 1 km utilizando a altitude como variável secundária (Hijmans et al., 2005). Estes dados foram obtidos pela *World Clim Organization*.

6.5.3.1 Precipitação

A precipitação média anual para o Estado de São Paulo correspondente ao período 1950 – 2000 é apresentada na Figura 6.14 e a precipitação média anual para 2050 (período 2041 - 2060) ambas obtidas via simulação a partir dos modelos HadGEM2-ES e MIROC-5 para os RCP 4.5 e 8.5 é ilustrada na Figura 6.15. Nota-se que os resultados de todas as simulações apontam aumento da

precipitação média anual para o Estado para 2050 quando comparados com o período presente (Figura 14). As simulações resultantes do modelo MIROC-5 indicam precipitações médias anuais superiores àquelas notadas pelas simulações derivadas do modelo HadGEM2-ES.

Os incrementos na precipitação média anual com relação à média histórica para as saídas dos modelos HadGEM2-Es e MIROC-5 considerando os cenários RCP 4.5 e 8.5 são apresentadas na Figura 6.16. Os resultados desses modelos indicaram que em 2050 o aumento da precipitação média anual considerando o modelo HadGEM2-ES será de 60 mm e de 44 mm para os cenários RCP 4.5 e 8.5, respectivamente. Com relação ao modelo MIROC-5, os valores médios encontrados para o aumento da precipitação média anual foram de 80 mm e 76 mm para os cenários RCP 4.5 e 8.5, respectivamente. Estes valores indicam, de forma geral, que são esperados aumentos na precipitação. Exceções ocorrem na região noroeste do Estado de São Paulo quando consideradas as simulações obtidas pelo modelo HadGEM2-ES (cenário RCP 8.5) e em pequenas áreas localizadas no extremo norte do estado e na divisa com o Estado do Rio de Janeiro considerando as simulações geradas pelo modelo MIROC-5 e (RCP 4.5).

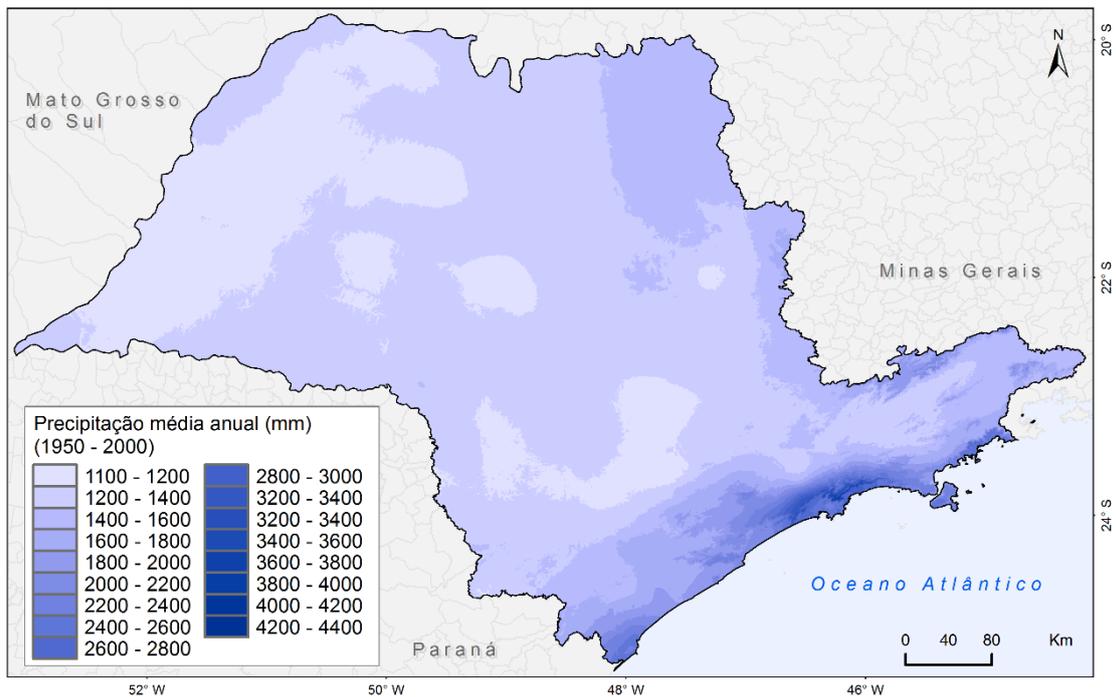
As áreas que devem apresentar o maior aumento de precipitação em 2050, considerando os resultados dos dois modelos e das duas projeções climáticas RCP, serão aquelas localizadas no Sul e na faixa litorânea do estado. Os menores aumentos se darão nas porções norte, noroeste e central do estado.

Comparando os dois modelos verificou-se que o modelo MIROC-5 estimou valores mais elevados de precipitação média anual quando comparado com os resultados do modelo HadGEM2-ES. Em termos médios, para o cenário RCP 4.5, o modelo MIROC estimou um aumento de 25% na precipitação média anual em relação ao modelo MIROC-5, ao passo que, para o cenário RCP 8.5, este aumento é de 42%.

Em relação às projeções climáticas RCP's, os resultados indicam também que as diferenças na precipitação média anual quando comparadas às simulações do modelo HadGEM2-ES cenários RCP 4.5 e 8.5 foi de 27%, ou seja, em um cenário mais "pessimista", haverá um decréscimo de 27% no total anual de

chuva em 2050 se comparado com o cenário mais “otimista”. As simulações provenientes do modelo MIROC-5 indicam, por sua vez, que haverá uma diminuição na precipitação média anual em 2050 de apenas 6% ao se comparar os cenários RCP 4.5 e 8.5, indicando também uma redução no total de chuva anual no cenário mais “pessimista”.

Figura 6.14 - Precipitação média anual para o Estado de São Paulo correspondente ao período climatológico 1950 – 2000



Fonte: Hijmans et al. (2005), via World Clim Organization

Figura 6.15 - Precipitação média anual para 2050 (média do período 2041 - 2060) obtida via simulação dos modelos HadGEM2-ES e MIROC-5 para os cenários RCP 4.5 e 8.5.

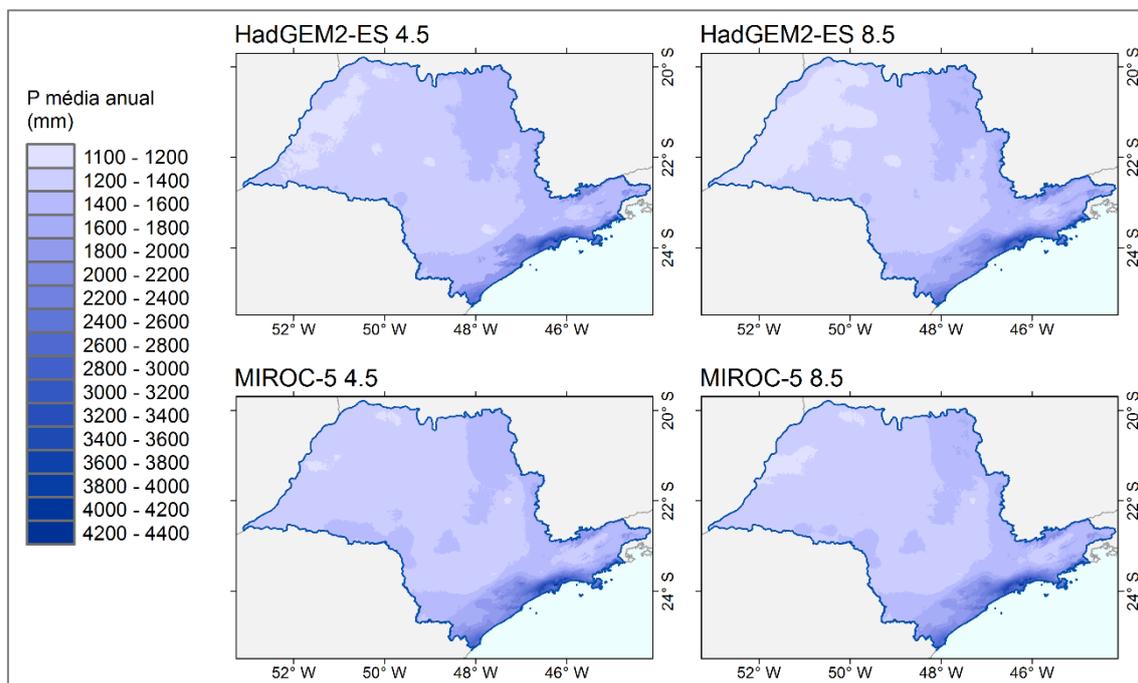
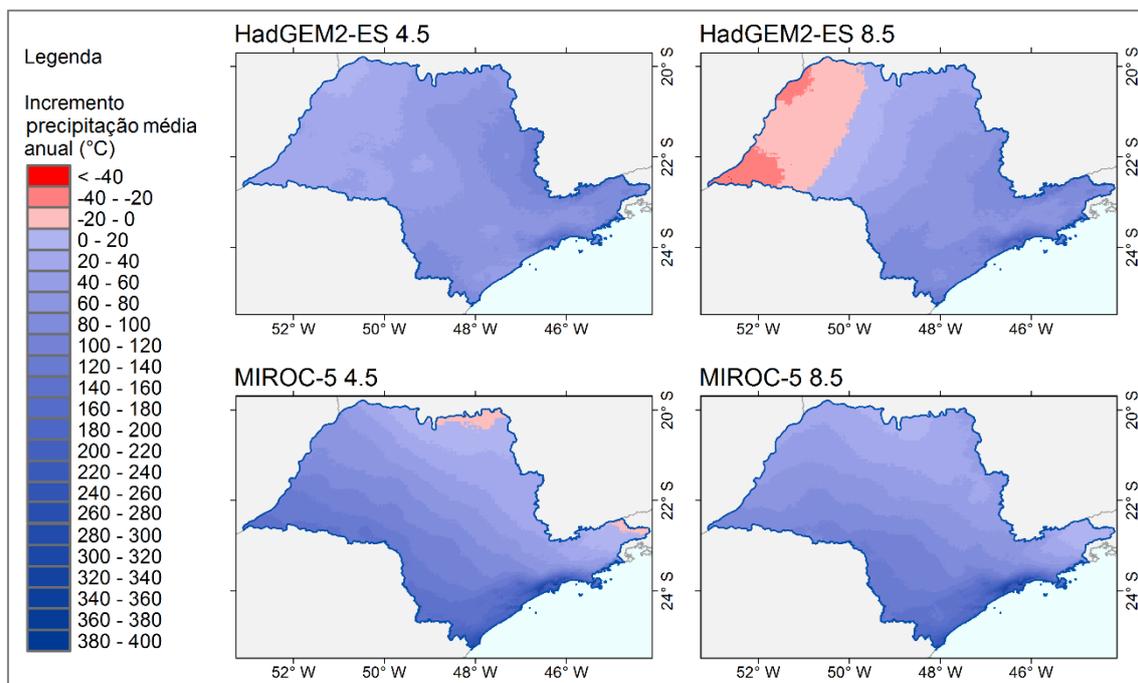


Figura 6.16 - Incremento na precipitação média anual em 2050 com relação à média histórica (1950- 2000) para o Estado de São Paulo

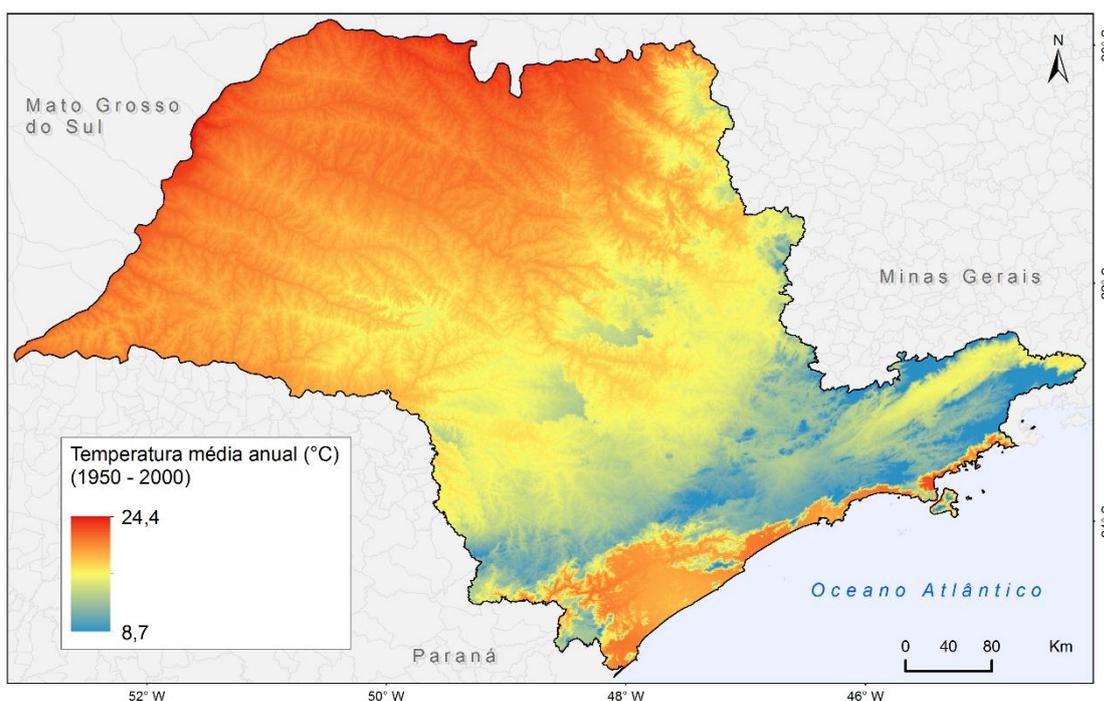


6.5.3.2 Temperatura do ar

A temperatura média anual referente ao período (1950-2000) é mostrada na Figura 6.17 e as simulações de temperatura média anual especificamente para o ano de 2050 (período 2041-2060) resultantes dos modelos HadGEM2-ES e MIROC-5 considerando os cenários RCP 4.5 e 8.5 são apresentadas na Figura 6.18.

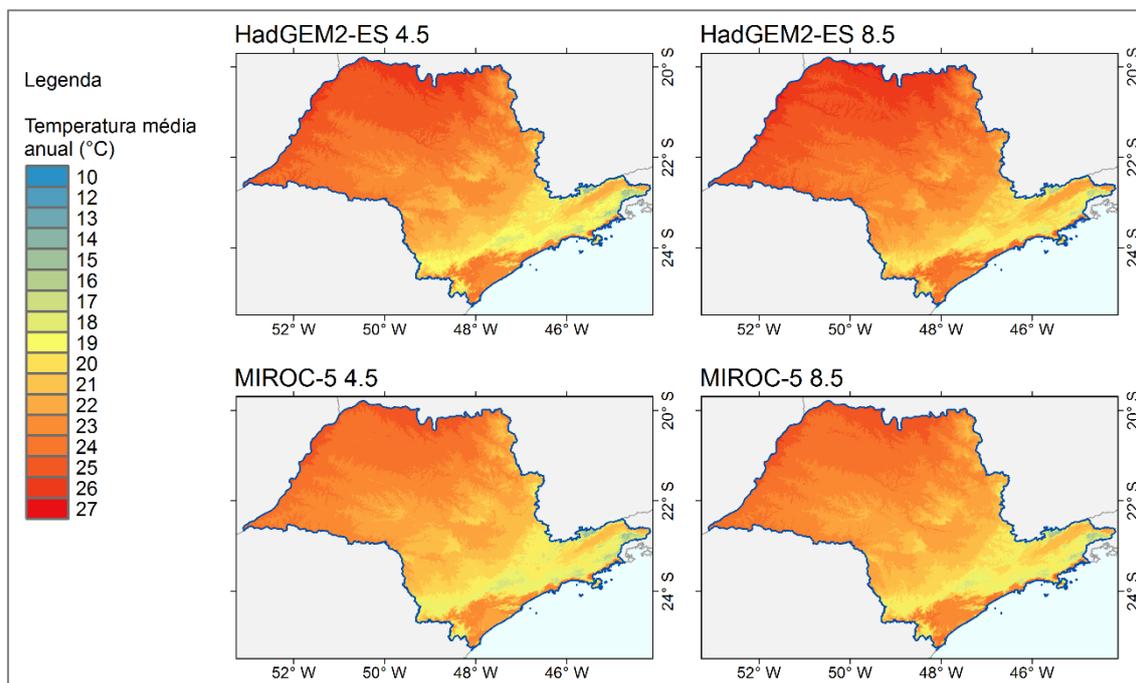
Os resultados do modelo HadGEM2-ES apontam para 2050 temperatura média anual de 22,9°C e 23,25°C para os cenários RCP 4.5 e 8.5, respectivamente, enquanto as simulações provenientes do modelo MIROC-5 indicam temperatura média anual de 21,9°C e 22,1°C para os cenários RCP 4.5 e 8.5, respectivamente. Ao mesmo tempo, o padrão espacial da temperatura em 2050 se mantém em todas as simulações, indicando temperaturas inferiores para as regiões localizadas nos domínios da Serra do Mar onde há o predomínio das maiores altitudes do estado e temperaturas mais elevadas ao norte e oeste do estado.

Figura 6.17 - Temperatura média anual climatológica para o Estado de São Paulo correspondente ao período 1950 – 2000



Fonte: Hijmans et al. (2005), via World Clim

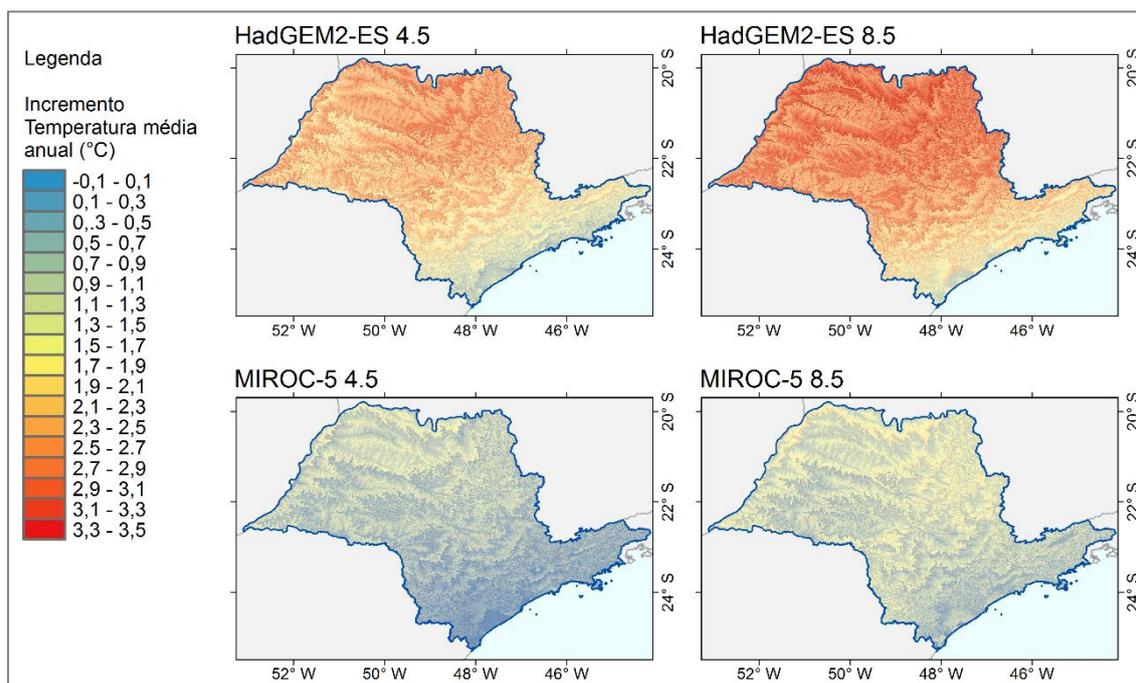
Figura 6.18 - Temperatura média anual para 2050 (média do período 2041 - 2060) obtida a partir da simulação dos modelos HadGEM2-ES e MIROC-5 para os cenários RCP 4.5 e 8.5 para o Estado de SP



Comparando-se as simulações da temperatura média anual referentes ao ano de 2050 com a temperatura média anual climatológica, período 1950-2000, Figura 6.19, observa-se que é previsto aumento de temperatura para os dois cenários RCP analisados. Em se tratando das simulações provenientes do modelo HadGEM2-ES, espera-se um aumento médio da temperatura anual de 2,09°C e 2,44°C para os cenários RCP 4.5 e 8.5, respectivamente, para o ano de 2050. Considerando-se os resultados das simulações do modelo MIROC-5, haverá um aumento de 1,06°C e 1,32°C em 2050 com relação àquelas estimadas para o período 1950-2000 de acordo com os cenários RCP 4.5 e 8.5, respectivamente.

Assim, verificou-se também que as simulações resultantes do modelo HadGEM2-ES estimam temperaturas médias anuais mais elevadas que as obtidas pelo modelo MIROC-5 para o ano de 2050. Assim, no ano de 2050, de acordo com estes resultados, espera-se aumento de temperatura independente do cenário analisado, porém este aumento será mais acentuado para a projeção RCP 8.5, para ambos os modelos analisados neste estudo.

Figura 6.19 - Incremento na temperatura média anual com relação à média climatológica (1950- 2000) para o Estado de São Paulo



Contudo, o objetivo deste estudo foi o de analisar as áreas aptas para o cultivo da cana-de-açúcar em 2050 no que diz respeito às variáveis climáticas temperatura e precipitação, tornou-se necessário estender esta análise para as temperaturas médias mensais, visto que os limiares adequados para o desenvolvimento da cultura foram determinados conforme médias mensais de temperatura. Assim, as médias mensais de temperatura para o período 1950-2000 obtidas via *World Clim Organization* são apresentadas na Figura 6.20 e os médios mensais de temperatura para o ano de 2050 resultantes das simulações dos modelos HadGEM2-ES e MIROC-5 considerando as projeções climáticas RCP 4.5 e 8.5 encontram-se nas Figuras 21, 22, 23 e 24.

Figura 6.20 - Temperatura média mensal climatológica (1950- 2000) para o Estado de São Paulo

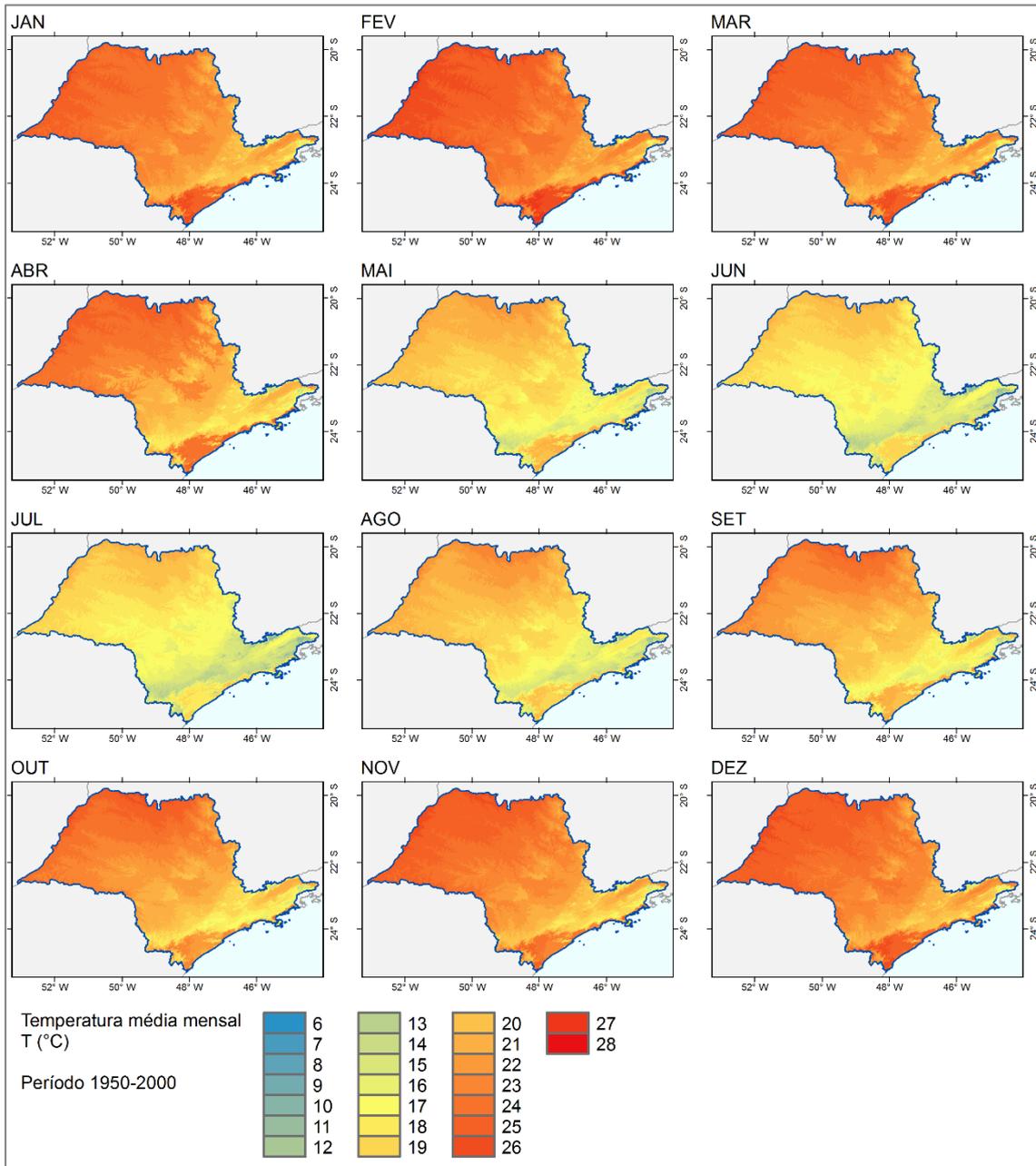


Figura 6.21 - Incremento da temperatura média mensal simulada via modelo HadGEM2-ES (RCP 4.5) com relação à temperatura média mensal climatológica (1950- 2000) para o Estado de São Paulo

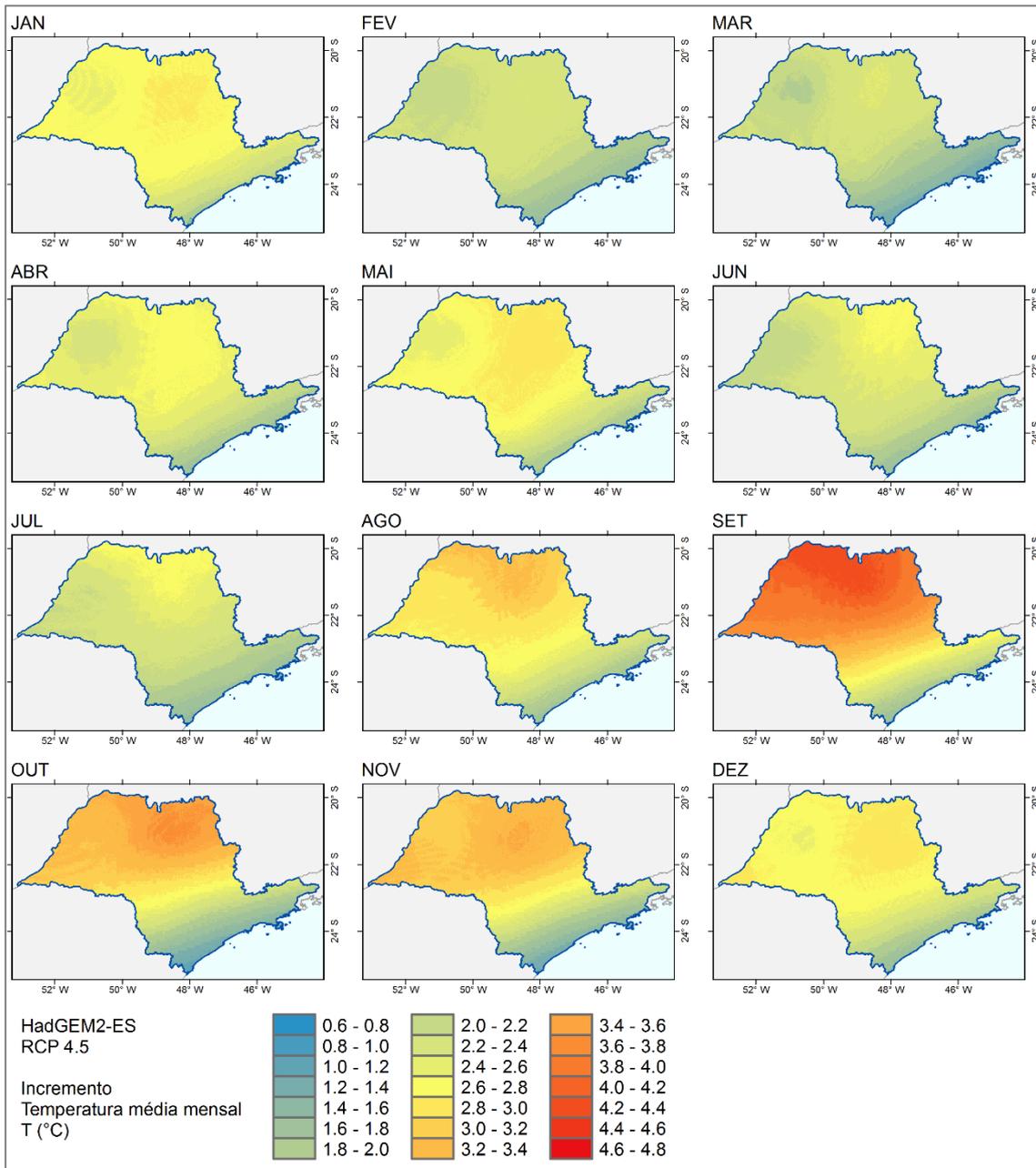


Figura 6.22 - Incremento da temperatura média mensal simulada via modelo HadGEM2-ES (RCP 8.5) com relação à temperatura média mensal climatológica (1950- 2000) para o Estado de São Paulo

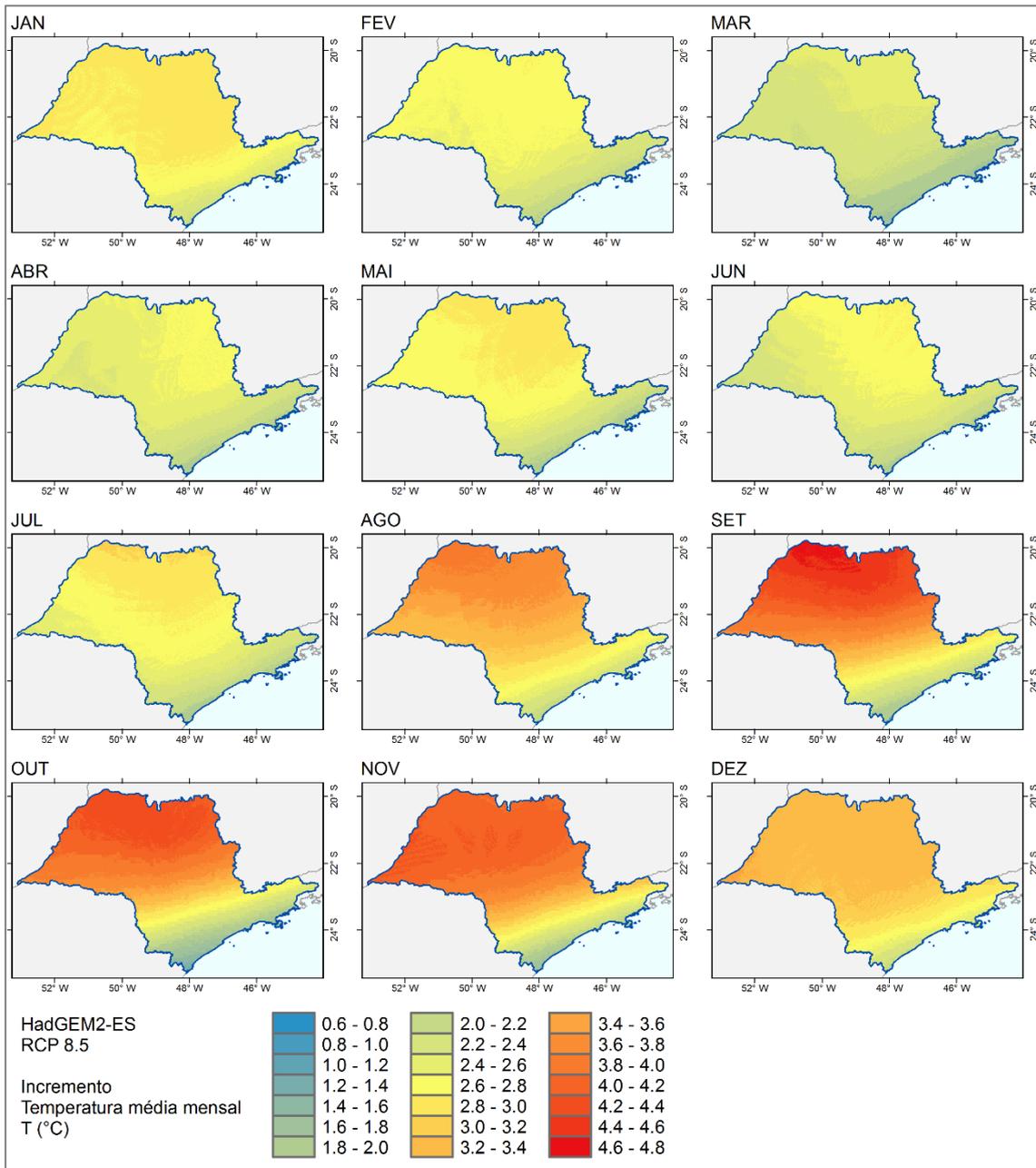


Figura 6.23 - Incremento da temperatura média mensal simulada via modelo MIROC-5 (RCP 4.5) com relação à temperatura média mensal climatológica (1950- 2000) para o Estado de São Paulo

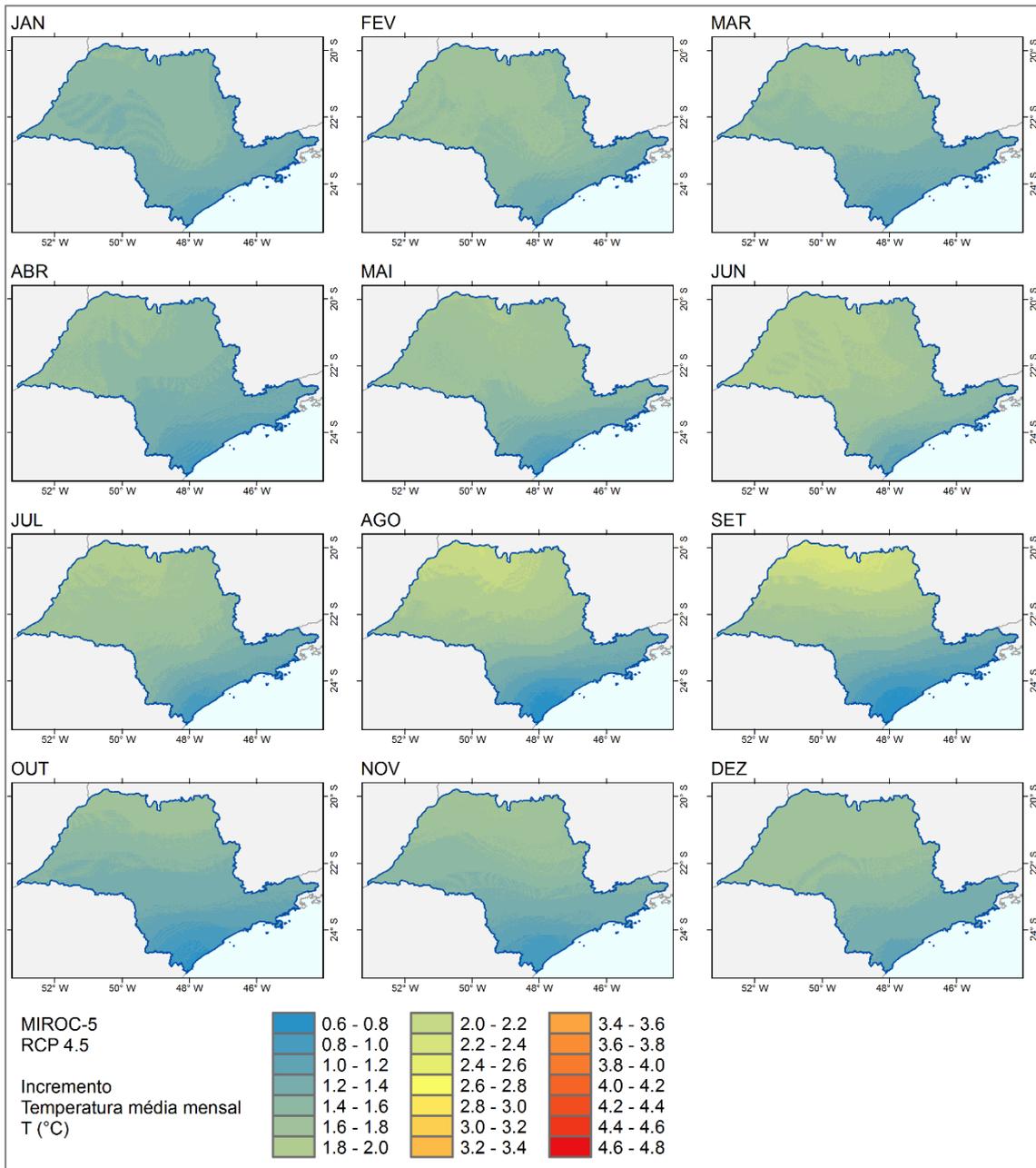
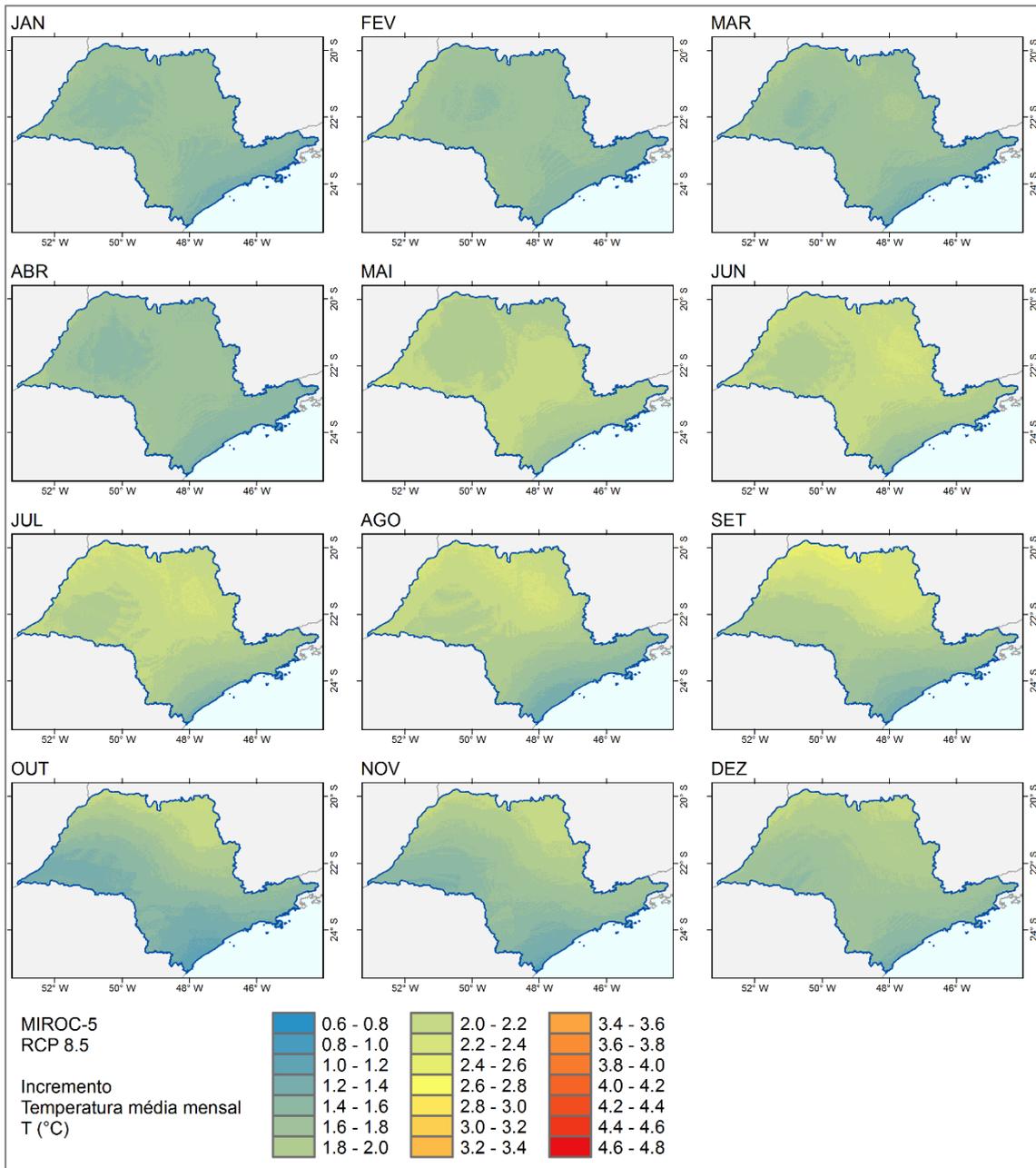


Figura 6.24 - Incremento da temperatura média mensal simulada via modelo MIROC-5 (RCP 8.5) com relação à temperatura média mensal climatológica (1950- 2000)



Analisando-se a Figura 6.20 nota-se a ocorrência de temperaturas médias mensais mais elevadas no verão, nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, sendo 22,9°C, 23,5°C e 23,5°C, respectivamente, e de temperaturas mais baixas durante o inverno, meses de junho, julho e agosto, com 18,5°C, 17,2°C e 17,1°C, respectivamente para 2050.

De forma geral, os resultados das simulações provenientes dos dois modelos, HadGEM2-Es e MIROC-5, tanto considerando as projeções RCP 4.5 quanto RCP 8.5, indicaram aumento de temperatura para todos os meses em todo o estado. No entanto, como verificado também através da análise das temperaturas médias anuais, os resultados da simulação do modelo HadGEM2-ES indicaram temperaturas médias mensais mais elevadas quando comparados às obtidas através da simulação do modelo MIROC-5.

Este aumento de temperatura para o ano de 2050 configura-se espacialmente padronizado em todas as simulações, apresentando, para as áreas localizadas na porção norte do estado, os maiores aumentos, ao passo que nas regiões localizadas no extremo sul ocorrem os menores aumentos. É importante destacar que as regiões onde espera-se os maiores incrementos de temperatura correspondem às áreas onde há o predomínio do cultivo da cana-de-açúcar no estado e, por esta razão, a cultura poderá ser afetada caso essas projeções se estabeleçam.

Com base nas simulações resultantes do modelo HadGEM2-ES verifica-se que as estimativas de temperatura médias mensais considerando o cenário RCP 8.5 são superiores às relacionadas ao cenário RCP 4.5 para todos os meses. A Tabela 6.1 aponta os incrementos na média mensal para 2050 em relação à temperatura média mensal climatológica.

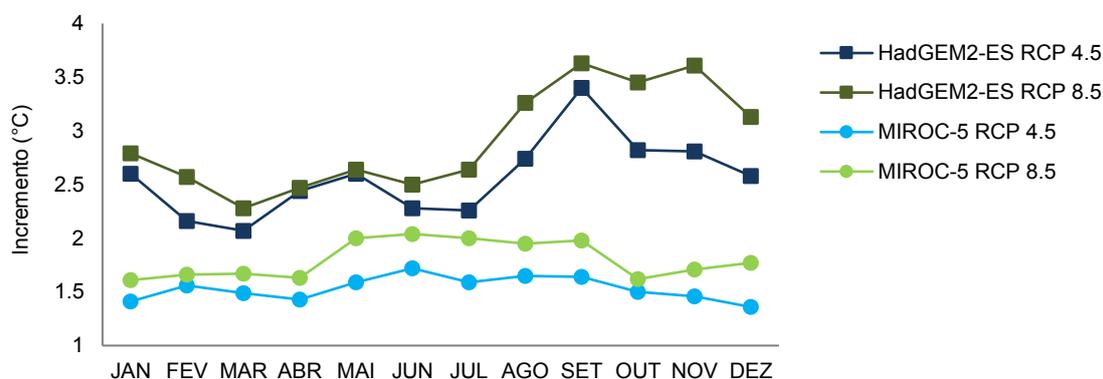
Tabela 6.1 - Temperaturas médias mensais climatológicas e aumentos na temperatura média mensal dos modelos HadGEM2-ES e MIROC-5 considerando os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 para o ano de 2050 (2041-2060)

	Temperatura média mensal climatológica(°C)	Incremento (°C)			
		HadGEM2-ES		MIROC-5	
		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Janeiro	23,50	2,60	2,79	1,41	1,61
Fevereiro	23,50	2,16	2,57	1,56	1,66
Março	22,09	2,07	2,28	1,49	1,67
Abril	21,01	2,44	2,47	1,43	1,63
Maiο	18,50	2,60	2,64	1,59	2,00
Junho	17,20	2,28	2,50	1,72	2,04
Julho	17,10	2,26	2,64	1,59	2,00
Agosto	18,70	2,74	3,26	1,65	1,95
Setembro	20,30	3,40	3,63	1,64	1,98
Outubro	21,50	2,82	3,45	1,50	1,62
Novembro	22,40	2,81	3,61	1,46	1,71
Dezembro	22,90	2,58	3,13	1,36	1,77

Nota-se que os meses que apresentaram os maiores aumentos na temperatura média anual, de acordo com os resultados da simulação do modelo HadGEM2-ES, foram agosto, setembro, outubro e novembro cujas anomalias são de 2,74°C, 3,40°C, 2,82°C e 2,81°C, respectivamente, para o cenário RCP 4.5 (Figura 2.25). Este período é particularmente importante para a fase de maturação da cana-de-açúcar, como exposto na Figura 6.1, a qual requer temperaturas entre 10 e 20°C. De acordo com as simulações resultantes do modelo MIROC-5, o período para o qual o modelo estima temperaturas médias mais elevadas está compreendido entre os meses de maio, junho, julho e agosto, abrangendo também a fase de maturação da cultura.

A Figura 6.25 também mostra que a amplitude dos incrementos nas temperaturas médias mensais é maior para os resultados provenientes do modelo HadGEM2-ES, correspondendo a 1,33°C no cenário 4.5. Em relação ao cenário 8.5, esta amplitude é de 1,35°C. O aumento de temperatura estimado pelo modelo MIROC-5, por sua vez, apresenta amplitude de 0,44°C para o cenário RCP 4.5 e 0,42°C para o cenário RCP 8.5.

Figura 6.25 - Incremento de temperatura para o ano de 2050 (1941-2060) considerando as temperaturas médias mensais climatológicas (1950-2000)

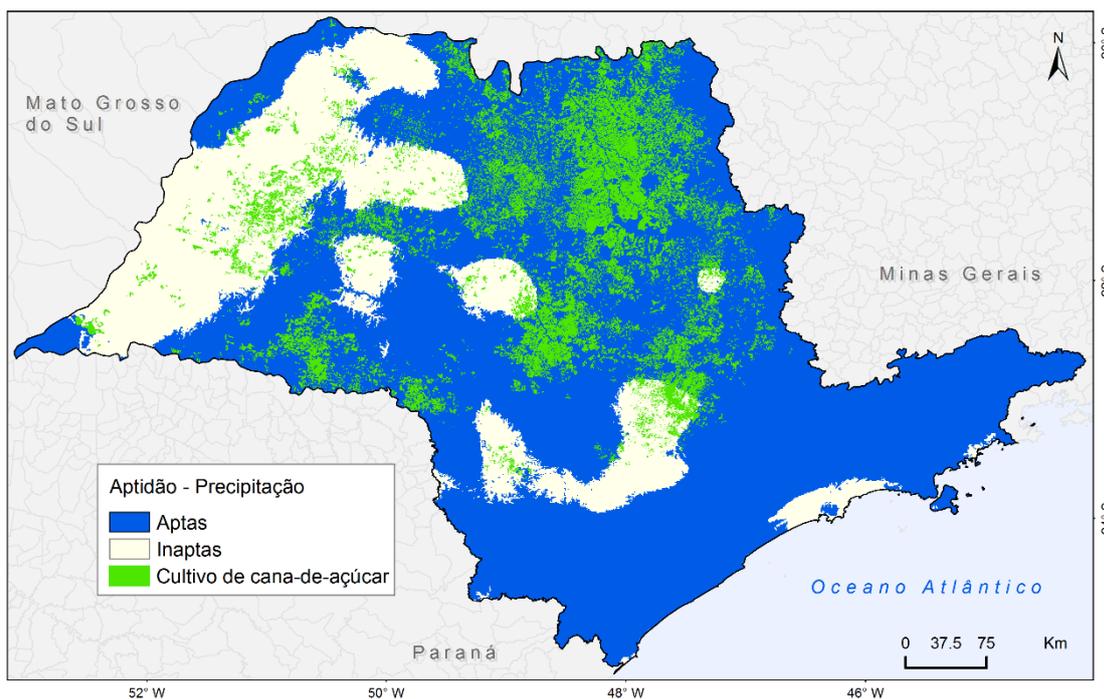


6.5.4 Aptidão climática da cana-de-açúcar para o presente e para 2050

6.5.4.1 Precipitação

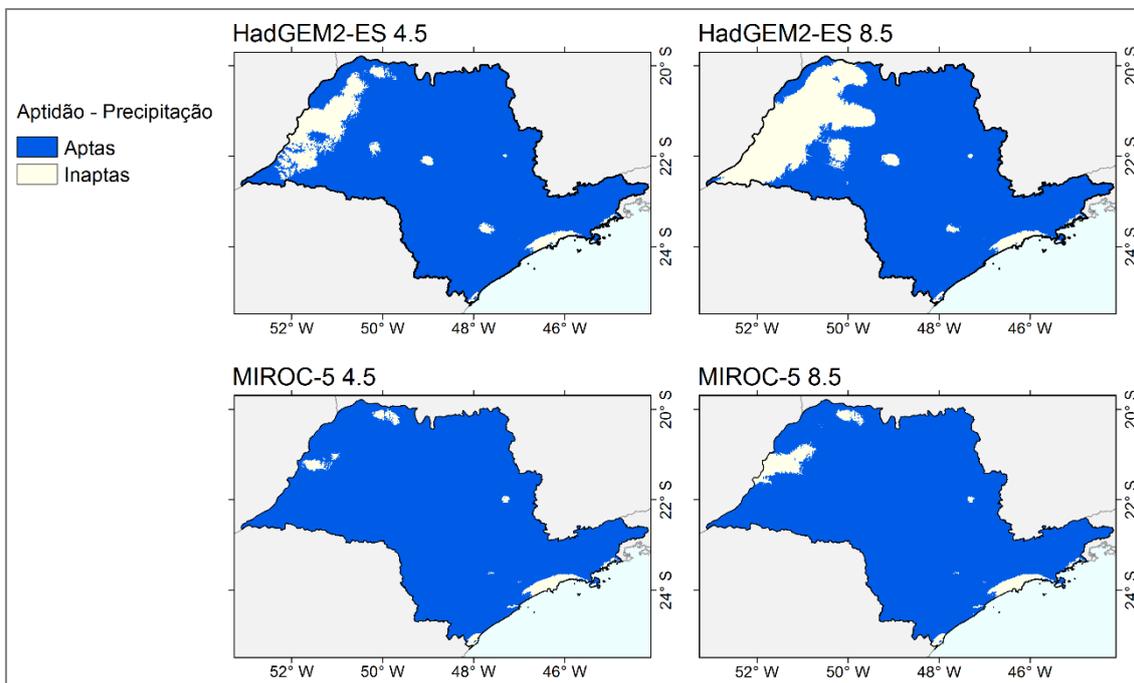
Com relação à aptidão climática da cana-de-açúcar, a precipitação média anual climatológica referente ao período 1950-2000, o Estado de São Paulo possui uma extensão de mais de 151 mil km² de áreas aptas (equivalente a mais de 15 milhões de hectares) localizadas como mostra a Figura 6.26. As regiões inaptas mediante o critério adotado neste estudo, que remete às áreas que apresentaram precipitação média anual fora do intervalo de 1200-2500 mm, localizam-se principalmente à oeste e em algumas regiões ao centro e litoral do estado. No entanto, estas regiões ainda assim apresentam plantio de cana-de-açúcar, fato que pode ser justificado pela existência de outros fatores determinantes, tais como pedológicos, de transporte e infraestrutura ou mesmo climáticos.

Figura 6.26 - Zonas aptas para o cultivo da cana-de-açúcar com relação à precipitação média anual referente ao período 1950-2000



Todavia, ao se considerar as projeções de precipitação média anual estimadas a partir da simulação dos modelos HadGEM2-ES e MIROC-5 para 2050, a configuração espacial das regiões aptas sofre modificações como mostra a Figura 6.27. Estima-se um aumento das áreas aptas para o cultivo da cana-de-açúcar para todas as simulações consideradas em decorrência do aumento das temperaturas médias anuais e, por consequência, aumento das áreas cuja precipitação média anual encontra-se no intervalo 1200-2500 mm. De acordo com os resultados das simulações do modelo HadGEM2-ES, estima-se um aumento de 32% e 24% das áreas aptas para os cenários RCP 4.5 e 8.5, respectivamente. O aumento das áreas aptas correspondentes ao cenário RCP 8.5 é inferior ao aumento estimado das áreas aptas para o cenário RCP 4.5 pois é previsto um aumento de precipitação média anual inferior para este cenário (média de 44 mm), ao passo que para o cenário RCP 4.5 é previsto um aumento médio de 60 mm.

Figura 6.27 - Zonas aptas para o cultivo da cana-de-açúcar com relação à precipitação média anual de acordo com os resultados das simulações dos modelos HadGEM2-ES e MIROC-5 para os cenários RCP 4.5 e 8.5



Em relação aos resultados das simulações do modelo MIROC-5 observa-se um aumento ainda maior das áreas aptas em relação à precipitação. Para o cenário RCP 4.5 os resultados apontam em um aumento de 37% das áreas aptas e para o cenário RCP 8.5 espera-se um aumento de 35%, diferença atribuída aos valores médios encontrados para o aumento da precipitação média anual de 80 mm e 76 mm para os cenários RCP 4.5 e 8.5, respectivamente.

6.5.4.2 Temperatura do ar

Como relação à determinação das zonas aptas para o cultivo da cana-de-açúcar em relação à temperatura (Figura 6.28) de acordo com as necessidades térmicas da cultura, as regiões propícias para o seu desenvolvimento baseado nos dados de temperatura média mensal climatológico (1950-2000). Como mencionado, o critério utilizado para a delimitação de tais áreas relacionado ao período de brotamento e de crescimento inicial é que a média dos meses outubro,

novembro, dezembro, janeiro e fevereiro deve ser superior a 20°C, período para o qual predomina o plantio da cana de ano e ano e meio. Assim, o Estado de São Paulo apresenta um total de mais de 224 mil km² (equivalente a 90% da área do estado) considerando-se as regiões aptas para o brotamento e crescimento inicial da planta (Figura 6.28a).

Ao serem considerados os cenários de mudanças climáticas para 2050, Figuras 6.29 e 6.30, observa-se um aumento das áreas aptas ao brotamento e crescimento inicial favorecido pelo aumento das temperaturas médias mensais no geral. Como o modelo HadGEM2-ES prevê aumento das temperaturas médias mensais superior ao aumento das temperaturas médias mensais estimadas pelo modelo MIROC-5, as áreas aptas indicadas na Figura 6.29 correspondentes às simulações do modelo HadGEM2-ES também são superiores. Isso ocorre por aumentam as áreas cuja média da temperatura dos meses outubro, novembro, dezembro, janeiro e fevereiro é superior a 20°C. As regiões que foram acrescidas ao total de áreas aptas para o brotamento e crescimento inicial localizam-se totalmente na região sul, principalmente nas áreas montanhosas da Serra do Mar cujas temperaturas médias mensais são inferiores se comparadas com as demais regiões do estado.

Figura 6.28 - Zonas aptas para o cultivo da cana-de-açúcar com relação à temperatura para o Estado de São Paulo

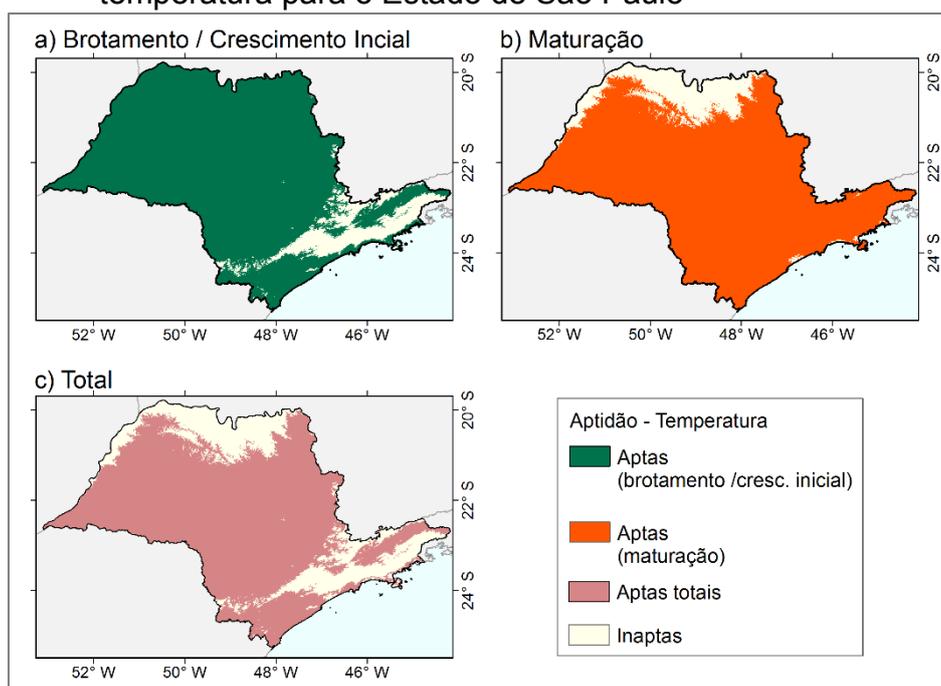


Figura 6.29 - Zonas aptas para o período de brotamento e crescimento inicial da cana-de-açúcar com relação à temperatura de acordo com os resultados das simulações dos modelos HadGEM2-ES e MIROC-5 para os cenários RCP 4.5 e 8.5 para o Estado de São Paulo

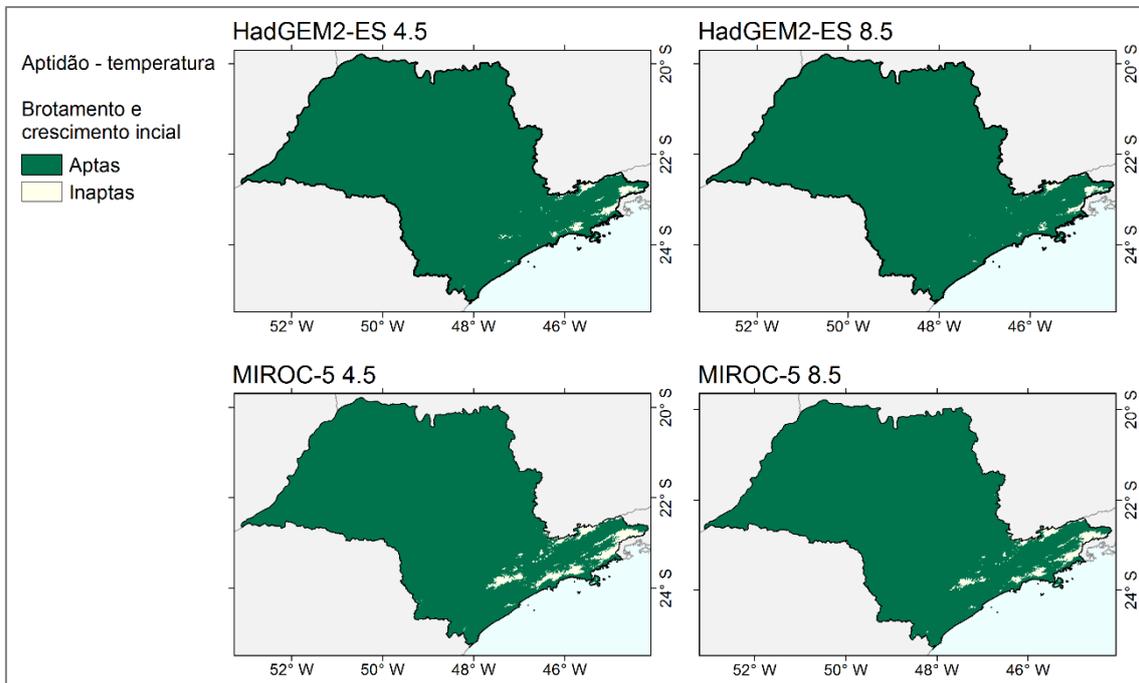
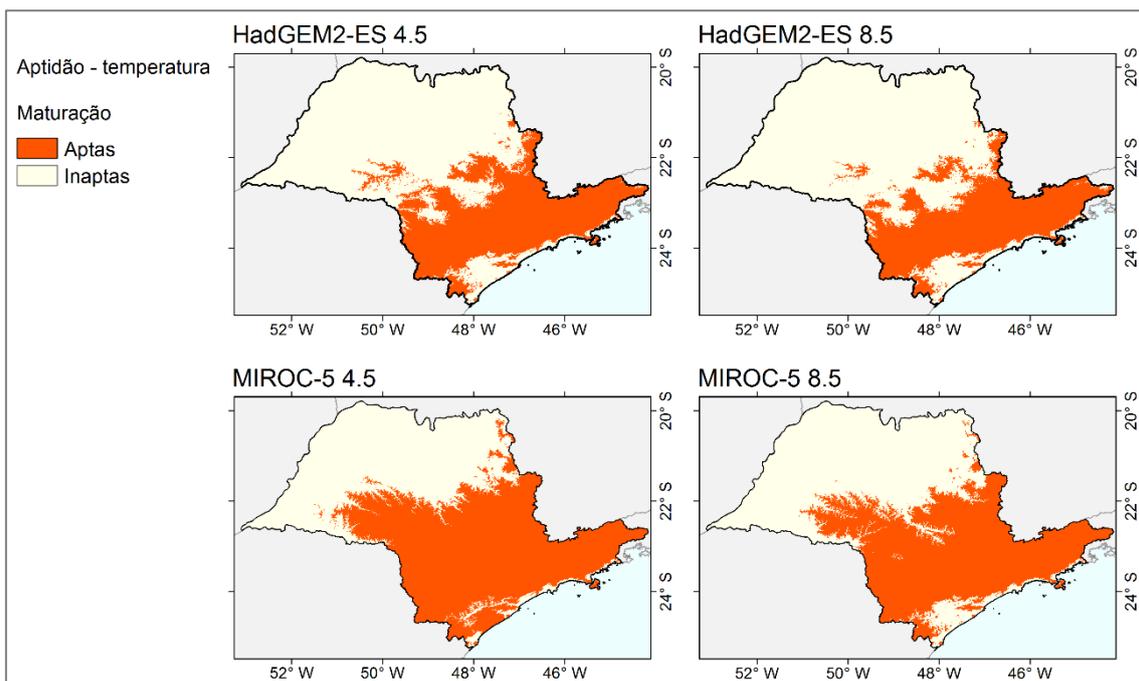


Figura 6.30 - Zonas aptas para o período de maturação da cana-de-açúcar com relação à temperatura de acordo com os resultados das simulações dos modelos HadGEM2-ES e MIROC-5 para os cenários RCP 4.5 e 8.5



Com relação ao período de maturação da planta, no entanto, as constatações são opostas. Considerando-se as áreas aptas para este período fenológico, apenas regiões ao norte do estado são consideradas inaptas de acordo com os dados climatológicos referentes ao período 1950-2000 de acordo com a Figura 6.28. As áreas aptas, no entanto, correspondem a 88% do estado, ou seja, mais de 210 km². Com também mencionado, estas áreas apresentam temperatura média dos meses maio, junho, julho e agosto entre 10 e 20°C, critério adotado para sua delimitação.

Considerando-se as projeções climáticas, com o aumento das temperaturas médias mensais esperado para todas as simulações analisadas neste estudo, haverá uma diminuição considerável das áreas aptas para a maturação da cana-de-açúcar, período no qual a cultura necessita de temperatura mais baixas, entre 10 e 20°C. Assim, de acordo com os resultados das simulações provenientes do modelo HadGEM2-ES, espera-se uma diminuição de 59% e 65% para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, respectivamente, da áreas aptas para a maturação da cana-de-açúcar. De acordo com os resultados da simulação do modelo MIROC-5 haverá uma diminuição de 37% e 46% considerando os cenários RCP 4.5 e 8.5, respectivamente, inferior àquela prevista ao se analisar os resultados do modelo HadGEM2-ES. Com o aumento da temperatura nos meses mais frios, as áreas aptas tenderiam a diminuir e isso prejudicaria a maturação da cana-de-açúcar, já que esta cultura requer ambientes com temperaturas mais baixas nessa fase.

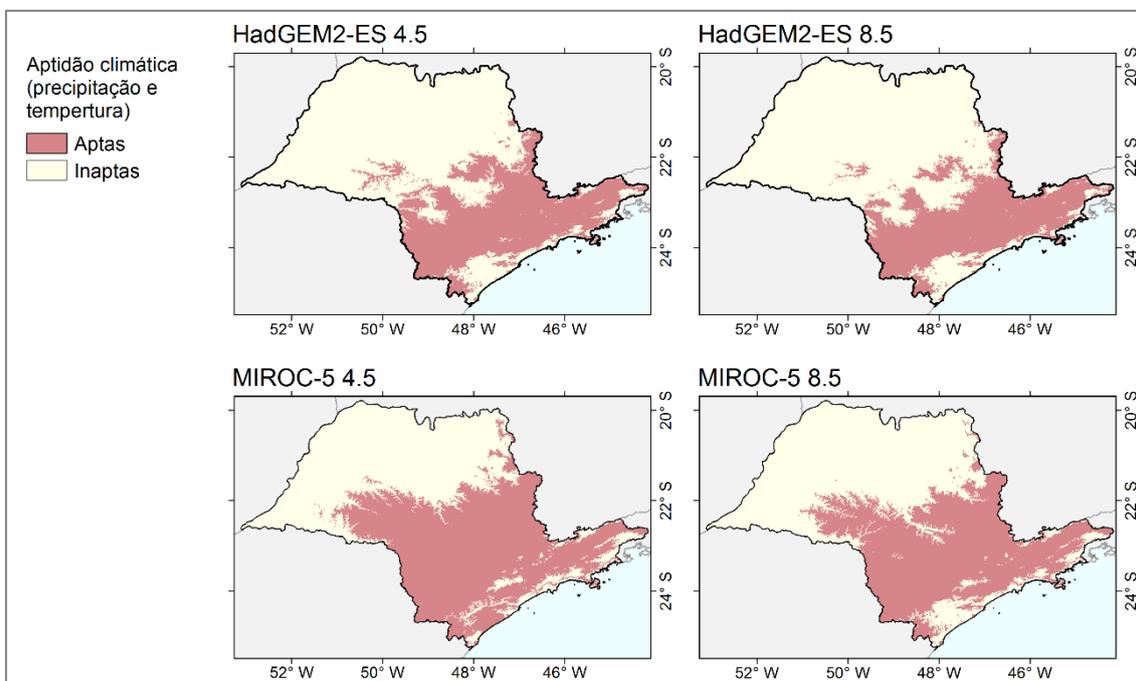
É importante salientar que esta redução das áreas aptas para a maturação da cana-de-açúcar, em termos espaciais, se dá sobretudo em áreas onde há, atualmente, o predomínio do plantio da cultura. Ou seja, as implicações da redução dessas áreas em cenários de mudanças climáticas, considerando uma projeção de médio prazo (2050), são sérias no que se refere ao suprimento de açúcar e de biocombustíveis, produto este que coloca o Estado de São Paulo como protagonista no panorama mundial.

A Figura 6.31 apresenta a intercessão entre as zonas apontadas nas figuras anteriores em relação à aptidão térmica denominadas zonas aptas totais. O Estado de São Paulo apresenta, considerando-se os dados climatológicos do

período 1950-2000, 195 mil km² de áreas aptas para o desenvolvimento da cana-de-açúcar, equivalente a 79% do estado. Ao serem consideradas as simulações dos modelos HadGEM2-ES observa-se que há uma redução de 56% e 70% para os cenários RCP 4.5 e 8.5, respectivamente. Os resultados das simulações do modelo MIROC-5, por sua vez, indicaram uma redução menor, 23% e 43% para os cenários RCP 4.5 e 8.5, respectivamente.

De acordo com estes resultados, o modelo HadGEM2-ES aponta os piores cenários para o desenvolvimento da cana-de-açúcar em 2050 considerando seus períodos fenológicos (brotamento, crescimento inicial e maturação), constatação esta justificada pelos maiores aumentos de temperatura média mensal para todos os meses como mostra a Figura 25.

Figura 6.31 - Zonas aptas totais para o cultivo da cana-de-açúcar com relação à temperatura de acordo com os resultados das simulações dos modelos HadGEM2-ES e MIROC-5 para os cenários RCP 4.5 e 8.5



6.6 Conclusões

A partir desse estudo é possível concluir que tanto o modelo HadGEM2-ES quanto o modelo MIROC-5 representaram satisfatoriamente o padrão da temperatura e da precipitação para o Estado de São Paulo para o presente.

Com relação à temperatura média mensal, as simulações provenientes do modelo HadGEM2-ES mostraram-se abaixo dos valores médios mensais climatológicos para todos os meses, enquanto que as simulações obtidas pelo modelo MIROC-5 superestimaram as temperaturas médias mensais climatológicas. Em termos médios, o modelo HadGEM2-ES subestimou a temperatura em 1,2°C e o modelo MIROC-5 superestima em 2,1°C. Portanto, com relação à temperatura, o modelo HadGEM2-ES apresentou melhor ajuste em relação aos dados climatológicos para o Estado de São Paulo.

Com relação à precipitação, de modo geral, o modelo HadGEM2-ES estimou totais de precipitações mais elevadas quando comparadas àqueles obtidos pelo modelo MIROC-5. O aumento médio em relação aos dados observados foi de 43%, ao passo que o modelo MIROC-5 apontou superestimativas de 28% para essa variável.

Já para a aptidão climática da cana-de-açúcar sob projeções de mudanças climáticas, de modo geral, considerando um aumento da precipitação, aumentarão as áreas aptas para o cultivo da cultura de 32% e 24% para os cenários RCP 4.5 e 8.5, respectivamente, a partir da análise dos resultados simulados pelo modelo HadGEM2-ES. Os resultados provenientes da simulação do modelo MIROC-5 indicam, no entanto, um aumento de 37% e 35% para os cenários RCP 4.5 e 8.5, respectivamente.

Em relação à temperatura, de modo geral, as áreas aptas para o brotamento e crescimento inicial da cana-de-açúcar irão aumentar em todos os cenários analisados em decorrência do aumento da temperatura, sobretudo nos meses de outubro a fevereiro. No entanto, o aumento da temperatura prejudicará a fase de maturação da cultura, período onde a planta requer temperaturas entre 10°C e 20°C. No total, as áreas aptas para o plantio de cana-de-açúcar se reduzirão em 56% e 70% para os cenários RCP 4.5 e 8.5, respectivamente, via simulações

do modelo HadGEM2-ES e 23% e 43% para os cenários RCP 4.5 e 8.5, respectivamente, de acordo com os resultados provenientes do modelo MIROC-5.

7 PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO BASEADA NO MODELO INTEGRADO DE PROCESSOS SUPERFICIAIS (INLAND)

7.1 Introdução

A cana-de-açúcar, principal cultura bioenergética do Brasil, tem sido foco de muitos estudos relacionados à produtividade e influências do clima, sobretudo no contexto de mudanças climáticas (MARIN et al., 2013; FERREIRA FILHO e HORRIDGE, 2014; SINGELS et al., 2014; ZHAO e LI, 2015). Assim, estudos indicam um aumento da atividade fotossintética da planta como consequência do aumento das concentrações de gás carbônico (MARIN e NASSIF, 2013; VIANNA E SENTELHAS, 2014) e também uma resposta negativa da cultura para o aumento da temperatura que aumenta as taxas de evapotranspiração e o déficit hídrico, fazendo com que a planta tenha dificuldades para se desenvolver (ZHAO e LI, 2015). Ao mesmo tempo, requer considerável demanda por irrigação de modo que o grau do impacto das mudanças do clima na cultura depende também da capacidade de adaptação dos produtores.

Santos e Sentelhas (2014) fizeram análises para a projeção da produtividade da cana-de-açúcar no Brasil e verificaram, a partir da constatação do aumento do déficit hídrico e da temperatura do ar para todos os cenários climáticos considerados, um aumento da produtividade com leve tendência de diminuição para temperaturas muito elevadas associadas à redução da taxa fotossintética.

Neste contexto, a literatura indica que a cana-de-açúcar é uma cultura sensível a mudanças climáticas e isso poderia afetar os grandes produtores mundiais de formas diferentes. Essa condição poderia ocorrer visto que as alterações no clima variam de acordo com a localização geográfica e, por essa razão, haveria aumento da frequência e da intensidade dos eventos extremos (geadas, secas, etc), os quais também variam espacialmente (ZHAO e LI, 2015).

Especificamente para o Estado de São Paulo, Monteiro e Sentelhas (2013), através da utilização do modelo da FAO (DOORENBOS e KASSAM, 1979),

apontaram regiões favoráveis para a produção da cana-de-açúcar, que são as áreas tradicionalmente produtoras, tais como: Piracicaba, Ribeirão Preto e São José do Rio Preto.

O objetivo deste estudo foi o de simular a produtividade da cana-de-açúcar para o Estado de São Paulo utilizando o Modelo Integrado de Processos Superficiais através da sua componente agrícola (INLAND/AGRO) para o período 2005-2014, denominado período “controle” e posteriormente para o período 2014-2050 utilizando as projeções climáticas RCP 4.5 e 8.5 do modelo HadGEM2-ES.

7.2 Modelo Integrado de Processos Superficiais (INLAND)

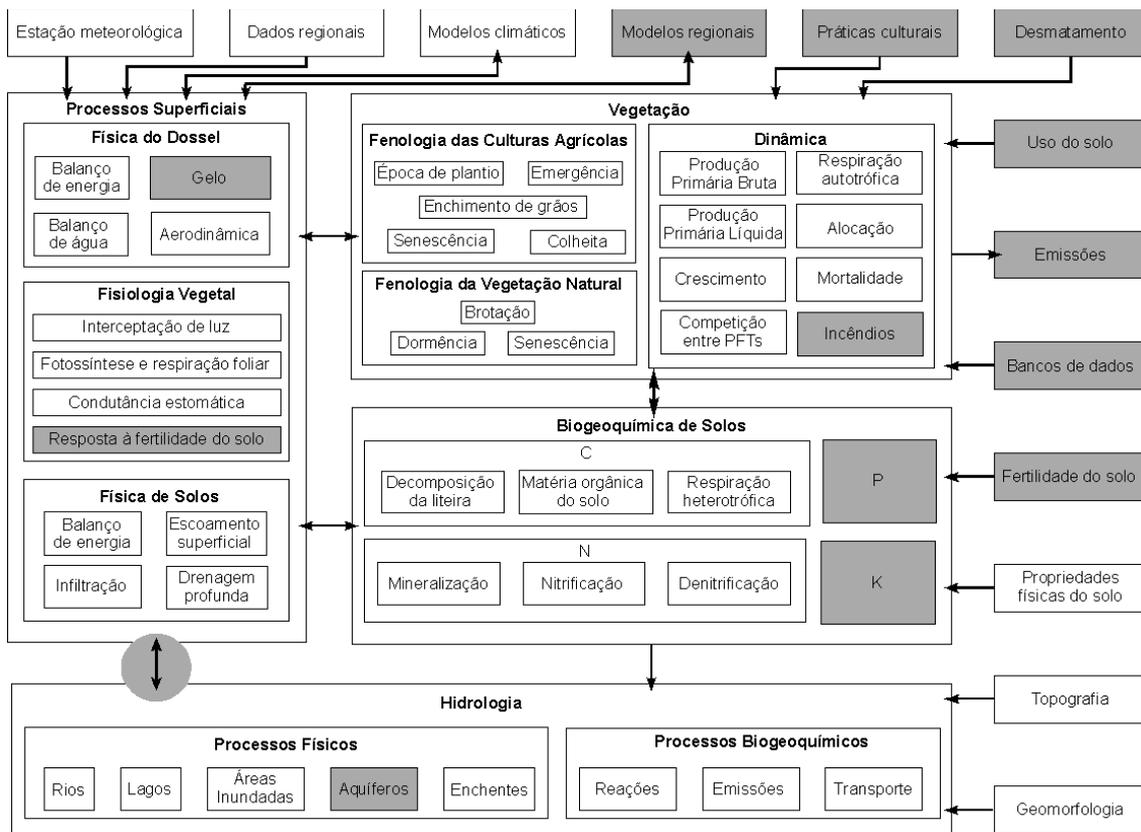
O Modelo Integrado de Processos Superficiais (INLAND) corresponde ao pacote de superfície do Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre (BESM, do inglês *Brazilian Earth System Model*) e tem sido desenvolvido através de parceria entre a Universidade Federal de Viçosa (UFV) e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. De forma geral, trata-se de um projeto em desenvolvimento e o modelo INLAND irá contemplar, quando finalizado, diversos processos que ocorrem na superfície, tais como: biofísica do dossel, incluindo balanços de água e energia, turbulência e aerodinâmica; processos de fisiologia vegetal, incluindo interceptação da radiação, fotossíntese e respiração e interações com a fertilidade do solo; física do solo, incluindo balanço hídrico e de energia, infiltração, escoamento superficial e infiltração; dinâmica da vegetação em curto prazo (fenologia); dinâmica da vegetação a longo prazo, incluindo produção primária bruta (GPP), produção primária líquida (NPP), crescimento primário e secundário, mortalidade e competição entre os tipos funcionais de plantas; distúrbios e queimadas; produtividade agrícola incluindo a fenologia da cultura agrícola e manejo (datas de plantio); processos bioquímicos do solo incluindo ciclos do carbono, nitrogênio e fósforo além de processos hidrológicos de superfícies incluindo rios, lagos, áreas úmidas e superfícies inundadas (COSTA et al., 2016).

O modelo INLAND foi baseado originalmente no modelo IBIS (*Integrated Biosphere Simulator*) descrito em Kucharik e Brie (2003) cuja estrutura básica é

apresentada na Figura 7.1. Com relação à escala temporal na qual o modelo realiza as simulações, para os processos de superfície, formados pelos subprocessos de física do dossel (balanço de energia, balanço hídrico, gelo e aerodinâmica), fisiologia vegetal (interceptação de luz, fotossíntese, condutância estomática e resposta à fertilidade do solo) e física do solo (balanço de energia, escoamento superficial, infiltração e drenagem profunda), ocorrem na escala mais rápida do modelo que corresponde à rodadas de minutos à horas. Ao ser completada uma escala diária, os processos relacionados à fenologia das plantas são acionados (simulando processos relacionados ao surgimento de folhas e senescência através do Índice de Área Folhear). Na escala de anos são simulados os processos de dinâmica da vegetação, atualizando a biomassa, quantidade de carbono, dentre outras informações.

Com relação ao módulo agrícola (AGRO), estão implementadas no modelo 4 culturas: arroz, soja, milho (anuais) e cana-de-açúcar (semi-perene). As culturas de arroz, soja e milho foram são originárias do modelo IBIS e apenas a cana-de-açúcar foi implementada exclusivamente para o INLAND conforme detalha Cuadra (2010).

Figura 7.1 - Estrutura básica do modelo INLAND



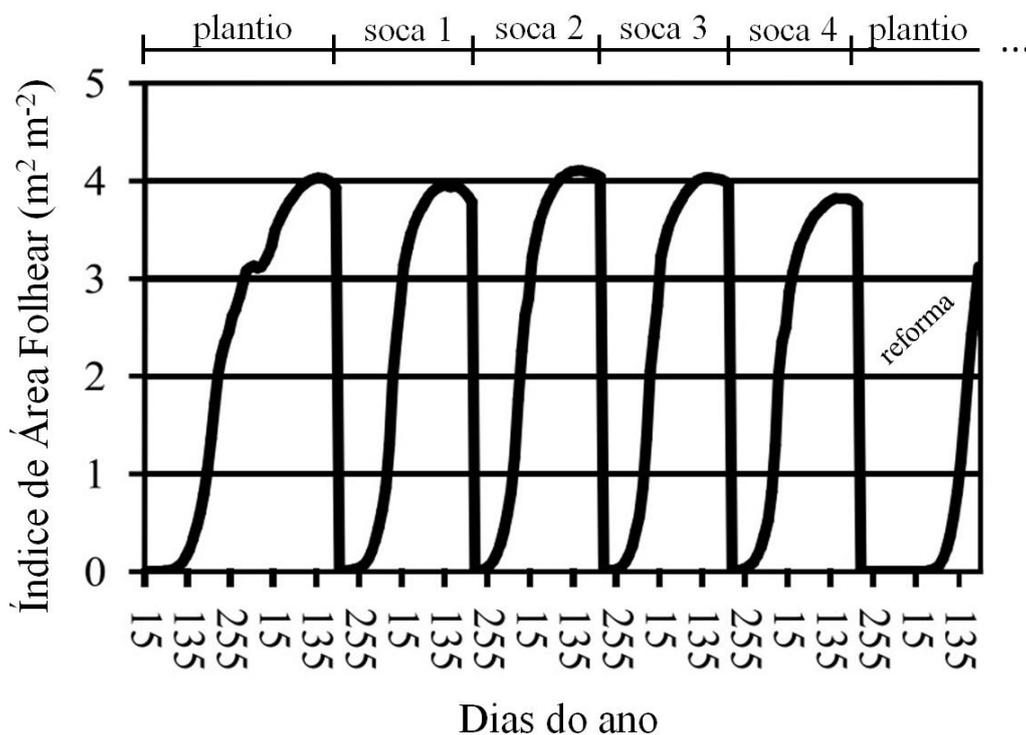
Fonte: Foley (1996)

7.3 Modelagem da produção da cana-de-açúcar

Cuadra (2010) apresentou um submodelo mecânico de crescimento da cultura da cana-de-açúcar, incluído como módulo dentro do modelo dinâmico Agro-IBIS que pode ser aplicado em múltiplas escalas espaciais, do local ao global. Este submodelo foi inserido no modelo INLAND e acoplado a modelos atmosféricos de modo que permitiu simular interações bidirecionais entre a cultura agrícola e a atmosfera. Segundo Cuadra (2010), o modelo obteve bom desempenho dos resultados para a produtividade média em algumas regiões do estado de São Paulo, apontando erros de -0,68% a +1,08%.

Com relação ao período de crescimento, Cuadra (2010) aponta que este é variável, dependente do clima e da variedade da planta (cultivar). A Figura 7.2 apresenta o ciclo de 18 meses da cana-de-açúcar simulado para o sudeste indicando o Índice de Área Folhear (LAI) ao longo do tempo.

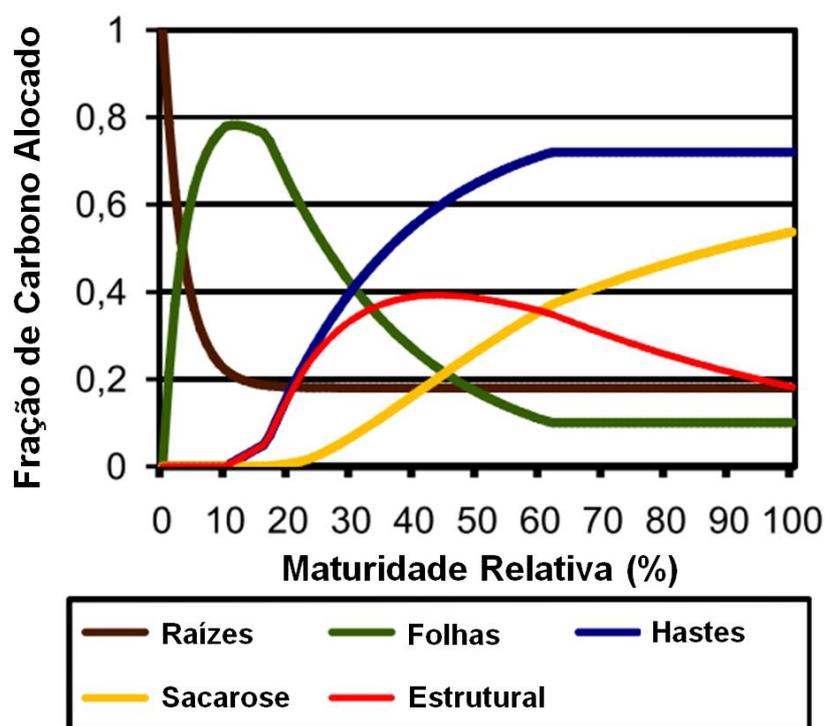
Figura 7.2 - Índice de Área Folhear (IAF) simulado para um ciclo de produtividade de cana-de-açúcar típico da região sudeste



Fonte: Adaptada de Cuadra (2010)

Sobre a alocação do carbono, Cuadra (2010) descreve que foi implementado um esquema baseado na análise de dois dos principais modelos de produtividade da cultura da cana-de-açúcar, o APSIM-*Sugarcane* (KEATING et al., 1999) e CANEGRO (SINGELS e BEZUIDENHOUT, 2005). As equações utilizadas para o esquema de alocação foram derivadas no modelo CANEGRO e correspondem a quatro compartimentos (*pools*) de alocação: folhas, raízes, tronco sucrose e tronco estrutural (as equações correspondentes a cada *pool* bem como mais detalhes sobre a implementação da cana-de-açúcar no modelo Agro-IBIS encontram-se em Cuadra, 2010) mostrados na Figura 7.3.

Figura 7.3 - Frações de alocação de carbono ao longo do ciclo da cana de açúcar



Fonte: Adaptado de Cuadra (2010)

7.4 Materiais e Método

7.4.1 Área de estudo

As simulações da produtividade da cana-de-açúcar (t/ha) foram obtidas considerando-se um retângulo que envolve o Estado de São Paulo limitado pelas coordenadas 19°S e 44°O e 16°S e 54°O.

7.4.2 Softwares e banco de dados

As simulações da produtividade utilizando o modelo INLAND/AGRO foram realizadas em sistema operacional LINUX. O ambiente computacional para a utilização do modelo requereu a instalação do compilador GFortran, do pré-processador GNU cpp e de bibliotecas NetCDF. A análise dos dados simulados

e observados foi realizada no Sistema de Informação Geográfica (SIG) ArcGIS (ESRI, 2014).

Com relação ao banco de dados foram utilizados dados observados de concentração de CO₂, temperatura do ar (°C) e totais pluviométricos (mm) do período histórico de 1950-2014 para obter as rodadas de produtividade do período 'controle', cujos anos analisados correspondem ao período 2005-2014 (MOSS et al, 2010).

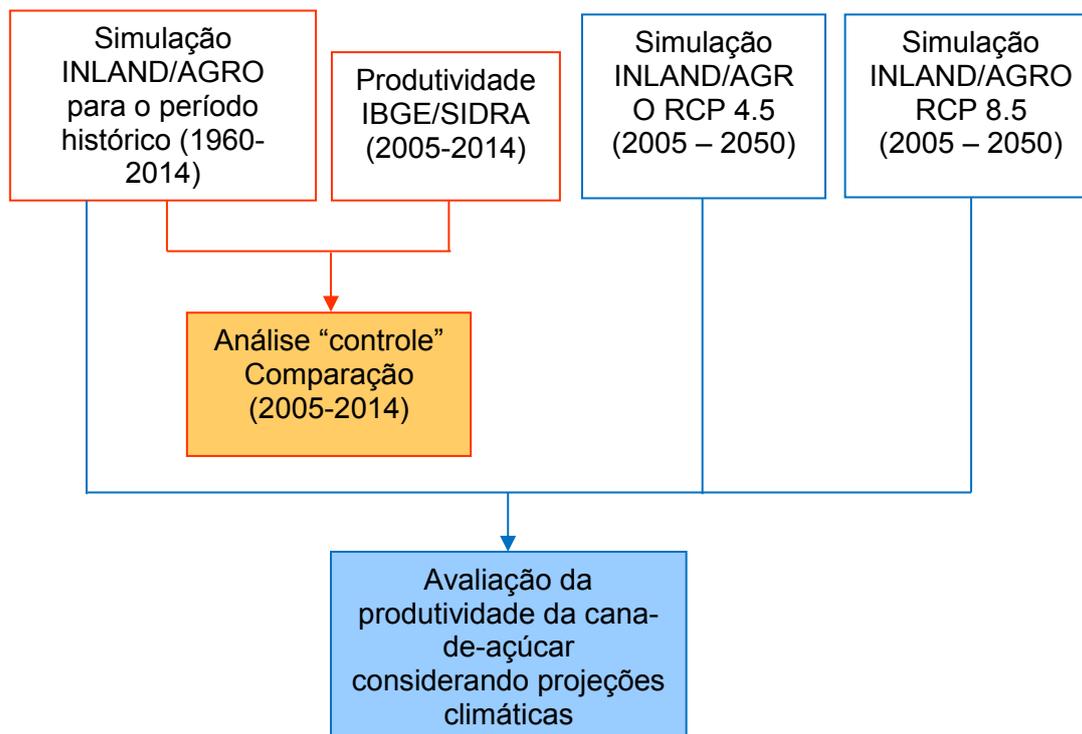
Sobre os dados observados de produtividade (t ha⁻¹) foram utilizadas as informações de Produção Agrícola Municipal disponibilizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) através do Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA) para o período de 2005-2014 (IBGE, 2016). Dados de concentração de CO₂, temperatura e precipitação históricos simulados através do modelo HadGEM2-ES foram empregados para gerar a produtividade da cana-de-açúcar também no período 1950-2014 (MOSS et al., 2010).

Para obter dados de produtividade da cana-de-açúcar no período futuro, 2014-2050, que alimentaram o modelo de expansão agrícola descrito no Capítulo 8, foram utilizados dados simulados de concentração de CO₂, temperatura e precipitação gerados pelo modelo HadGEM2-ES considerando as projeções climáticas RCP4.5 e 8.5.

7.4.3 Método

A Figura 7.4 ilustra a metodologia empregada que envolve duas fases. A primeira, "análise controle" consistiu em elaborar uma análise para o período 2005-2014 da simulação da produtividade gerada a partir do modelo INLAND/AGRO comparando estes resultados com os dados observados disponibilizados pelo IBGE/SIDRA. A segunda fase consistiu na simulação da produtividade gerada a partir do modelo INLAND para o período 2014-2050 utilizando as projeções climáticas de concentrações de CO₂, temperatura e precipitação dos RCP 4.5 e 8.5 (Moss et al., 2010).

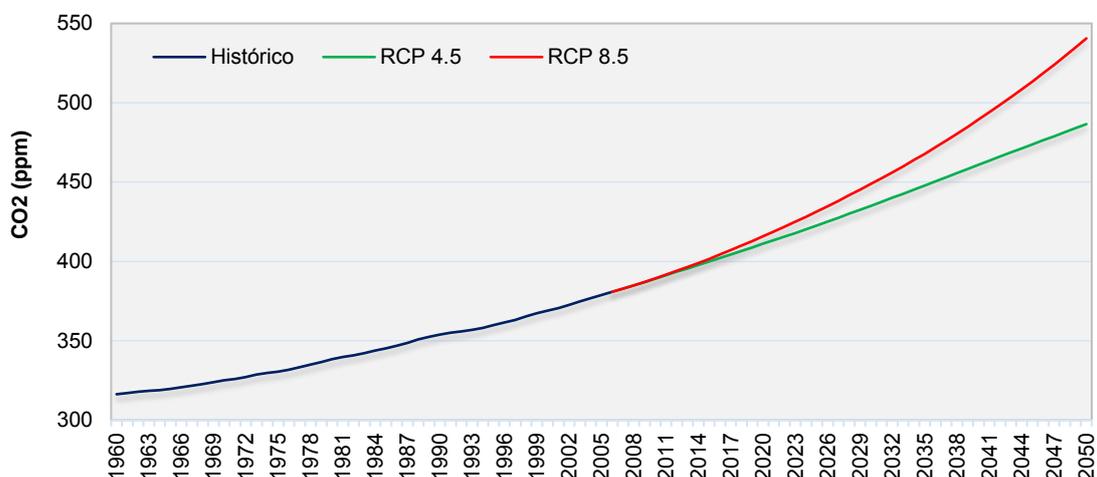
Figura 7.4 - Fluxograma geral do método para a avaliação da produtividade simulada considerando projeções climáticas



Os parâmetros do modelo INLAND/AGRO configurados estão inseridos no arquivo denominado *inland-grid.infile* e foram agrupados em 7 categorias: i) parâmetros temporais; ii) parâmetros de simulação; iii) parâmetros de saída; iv) parâmetros de simulação das culturas; v) domínio da simulação; vi) parâmetro de *subgrid* e vii) parametrização heterogênea. Para as simulações realizadas, estes arquivos foram configurados especialmente no que diz respeito ao período de simulação e dados de entrada (*input*).

Com relação às concentrações de CO₂, a Figura 7.5 mostra a evolução das concentrações usadas nas simulações. Tratam-se de valores médios anuais correspondentes a área de estudo. Os dados de temperatura e precipitação também foram atualizados anualmente durante o período de simulação e possuem resolução espacial de 0,5° como detalhado no Capítulo 6. O Capítulo 6 apontou que o modelo HadGEM2-ES subestimou as temperaturas médias anuais quando comparadas com dados climatológicos; com relação à precipitação o modelo apontou uma superestimativa média anual de 60 mm e de 44 mm para os cenários RCP 4.5 e 8.5, respectivamente.

Figura 7.5 - Concentrações de CO₂ utilizadas nas simulações da produtividade da cana-de-açúcar para o período de controle (histórico) e para o período 2005-2050 com base nas projeções climáticas RCP4.5 e 8.5 obtidas através do modelo HadGEM2-ES.



7.5 Resultados e discussões

O período de controle simulado abrangeu o intervalo 1960-2015. No entanto, para comparação com os dados observados foi avaliado apenas o período 2005-2015. O ano de 2010 foi excluído porque coincide com o ano no qual há o replantio. Ou seja, a cana soca do quarto ciclo é totalmente removida e ocorre o plantio e, no caso do modelo INLAND, pressupõe-se que há replantio após quatro ciclos de cana-soca ano e meio. A Figura 7.6 apresenta os resultados da simulação para este período e indica que os anos que apresentaram maior produtividade foram 2005 e 2011, de forma geral. A região norte do estado, para todos os anos do período, foi a que apresentou os maiores valores.

Os dados observados do IBGE (Figura 7.7) foram espacializados e interpolados para a mesma resolução dos dados simulados pelo modelo INLAND/AGRO e indicaram as variações conhecidas da produtividade da cultura em função das demandas de mercado, como o aumento verificado nas safras 2008/2009. A Figura 7.8 apresenta a comparação entre os resultados apontados a Figura 7.6 e os dados observados do IBGE (Figura 7.7). De forma geral, as regiões onde

os resultados simulados foram mais discrepantes estão localizadas na porção sul do estado que, segundo o Zoneamento Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro do estado é definida como inadequada do ponto de vista edafoclimático (Figura 7.9). Por este motivo, a Resolução Estadual de Meio Ambiente do Estado de São Paulo número 88 (SÃO PAULO, 2008) impediu a instalação ou ampliação de empreendimentos existentes do setor sucroalcooleiro nessas regiões a partir de 2008, embora os dados observados (IBGE/SIDRA) na Figura 7.7 apontem expansão nessas regiões.

Figura 7.6 - Produtividade simulada através do modelo INLAND/AGRO utilizando dados históricos observados de concentração de CO₂, precipitação e temperatura (período controle) para o Estado de São Paulo

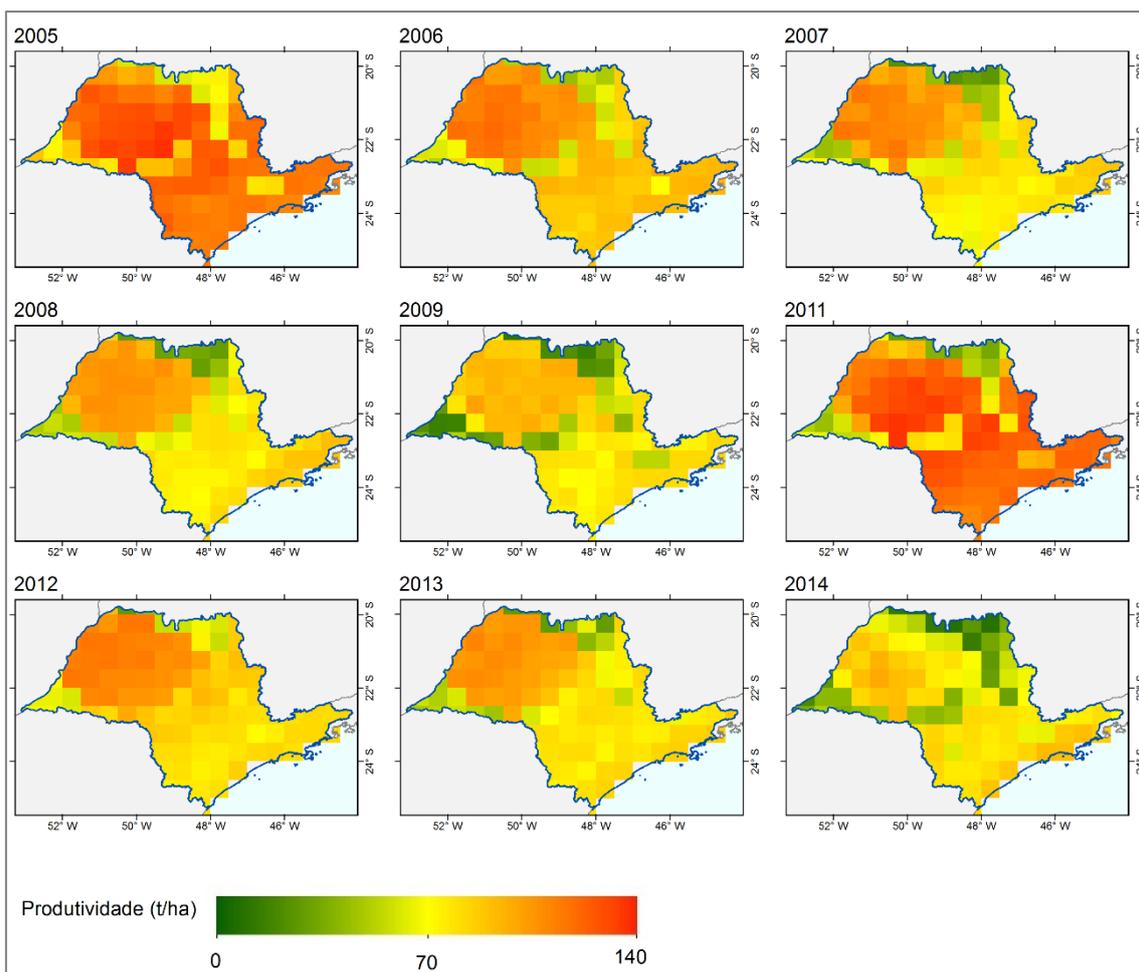
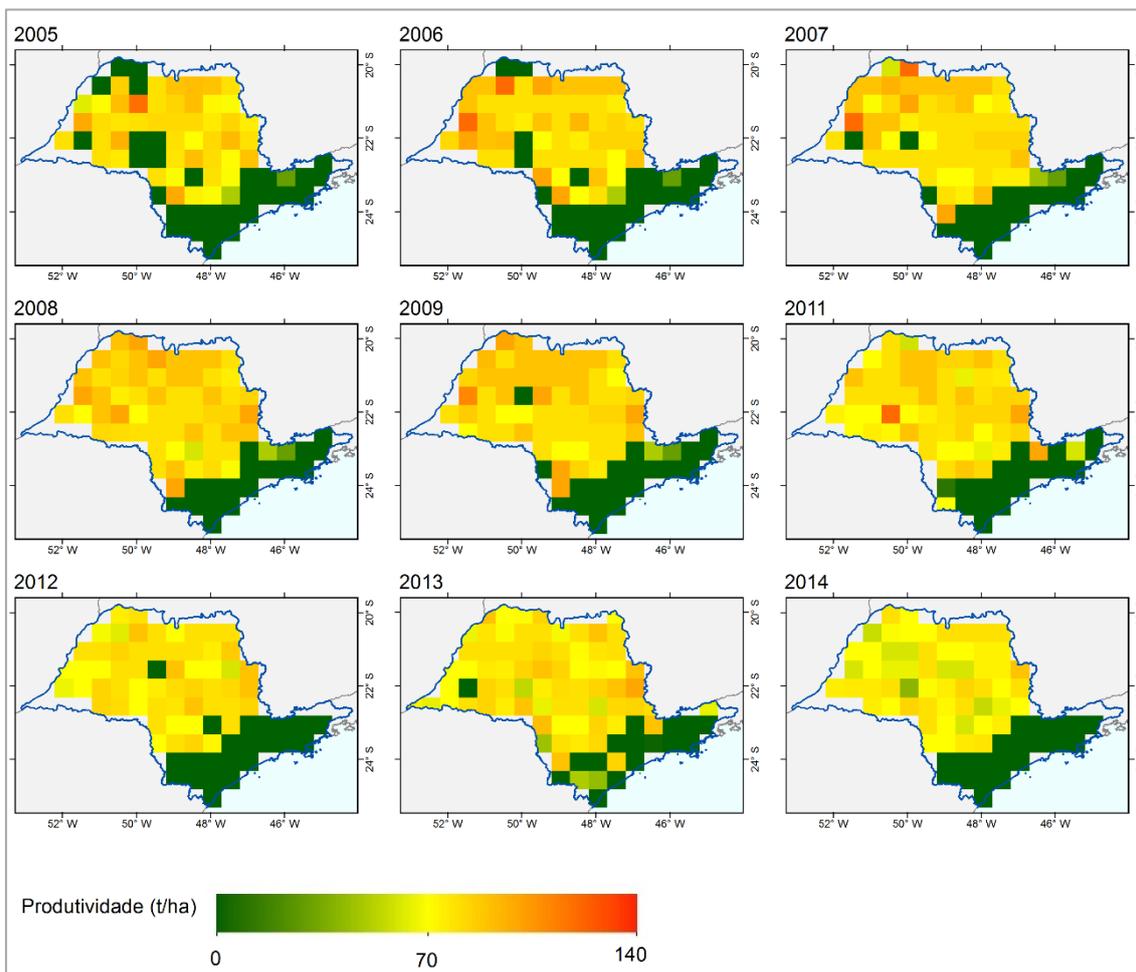


Figura 7.7 - Produtividade observada para o período 2005-2014 para o Estado de São Paulo



Fonte: IBGE/SIDRA

Figura 7.8 - Erro estimado entre a produtividade observada e a produtividade estimada para o Estado de São Paulo

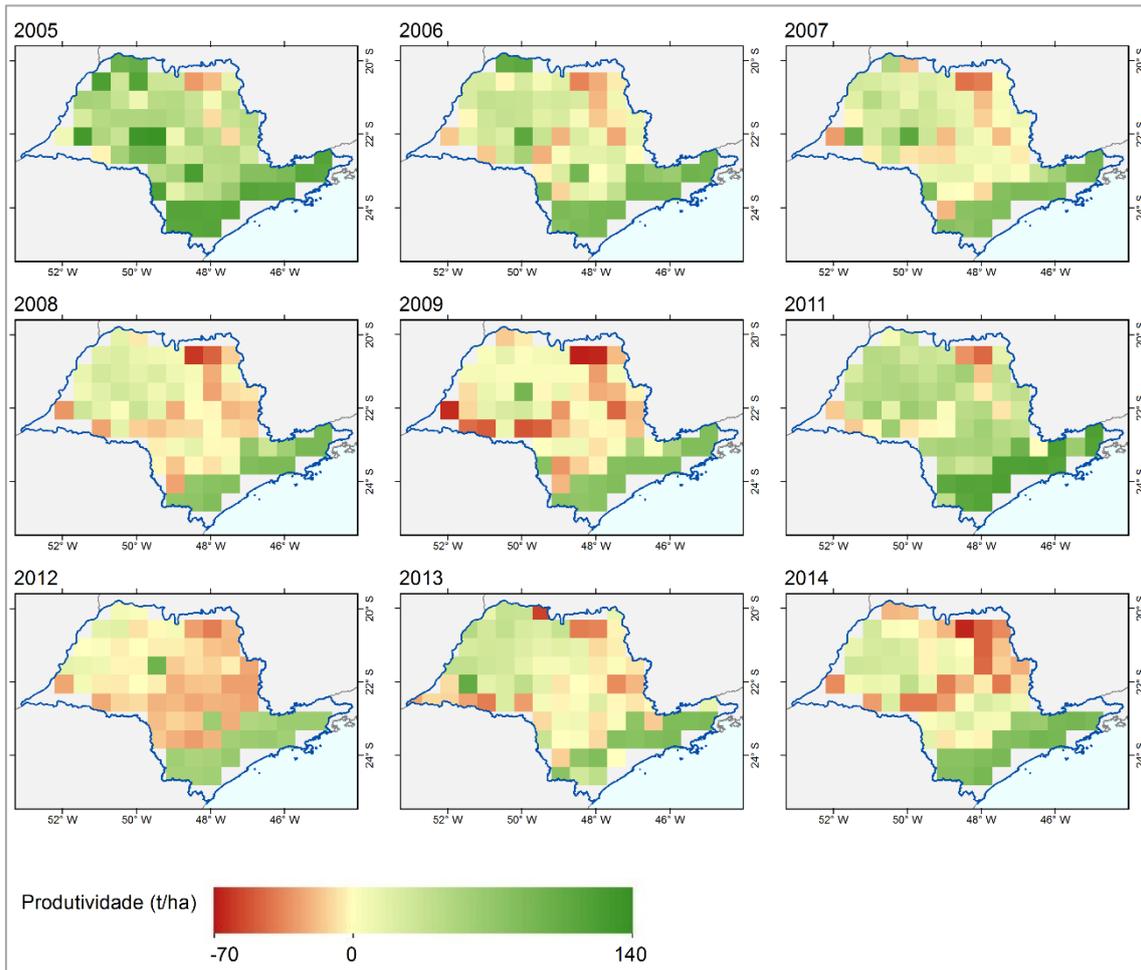
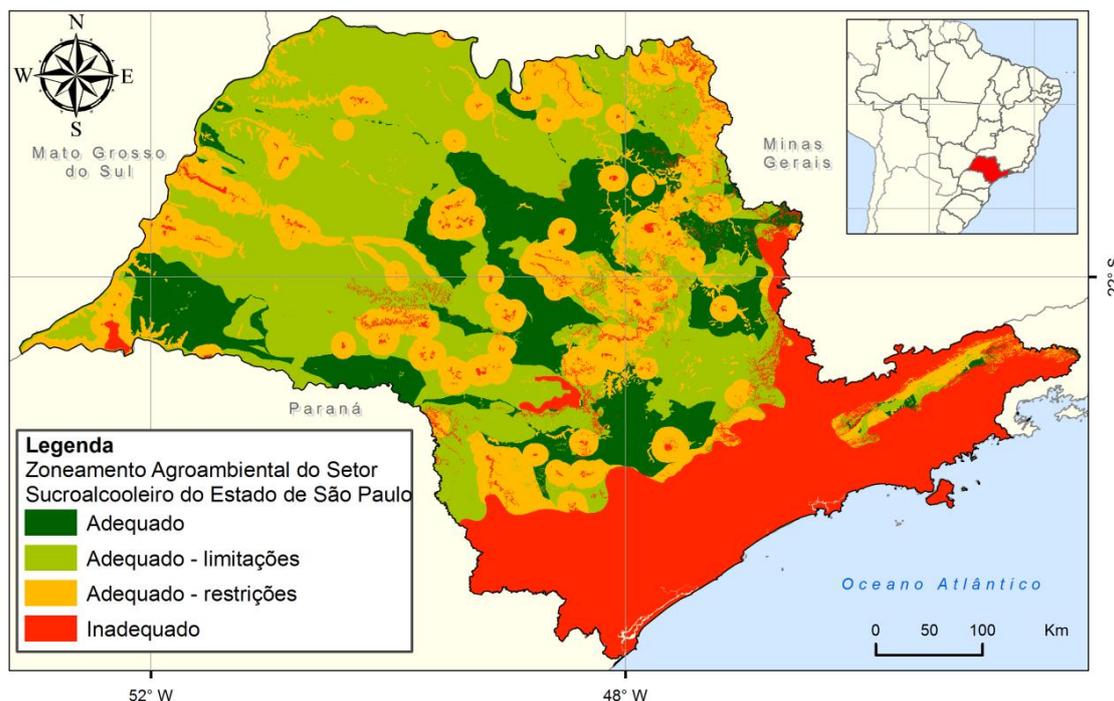


Figura 7.9 - Zoneamento Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro do Estado de São Paulo.



Fonte: Instituto Agrônômico/APTA.

A Figura 7.10 aponta a produtividade simulada para o ano de 2014 considerando as projeções climáticas RCP 4.5 e 8.5 obtidas através do modelo HadGEM2-ES. A produtividade média encontrada para todo o Estado de São Paulo baseando-se nas projeções climáticas RCP 4.5 foi de 23 Mg ha⁻¹, sendo que o valor mínimo encontrado foi de 5,14 Mg ha⁻¹ e o valor máximo 40,6 Mg ha⁻¹. Para as projeções do RCP 8.5 a produtividade média obtida foi de 70 Mg ha⁻¹ enquanto o valor mínimo foi de 9 Mg ha⁻¹ e o valor máximo 99 Mg ha⁻¹. Esta data foi escolhida como base para o cálculo do incremento de produtividade utilizado nas simulações da expansão da área cultivada com cana-de-açúcar apresentada no Capítulo 8 como mostram as Figuras 7.11 e 7.12. A Figura 7.11 aponta o incremento de produtividade para os anos de 2020, 2025, 2030, 2035, 2039, 2045 e 2050 com relação ao ano de 2014 de acordo com as simulações obtidas pelo modelo INLAND/AGRO baseadas nas projeções climáticas RCP 4.5. Podemos observar que as simulações indicaram aumento da produtividade para todos estes anos considerados, exceto para algumas regiões do ano de 2020 e 2045. O período 2014-2035 foi o que apresentou maior acréscimos, seguido pelo

período 2014-2030. Com relação às projeções climáticas RCP 8.5, todos os períodos apresentam, no geral, aumento da produtividade da cana-de-açúcar, porém na região oeste do estado, nos períodos 2014-2020, 2014-2030 e 2014-2035, notou-se acentuadas diminuições.

Os gráficos apresentados nas Figuras 7.13 e 7.14 mostram a evolução da produtividade média, mínima e máxima simuladas para o Estado de São Paulo no período 2014-2050 considerando as projeções climáticas RCP 4.5 e 8.5, respectivamente, do modelo HadGEM2-ES. De maneira geral, as simulações considerando as projeções climáticas RCP 8.5 indicam produtividades da cana-de-açúcar superiores às indicadas pelas simulações do RCP 4.5. Ou seja, as condições climáticas e as concentrações de CO₂ (Figura 7.5) estimularam a cultura de modo que aumentou a eficiência fotossintética da planta como apontam os estudos de Singels et al. (2013), Santos e Sentelhas (2014) e Zhao e Li (2015), por exemplo. Os mapas que contam nessas figuras mostram aumento da produtividade da cana-de-açúcar para o estado de São Paulo em todo o período nos dois casos, tanto em termos de produtividade média quanto produtividade máxima como mostram as respectivas equações de regressão.

Apenas é prevista diminuição da produtividade mínima das simulações considerando as projeções climáticas RCP 4.5.

Figura 7.10 - Produtividade simulada para o ano de 2014 baseada em projeção climática para o Estado de São Paulo

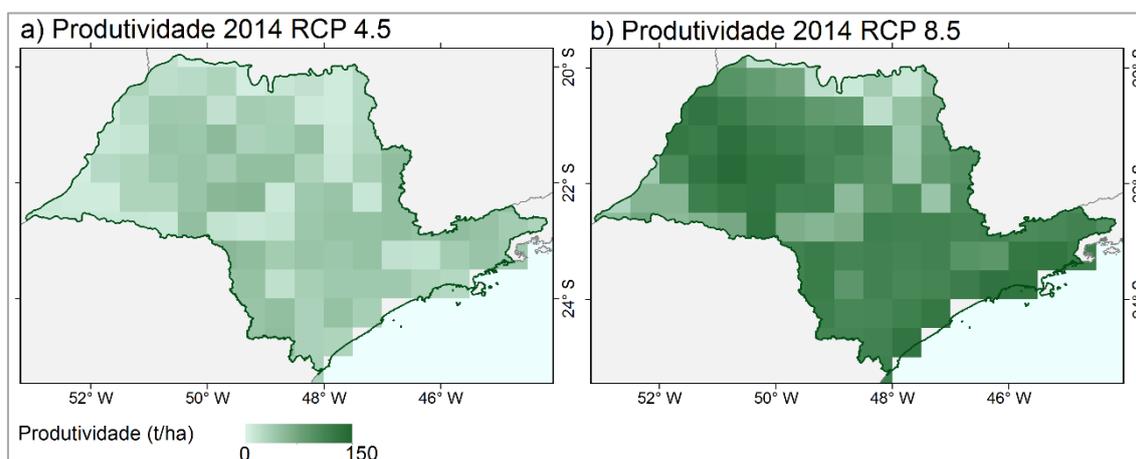


Figura 7.11 - Incremento da produtividade simulada em relação ao ano de 2014 baseado em projeção climática RCP 4.5 para o Estado de São Paulo

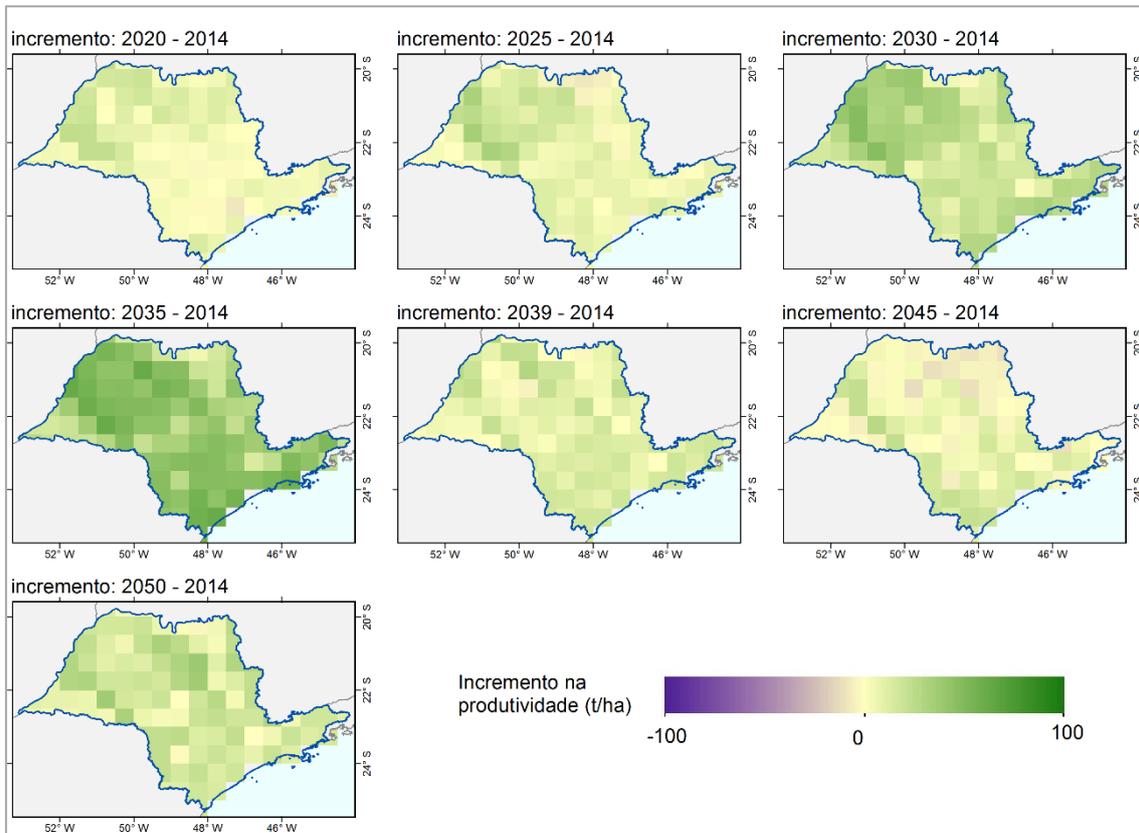


Figura 7.12 - Incremento da produtividade simulada em relação ao ano de 2014 baseado em projeção climática RCP 8.5 para o Estado de São Paulo

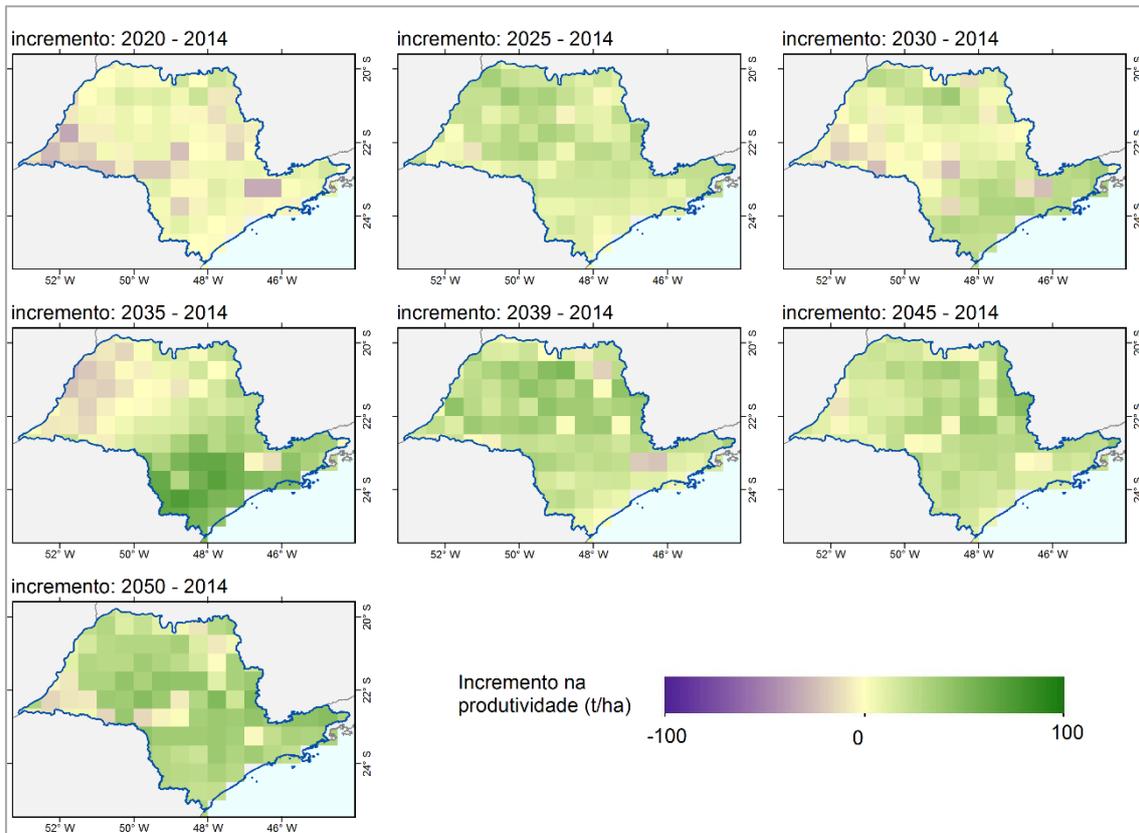


Figura 7.13 - Evolução da produtividade média, mínima e máxima simuladas para o Estado de SP considerando a projeção climática RCP 4.5

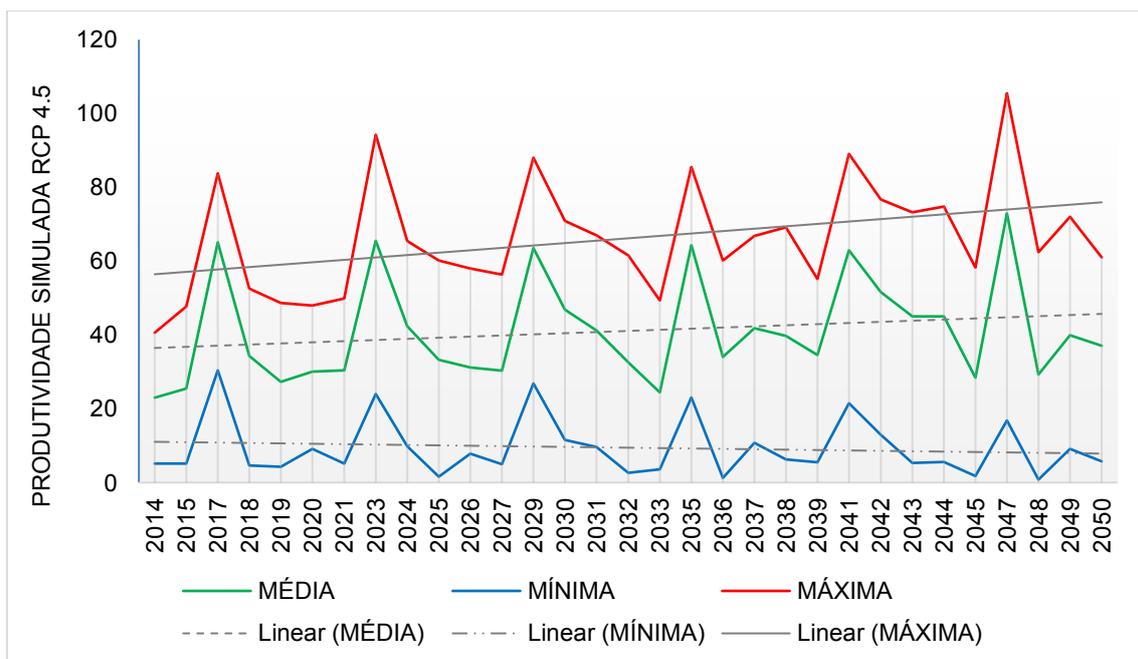
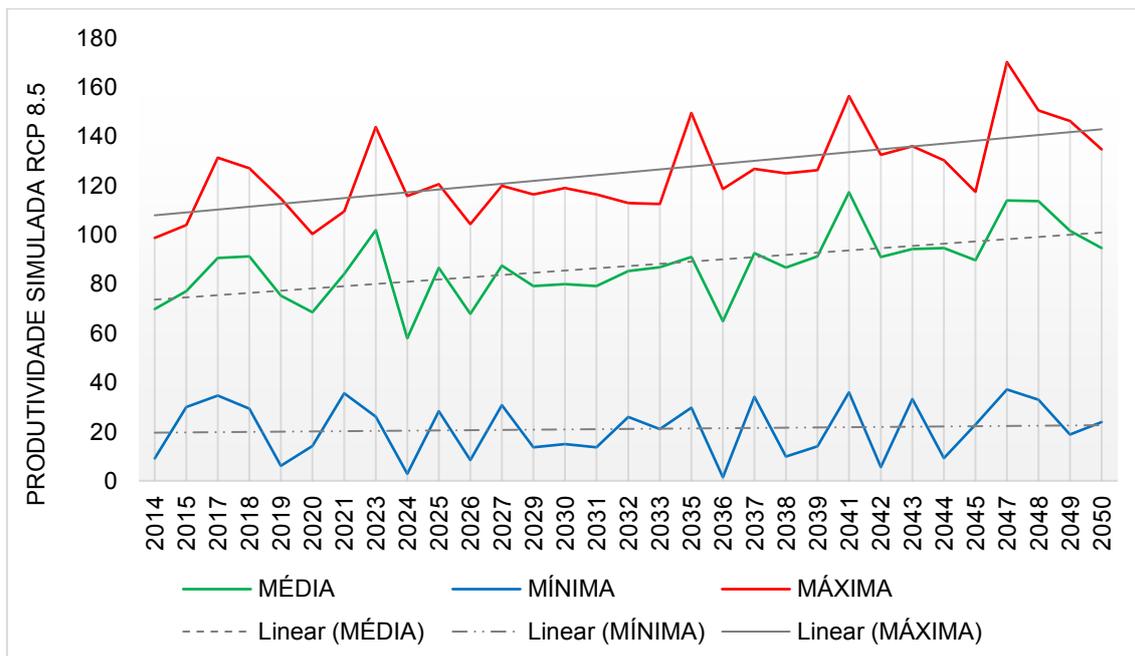


Figura 7.14 - Evolução da produtividade média, mínima e máxima simuladas para o Estado de SP considerando a projeção climática RCP 8.5



7.6 Conclusões

Este estudo concluiu que as projeções climáticas RCP 8.5 obtidas a partir do modelo HadGEM2-ES contribuem para um aumento da produtividade da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, uma vez que as concentrações de CO₂ mais elevadas são responsáveis pelo aumento da taxa de fotossíntese da cultura.

As simulações considerando as projeções climáticas RCP 4.5 obtidas pelo modelo HadGEM2-ES apresentaram-se inferiores às projeções baseadas no RCP 8.5, embora também tenham apresentado aumento da produtividade para esse estado.

8 MODELAGEM DA EXPANSÃO DA ÁREA CULTIVADA COM CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO

8.1 Introdução

No âmbito da Ciência Ambiental, diversos trabalhos têm considerado modelos matemáticos para representar situações relativas ao meio natural e/ou criadas pelo homem para alterar o meio ambiente e apontar comportamentos futuros (CHRISTOFOLETTI, 1999). Dessa forma, alguns exemplos de aplicações desses modelos podem ser listados, tais como: degradação do ambiente natural (AGUIAR et al., 2007; OMETTO et al., 2011; LAPOLA et al., 2014), processos hidrológicos (XU et al., 2005; MELLO et al., 2016; MONTEIRO et al., 2016; SPERA et al., 2016), desastres naturais (CAMARINHA et al., 2014; HADDAD e TEIXEIRA, 2015), mudanças climáticas (Marin e Nassif, 2013), expansão agrícola (FERREIRA FILHO e HORRIDGE, 2014; SPAROVEK et al., 2012; SPAROVEK et al., 2009), dentre outras aplicações, em diversas escalas espaço-temporais.

A cana-de-açúcar é um dos principais produtos agrícolas do Estado de São Paulo. Sua participação no valor da produção agropecuária e florestal total do estado em 2014 foi de 42,55%, equivalente a R\$25,47 bilhões (SILVA et al., 2015). Frente à importância econômica da cultura para a região e para o Brasil, diversas pesquisas têm sido desenvolvidas com o objetivo de compreender o desenvolvimento da cana-de-açúcar no que diz respeito, principalmente, à produtividade agrícola (MARIN et al., 2013; MARIN e JONES, 2014) e à área cultivada (LAPOLA et al., 2009; SPAROVEK et al., 2009; FERREIRA FILHO e HORRIDGE, 2014; ARCOVERDE, 2014; MARIN et al., 2016).

Em relação à modelagem de expansão da cana-de-açúcar, há dois tipos de abordagens: i) a primeira consiste na estimativa da produtividade futura com o objetivo de guiar a expansão industrial, o mercado, o gerenciamento de práticas de conservação e de irrigação (LISSON et al., 2005), através da exploração de *drivers*, ou seja, de fatores que condicionam a variação da produção,

principalmente climáticos; ii) a segunda abordagem busca indicar as áreas para onde a cultura irá avançar, mediante um conjunto de variáveis potencialmente determinantes, onde são relacionadas tanto variáveis bioclimáticas, que definem a aptidão, como apresentado no Capítulo 6, quanto àquelas relacionadas a aspectos socioeconômicos definidos principalmente pelas demandas dos mercados internos e externos, a fatores de infraestrutura e à políticas públicas (MARIN e CARVALHO, 2012).

Com relação às escalas espaciais em estudos de expansão da cana-de-açúcar, em nível local pode-se citar o trabalho de Arcoverde (2014) que, por meio de sensoriamento remoto e modelagem dinâmica espacial por autômatos celulares, identificou áreas de expansão da cana-de-açúcar para o município de Quirinópolis e Galharte (2011) para nível mais amplo, que aplicou o modelo CLUE-S (*Conversion of Land Use and its Effects at small region extent*) para duas regiões, a microbacia hidrográfica do Ribeirão das Guabiobas (localizada em São Carlos/SP) e para a microbacia hidrográfica córrego da Onça (Ilha Solteira/SP e Itapura/SP).

O objetivo deste estudo foi o de criar um modelo capaz de simular a expansão da área cultivada com cana-de-açúcar para o Estado de São Paulo utilizando o arcabouço de modelagem LuccME, desenvolvido no Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

8.2 Área de estudo

Neste capítulo, o Estado de São Paulo foi dividido em 16097 células regulares de 16 km². Todos os fatores determinantes potenciais da localização espacial das áreas com cultivo de cana-de-açúcar foram decompostos nestas células.

8.3 Softwares e banco de dados

O banco de dados foi implantado no *software* TerraView 4.2.0 (INPE, 2015a). Trata-se de um aplicativo construído sobre a biblioteca de geoprocessamento

TerraLib (INPE, 2015b) que tem como objetivo ser uma alternativa para a visualização, manipulação e análise de dados vetoriais e matriciais em banco de dados geográficos.

A compatibilização das bases cartográficas e as análises de parte dos resultados foram realizadas no *software* ArcGIS 10.0 (ESRI, 2014). Por se tratar de uma área de estudo com dimensões regionais, utilizou-se a projeção Policônica considerando-se -49° como meridiano central e o *Datum World Geodetic System* definido em 1984 (D_WGS_1984). Os fatores determinantes potenciais para explicar a expansão da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo foram integrados no espaço celular de resolução espacial de 4 km². Um espaço celular consiste na representação do espaço por uma estrutura matricial generalizada onde cada célula está associada a vários tipos de atributos (CÂMARA, 2005).

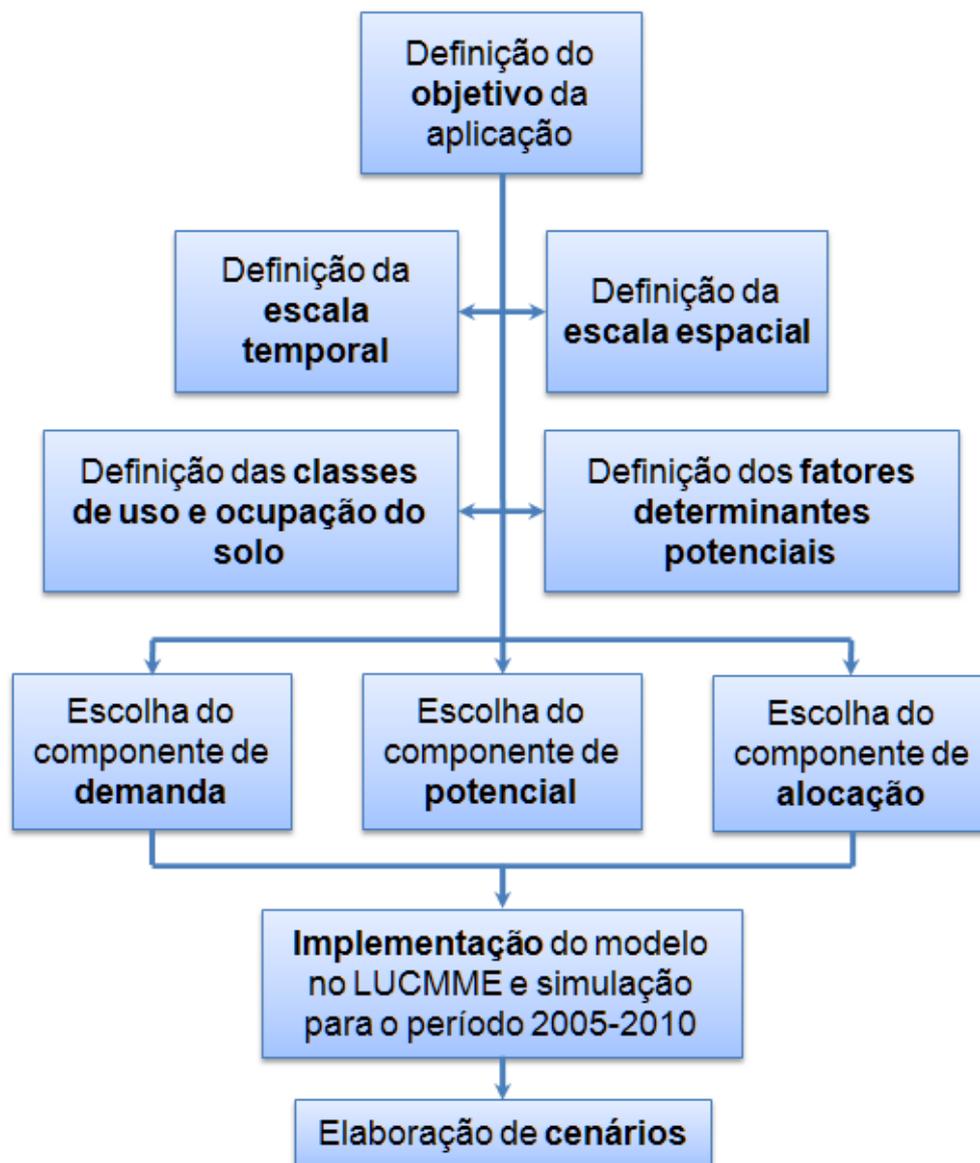
As simulações foram realizadas no *software* LuccME versão 2.1 (*Land Use and Cover Change*) lançado oficialmente em dezembro de 2015 e desenvolvido pelo Centro de Ciência do Sistema Terrestre do INPE e colaboradores. Trata-se de um arcabouço para modelagem de uso da terra espacialmente explícita que permite construir modelos para análise de desmatamento, expansão agrícola, desertificação, degradação florestal, crescimento urbano e outros processos de mudanças de uso e cobertura da terra em diversas escalas e áreas de estudo. Maiores informações sobre essa ferramenta podem ser encontradas em <http://luccme.ccst.inpe.br/>.

8.4 Método

O modelo de expansão da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo foi construído conforme o fluxograma apresentado pela Figura 8.1. De forma sintética, a construção do modelo iniciou-se com discussões e pesquisas na literatura relacionadas aos fatores biofísicos e econômicos que potencialmente poderiam influenciar na dinâmica da expansão da cultura no estado. Estes fatores, juntamente com os mapas de uso da terra, compuseram o banco de dados e alimentaram posteriormente o plano celular. Em seguida foi realizada análise exploratória (métodos estatísticos) das possíveis variáveis que poderiam

ocasionar a expansão da cana-de-açúcar no estado de São. Modelos de regressão para determinar o potencial das células em receber o uso 'cana-de-açúcar' indicaram as variáveis a serem consideradas como influentes no processo de expansão da cana. A seguir, as etapas metodológicas serão discutidas detalhadamente.

Figura 8.1 - Etapas metodológicas para a construção do modelo de expansão da cana-de-açúcar para o Estado de São Paulo



Fonte: Adaptado de Aguiar et al. (2015)

8.4.1 Definição do objetivo da aplicação do software LuccME

O objetivo da aplicação das ferramentas de modelagem contidas no *software* LuccME foi o de construir um modelo capaz de simular a dinâmica da expansão da área cultivada com cana-de-açúcar no estado de São Paulo e gerar um cenário para 2050.

8.4.2 Definição da escala temporal

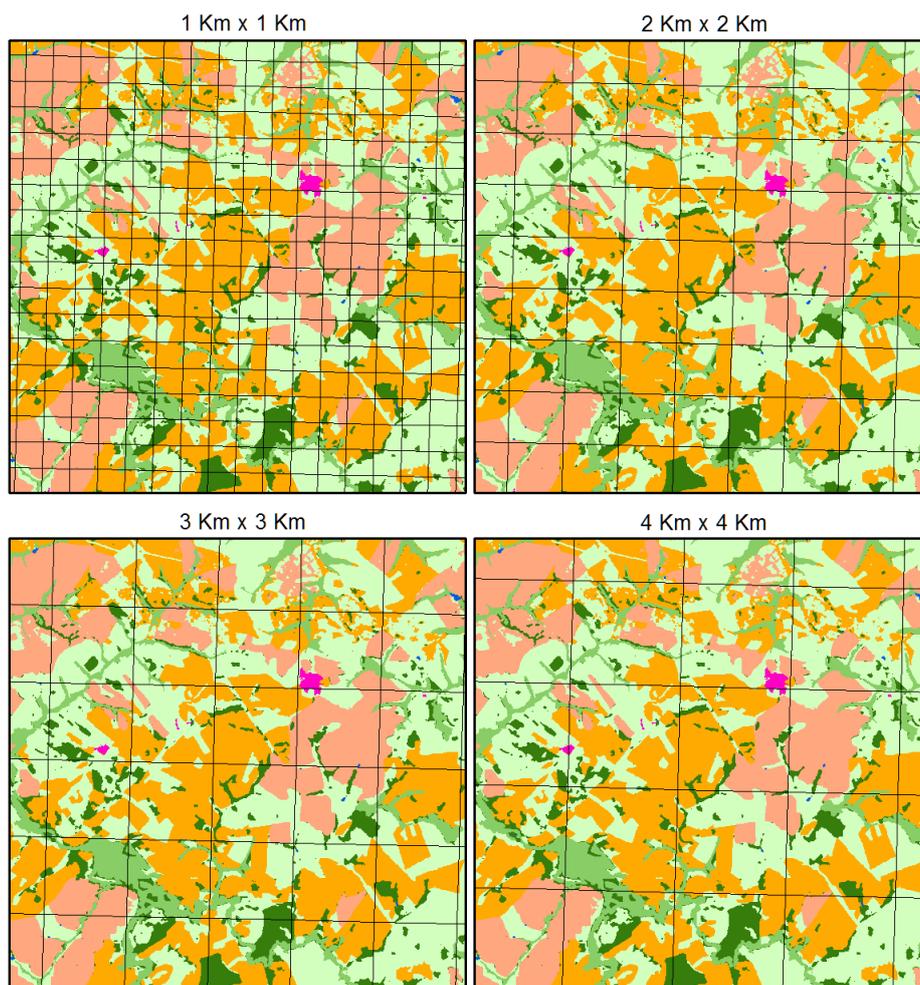
A definição da escala temporal do modelo (ou período de simulação) foi baseada no período de dados dos levantamentos das áreas cultivadas com cana-de-açúcar realizados pelo Projeto CANASAT (RUDORFF et al., 2010). Os dados adquiridos pertencem ao período 2004-2012 e, por esta razão, optou-se por simular o período 2005-2010 e validar o ano de 2012.

8.4.3 Definição da escala espacial

A escolha da escala espacial teve como critério a resolução espacial dos dados disponíveis do Projeto CANASAT e do mapa de uso e ocupação do solo em São Paulo. Com relação ao mapa de uso e ocupação do solo, utilizou-se o ano de 2005 o qual foi disponibilizado em formato digital (".geotiff") pela Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SÃO PAULO, 2013) e apresenta resolução espacial de 1:100.000; já os dados dos levantamentos das áreas cultivadas com cana-de-açúcar realizados pelo Projeto CANASAT possuem resolução espacial de 1:50.000. Estas duas informações foram analisadas considerando quatro grades regulares, 1 km², 4 km², 9 km² e 16 km² (Figura 8.2), com o intuito de verificar onde haveria menor perda de informação ao ser preenchido o plano celular. Neste caso, o plano celular regular de 1 km² foi considerado o mais adequado, mas testes iniciais mostraram que a capacidade e processamento dos computadores disponíveis limitariam a construção do modelo. Optou-se, então, pela utilização de um plano celular regular de 16 km² totalizando 16097 células em todo o Estado de São Paulo.

Neste momento optou-se pela utilização de algoritmos contínuos, ou seja, as variáveis de uso e ocupação do solo seriam preenchidas no plano celular de modo que cada célula contivesse o valor de percentagem de cada uso e não apenas o uso majoritário correspondente à mesma.

Figura 8.2 - Grades regulares utilizadas para a escolha do tamanho das células do plano de preenchimento das células com cana-de-açúcar.



8.4.4 Definição das classes de uso e ocupação do solo

As classes de uso são requeridas para se computar os valores de demanda, ou seja, cada categoria de uso e ocupação do solo de cada ano simulado apresenta uma determinada área a ser alocada com a cana-de-açúcar, de acordo com o

potencial de cada célula. Para esta etapa foi utilizado o levantamento de uso e ocupação do solo na escala de 1:50.000 da Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SÃO PAULO, 2013) do ano de 2005, além dos mapeamentos realizados pelo projeto CANASAT (2005-2012). Segundo o mapeamento de uso e ocupação do solo em 2005, o estado apresentou, nesse ano, 15% da sua área recoberta por cana-de-açúcar (indicada como cultura semi-perene), 53% por pastagem e 20% por mata. Os demais usos somaram 12% e correspondem as áreas dos aeroportos, corpos hídricos, área urbana, campos úmidos, mata ciliar, cerrado, culturas anuais e perenes, indústria, mangues, restinga e reflorestamento como ilustra a o mapa apresentado na Figura A4 do Apêndice A.

Diante da dificuldade na aquisição e/ou inexistência de mapeamentos de uso e ocupação das terras do Estado de São Paulo, assumimos que a variação espaço-temporal das áreas dos usos os usos aeroportos, indústrias, mineração, água e área urbana foi tomada como constante sendo considerados, portanto, estáticos. Esta premissa permitiu que construíssemos mapas de uso da terra para os anos no período de 2005 - 2012 com três categorias: 1) 'cana', mapeada pelo projeto CANASAT; 2) 'outros', classe referente aos usos estáticos (aeroportos, indústrias, mineração, água e área urbana) e 3) diversos, composto pelas áreas que não fazem parte de nenhuma das categorias anteriores. Assim, esta última categoria foi definida através da subtração entre a área total do estado (A_T) e a soma das áreas das categorias 'cana-de-açúcar' e 'outros'. A área da categoria 'diversos' é, portanto, variável, uma vez que é função da área cultivada com cana-de-açúcar (ver o resumo da construção desses mapas na Tabela 8.1).

Os mapas de uso e ocupação do solo empregados no exercício de modelagem da expansão da área cultivada com cana-de-açúcar no Estado de São Paulo são apresentados nas Figuras 8.3 a 8.8. A utilização destes mapas na modelagem da expansão da cana-de-açúcar, no entanto, implica na limitação em discutir sobre a competição entre os usos no período simulado, porém não prejudica a análise da dinâmica da expansão das áreas cultivadas com a cultura.

Em se tratando da dinâmica temporal da expansão da cana-de-açúcar no estado, a Tabela 8.2 mostra a comparação de indicadores quantitativos (área). No período de 2005 - 2010 houve um acréscimo de 32% área cultivada no estado que representou a conversão de quase 2 milhões ha em plantações de cana-de-açúcar.

Tabela 8.1 - Montagem dos mapas de uso e ocupação do solo (A_T refere-se a área total do Estado de São Paulo)

ANO	CATEGORIA 1: CANA-DE-AÇÚCAR		CATEGORIA 2: DIVERSOS		CATEGORIA 3: OUTROS	
2005	MAPEAMENTO CANASAT_SP_2005	CANA05	A _T - (MAPEAMENTO CANASAT_SP_2005 + OUTROS)	DIVERSOS05	AEROPORTOS, INDÚSTRIAS, MINERAÇÃO, ÁGUA E ÁREA URBANA (2005)	OUTROS05
2006	MAPEAMENTO CANASAT_SP_2006	CANA06	A _T - (MAPEAMENTO CANASAT_SP_2006 + OUTROS)	DIVERSOS06	AEROPORTOS, INDÚSTRIAS, MINERAÇÃO, ÁGUA E ÁREA URBANA (2005)	OUTROS06
2007	MAPEAMENTO CANASAT_SP_2007	CANA07	A _T - (MAPEAMENTO CANASAT_SP_2007 + OUTROS)	DIVERSOS07	AEROPORTOS, INDÚSTRIAS, MINERAÇÃO, ÁGUA E ÁREA URBANA (2005)	OUTROS07
2008	MAPEAMENTO CANASAT_SP_2008	CANA08	A _T - (MAPEAMENTO CANASAT_SP_2008 + OUTROS)	DIVERSOS08	AEROPORTOS, INDÚSTRIAS, MINERAÇÃO, ÁGUA E ÁREA URBANA (2005)	OUTROS08
2009	MAPEAMENTO CANASAT_SP_2009	CANA09	A _T - (MAPEAMENTO CANASAT_SP_2009 + OUTROS)	DIVERSOS09	AEROPORTOS, INDÚSTRIAS, MINERAÇÃO, ÁGUA E ÁREA URBANA (2005)	OUTROS09
2010	MAPEAMENTO CANASAT_SP_2010	CANA10	A _T - (MAPEAMENTO CANASAT_SP_2010 + OUTROS)	DIVERSOS10	AEROPORTOS, INDÚSTRIAS, MINERAÇÃO, ÁGUA E ÁREA URBANA (2005)	OUTROS10
2011	MAPEAMENTO CANASAT_SP_2011	CANA11	A _T - (MAPEAMENTO CANASAT_SP_2011 + OUTROS)	DIVERSOS11	AEROPORTOS, INDÚSTRIAS, MINERAÇÃO, ÁGUA E ÁREA URBANA (2005)	OUTROS11
2012	MAPEAMENTO CANASAT_SP_2012	CANA12	A _T - (MAPEAMENTO CANASAT_SP_2012 + OUTROS)	DIVERSOS12	AEROPORTOS, INDÚSTRIAS, MINERAÇÃO, ÁGUA E ÁREA URBANA (2005)	OUTROS12

Figura 8.3 - Categorias cana-de-açúcar, demais uso e estática em 2005

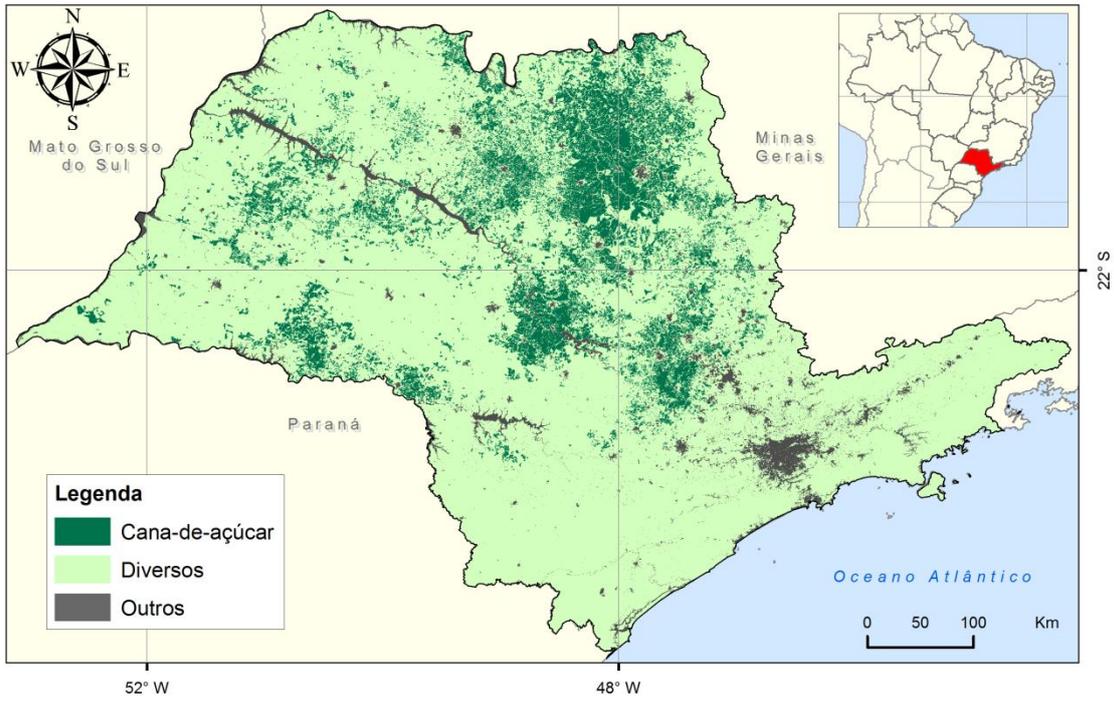


Figura 8.4 - Categorias cana-de-açúcar, demais uso e estática em 2006

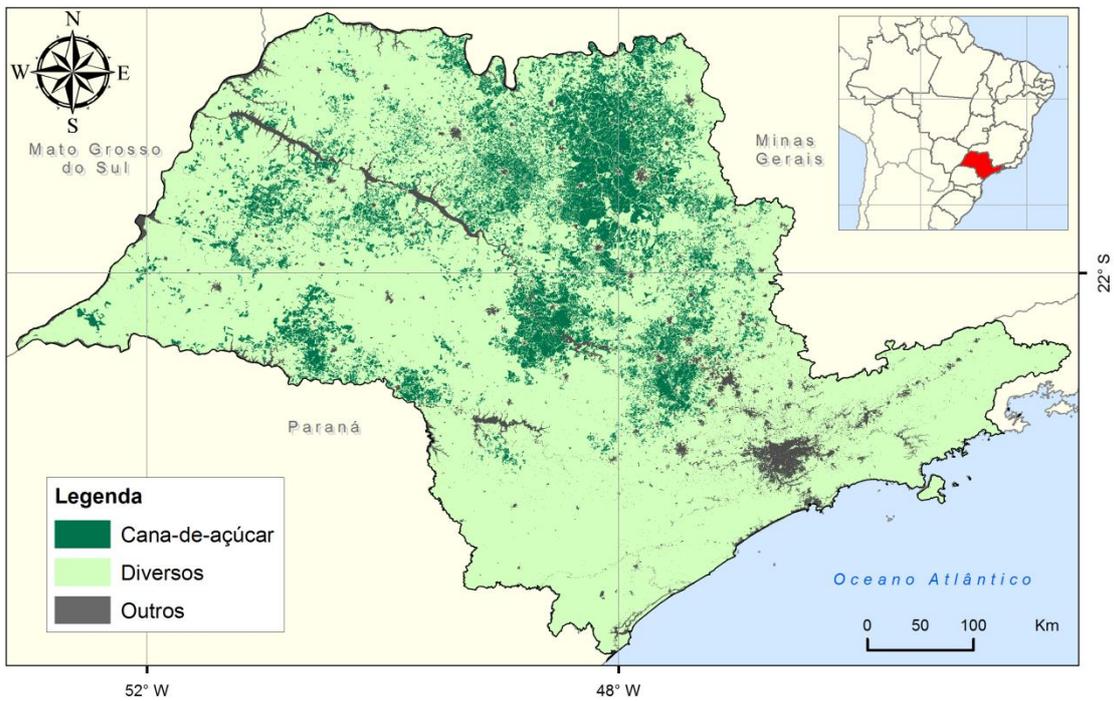


Figura 8.5 - Categorias cana-de-açúcar, demais uso e estática em 2007

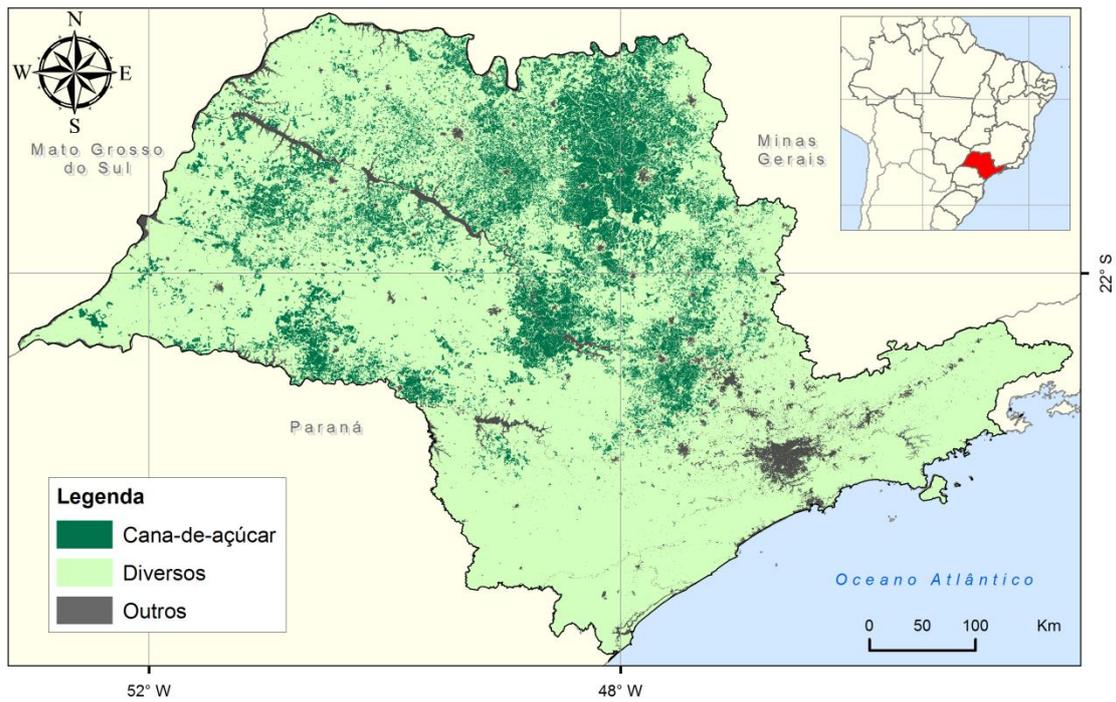


Figura 8.6 - Categorias cana-de-açúcar, demais uso e estática em 2008

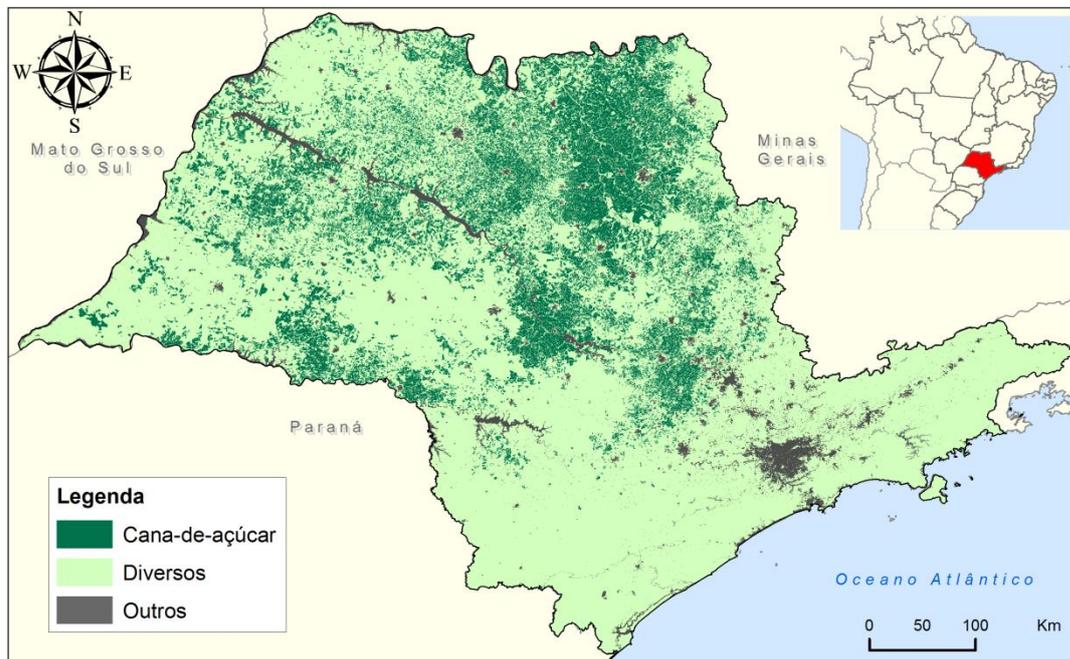


Figura 8.7 - Categorias cana-de-açúcar, demais uso e estática em 2009

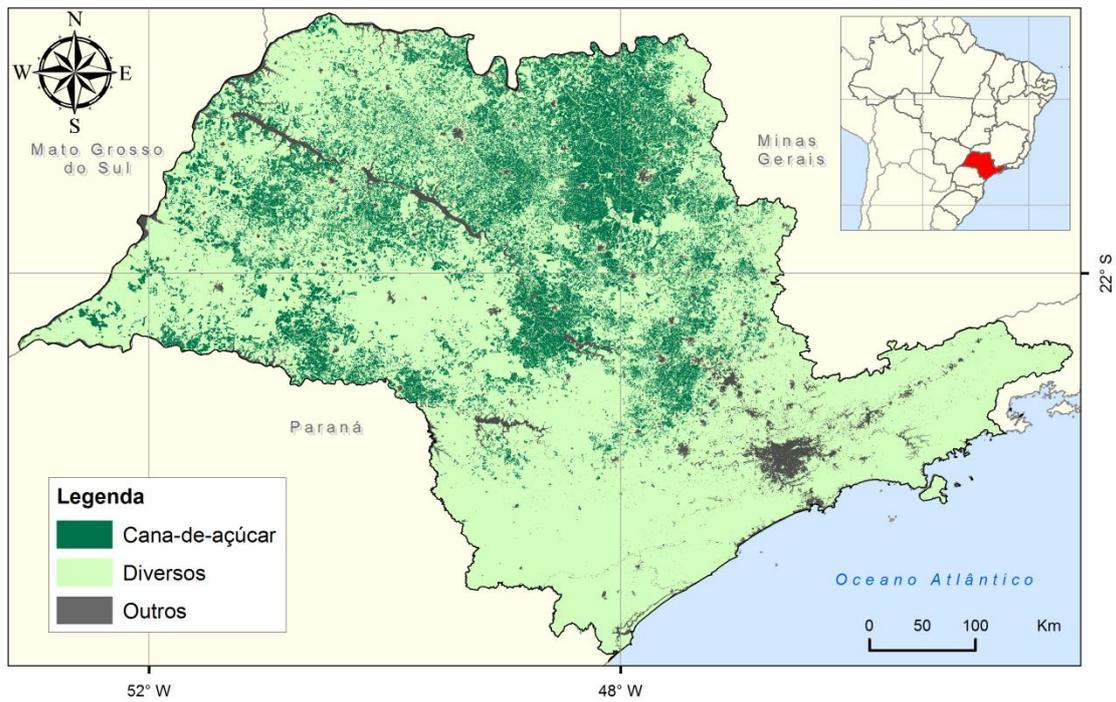


Figura 8.8 - Categorias cana-de-açúcar, demais uso e estática em 2010

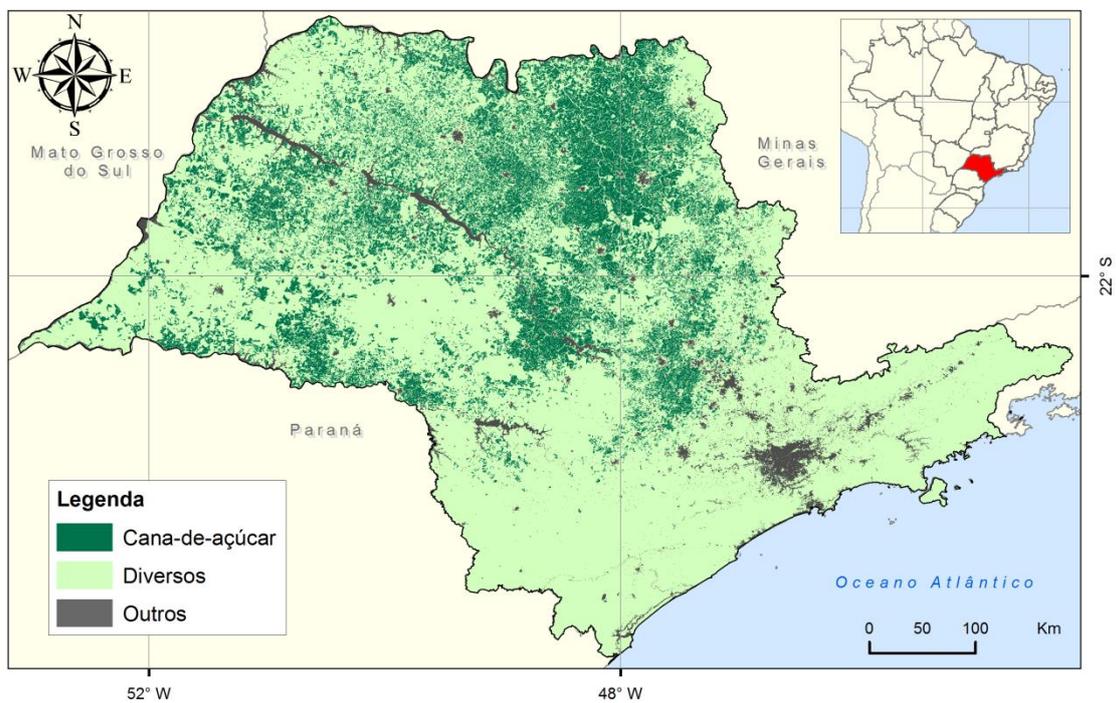


Tabela 8.2 - Comparação de indicadores quantitativos da expansão da cana-de-açúcar no estado de São Paulo. O indicador apresenta o número de células de 4 x 4 km² ocupadas pela cultura no período de 2005-2010.

Ano	Número de células válidas	Cana-de-açúcar	Diversos	Outros
2005	16097	2133	10441	3523
2006	16097	2323	10251	3523
2007	16097	2679	9895	3523
2008	16097	3036	9538	3523
2009	16097	3266	9308	3523
2010	16097	3304	9270	3523

8.4.5 Fatores determinantes potenciais

Os fatores determinantes (ou variáveis) potenciais ou candidatos para explicar a expansão da área cultivada por cana-de-açúcar foram levantados mediante revisão da literatura e referem-se principalmente a aspectos edafoclimáticos, biofísicos, de infraestrutura e de acesso à mercados. Estas informações espaciais compuseram um banco de dados implantado no TerraView que constituiu de 27 variáveis mostradas nas Figuras 8.9 a 8.31 que estão agrupadas em 4 categorias detalhadas no Quadro 8.1, a saber:

- *Acesso à rede de transporte e mercados*: rodovias, ferrovias, hidrovias, cidades, portos, porto de Santos/SP, dutos, usinas de cana-de-açúcar e destilarias de álcool, usinas térmicas que queimam o bagaço da cana-de-açúcar;
- *Ambientais*: altitude, declividade, rios, precipitação, temperatura, fertilidade, aptidão do solo para a cana-de-açúcar, radiação solar, deficiência hídrica, pedregosidade, profundidade do solo;
- *Cultura*: produtividade, quantidade produzida, área colhida, PIB agrícola;
- *Políticas Públicas*: Unidades de conservação.

Deste conjunto de fatores potenciais algumas foram consideradas variáveis dinâmicas, ou seja, seriam atualizadas durante o período de simulação. Esta atualização foi possível porque estas variáveis apresentaram informações

capazes de apontar alterações ao longo do período (ex.: ano de fundação de usinas). São elas: usinas, usinas térmicas que queimam o bagaço da cana-de-açúcar, produtividade, quantidade produzida, área colhida, PIB agrícola e unidades de conservação.

Quadro 8.1 - Conjunto de variáveis explanatórias potenciais (variáveis independentes) separadas por categoria

ID	Variável (nome no banco)	Descrição	Vetorial	Matricial	Discreto	Contínuo	Fonte	
Acessibilidade à rede de transporte e mercado	Rodovias							
	1	rodovias	Distância euclidiana às rodovias localizadas no estado de São Paulo	x		x		CTBE
		l_rodovias	log	x		x		
	Ferrovias							
	2	ferrovias	Distância euclidiana à ferrovias localizadas no estado de São Paulo	x		x		CTBE
		l_rodovias	log	x		x		
	Hidrovias							
	3	hidrovias	Distância euclidiana às hidrovias localizadas no estado de São Paulo	x		x		CTBE
		l_hidro	log	x		x		
	Cidades							
	4	idades	Distância euclidiana à localização das cidades paulistas	x		x		IBGE
		l_cidades	log	x		x		
	Portos							
	5	portos	Distância euclidiana aos portos que possuem influência no Estado de São Paulo	x		x		CTBE
		l_portos	log	x		x		
	Porto de Santos							
6	santos	Distância euclidiana ao Porto de Santos/SP	x		x		CTBE	
	l_santos	log	x		x			
Dutos								
7	dutos	Distância euclidiana aos dutos paulistas ou que influem no Estado de São Paulo	x		x		PNLT	
	l_dutos	log	x		x			
8	Usinas							

ID	Variável (nome no banco)	Descrição					Fonte	
			Vetorial	Matricial	Discreto	Contínuo		
9	usinas	Distância euclidiana à usinas de cana-de-açúcar e destilarias de álcool	x		x		CTBE	
	l_usinas	log	x		x			
	usinas térmicas							
	ute_bag	Distância euclidiana à usinas térmicas que queimam bagaço da cana-de-açúcar localizadas no estado de São Paulo	x		x		ANEEL	
l_ute_bag	log	x		x				
Ambientais	Altitude							
	10	dem	Altitude média (m)		x		x	TOPODATA
	Declividade							
	11	slope_apt	Porcentagem de áreas com declividade até 12%		x	x		TOPODATA
		slope_med	Declividade média (%)	x			x	
	Rios							
	12	rios	Distância Euclidiana aos rios	x		x		ANA
		l_rios	Log	x		x		
	Precipitação							
	13	prec_apt	Porcentagem de área com precipitação média anual entre 1200 e 2500 mm ano ⁻¹	x		x		AMBDATA
prec_med		Precipitação média anual (mm)		x		x		
Temperatura								
14	temp_apt	Porcentagem de área onde a temperatura média anual é maior que 20°C	x		x		AMBDATA	
	temp_med	Temperatura média anual (°C)						
Fertilidade								
15	fert_alta	Porcentagem de área com alta fertilidade dos solos	x		x		IAC/APTA	
Aptidão do solo								
16	apt_solo	Porcentagem de áreas aptas para o desenvolvimento da cana-de-açúcar sob aspectos pedológicos	x		x		IAC/APTA	
	aptt_solo	Porcentagem de áreas aptas e/ou restrições para o desenvolvimento da cana-de-açúcar sob aspectos pedológicos						
Radiação solar								
17	radsol_A	Radiação solar média anual		x		x	INPE/LABSOLAR	
	radsol_spring	Radiação solar média na primavera		x		x		

ID	Variável (nome no banco)	Descrição					Fonte
			Vetorial	Matricial	Discreto	Contínuo	
	radsol_summer	Radiação solar média no verão		x		x	
Deficiência hídrica							
18	defhid	Porcentagem de áreas inaptas com relação à deficiência hídrica anual total	x		x		CIIAGRO
	defhidn	Deficiência hídrica numérica (mm)					
	defhid2	Porcentagem de áreas inaptas com relação à deficiência hídrica no segundo trimestre	x		x		
	defhid3	Porcentagem de áreas inaptas com relação à deficiência hídrica no terceiro trimestre	x		x		
	defhid4	Porcentagem de áreas inaptas com relação à deficiência hídrica no quarto trimestre	x		x		
Pedregosidade							
19	pedreg	Porcentagem de áreas aptas conforme a pedregosidade	x		x		CIIAGRO
Profundidade							
20	profund	Porcentagem de áreas aptas em relação à profundidade do solo	x		x		CIIAGRO
Porcentagem de área disponível para conversão							
21	pastagem	Porcentagem de área disponível para o processo de conversão pastagem-cana	x		x		SEPLA
Cana-de-açúcar							
Produtividade							
22	produtividade2	Produtividade da cana-de-açúcar por município do estado de São Paulo nos anos 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013 e 2014 (t ha ⁻¹)	x		x		IBGE
Quantidade Produzida							
23	qproduz	Quantidade de cana-de-açúcar produzida por município do estado de São Paulo nos anos 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013 e 2014 (t)	x		x		IBGE
Área colhida							
24	areacolhida	Área colhida com plantio de cana-de-açúcar por município do estado de São Paulo nos anos 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013 e 2014 (ha)	x		x		IBGE
PIB Agrícola							
25	pib_agricola	Produto Interno Bruto do agronegócio para os anos de 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013 e 2014 em (R\$)	x		x		IBGE
Políticas Públicas							
Unidades de Conservação							
26	uc	Porcentagem de áreas com Unidades de Conservação no Estado de São Paulo	x		x		MMA
Zoneamento							
27	zc_adequado	Porcentagem de área adequada conforme o Zoneamento Agroclimática da Cana-de-açúcar	x		x		CIIAGRO

Figura 8.9 - Mapa da localização das rodovias, ferrovias e hidrovias que passam pelo estado de São Paulo, Fonte: CTBE

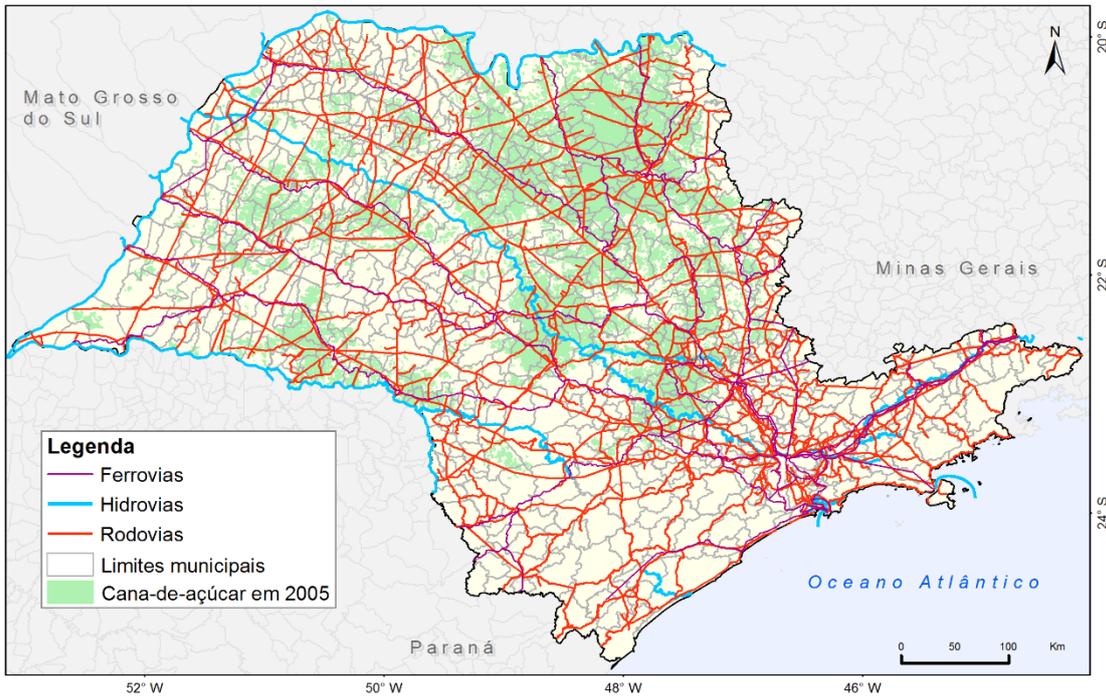
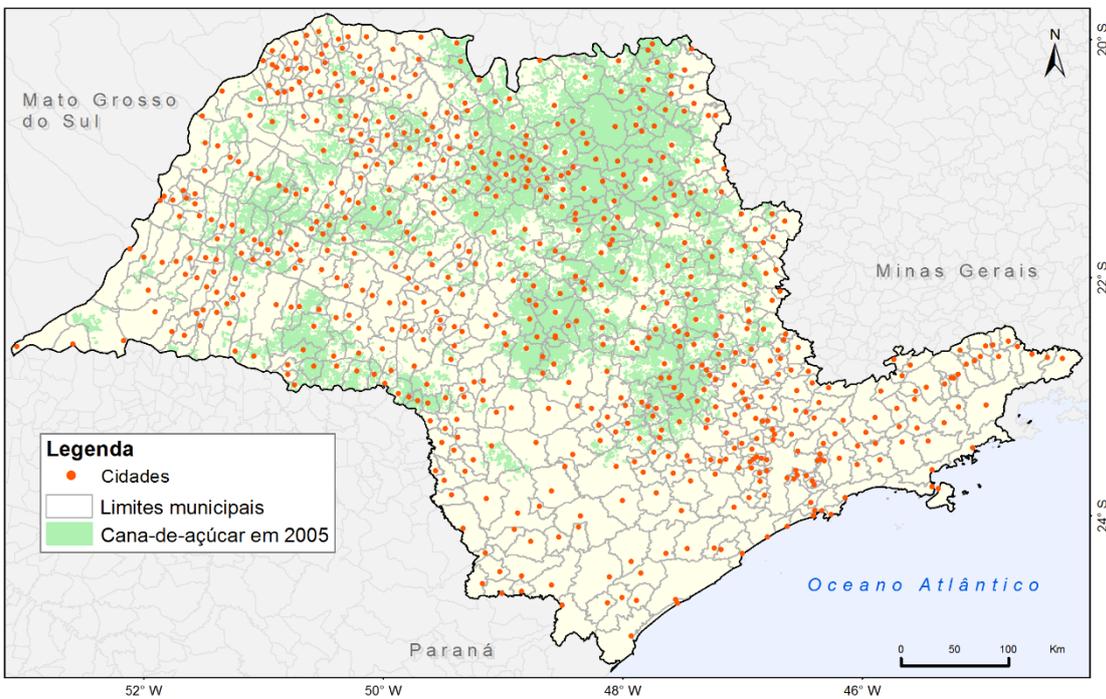
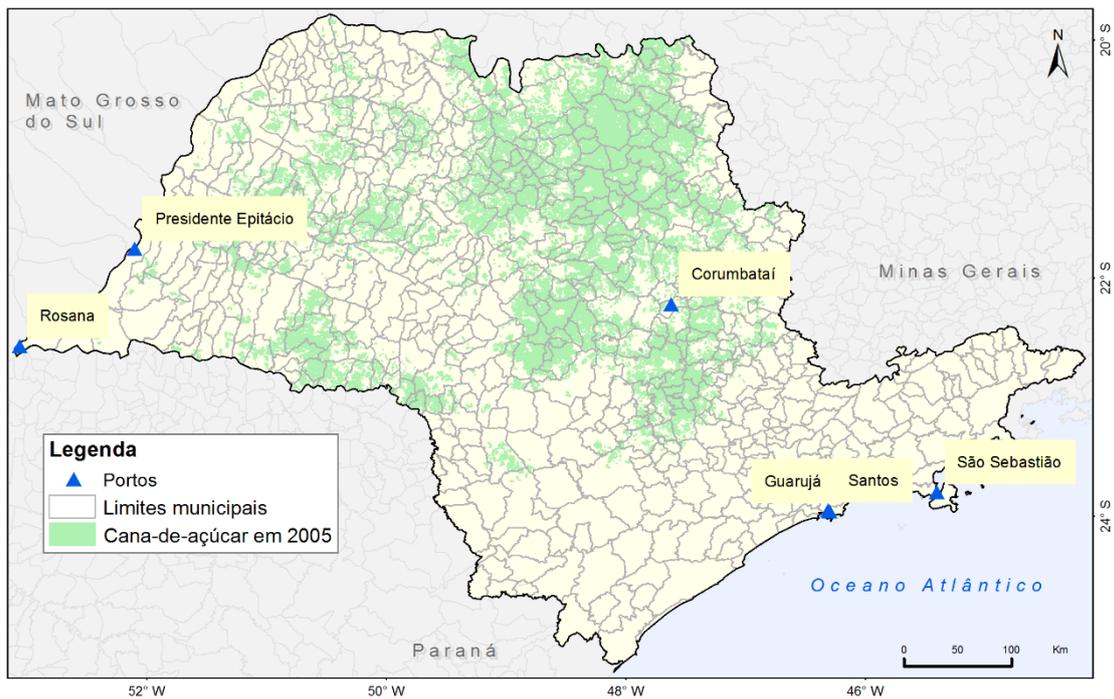


Figura 8.10 - Mapa da localização das cidades do estado de São Paulo



Fonte: IBGE

Figura 8.11 - Mapa da localização dos portos do estado de São Paulo



Fonte: CTBE

Figura 8.12 - Mapa da localização dos dutos paulistas existentes no período 2005-2010

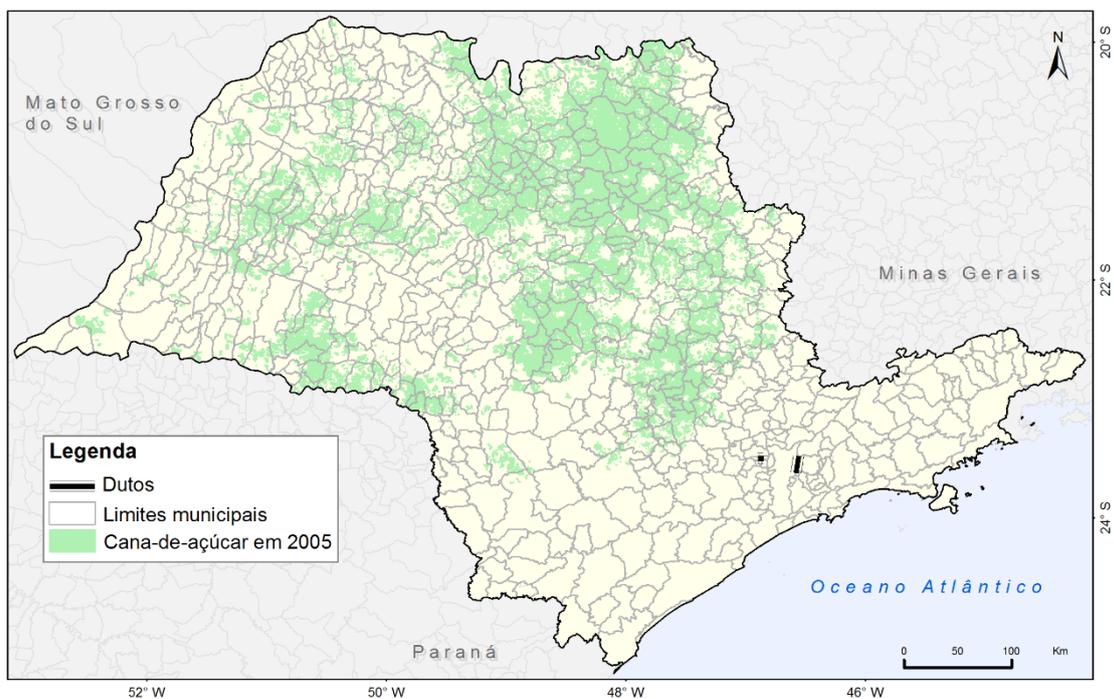
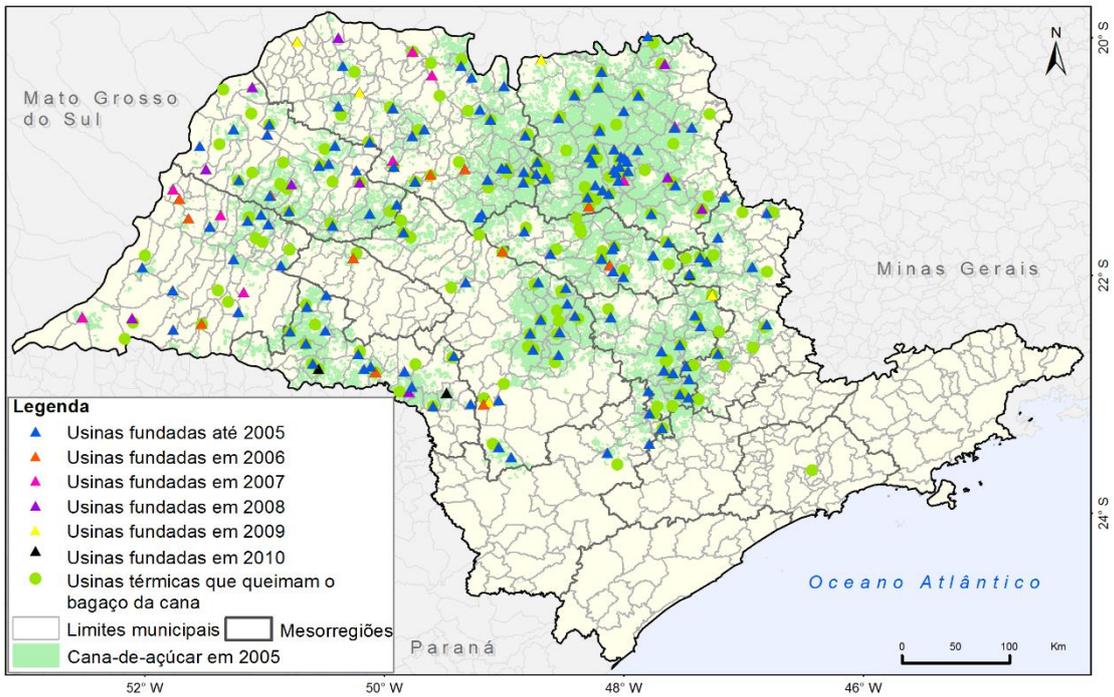


Figura 8.13 - Mapa da localização das usinas de cana-de-açúcar com suas datas de fundação e das usinas térmicas que queimam o bagaço da cana-de-açúcar no estado de São Paulo



Fonte: PNLT

Figura 8.14 - Mapa de declividade do estado de São Paulo

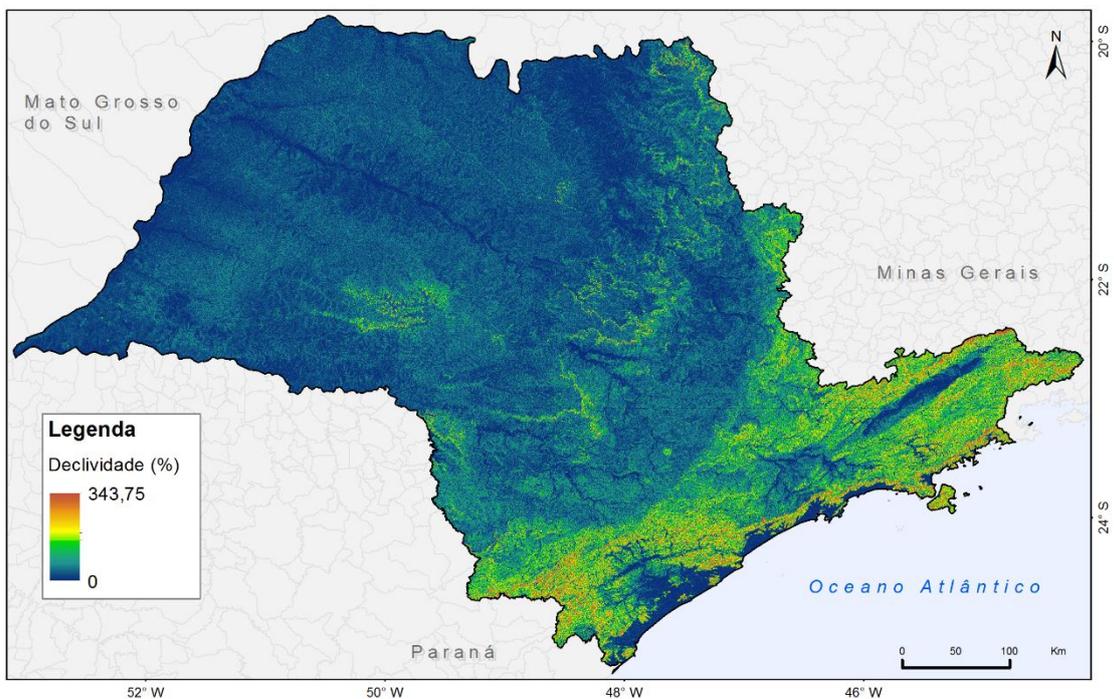


Figura 8.15 - Mapa das áreas aptas para o plantio da cana-de-açúcar em relação à declividade

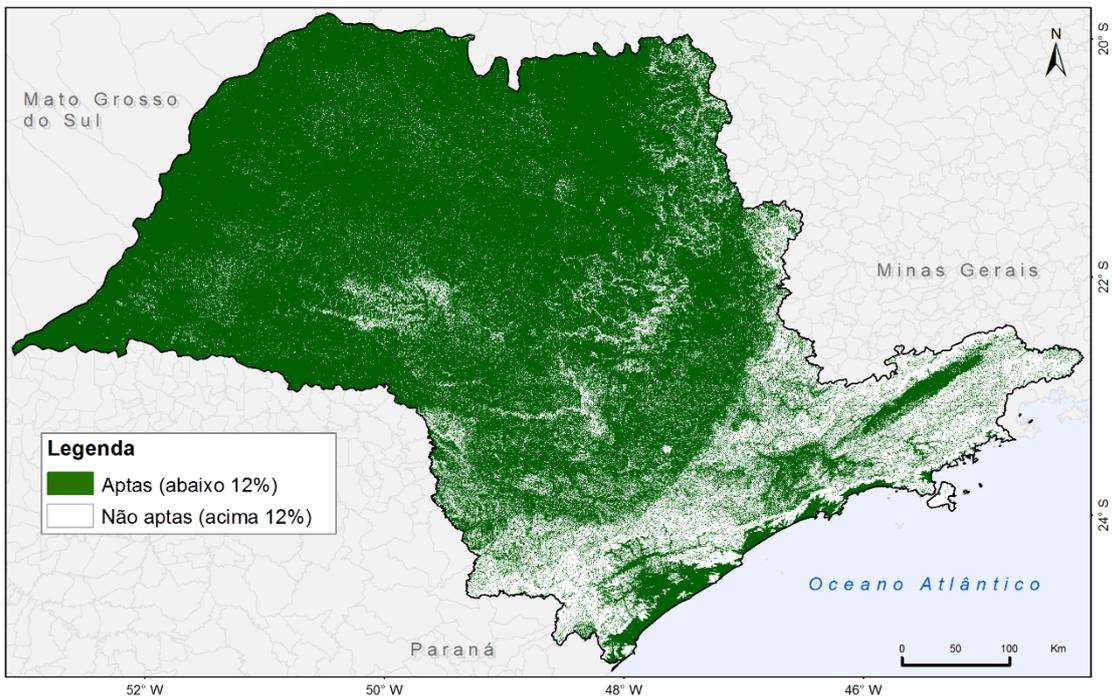
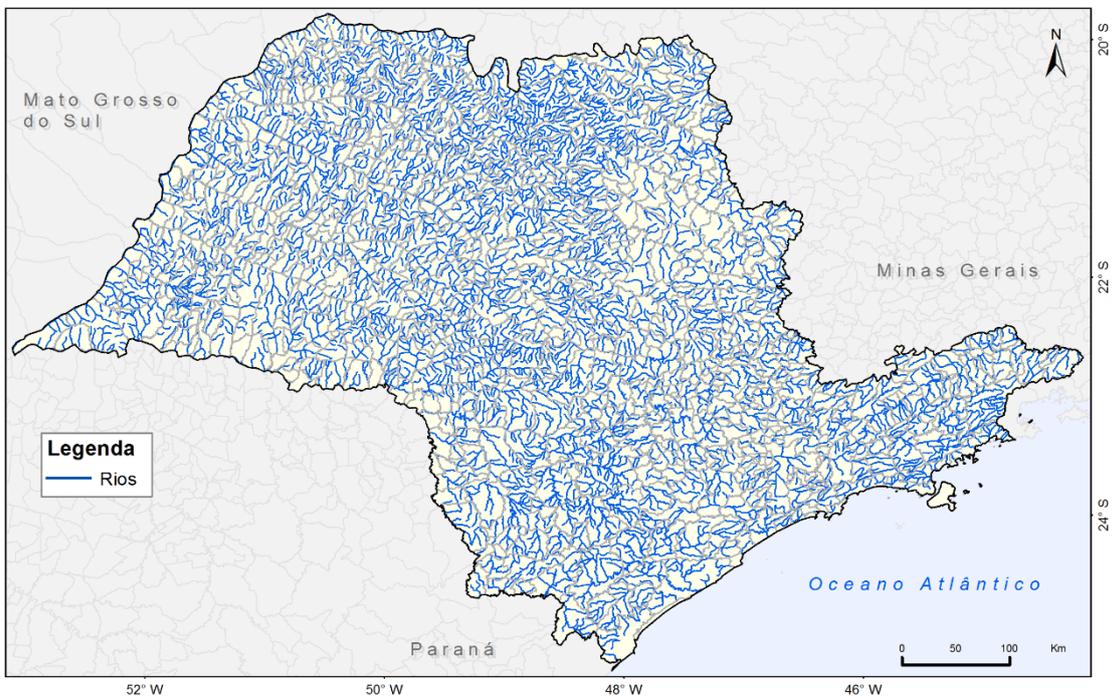


Figura 8.16 - Rede hidrográfica do Estado de São Paulo,



Fonte: ANA

Figura 8.17 - a) Precipitação Média Anual (período 1950 – 2000), Fonte: World Clim; b) áreas aptas para a expansão da cana-de-açúcar cuja precipitação média anual varia entre 1200 e 2500 mm

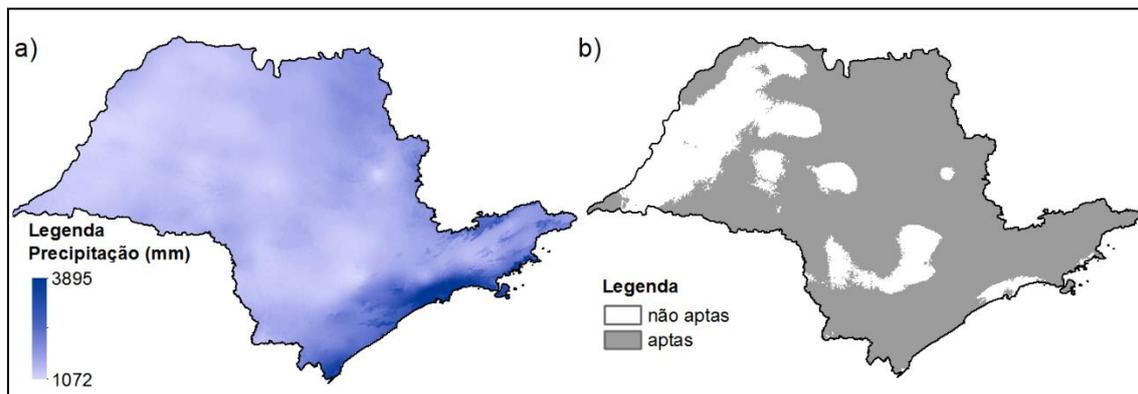


Figura 8.18 - Dados de temperatura utilizados. a) Temperatura média mensal (Fonte: WorldClim - *Global Climate Data*); b) áreas aptas para o brotamento e crescimento da cana-de-açúcar onde a temperatura média dos meses de outubro a fevereiro é superior a 20°C; c) áreas aptas para a maturação da cana-de-açúcar onde a temperatura média para os meses de Maio a Agosto está entre 10 e 20°C; d) áreas aptas para o plantio da cana-de-açúcar (interseção das áreas mostradas em b e c)

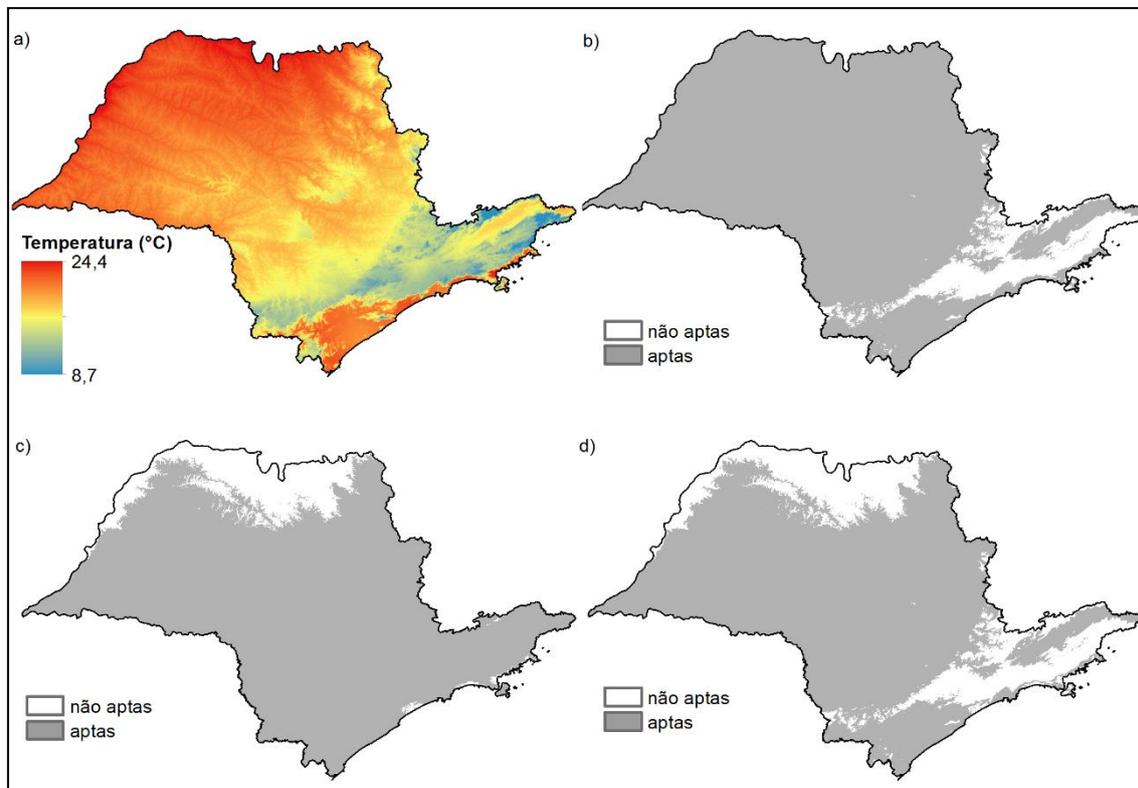
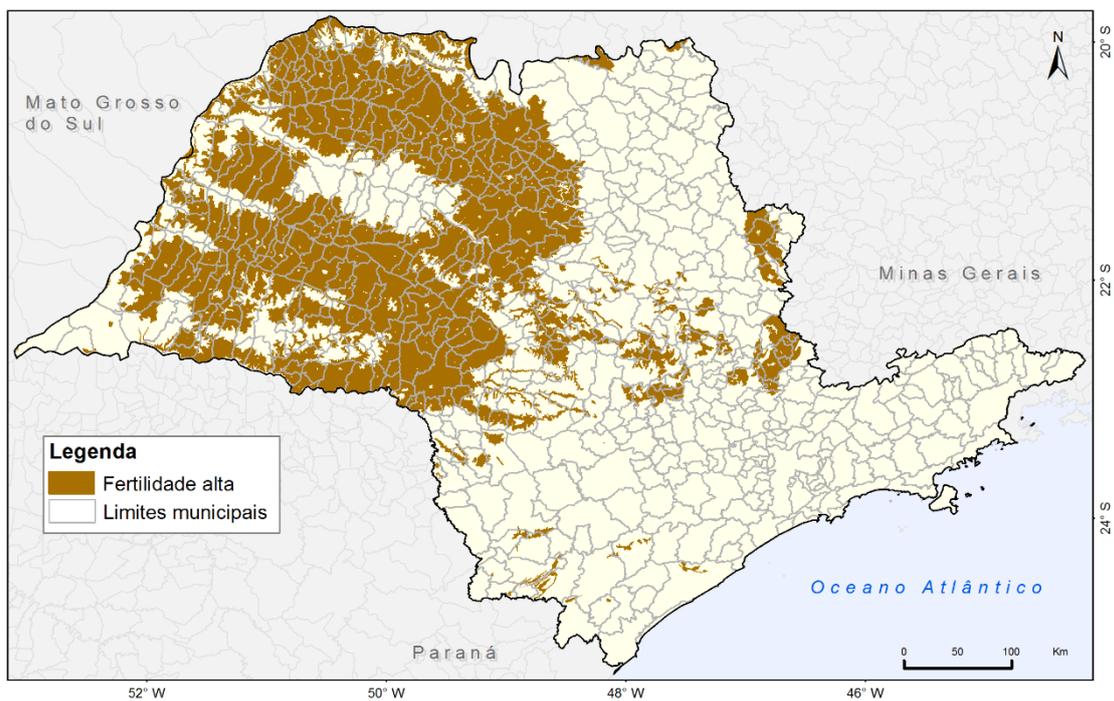


Figura 8.19 - Áreas com fertilidade dos solos alta



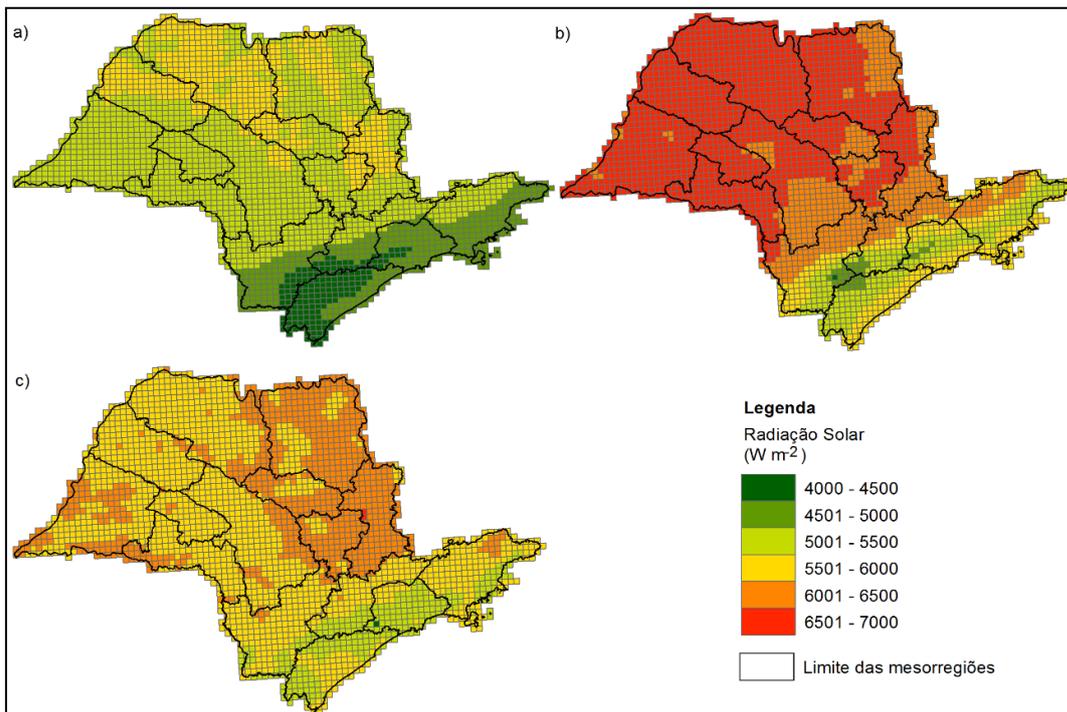
Fonte: IAC/APTA

Figura 8.20 - Áreas com boa aptidão do solo para a cana-de-açúcar



Fonte: IAC/APTA

Figura 8.21 - a) Radiação Solar anual; b) Radiação solar na primavera; c) Radiação solar no verão



Fonte: LABSOLAR/INPE

Figura 8.22 - a) Deficiência hídrica anual; b) deficiência hídrica no segundo trimestre; c) deficiência hídrica no terceiro trimestre; d) deficiência hídrica no quarto trimestre. Fonte: IAC/APTA

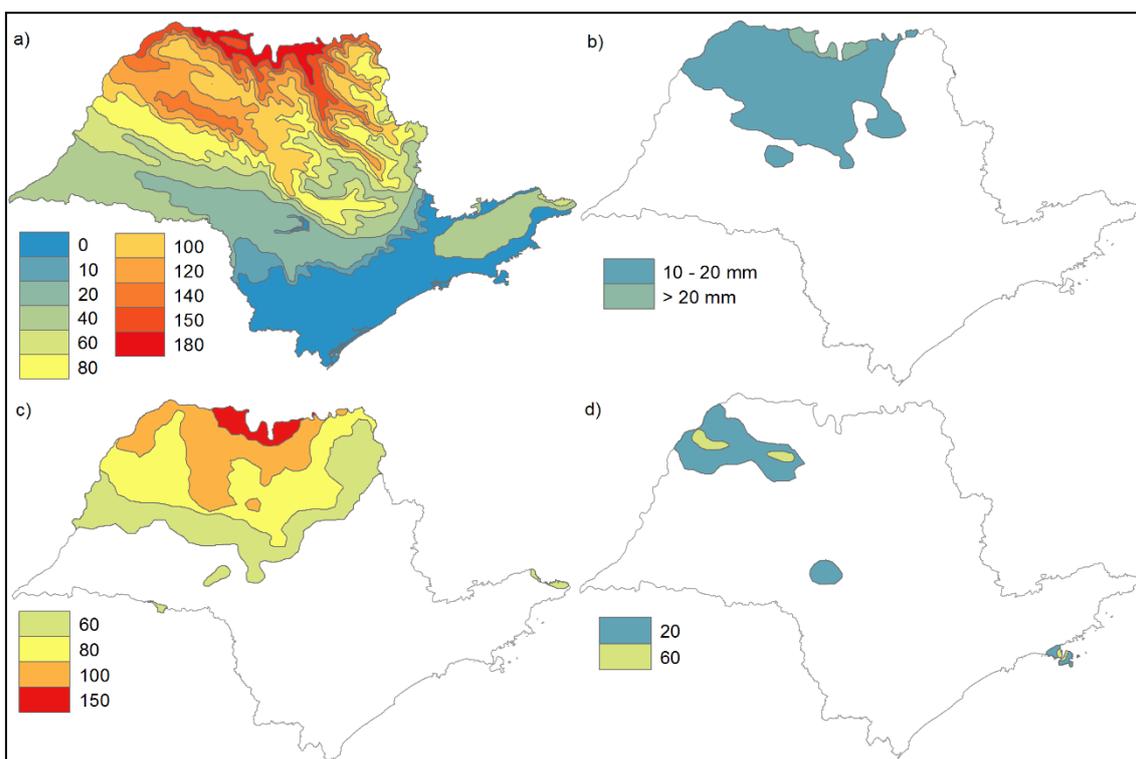
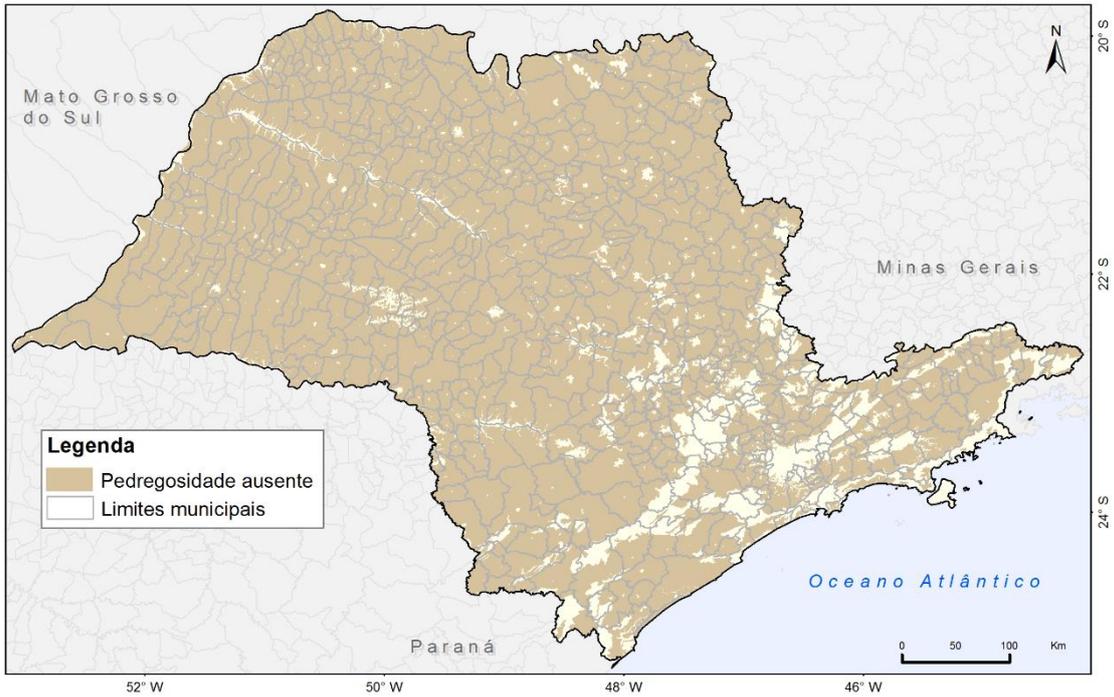
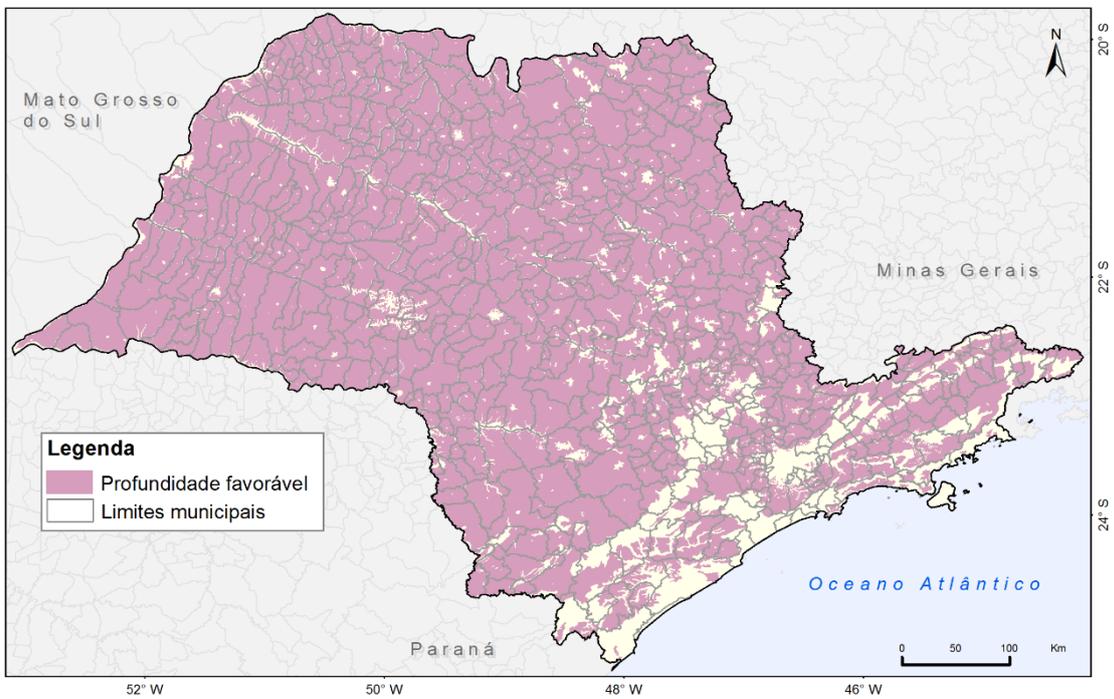


Figura 8.23 – Áreas sem pedregosidade



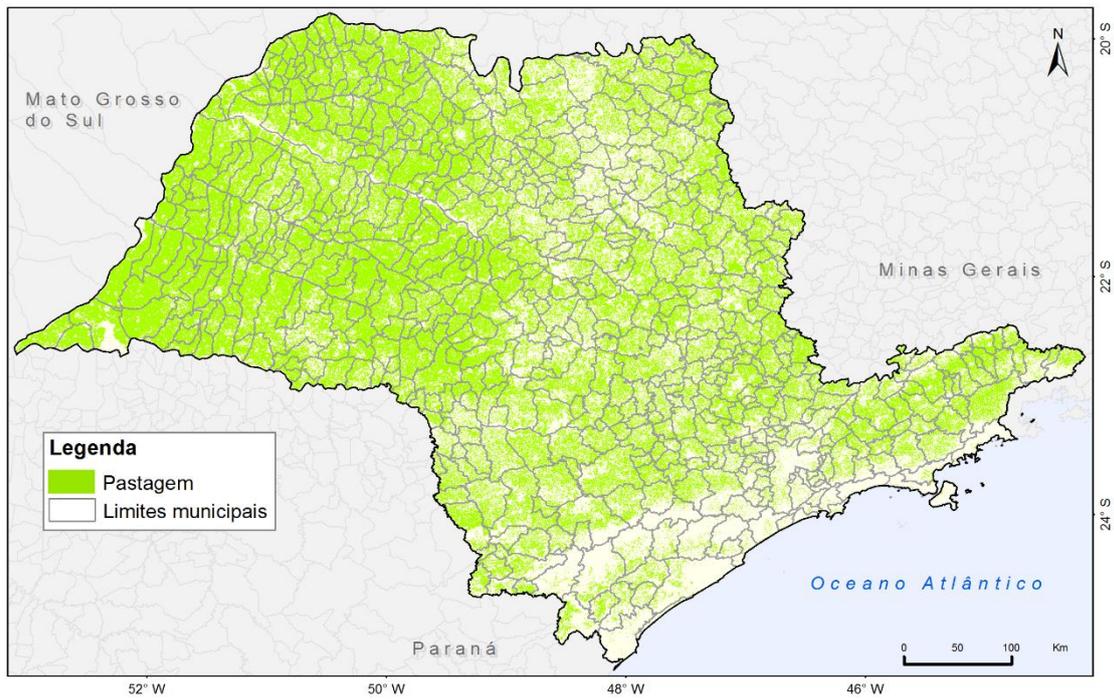
Fonte: IAC/APTA

Figura 8.24 - Áreas cuja profundidade do solo é favorável ao plantio da cana-de-açúcar



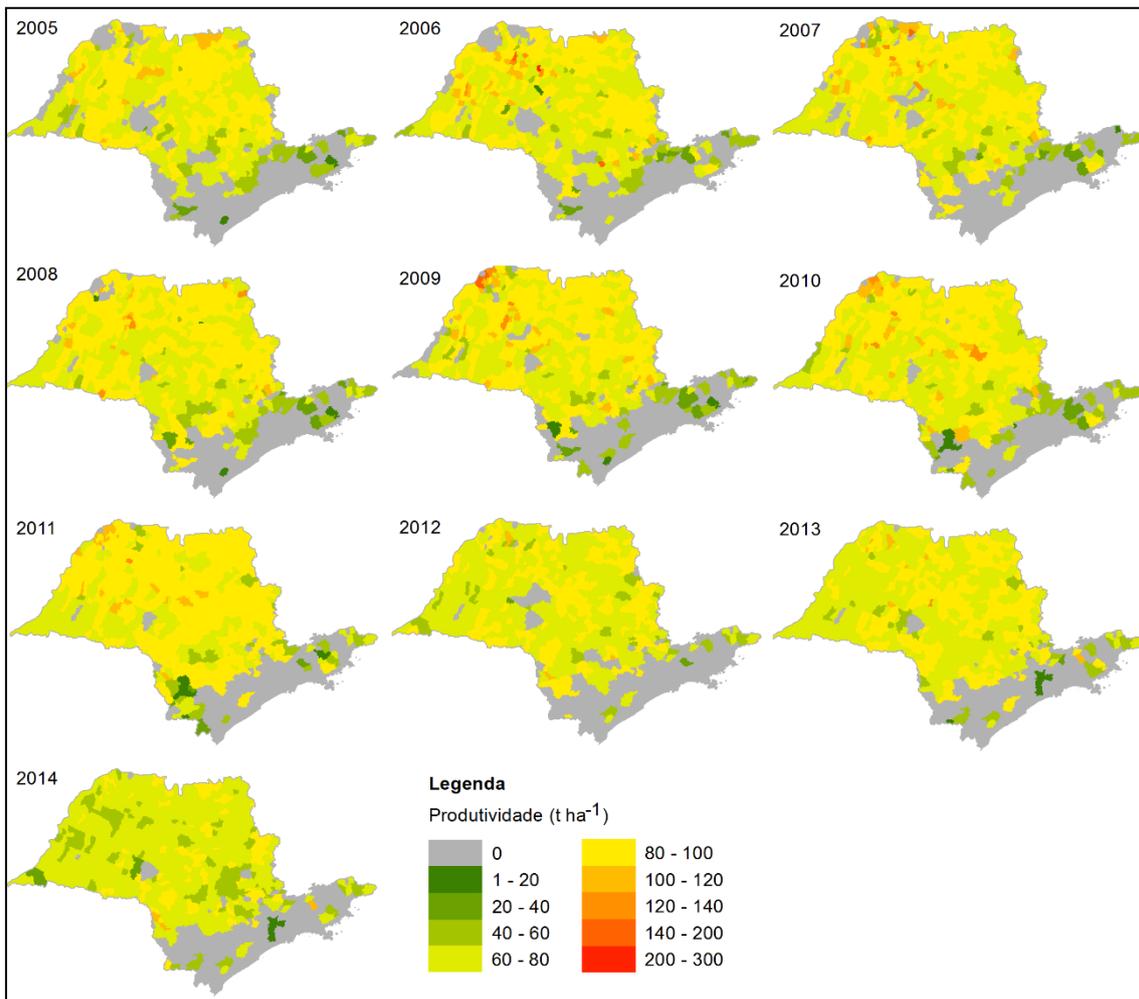
Fonte: IAC/APTA

Figura 8.25 – Localização do uso 'pastagem'



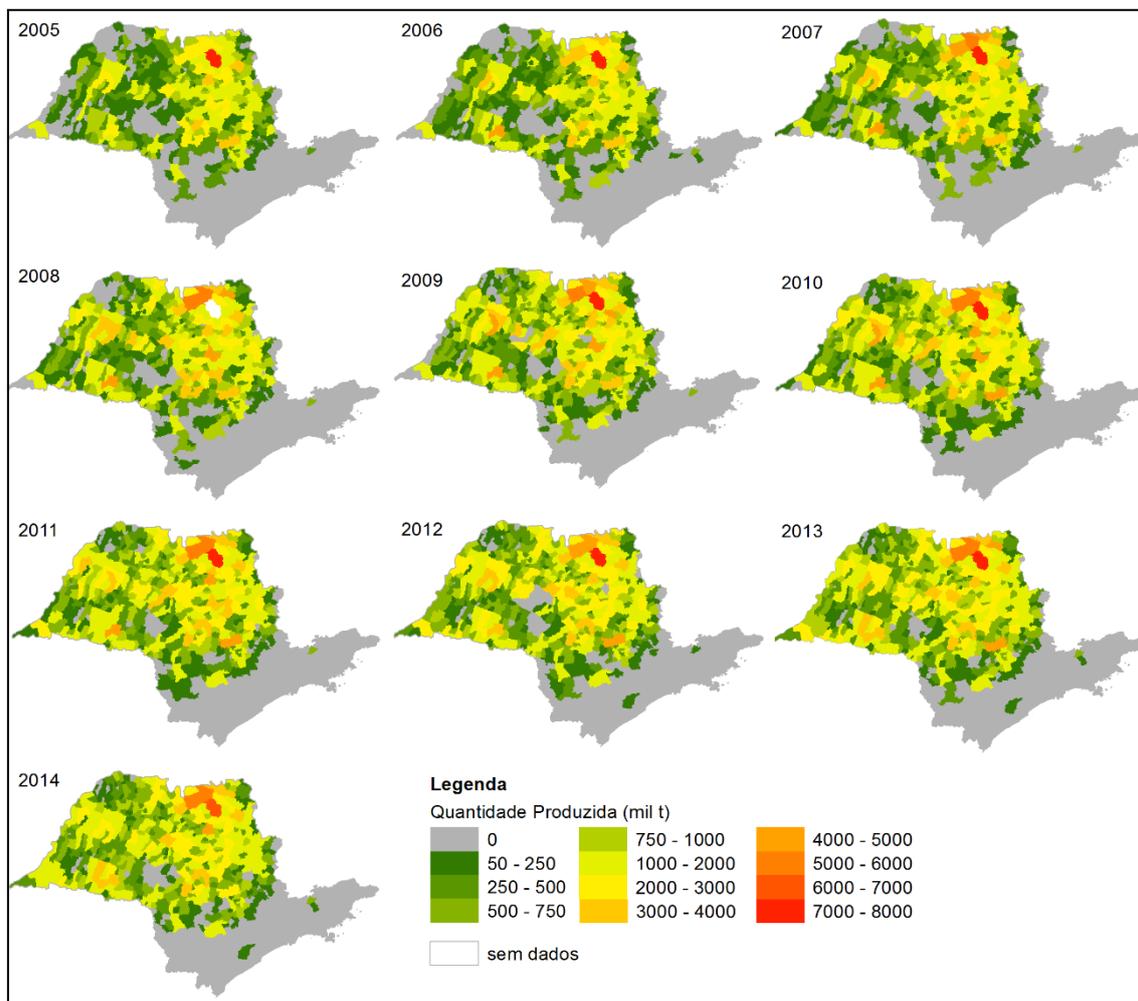
Fonte: São Paulo (2006)

Figura 8.26 - Produtividade da cana-de-açúcar para os municípios paulistas no período 2005 – 2014.



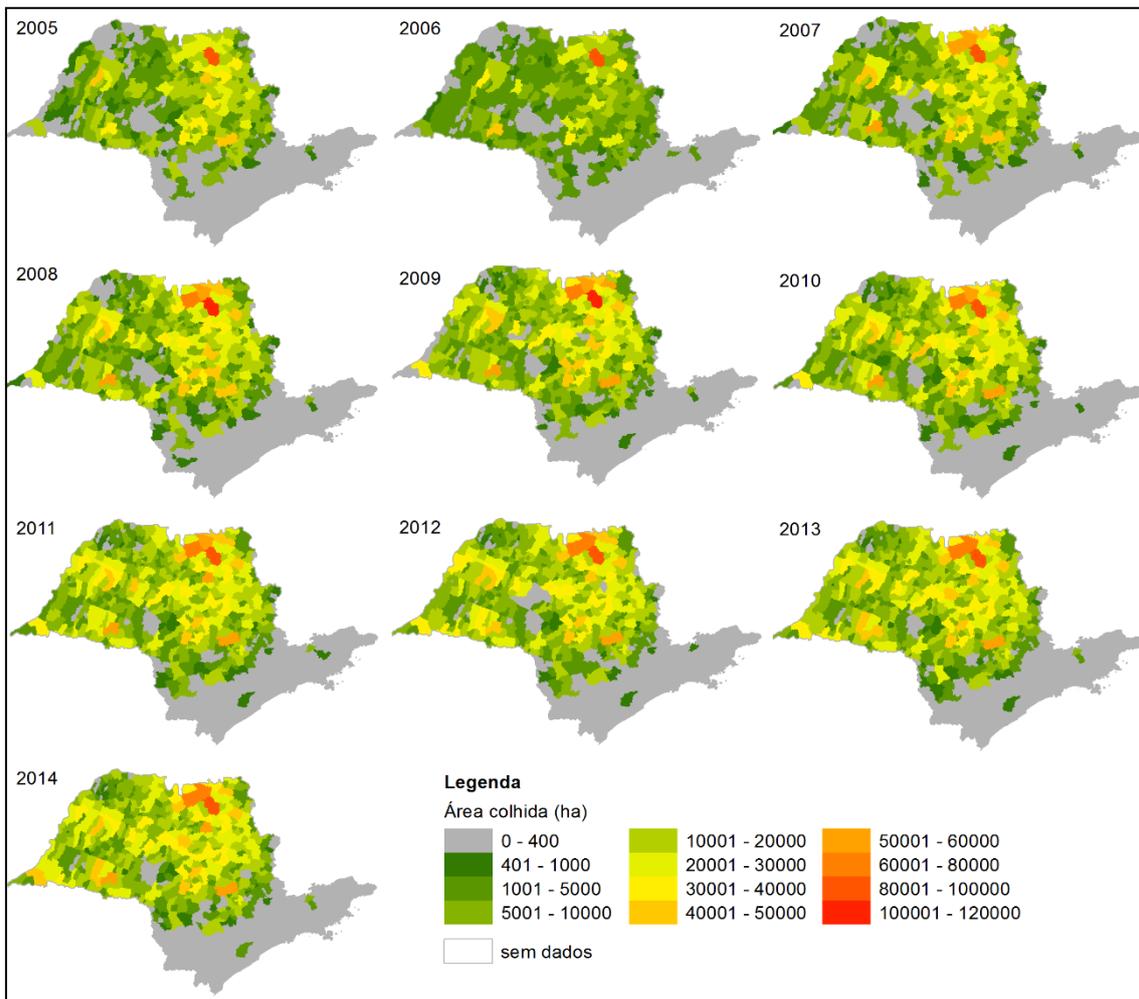
Fonte: IBGE

Figura 8.27 - Quantidade produzida de cana-de-açúcar no estado de São Paulo no período 2005 – 2014.



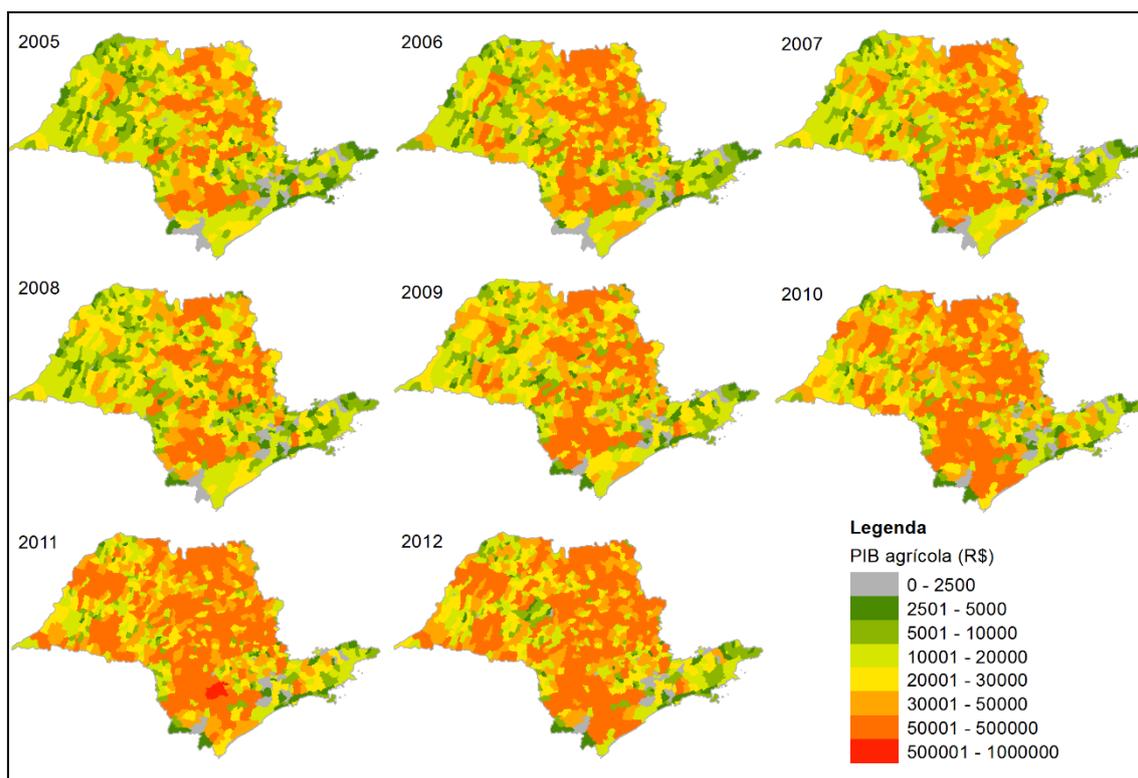
Fonte: IBGE

Figura 8.28 - Área colhida de cana-de-açúcar no estado de São Paulo no período 2005 – 2014.



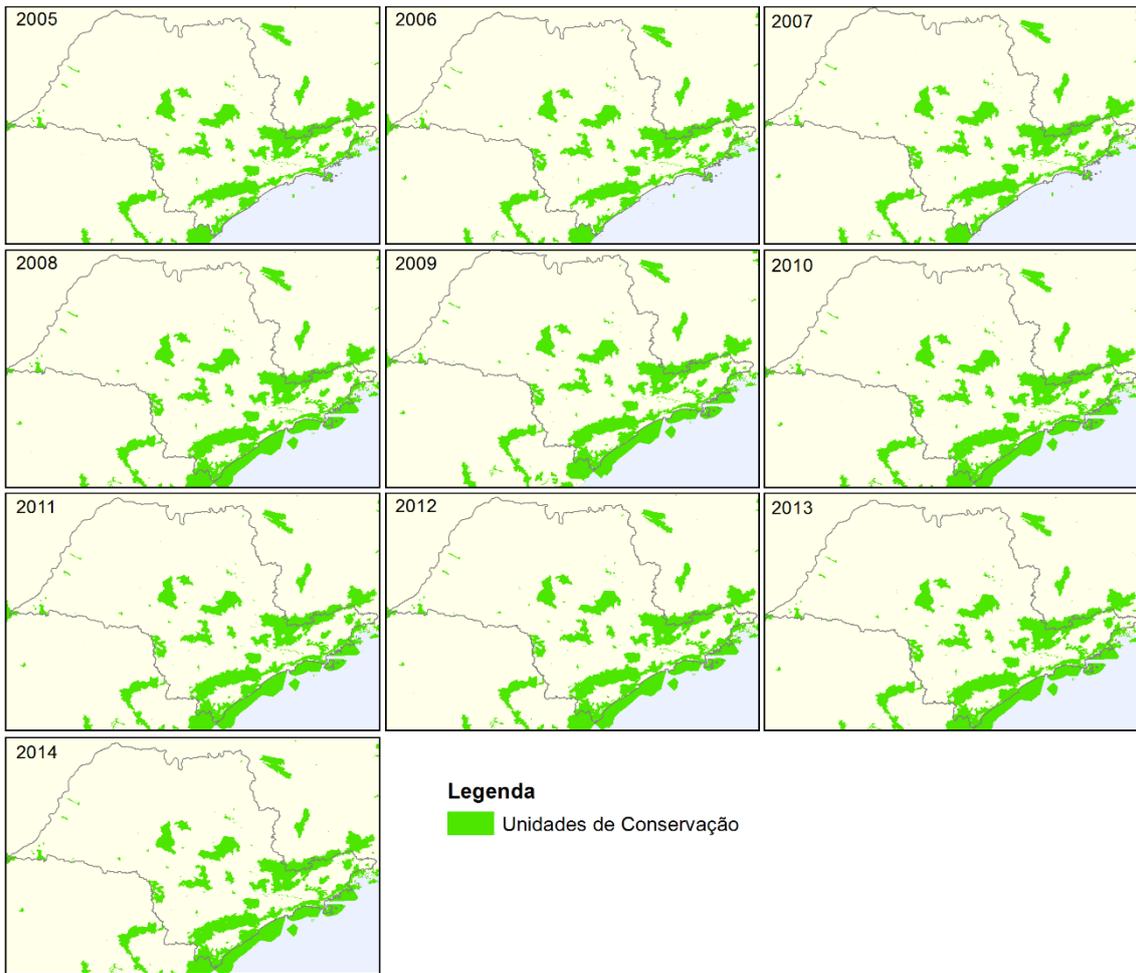
Fonte: IBGE

Figura 8.29 – PIB agrícola dos municípios de São Paulo



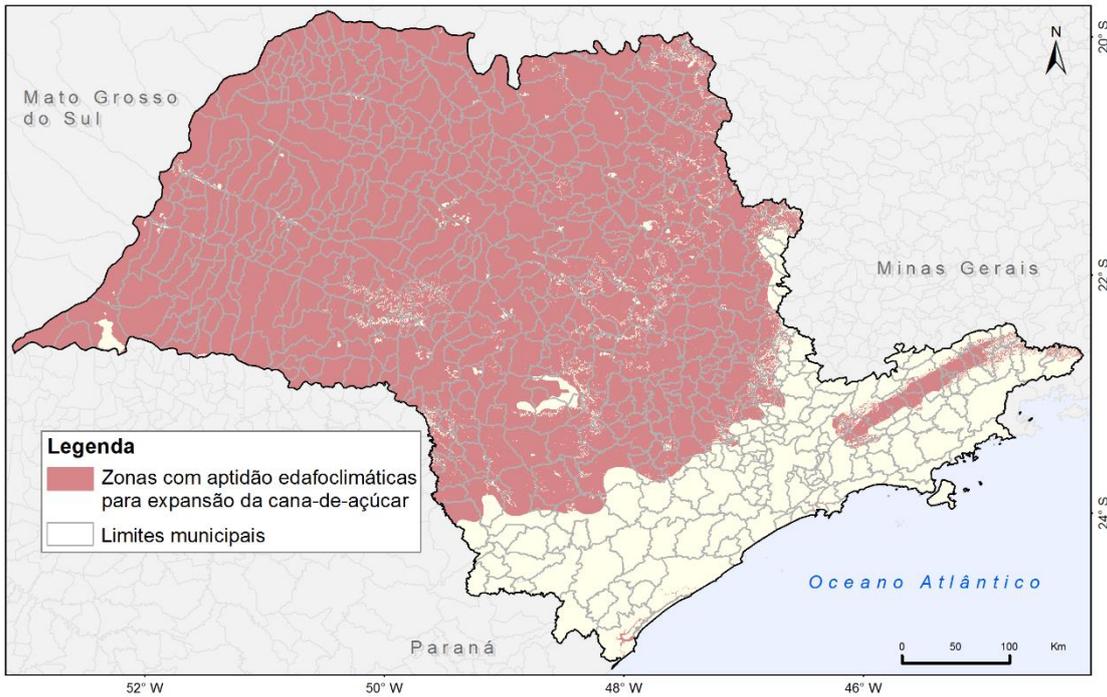
Fonte: IBGE

Figura 8.30 – Unidades de conservação



Fonte: Brasil (2000)

Figura 8.31 - Zonas com aptidão edafoclimática para a expansão da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo.



Fonte: CIAGRO/IAC/APTA

Estes fatores potenciais foram decompostos no plano celular de 4 km² (definido na seção 8.4.2) utilizando-se o *plugin* (extensão do TerraView) Preenchimento de Células. O *plugin* possibilita calcular valores para atributos de tabelas associadas a planos de informação do tipo celular com o objetivo de homogeneizar informações derivadas de diferentes fontes, em formatos distintos (dados vetoriais, matriciais e também outros planos celulares), agregando-os em uma mesma base espaço-temporal. O cálculo para o preenchimento de cada variável é realizado através de operadores matemáticos escolhidos de acordo com a representação geométrica e a semântica dos atributos dos dados de entrada. A Tabela 8.3 mostra os operadores utilizados para o preenchimento de cada fator potencial no plano celular de 4km².

Tabela 8.3 - Operadores utilizados no cálculo para o preenchimento do espaço celular

Variável	Nome no banco	Operador utilizado no preenchimento das células
Mapa de uso de 2005 (Figura 8.3 a 8.8)	-cana -diversos -outros	Porcentagem de cada classe
Rodovias	rodovias l_rodovias	Distância mínima
Ferrovias	ferrovias l_ferrovias	Distância mínima
Hidrovias	hidrovias l_hidro	Distância mínima
Cidades	idades l_cidades	Distância mínima
Portos	portos l_portos	Distância mínima
Santos	santos l_santos	Distância mínima
Dutos	dutos l_dutos	Distância mínima
Usinas	usinas l_usinas	Distância mínima
Usinas Térmicas	ute_bag l_ute_bag	Distância mínima
Altitude	dem	Média
Declividade	slope_media slope_apt	Valor médio Porcentagem da Área Total
Rios	rios l_rios	Distância mínima
Precipitação	prec_media prec_apt	Valor médio Porcentagem da Área Total
Temperatura	temp_media temp_apt	Valor médio Porcentagem da Área Total
Fertilidade	fert_alta	Porcentagem da Área Total
Aptidão do solo	apt_solo	Porcentagem da Área Total
Radiação Solar	radsol_A radsol_summer radsol_spring	Valor médio
Déficit Hídrico	defhidn defhid2 defhid3 defhid4	Porcentagem da Área Total Média ponderada por área Porcentagem da Área Total Porcentagem da Área Total Porcentagem da Área Total
Pedregosidade	pedreg	Porcentagem da Área Total
Profundidade	profund	Porcentagem da Área Total
Porcentagem (área disponível para cana)	pastagem	Porcentagem da Área Total
Produtividade	produz	Média Ponderada por área
Quantidade Produzida	qproduz	Média Ponderada por área
Área colhida	areacolhida	Média Ponderada por área
PIB Agrícola	pib_agricola	Média Ponderada por área
Unidades de Conservação	uc	Porcentagem da Área Total
Zonas aptas indicadas pelo Zoneamento	zc_adeq	Porcentagem da Área Total

8.4.6 Escolha dos componentes de demanda

A componente demanda refere-se à área total de cada uso em cada ano do período simulado e nesse estudo, foi extraída diretamente de cada pixel do plano celular após o preenchimento dos planos de informação apontados pelas Figuras 8.3 a 8.8. Em outras palavras, cada ano pertencente ao período de 2005-2010 correspondeu a 3 colunas do plano celular que se referem à: a) porcentagem da célula com o uso 'cana-de-açúcar', b) porcentagem da célula com o uso "diversos" e c) porcentagem da célula com "outros" usos, respectivamente, como mostra a Figura 8.32. Cada linha corresponde à uma célula (ou pixel) e a soma das porcentagens dos usos referentes ao mesmo ano e para a mesma célula resulta em 1 (ou 100%) que é o valor da área total da célula. Os desenvolvedores e colaboradores do Projeto LuccME disponibilizam no site (http://luccme.ccst.inpe.br/conteudo_pt/config.html) um Guia do Usuário onde cada etapa de configuração para a construção de novos modelos é detalhada (AGUIAR et al., 2015).

Dessa forma, portanto, foram calculadas as demandas para os anos do período 2005 a 2012 ano a ano e em seguida, valores correspondentes para cada demanda foram sendo inseridos no modelo de simulação da expansão da cana. Nessa etapa, busca-se alocar estas demandas (áreas) de acordo com o potencial de cada célula, conforme descrito a seguir.

Figura 8.32 - Valores de demandas em cada célula para o ano de 2005.

	object_id0	Col	Lin	diversos05	cana05	out05
1	C00L158	0	158	0	0.025	0.975
2	C00L159	0	159	0	0.009	0.991
3	C00L160	0	160	0	0.167	0.833
4	C01L156	1	156	0	0	1
5	C01L157	1	157	0.237	0.001	0.762
6	C01L158	1	158	0.292	0	0.708
7	C01L159	1	159	0.316	0	0.684
8	C01L160	1	160	0.467	0.121	0.412
9	C01L161	1	161	0.294	0.243	0.463
10	C01L162	1	162	0	0.164	0.836
11	C02L155	2	155	0.369	0	0.631
12	C02L156	2	156	0.327	0.001	0.672

8.4.7 Escolha dos componentes potenciais

O potencial refere-se à adequação de cada célula mudar a porcentagem de um determinado uso baseada nos fatores determinantes. Ou seja, as células com maior potencial para receberem o uso apresentam maior suscetibilidade para mudanças na porcentagem de uso. Os componentes de potencial utilizados são – em geral – baseados em técnicas de regressão multivariada que definem as variáveis determinantes para o processo a ser simulado escolhidas do conjunto de variáveis determinantes potenciais. Ou seja, dado um conjunto com variáveis potencialmente capazes de explicar um determinado processo, a regressão multivariada seleciona aquelas realmente capazes de o fazer. Assim, o processo de seleção das variáveis e construção dos modelos deve ser feito externamente (fora do LuccME). Somente os parâmetros serão informados ao LuccME, de acordo com cada componente/técnica adotada.

A modelagem estatística multivariada foi realizada empregando-se os *softwares* R e R Studio (R *DEVELOPMENT CORE TEAM*, 2011; 2014) para a construção de modelos de regressão linear multivariada clássica e GEODA (ANSELIN et al., 2006) para a construção de modelos de regressão multivariada espacial. Nestes modelos as variáveis dependentes são aquelas associadas aos usos e ocupações do solo (cana-de-açúcar, diversos e outros) e as variáveis independentes são as apresentadas nas Figuras 8.9 a 8.31.

Uma análise exploratória inicial realizada no R considerou todos os fatores determinantes potenciais. A opção inicial de não exclusão de variáveis teve como objetivo verificar a correlação entre as mesmas de modo que algumas pudessem ser rejeitadas simplificando o modelo. De acordo com a análise de correlação, foram escolhidos e testados subconjuntos de variáveis de modo a obter um bom modelo de regressão multivariada clássica. Foi utilizado o critério *Stepwise* para a seleção automática de fatores pertencentes aos subconjuntos (o procedimento constrói iterativamente uma sequência de modelos de regressão pela adição ou remoção de variáveis em cada etapa) e os parâmetros considerados para se verificar o desempenho destes modelos foram o coeficiente de determinação (r^2) e o critério de Akaike (AIC). Quanto maior o R^2 e menor o valor de AIC, melhor é o desempenho do modelo.

Esta etapa metodológica foi interativa, ou seja, cada vez que um novo conjunto de fatores determinantes retornava valores de r^2 superior e AIC inferior aos obtido anteriormente, novas variáveis eram testadas (incluídas ou rejeitadas) até que o r^2 e AIC não mostrassem mais mudanças significativas. Além de r^2 e AIC, os modelos de regressão multivariada clássica foram analisados através do Índice de Moran que confere a autocorrelação espacial e dos Testes de Lagrange que verificam qual modelo multivariado espacial é mais apropriado, *Spatial Lag* ou *Spatial Error*.

Os fatores determinantes selecionados nos modelos resultantes da análise exploratória via critério *Stepwise* foram consideradas nos modelos de regressão multivariada espacial empregando-se o *software* geoestatístico GEODA. Os modelos de regressão espacial procuram estabelecer a importância relativa de fatores determinantes para diferentes usos da terra (AGUIAR, 2006). Este trabalho aplicou o modelo de regressão *Spatial Lag* (ANSELIN, 1996) para verificar a dependência espacial dos fatores determinantes. Este método é descrito matematicamente como mostra a Equação 8.1 e 8.2.

$$Y = X\beta + \varepsilon, \varepsilon \sim N(0, \sigma^2) \text{ ou} \quad (8.1)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k-1} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \dots \\ \beta_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \dots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (8.2)$$

onde Y é um vetor ($nx1$) de observações de uma variável dependente em cada uma das n localizações; X é a matriz (nxk) de variáveis exógenas; β é um vetor ($kx1$) de parâmetros e ε é um vetor ($nx1$) de erros. Além disso, é adicionada um parcela que remete a dependência espacial através de um novo termo que incorpora a autocorrelação espacial como parte de um componente explanatório do modelo. A Equação 8.3 é a modificação da Equação 8.1 adicionando o componente referido.

$$Y = \rho WY + X\beta + \varepsilon, \varepsilon \sim N(0, \sigma^2) \quad (8.3)$$

onde W é uma matriz de pesos espaciais, o produto WY retrata a dependência espacial sobre Y e ρ é o *coeficiente auto regressivo espacial*.

Neste momento, com o objetivo de escolher o modelo que apresentou melhor ajuste para ser implementado no LuccME, os modelos de regressão multivariada clássica foram comparados aos modelos de regressão multivariados espaciais através do r^2 e do Log da Verossimilhança.

8.4.8 Escolha dos componentes alocação

A componente de alocação determina a distribuição espacial das mudanças de uso e cobertura da terra com base na demanda (seção 5.4.6) e no potencial (seção 5.4.7) e a parametrização desse componente obedece às necessidades do usuário. As regras de alocação definidas neste trabalho estão inseridas no algoritmo implementado no LUCMME *AllocationClueLike*:

Baseado no processo de competição entre classes de uso da terra dentro de uma mesma célula, ajustado de modo iterativo para satisfazer a demanda quando todas as células são consideradas, conforme descrito em Verburg et al., (1999). As células recebem um percentual da mudança que deve ser alocada em cada passo de tempo para toda a área, proporcionalmente ao seu potencial (AGUIAR et al., 2015).

8.4.9 Implementação do modelo no LuccME e simulação para o período 2005-2010

A construção do modelo foi feita no *software* LuccME. Os primeiros passos consistiram em configurações iniciais como as *definições do modelo* (pasta de trabalho, nome do modelo e período para simulação), as *definições espaciais* (informações sobre o banco de dados, nome do tema referente ao plano celular e tamanho da célula) e os *tipos de uso da terra*. A parte central da construção do modelo é a configuração dos componentes de demanda, potencial e alocação definidos nas seções anteriores. Em seguida foram realizadas configurações finais que requerem informações sobre os anos de atualização das variáveis (variáveis dinâmicas) e sobre os cenários.

8.4.10 Variáveis dinâmicas

Como mencionado, o período inicial de simulação do modelo foi de 2005-2010 e o ano para o qual foi realizada a validação é 2012. No entanto, para os anos de 2006-2014 e 2050 algumas variáveis foram atualizadas durante a simulação. Estas variáveis e o respectivo período de atualização são mostrados na Tabela 8.4, embora tenham sido apresentadas no item 1.4.5 (*Fatores determinantes potenciais* deste capítulo).

Tabela 8.4 - Variáveis dinâmicas e respectivo período de simulação

	Variável	Nome no banco	Anos atualizados no modelo
1	Distância euclidiana à usinas de cana-de-açúcar e destilarias de álcool	l_usinas	2005, 2006,2007,2008,2009,2010
2	Produtividade	Produtividade2	2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013 e 2014 (dados observados)
3	Quantidade de cana-de-açúcar produzida	qproduz	2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013 e 2014 (dados observados)
4	Área colhida com plantio de cana-de-açúcar	areacolhida	2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013 e 2014 (dados observados)
5	Produto Interno Bruto do agronegócio	pib_agricola	2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014 (dados observados) 2020, 2025, 2030, 2035, 2039, 2045 e 2050 (dados simulados – ver Capítulo 7)
6	Unidades de conservação	uc	2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013 e 2014
7	Precipitação (Fig. 6.27)	prec_apt	2050
8	Temperatura (Fig. 6.31)	temp_apt	2050

Especialmente as variáveis de precipitação e temperatura que foram atualizadas no ano de 2050 são resultado da análise de aptidão climática da cana-de-açúcar mostrada no Capítulo 6, precisamente nas Figuras 6.31 e 6.35. Neste caso, foram utilizados os resultados correspondentes às simulações do modelo HadGEM2-ES para as projeções RPC 4.5 e 8.5.

Os dados de produtividade atualizados nos anos 2020, 2025, 2030, 2035, 2039, 2045 e 2050 são resultados da análise reportada no Capítulo 7 que faz referência às simulações do modelo INLAND utilizando sua componente agrícola e baseando-se nas simulações provenientes do modelo HadGEM2-ES para as projeções RPC 4.5 e 8.5.

8.4.11 Validação

No LuccME estão implementadas duas rotinas para validação que comparam, para o mesmo ano, o resultado da simulação para um determinado uso e o correspondente dado real para o mesmo ano. No caso deste estudo, o resultado da simulação da área cultivada para o ano de 2012 foi comparado ao mapeamento obtido via projeto CANASAT para o ano de 2012.

Ambos os métodos consideram a diferença entre o dado simulado e o real, porém o primeiro, *multiresolução de toda área (ext)*, considera toda a área de uma região representada em janelas regulares (multiresolução), enquanto o segundo, *multiresolução das áreas onde houveram mudanças (dif)*, avalia apenas as áreas nas quais foram quantificadas mudanças em janelas regulares. Assim, os resultados são apresentados em porcentagem de acerto considerando-se 10 resoluções (10 janelas), 1x1, 2x2, 3x3, 4x4, 5x5, 6x6, 7x7, 8x8, 9x9 e 10x10. O erro permitido foi de 0%.

8.4.12 Cenário da área cultivada com cana-de-açúcar no Estado de São Paulo para o ano de 2050

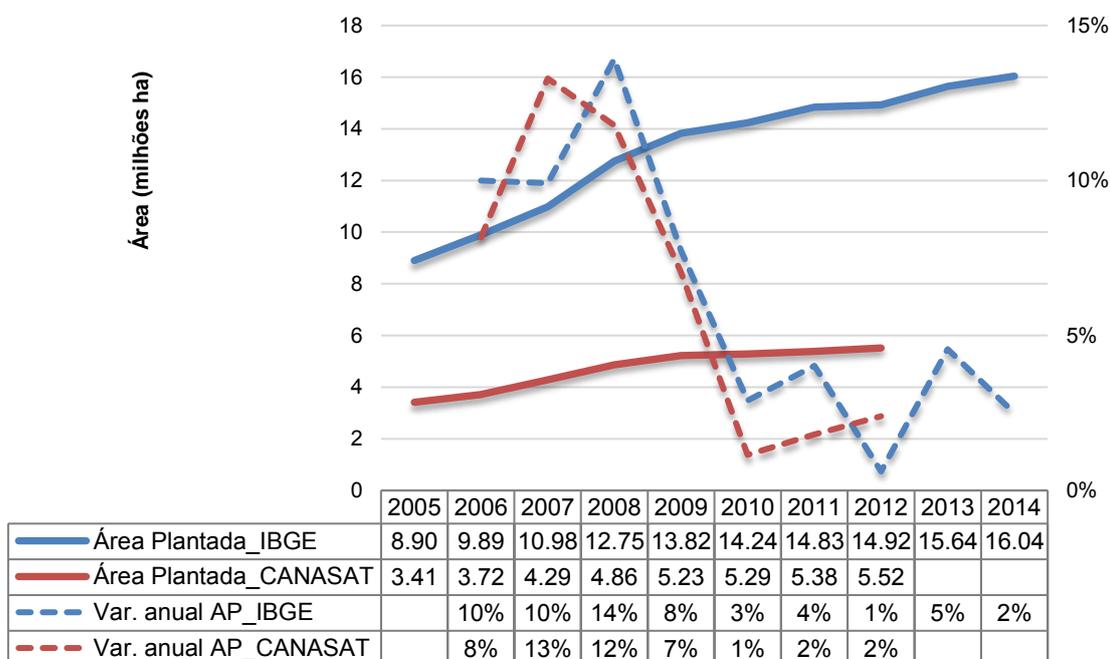
8.4.12.1 Projeções da área cultivada para o período 2015 – 2050

Para a geração de cenários de expansão da área cultivada com cana-de-açúcar deve-se informar ao modelo as projeções de área plantada no período de interesse. Como o objetivo desta pesquisa foi o de gerar cenários para os anos de 2050 e 2100, foi realizada pesquisa bibliográfica em busca de informações futuras de área cultivada com cana-de-açúcar para o Estado de São Paulo. Em

termos de previsão de culturas agrícolas, geralmente as informações existentes são fornecidas com relação à produtividade ($t\ ha^{-1}$) ou de quantidade produzida (t) e menos frequentes em relação à área cultivada (ha). Ao mesmo tempo, informações individualizadas para estados são ainda mais difíceis de serem encontradas.

Como mencionado neste capítulo, a área plantada com cana-de-açúcar para os anos compreendidos no período 2005-2012 foi obtida via dados do projeto CANASAT. Para estimar a área plantada nos anos de 2013 e 2014 foram utilizadas as variações anuais de área plantada apontadas pelo IBGE (IBGE, 2016), mostrados na Figura 8.33, que indicam aumento de área plantada de 2012 para 2013 de 5% e de 2013 para 2014 de 2%. A discrepância entre as informações fornecidas pelo IBGE/SIDRA e aquelas provenientes dos mapeamentos do Projeto Canasat (apontadas também na Figura 8.33) devem ser notadas, razão pela qual optou-se por utilizar a variação anual (em porcentagem) e não o valor de área absoluto (ha).

Figura 8.33 - Dados de área colhida e área plantada com cana-de-açúcar no estado de São Paulo. Fonte: SIDRA/IBGE



Para o período 2014/2015 – 2024/2025 foram analisados dois estudos. O primeiro remete à simulações de área cultivada com cana-de-açúcar no Brasil considerando dois cenários, um com alta demanda por açúcar e etanol para 2024 e outro com baixas demandas por derivados da cana-de-açúcar (Marin et al., 2016). O primeiro cenário resultou em 13% de acréscimo de área plantada e o segundo apontou uma redução de 18% da área plantada do país, possivelmente por conta da competição da cana-de-açúcar com outros usos. Contudo, o acréscimo de 13% da área plantada para altas demandas implica em aumento da produtividade seguindo tendências históricas de crescimento da cultura.

O outro estudo avaliado trata-se das projeções de longo prazo do Agronegócio realizadas pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2015). Este relatório aponta um aumento de área plantada com cana-de-açúcar no estado de São Paulo de 25,5% e observa que será o estado apresentará o menor crescimento previsto dentre os analisados (Goiás, Minas Gerais, Paraná, Mato Grosso), conforme apresentado na Tabela 8.5. Optou-se, nesse estudo, por considerar as estimativas de aumento de área cultivada com cana-de-açúcar para o estado de São Paulo.

Tabela 8.5 - Projeções Regionais - 2014/2015 a 2024/2025

Estados	Produção (mil t)			Área Plantada (mil ha)		
	2014/15	2024/25	Var. %	2014/15	2024/25	Var. %
GO	61092	83005	35,9	791	1064	34,4
MG	70575	92752	31,4	925	1201	29,8
MT	20332	26592	30,8	293	397	35,5
PR	50769	67351	32,7	696	925	32,9
SP	343345	423937	23,5	4686	5882	25,5

Fonte: BRASIL (2015)

Para o período 2025 – 2050, os resultados mostram que não existem projeções de área cultivada com cana-de-açúcar e por esta razão, considerou-se um crescimento de 10% para a área cultivada. Na Tabela 8.6 são apresentados os valores de área plantadas informados ao modelo para alocação.

Tabela 8.6 - Área cultivada com cana-de-açúcar e projeções (2015-2050) em km²

ANO	CANA	DIVERSOS	OUTROS	ANO	CANA	DIVERSOS	OUTROS
2005	34129	210938	12485	2028	74731	170337	12485
2006	37162	207906	12485	2029	75026	170041	12485
2007	42858	202210	12485	2030	75322	169746	12485
2008	48579	196488	12485	2031	75617	169450	12485
2009	52256	192812	12485	2032	75912	169155	12485
2010	52864	192204	12485	2033	76208	168860	12485
2011	53838	191230	12485	2034	76503	168564	12485
2012	55159	189908	12485	2035	76799	168269	12485
2013	57917	187150	12485	2036	77094	167974	12485
2014	59076	185992	12485	2037	77389	167678	12485
2015	60418	184649	12485	2038	77685	167383	12485
2016	61761	183306	12485	2039	77980	167087	12485
2017	63104	181964	12485	2040	78275	166792	12485
2018	64446	180621	12485	2041	78571	166497	12485
2019	65789	179279	12485	2042	78866	166201	12485
2020	67132	177936	12485	2043	79162	165906	12485
2021	68474	176593	12485	2044	79457	165611	12485
2022	69817	175251	12485	2045	79752	165315	12485
2023	71159	173908	12485	2046	80048	165020	12485
2024	72502	172565	12485	2047	80343	164724	12485
2025	73845	171223	12485	2048	80638	164429	12485
2026	74140	170927	12485	2049	80934	164134	12485
2027	74436	170632	12485	2050	81229	163838	12485

8.4.12.2 Cenários de expansão de áreas com cultivo da cana-de-açúcar no estado de São Paulo a partir das projeções RCP 4.5 e 8.5

As variáveis determinantes dinâmicas atualizadas durante o período de simulações foram a produtividade agrícola, a temperatura do ar e a precipitação em dois contextos climáticos divergentes; as projeções climáticas RCP 4.5 e 8.5 geradas pelo modelo HadGEM2-ES.

As projeções RCP 4.5 e 8.5 foram aplicadas para a modelagem de expansão da área cultivada com cana-de-açúcar e para isso, ambas as projeções foram inseridas no modelo INLAND/AGRO e assim foram obtidas as produtividades da cana-de-açúcar para o estado de São Paulo (como descrito no Capítulo 7).

Considerou-se, também, as áreas aptas com relação à temperatura e às precipitações resultantes da análise climática das simulações do modelo HadGEM2-ES apresentada no Capítulo 6 para este mesmo conjunto de forçantes radiativas.

Em se tratando da produtividade agrícola, os resultados simulados pelo modelo INLAND/AGRO foram utilizados somente para a construção dos cenários de expansão da cana. Neste caso, por terem sido verificadas superestimativas em algumas áreas e subestimativas em outras (conforme mostrou o Capítulo 7), optou-se por utilizar incrementos de produtividade resultantes da comparação entre os resultados simulados de 2014 com os anos 2020, 2025, 2030, 2035, 2039, 2045 e 2050 (Equação 8.4) que foram aplicados ao dado observado (SIDRA/IBGE) referente ao ano de 2010 (Figura 8.33).

$$Produtividade_x = Produtiv_{2014} + (Produtiv_{2014} * incremento_{x-2014}) \quad (8.4)$$

onde:

$Produtividade_x$ - produtividade no ano x ($t\ ha^{-1}$), sendo x = 2020, 2025, 2030, 2035, 2039, 2045 e 2050;

$Produtiv_{2014}$ - produtividade observada no ano de 2014 disponibilizada pelo IBGE/SIDRA ($t\ ha^{-1}$);

$incremento_{x-2014}$ - aumento no período x-2014, sendo x = 2020, 2025, 2030, 2035, 2039, 2045 e 2050

O cenário *RCP 8.5* utilizou as simulações da produtividade para o estado de São Paulo obtidas via modelo INLAND/AGRO baseadas nas projeções climáticas *RCP 8.5* e o incremento da produtividade foi calculado também conforme a Equação 8.4.

8.5 Resultados

Esta seção apresenta os modelos de regressão estatísticos construídos para explicar a dinâmica da expansão da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo e são discutidos seus respectivos fatores determinantes. Nos modelos apresentados, a variável dependente é a cana-de-açúcar (*cana*) e as variáveis explanatórias potenciais, variáveis independentes, são aquelas selecionadas do conjunto referido no Quadro 8.1 via critério *Stepwise*.

8.5.1 Fatores determinantes para a expansão da área cultivada com cana-de-açúcar no Estado de São Paulo

Com relação aos modelos de regressão, antes de discuti-los, uma observação prévia: durante o processo interativo para a seleção das variáveis determinantes utilizando o critério *stepwise*, constatou-se que a variável porcentagem de áreas com pastagem (*pastagem*) teve grande participação no desempenho dos modelos, o que permitiu concluir que a disponibilidade de terras está intimamente relacionada com a cultura. Ou seja, conforme apontam diversos trabalhos sobre modelagem da expansão da área cultivada com cana-de-açúcar, os quais utilizaram diversas metodologias e escalas, a transição do uso pastagem para a cana-de-açúcar foi o principal processo identificado para a expansão (NASSAR et al., 2008; RUDORF et al., 2010; LOARIE et al., 2011; ADAMI et al., 2012; ARCOVERDE et al., 2008). Embora o presente trabalho não se preocupe em discutir a transição entre os usos e apenas a expansão da cultura, a introdução de uma variável determinante que retrate, de alguma forma, a quantidade de área disponível a ser convertida em cana-de-açúcar foi fundamental na compreensão do processo de modelagem da expansão.

A seguir é apresentado, em forma de tabela, o modelo de regressão multivariada obtido, bem como, os testes para examinar normalidade (Jarque-Bera), heterodasticidade (Breusch-Pagan e Koenker-Bassett), dependência espacial (Moran's error) e a escolha do modelo de regressão espacial (Testes de Lagrange). Por último, é apresentado também, o resultado da regressão espacial (*Spatial Lag*).

Como mencionado anteriormente, o modelo considerou inicialmente todas as variáveis mostradas no Quadro 8.1. O critério *stepwise* selecionou o subconjunto apresentado na Tabela 8.7. Como principais fatores determinantes associados à expansão da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo foram apontados (ou seja, as variáveis com maior peso para a expansão da cana): porcentagem da célula com pastagem (*pastagem*), distância às usinas em log (*l_usinas*), precipitação (*prec_apta*), temperatura (*temp_apta*), aptidão do solo (*apt_solo*), profundidade (*profund*), produtividade (*produtividade2*), unidades de conservação (*uc*), áreas aptas de acordo com o zoneamento (*zc_adeq*), declividade média (*slope_media*) e fertilidade (*fert_alta*).

Com relação à dependência espacial, o Índice de Moran ($I=0,53$) dos resíduos da regressão linear múltipla mostra que há autocorrelação espacial. As análises dos testes de Lagrange apontaram que o modelo de maior ajuste sugerido foi o *Spatial Error*. No entanto, este método não está implementado no LuccME e, por esta razão, foi utilizado o modelo *Spatial Lag*. No entanto, os testes de Lagrange, apontaram significância para os dois modelos, *Spatial Lag* e *Spatial Error*, não havendo prejuízo se empregado o *Spatial Lag*.

Os resultados da regressão espacial são apresentados na Tabela 8.8 que mostra que a maioria das variáveis inseridas no modelo são estatisticamente significantes ($p<0,05$). A análise dos valores de AIC e Log da Verossimilhança indicaram que o modelo de regressão *Spatial Lag* apresentou melhor ajuste em relação ao modelo de regressão linear múltipla.

De forma geral, os indicadores estatísticos mostraram melhor desempenho para os modelos espaciais em relação aos modelos lineares como pode-se verificar através da Figura 8.34. Em relação aos coeficientes de determinação múltipla (R^2) dos modelos de regressão lineares, as variações foram quase insignificantes, ao passo que para os modelos de regressão espacial *Spatial Lag* não houve variação e se apresentaram significativos e maiores que 0,60.

Tabela 8.7 - Regressão linear múltipla para o uso 'cana'

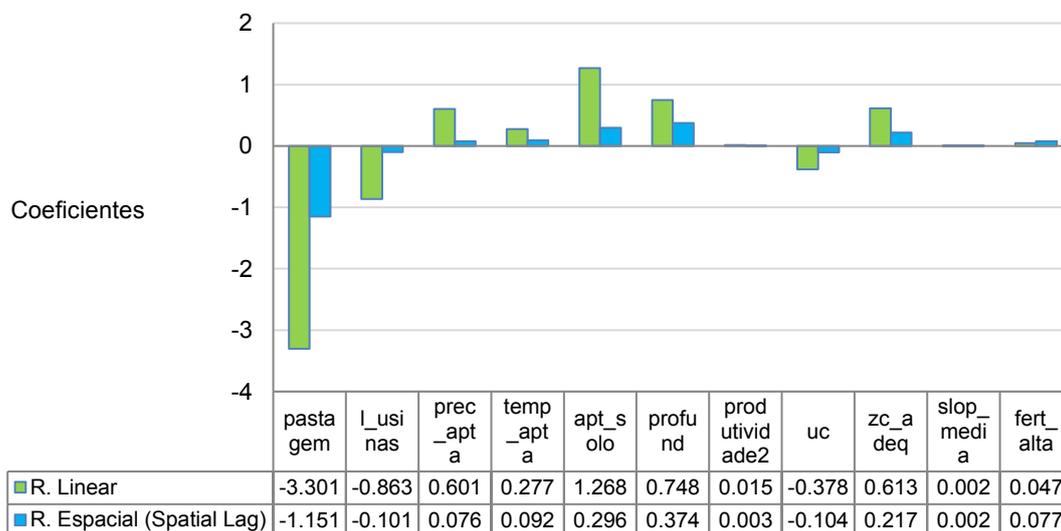
<i>Variável dependente:</i>	l_cana		
r^2 :	0,62		
r^2 ajustado:	0,62		
<i>Critério de Akaike:</i>	54540,6		
<i>Log da Verossimilhança:</i>	-27258,3		
<i>Variable</i>	<i>Coefficient</i>	<i>Std,Error</i>	<i>Probability</i>
CONSTANT	-1,11047	0,159762	0
pastagem	-3,3006	0,047078	0
l_usinas	-0,86285	0,031443	0
prec_apt	0,601315	0,028556	0
temp_apt	0,276721	0,028971	0
apt_solo	1,267654	0,031989	0
profund	0,747711	0,040212	0
produtividade2	0,01527	0,000411	0
uc	-0,37807	0,037251	0
zc_adeq	0,613384	0,05202	0
slop_media	0,001703	0,002037	0,40315
fert_alta	0,047087	0,028744	0,10138
Diagnóstico de normalidade e heterocedasticidade dos erros			
TEST	DF	VALUE	PROB
Breusch-Pagan	11	2034,9562	0
Koenker-Bassett	11	1570,2272	0
Diagnóstico da dependência espacial			
TEST	MI/DF	VALUE	PROB
Moran' I (error)	0,53	132,7870	0
Lagrange Multiplier (lag)	1	16086,5624	0
Robust LM (lag)	1	604,5511	0
Lagrange Multiplier (error)	1	17523,6404	0
Robust LM (error)	1	2041,6292	0
Lagrange Multiplier (SARMA)	2	18128,1915	0

Tabela 8.8 - Regressão múltipla espacial (Spatial Lag) para o uso 'cana'

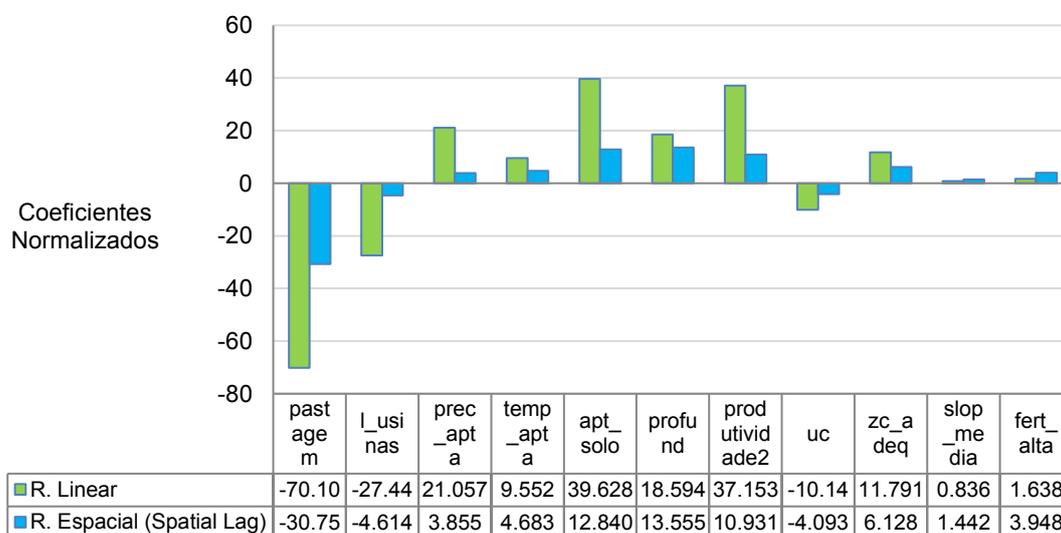
<i>Variável dependente:</i>	l_cana		
r^2 :	0,824944		
r^2 ajustado:	-		
<i>Critério de Akaike:</i>	43916,8		
<i>Log da Verossimilhança:</i>	-21945,4		
<i>Variable</i>	<i>Coefficient</i>	<i>Std.Error</i>	<i>Probability</i>
W_l_cana	0,79144	0,005854	0
CONSTANT	-0,65346	0,108438	0
pastagem	-1,15078	0,037413	0
l_usinas	-0,10061	0,021807	0
prec_apt	0,075807	0,019665	0,00012
temp_apt	0,092266	0,019703	0
apt_solo	0,296007	0,023054	0
profund	0,373607	0,027563	0
produtividade2	0,00317	0,00029	0
uc	-0,10351	0,025291	0,00004
zc_adeq	0,21731	0,035463	0
slop_media	0,001989	0,001379	0,1491
fert_alta	0,076825	0,019459	0,00008
Diagnóstico de normalidade e heterocedasticidade dos erros			
TEST	DF	VALUE	PROB
Breusch-Pagan	13	28781,3654	0
Diagnóstico da dependência espacial			
TEST	DF	VALUE	PROB
Likelihood Ratio Test	1	39998,2318	0

Figura 8.34 - Comparação entre os coeficientes da regressão linear e da regressão espacial (*Spatial Lag*) para o uso 'cana' sendo: a) coeficiente; b) coeficiente normalizado

a)



b)



Com relação aos fatores determinantes, a Figura 8.34 ilustra a participação dos mesmos no modelo estatístico resultante do processo iterativo utilizando o critério *stepwise*. Nota-se que a variável mais importante se relaciona ao principal

processo que envolve a expansão da cana-de-açúcar, ou seja, a conversão para pastagem. Esta variável traduz, como mencionado, a disponibilidade de terras para a cultura, o que pode ser visualizado pela correlação inversa com a cana-de-açúcar (coeficiente com sinal negativo).

As duas outras variáveis que apresentaram maiores correlações com a cana-de-açúcar, como aponta a Figura 8.34, são a aptidão do solo para o desenvolvimento da cultura e a profundidade. A correlação obtida para estes dois fatores foi direta, de modo que a localização das áreas cultivadas com cana-de-açúcar procura seguir o padrão espacial destas variáveis. Em se tratando da aptidão do solo para a cultura, esta variável considera as características dos solos do Estado de São Paulo buscando apreciar a aptidão agrícola (boa, regular ou restrita) sob aspectos de fertilidade natural (alta, média, ou baixa), profundidade (favorável, desfavorável) e pedregosidade (presente ou ausente), variáveis também consideradas individualmente no modelo. Por esta razão, baseando-se nos resultados desses modelos estatísticos, pode-se inferir que a maior parte das propriedades que cultivam a cana-de-açúcar se localizam em regiões nas quais as terras possuem potencial agrícola para o seu desenvolvimento. Esta informação pode ser reafirmada considerando-se que as variáveis fertilidade e profundidade também foram relacionadas nos modelos estatísticos.

É importante mencionar que, embora o procedimento esperado fosse retirar dos modelos estatísticos a variável aptidão do solo ou as variáveis profundidade e fertilidade (uma vez que este dado de aptidão envolve os dados de profundidade e fertilidade), notou-se que sem a utilização dessas variáveis, o coeficiente de determinação múltipla (r^2) se reduziria.

Com relação às variáveis climáticas selecionadas, precipitação e temperatura do ar, verificou-se que a precipitação apresentou maior importância para a cultura, conforme os resultados da regressão linear. No entanto, quando considerada a dependência espacial (regressão espacial) as duas variáveis passaram a apresentar coeficientes praticamente iguais. É importante salientar, nesse caso, que estas variáveis selecionadas correspondem à porcentagem de áreas aptas

para o plantio da cana dentro de cada célula cujos critérios foram apresentados no Capítulo 6.

Com relação à declividade, a análise estatística selecionou a variável declividade média, embora o banco de dados contivesse o dado correspondente à porcentagem da célula que apresenta declividade média abaixo de 12% (Figura 8.14), classificação que representa diretamente a faixa ideal para o plantio da cultura, visto que na maior parte dos empreendimentos a colheita é mecanizada.

Outro fator determinante escolhido corresponde à distância até as usinas e destilarias de álcool. Neste caso, a correlação é negativa porque as usinas se localizam próximas das áreas produtoras de cana-de-açúcar, ou seja, quanto maior a distância até as usinas, menor a quantidade de plantações de cana-de-açúcar.

A variável unidades de conservação também apresentou correlação negativa com a cana-de-açúcar e isto é esperado porque nestas áreas de proteção não existem cultivos de cana-de-açúcar. Esta variável indicou no processo de modelagem de expansão, portanto, que nestas regiões delimitadas como unidades de conservação o uso cana-de-açúcar não será alocado.

Por fim, a variável correspondente às zonas aptas para o plantio da cana-de-açúcar de acordo com o Zoneamento Agroambiental do Estado de São Paulo para o Setor Sucroenergético apresentou correlação positiva com a cana-de-açúcar e isso mostrou que, de certa maneira, os empreendimentos desse setor se localizam nas áreas indicadas como adequadas pelo zoneamento.

Embora este modelo de expansão da cana-de-açúcar desenvolvido nesse estudo se preocupe em analisar a expansão da cultura e não a competição entre os usos, o LuccME requer, para cada uso do solo, o respectivo componente potencial, ou seja, necessita de modelo estatístico também para o uso 'diversos' (seção 8.4.7 deste capítulo). Por isso, modelos de regressão linear e espacial para representar o uso 'diversos' também foram construídos. Neste caso, sabendo-se que 'diversos' é o somatório dos usos campos úmidos, cerrados, cultura anual, cultura perene, mangues, mata, mata ciliar, pastagem, reflorestamento e restinga, categorias estas muito diferentes entre si (ver Figuras

8.3 a 8.8), os modelos estatísticos construídos para explicar a localização desse agrupamento não são adequados em termos conceituais, embora o sejam na prática. Em outras palavras, esta constatação é esperada porque os usos agrupados nesta classe são muitos distintos (mata e mata ciliar *versus* cultura anual, por exemplo) e um único conjunto de fatores determinantes não pode ser capaz de representar toda esta diversidade. No entanto, este fato não prejudica o objetivo maior desta análise que é a de gerar mapa da área cultivada com cana-de-açúcar para o Estado de São Paulo para o ano de 2050.

Os fatores potenciais determinantes da classe 'diversos' compõem um subconjunto das variáveis apresentadas no Quadro 8.1 e, neste caso, foram excluídas aquelas que possuem relação direta com a cana-de-açúcar. Utilizando o critério de seleção *Stepwise*, a Tabela 8.9 mostra o resultado da regressão múltipla clássica e os fatores potenciais selecionados para representar o potencial da categoria 'diversos'. Conforme os resultados encontrados, as variáveis preditoras foram: cidades, declividade média, pedregosidade, profundidade, pastagem e unidades de conservação. O modelo de regressão múltipla clássica mostrou também que as variáveis determinantes foram capazes de explicar a localização de 52% da categoria 'diversos'. No entanto, o Índice de Moran ($I=0,64$) dos resíduos da regressão clássica apontam que há autocorrelação espacial e a análise dos testes de Lagrange indicam que o modelo recomendado é o *Spatial Error*, assim como no caso dos resultados referentes à cana. Conforme a significância encontrada ($p<0,05$), não há prejuízo se utilizado o modelo *Spatial Lag*. A comparação entre os coeficientes para ambos os modelos é mostrada na Figura 8.35.

A Tabela 8.10 apresenta os resultados da regressão espacial *Spatial Lag* e mostra que todas as variáveis inseridas no modelo são estatisticamente significantes ($p<0,05$). Considerando o AIC e o Log da Verossimilhança, o modelo que melhor apresentou o melhor ajuste é o modelo espacial.

Tabela 8.9 - Regressão múltipla clássica para o uso 'diversos'

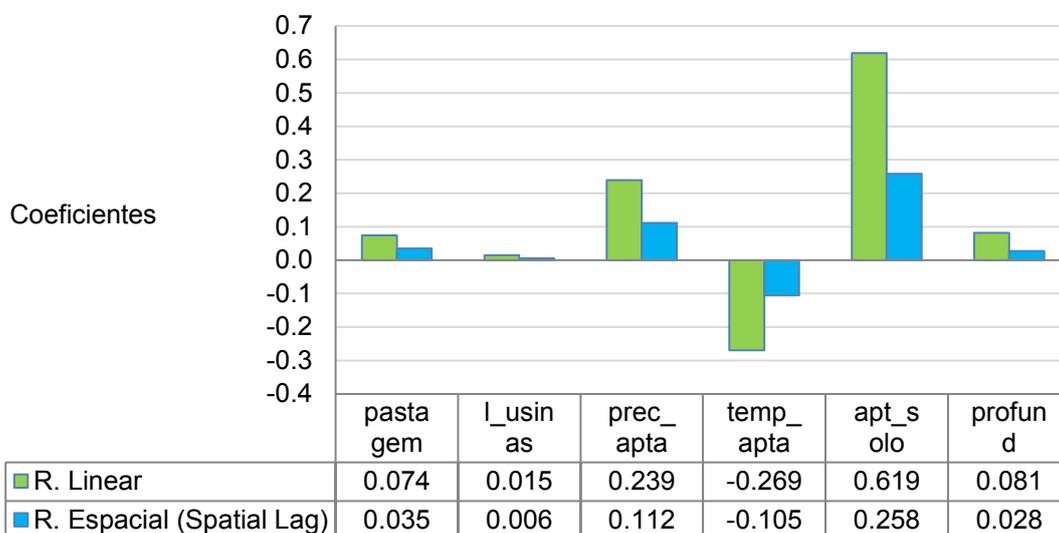
<i>Variável dependente:</i>	diversos		
r^2 :	0,52		
r^2 ajustado:	0,52		
<i>Critério de Akaike:</i>	-10917.2		
<i>Log da Verossimilhança:</i>	5465.59		
<i>Variable</i>	<i>Coefficient</i>	<i>Std.Error</i>	<i>Probability</i>
CONSTANT	0,092919	0,016541	0
l_cidades	0,073717	0,004033	0
slop_media	0,015384	0,000212	0
pedreg	0,239295	0,007864	0
profund	-0,26928	0,006897	0
pastagem	0,619359	0,005395	0
uc	0,081433	0,004857	0
Diagnóstico de normalidade e heterocedasticidade dos erros			
TEST	DF	VALUE	PROB
Breusch-Pagan	11	2034,9562	0
Koenker-Bassett	11	1570,2272	0
Diagnóstico da dependência espacial			
TEST	MI/DF	VALUE	PROB
Moran' I (error)	0,64	159,5921	0
Lagrange Multiplier (lag)	1	17802,6811	0
Robust LM (lag)	1	275,5977	0
Lagrange Multiplier (error)	1	25387,0495	0
Robust LM (error)	1	7859,9661	0
Lagrange Multiplier (SARMA)	2	25662,6472	0

Tabela 8.10 -Regressão múltipla espacial (Spatial Lag) para o uso 'diversos'

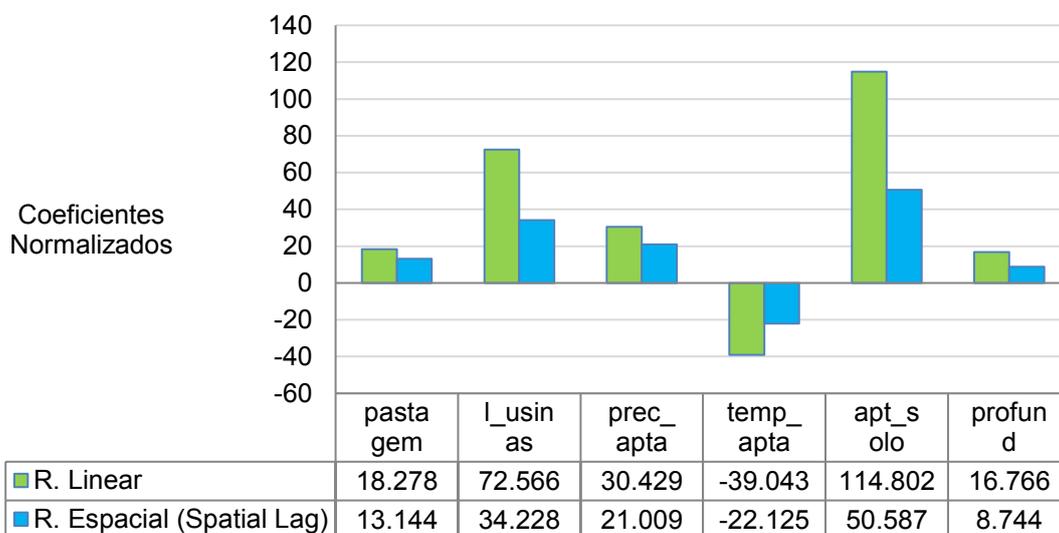
<i>Variável dependente:</i>	diversos		
r^2 :	0,52		
r^2 ajustado:	-		
<i>Critério de Akaike:</i>	-10917.2		
<i>Log da Verossimilhança:</i>	5465.59		
<i>Variable</i>	<i>Coefficient</i>	<i>Std.Error</i>	<i>Probability</i>
W_diversos	0,747761	0,005379	0
CONSTANT	-0,1199	0,01077	0
l_cidades	0,035094	0,00267	0
slope_media	0,005545	0,000162	0
pedreg	0,111745	0,005319	0
profund	-0,10485	0,004739	0
pastagem	0,257943	0,005099	0
uc	0,027867	0,003187	0
Diagnóstico de normalidade e heterocedasticidade dos erros			
TEST	DF	VALUE	PROB
Breusch-Pagan	6	4480,7006	0
Diagnóstico da dependência espacial			
TEST	DF	VALUE	PROB
Likelihood Ratio Test	1	12160,2690	0

Figura 8.35 - Comparação entre os coeficientes da regressão linear e da regressão espacial (*Spatial Lag*) para o uso 'diversos'

a)



b)



8.5.2 Simulação para o período 2005-2010, validação para o ano de 2012 e projeções para 2050

Nas Figuras 8.36 a 8.43 são apresentados os resultados espacialmente explícitos das simulações da expansão da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo utilizando o arcabouço de modelagem LuccME. A Tabela 8.11 mostra os resultados da validação da simulação para o ano de 2012 baseada no dado CANASAT do ano de 2012.

A área alocada para cada ano simulado correspondeu aos valores apresentadas na Tabela 8.6. Para o período de simulação entre 2005-2010 foram utilizados os quantitativos de área levantados pelo projeto CANASAT, fato que insere um ajuste importante nas simulações deste período. Como mostra a Tabela 8.11, considerando-se janelas de 10x10 células, ou seja, áreas de 1600 km², a simulação validada apresentou um acerto de 86,42%, ao passo que, quando foram analisadas apenas as áreas para onde ocorreram mudanças o acerto foi de 68,89%.

Figura 8.36 - Simulação da área cultivada com cana-de-açúcar para o ano de 2005

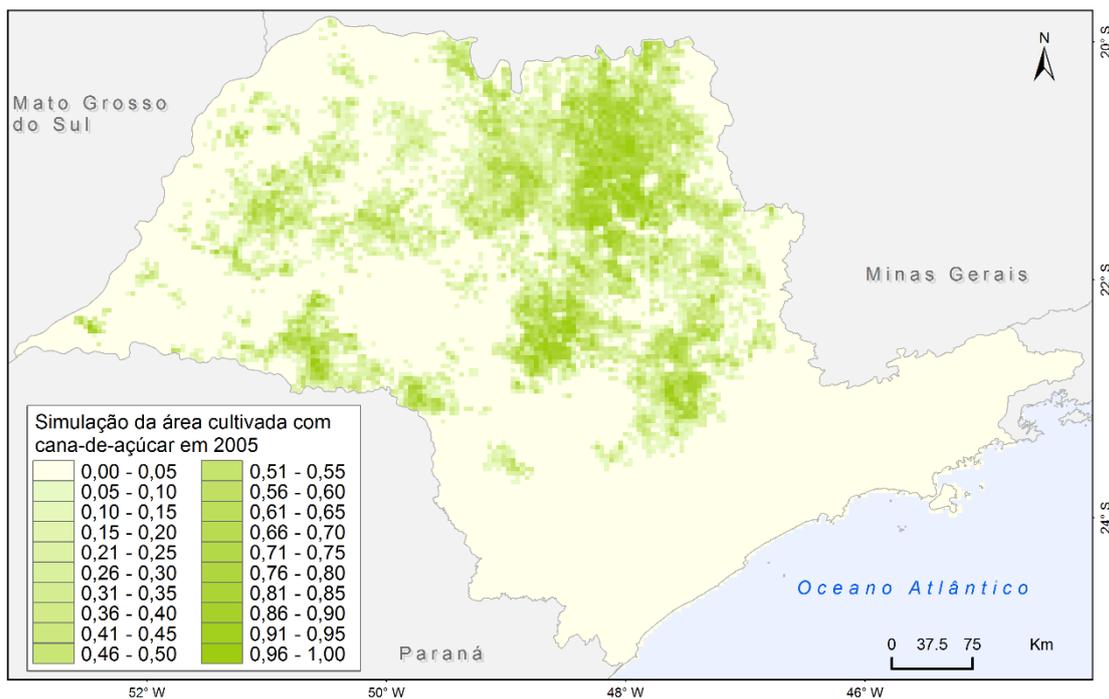


Figura 8.37 - Simulação da área cultivada com cana-de-açúcar para o ano de 2006

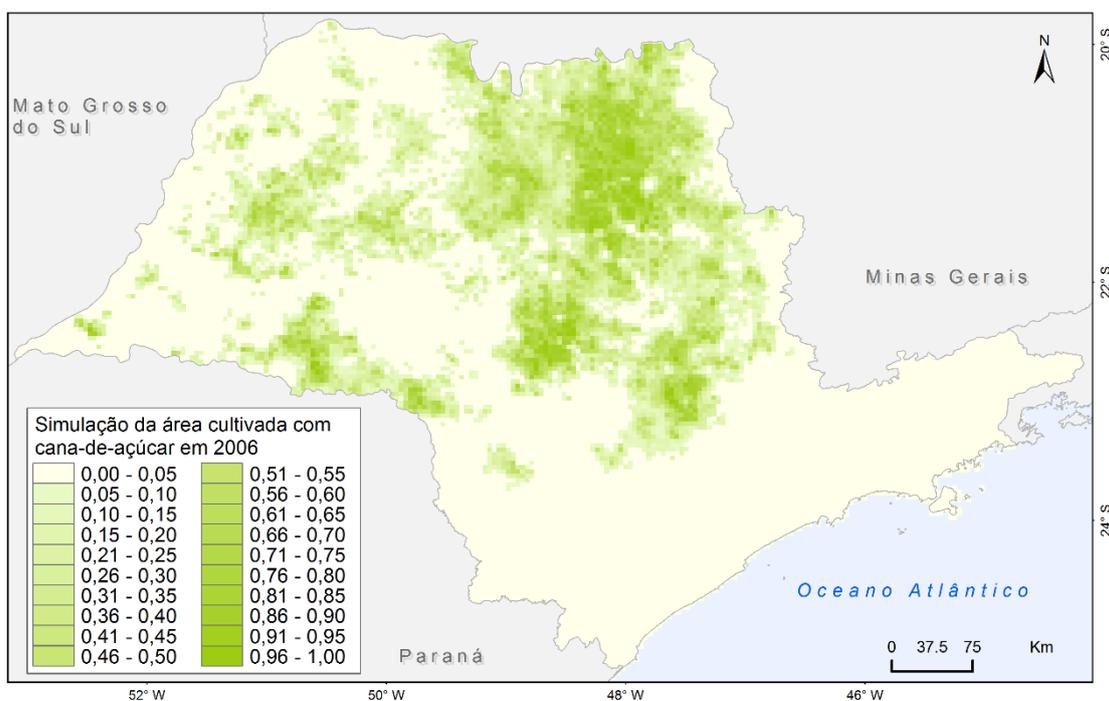


Figura 8.38 - Simulação da área cultivada com cana-de-açúcar para o ano de 2007

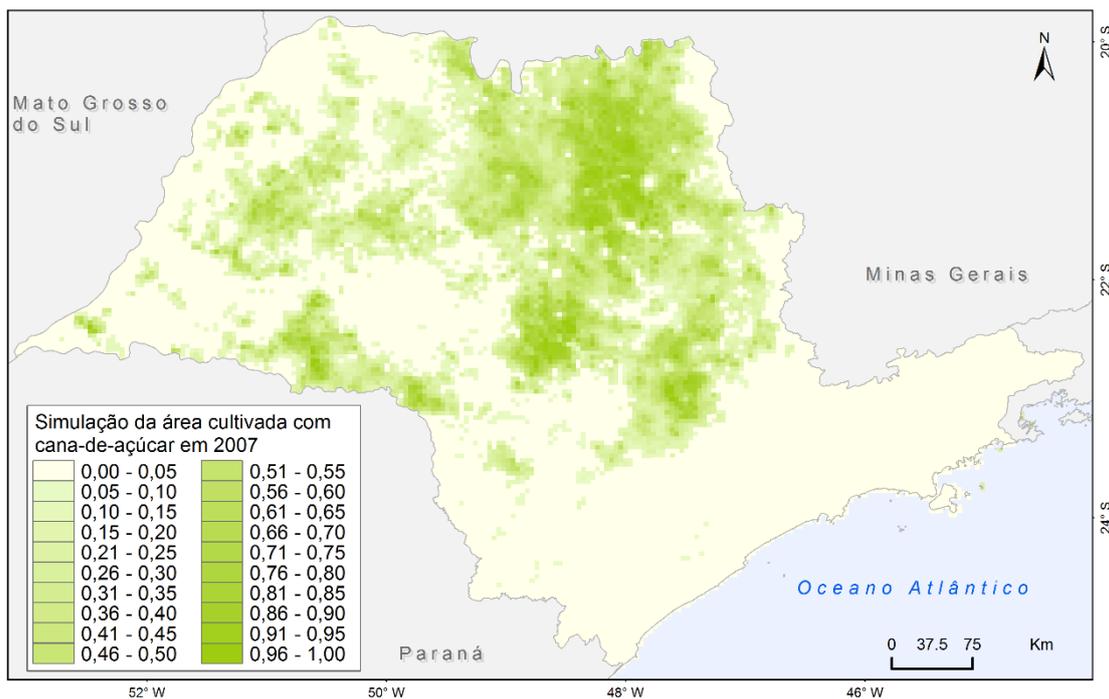


Figura 8.39 - Simulação da área cultivada com cana-de-açúcar para o ano de 2008

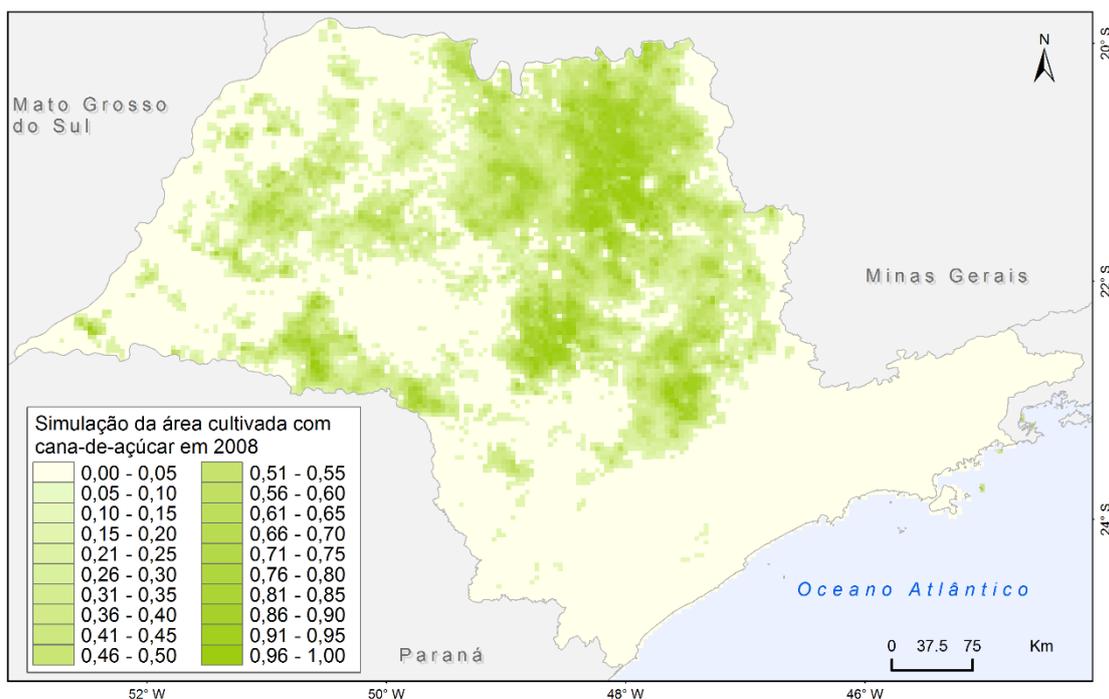


Figura 8.40 - Simulação da área cultivada com cana-de-açúcar para o ano de 2009

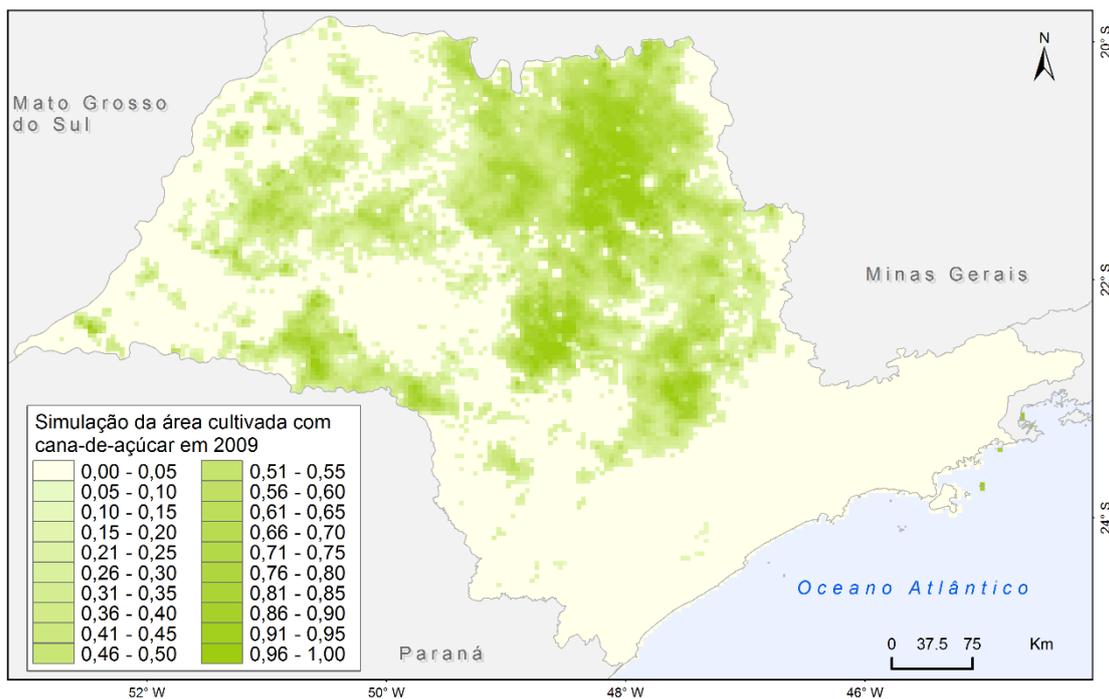


Figura 8.41 - Simulação da área cultivada com cana-de-açúcar para o ano de 2010

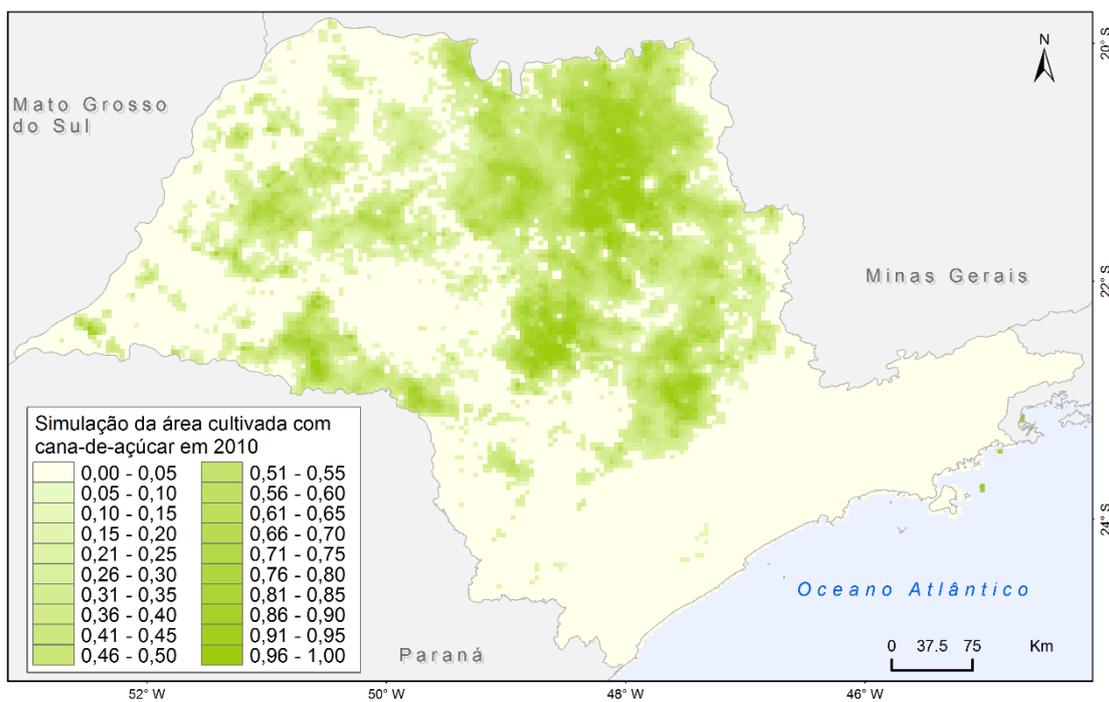


Figura 8.42 - Simulação da área cultivada com cana-de-açúcar para o ano de 2011

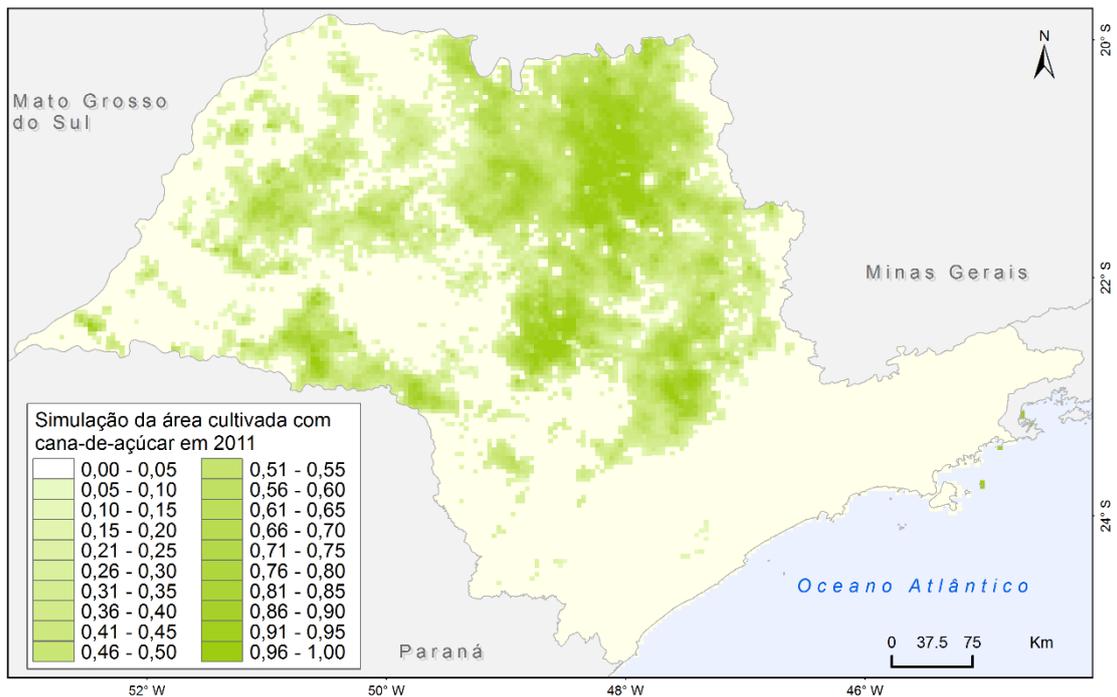


Figura 8.43 - Simulação da área cultivada com cana-de-açúcar para o ano de 2012

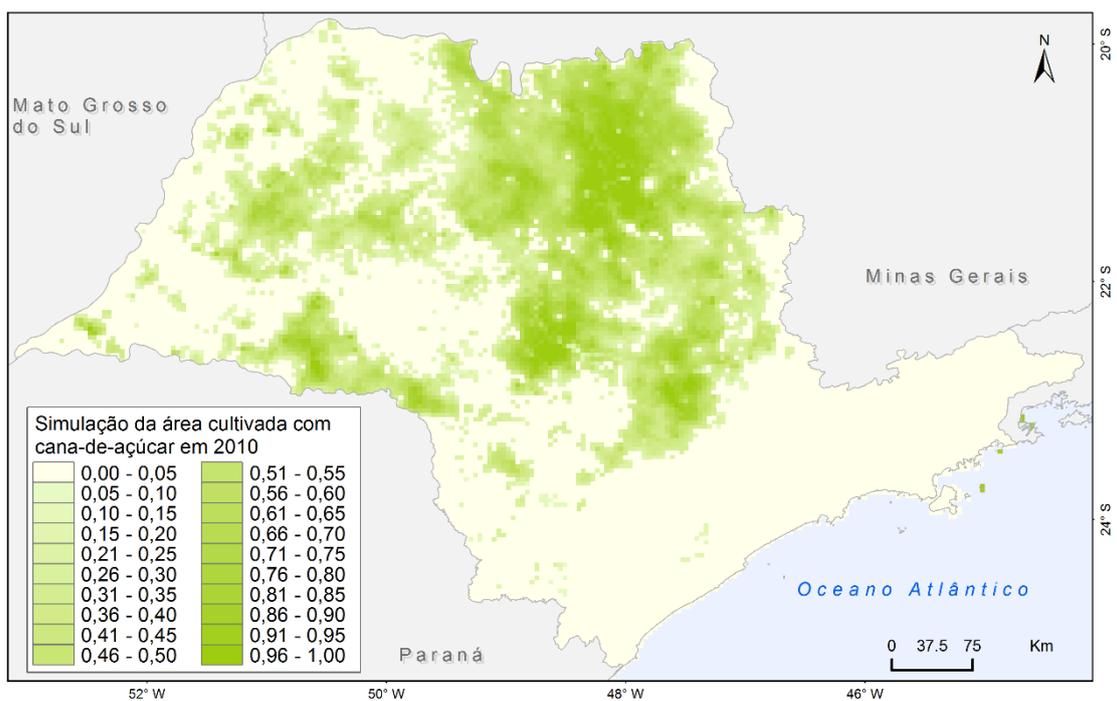


Tabela 8.11 - Validação

Janela	Extensão (ext) - %	Diferença (dif) - %
1 (1x1)	79,18	50,06
2 (2x2)	82,81	57,49
3 (3x3)	83,93	60,85
4 (4x4)	84,80	63,51
5 (5x5)	85,35	64,85
6 (6x6)	85,60	65,81
7 (7x7)	85,72	66,74
8 (8x8)	85,90	68,72
9 (9x9)	86,11	68,00
10 (10x10)	86,42	68,89

Para estas simulações foi permitida uma diferença total de área a ser alocada de 500 km² para cada uso, ou seja, o modelo, a cada interação, tentava alocar a demanda (Tabela 8.6) e, nesse processo, quando o total alocado e total informado para ser alocado (Tabela 8.6) apresentou diferença menor que 500 km² a simulação para aquele ano era concluída. O número de interações para cada ano esteve diretamente relacionado à facilidade ou dificuldade do modelo em alocar as demandas (quantitativos de uso, Tabela 8.6). Considerou-se 3000 o número máximo de interações. Caso a demanda não tivesse sido alocada após 3000 interações, a simulação era interrompida e o modelo era novamente parametrizado. O Apêndice B mostra o código do modelo final confeccionado para simular a área plantada com cana-de-açúcar no estado de São Paulo.

Com relação às simulações projetadas para o ano de 2050, a Figura 8.44 e 8.45 mostram estimativas de localização da área com cana-de-açúcar considerando as projeções climáticas RCP 4.5 e 8.5. Os gráficos apresentados pelas Figuras 8.46 e 8.47 mostram os quantitativos anuais de área plantada simulados em comparação com os valores de área informados ao modelo (Tabela 8.6).

De forma geral, o modelo alocou satisfatoriamente os quantitativos de área planta com cana-de-açúcar para as duas projeções obtidas. Como mostra a Figura 48, os incrementos anuais de área plantada apresentaram variações de uma simulação para outra, porém seguem o padrão apresentado pela linha que corresponde ao incremento da demanda informada. As variações ocorridas entre os dois cenários ocorrem depois que são atualizadas as variáveis de produtividade (simuladas via modelo INLAND/AGRO, Capítulo 7) e precipitação e temperatura do ar (Capítulo 6).

Figura 8.44 - Simulação da área cultivada com cana-de-açúcar para o ano de 2050 considerando as projeções climáticas RCP 4.5

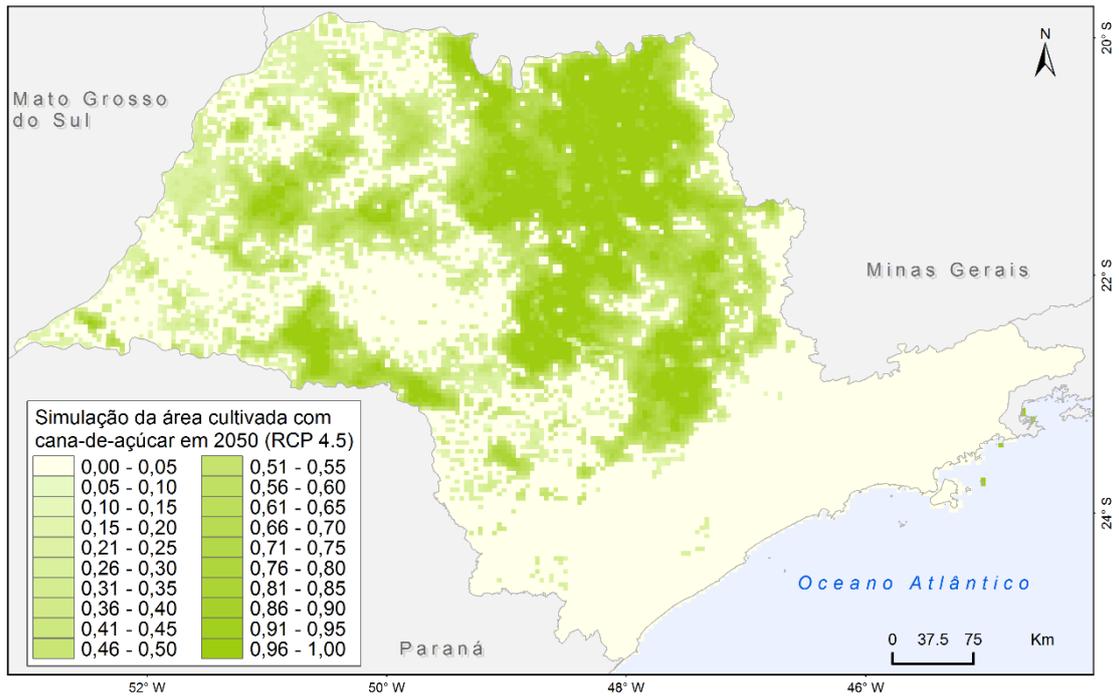


Figura 8.45 - Simulação da área cultivada com cana-de-açúcar para o ano de 2050 considerando as projeções climáticas RCP 8.5

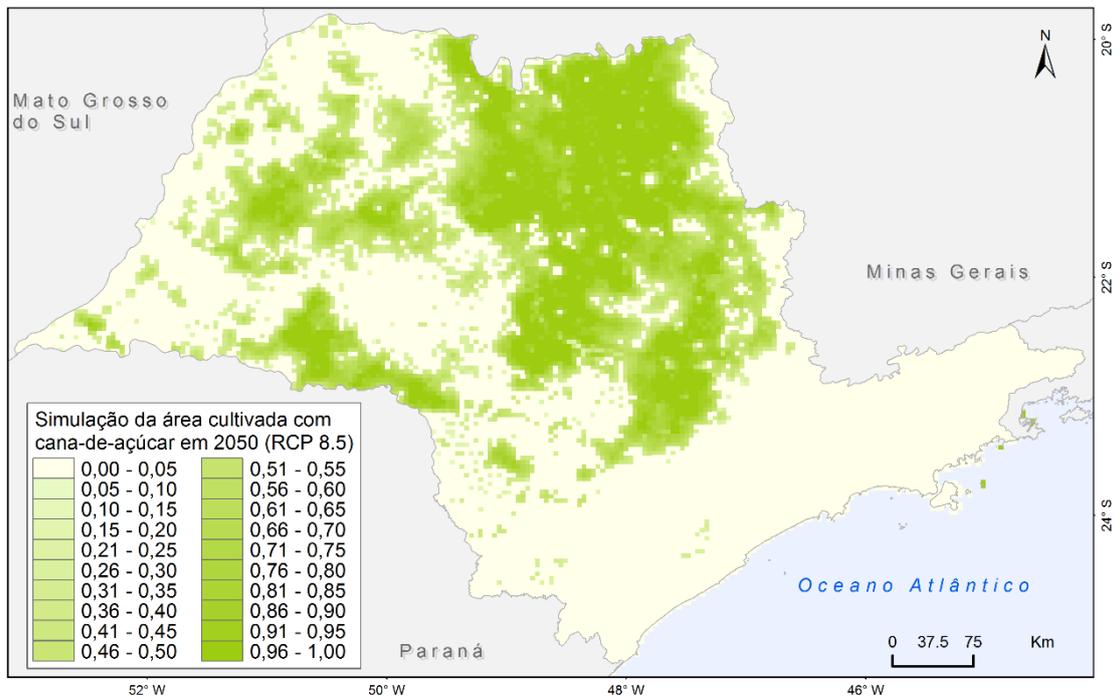


Figura 8.46 - Simulação da área cultivada com cana-de-açúcar de acordo com as projeções climáticas RCP 4.5 e 8.5

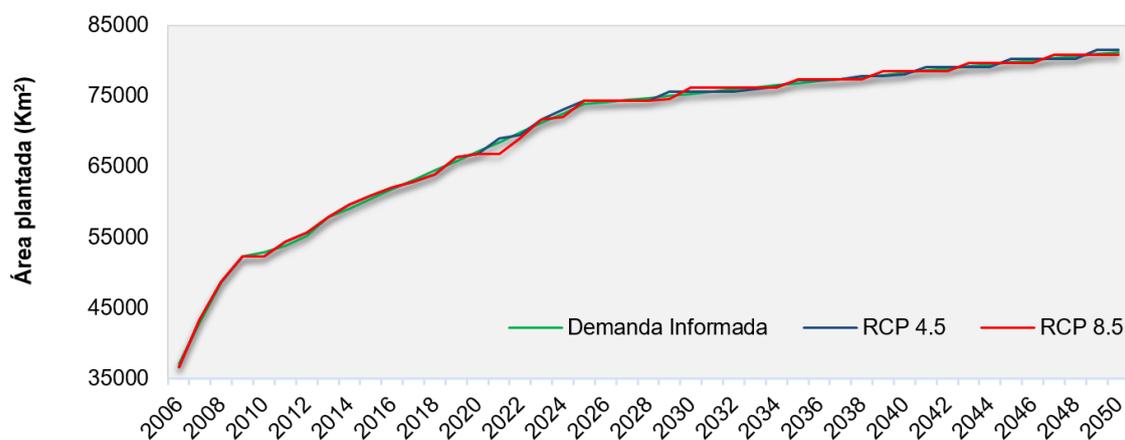
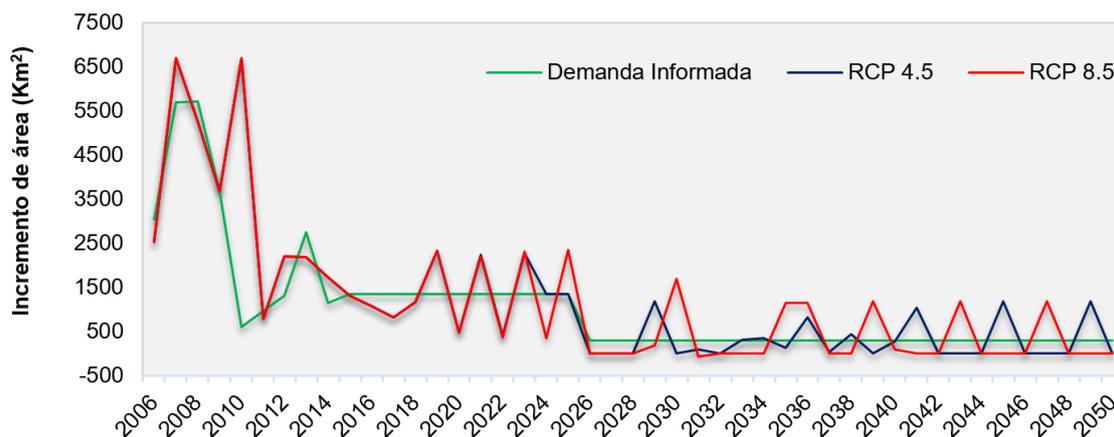


Figura 8.47 - Incremento anual da área cultivada com cana-de-açúcar considerando as projeções climáticas RCP 4.5 e 8.5

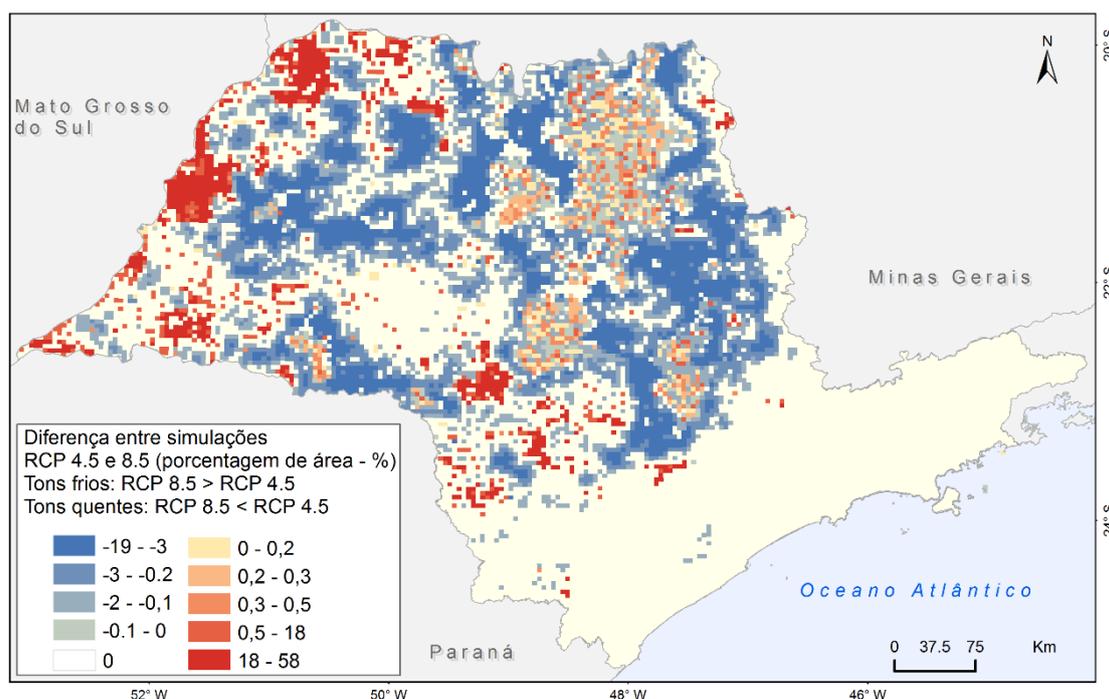


Com relação à linha da demanda, como descrito anteriormente, as projeções de aumento de área plantada com cana-de-açúcar para os períodos 2015-2025 e 2025 – 2050 foram uniformes como apontam as Figura 48 e 49. Comparando estas projeções com os resultados de incremento anual resultantes da simulação as diferenças são justificadas por duas razões. A primeira é que o potencial de cada célula em ter o uso cana-de-açúcar, determinado pelo modelo de regressão espacial (*Spatial Lag*), aponta as células prioritárias para “receber” o uso “cana-de-açúcar” e, sendo assim, a dinâmica da alocação faz com que se distribua a

área informada (Tabela 8.6) resultando em incrementos diferentes para cada ano.

Em relação às diferenças espaciais da localização das áreas cultivadas com cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, a Figura 8.48 mostra as áreas onde houve diferenças entre os dois cenários RCP 4.5 e 8.5 (lembrando que os valores apontados nesta figura se referem à porcentagem da diferença de área plantada em cada célula de 16 km²).

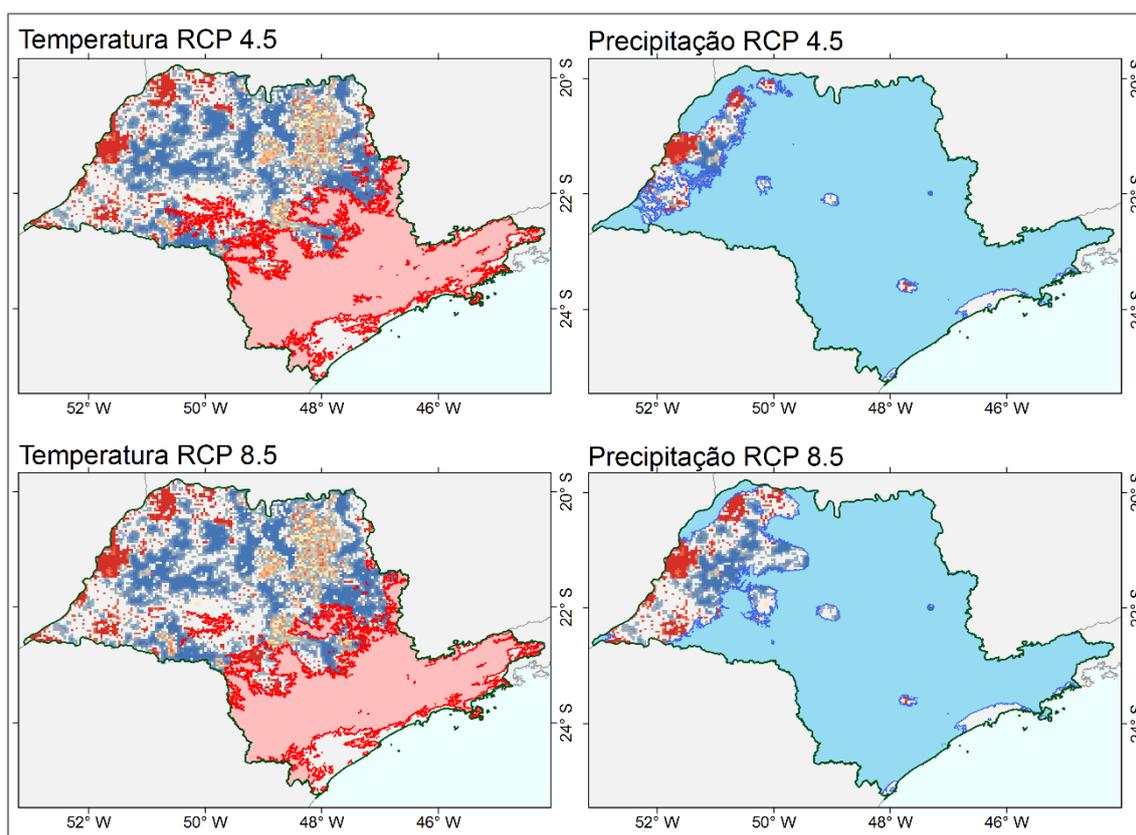
Figura 8.48 - Variação dos percentuais de área plantada em cada célula. Os valores negativos indicam que os percentuais de área plantada em cada célula considerando o cenário RCP 8.5 foram superiores aos percentuais considerando a área plantada simulada de acordo com o cenário RCP 4.5.



De forma geral, nota-se que o cenário RCP 8.5 aponta mais dispersão da área plantada que o cenário RCP 4.5. No entanto, esta dispersão não apresenta relação direta com os dados de precipitação e temperatura utilizados nestes cenários como mostra a Figura 8.49. Por isso, as divergências estão mais

associadas à produtividade simulada utilizada para alimentar o modelo nos anos de 2020, 2025, 2030, 2035, 2039, 2045 e 2050.

Figura 8.49 - Variação dos percentuais de área plantada em cada célula e sobreposição das áreas aptas considerando precipitação e temperatura utilizadas como *input* nas simulações de 2050.



8.6 Conclusões

A partir deste estudo conclui-se que as simulações relacionadas à expansão da cana-de-açúcar apresentaram um bom ajuste de acordo com os resultados da validação obtidos para o ano de 2012. O acerto obtido foi de 68,89% quando se considerou janelas de 10x10 células quando foram analisadas apenas as áreas onde ocorreram mudanças.

Com relação aos fatores determinantes para a localização da área cultivada com cana-de-açúcar para o Estado de São Paulo, a pastagem foi a variável que apresentou maior importância para a expansão (correlação negativa) e esse

resultado corrobora com os estudos levantados nesse capítulo. Em seguida, as variáveis relacionadas aos aspectos pedológicos foram as que apresentaram maior importância, seguidas da aptidão edafoclimática indicada pelo zoneamento e pelas variáveis climáticas individualmente.

Considerando os cenários de área plantada com cana-de-açúcar para 2050, as simulações consideraram um aumento de 37% de área cultivada em relação ao ano de 2014. Os resultados apontaram que para as projeções RCP 4.5 e 8.5 do modelo HadGEM2-ES, a precipitação e a temperatura do ar não foram os principais determinantes da diferenciação entre eles, fato atribuído aos dados simulados de produtividade da cana-de-açúcar obtidos pelo modelo INLAND/AGRO considerando ambas as projeções climáticas RCP 4.5 e 8.5.

9 A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR E A EROSÃO DO SOLO: ANÁLISE DO PRESENTE E PARA UM CENÁRIO FUTURO

Este capítulo trata da integração dos resultados dos capítulos anteriores e tem como objetivo levantar uma análise da relação entre a erosão e a cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. As análises do presente são referentes ao ano de 2005 uma vez que o mapeamento do uso e ocupação da terra base para o estudo de erosão refere-se a este ano.

Bertoni et al. (1998) afirmam que o plantio da cana-de-açúcar evita que sejam erodidas anualmente 74,8 milhões de toneladas de solo por ano, pois a perda média de solo encontrada, em contrapartida, para o cultivo de grãos é $24,5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Mesmo assim, nesse estudo a perda média encontrada para as áreas com cultivo de cana-de-açúcar foi de $34 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, estimativa média superior a $30 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (RODRIGUES et al., no prelo), valor considerado para todo o Estado de São Paulo. Como concluído no Capítulo 4, em relação às estimativas feitas na década de 1980 por Bertoni e Lombardi Neto (2012), o solo no Estado de São Paulo se desgasta atualmente 5 vezes mais rapidamente e, áreas produtoras de cana-de-açúcar, no que diz respeito à degradação do solo, apresentam papel importante no contexto da erosão.

A Figura 9.1 mostra os resultados das estimativas das taxas de perda de solo para as áreas que apresentaram cultivo de cana-de-açúcar no ano de 2005. Pode-se notar que apenas 38% das áreas com cana-de-açúcar são caracterizadas por estimativas médias de perda de solo inferiores a $10 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Com relação à localização, de forma geral, todas as mesorregiões do estado que produzem cana-de-açúcar apresentaram taxas de perda de solo elevadas, porém, as situações das mesorregiões de Ribeirão Preto, Araçatuba, Araraquara, Campinas e Bauru são ainda mais graves porque são áreas onde o cultivo é mais intenso (maior área cultivada).

Considerando-se o balanço entre as taxas de renovação do solo ($0,2 \text{ mm ano}^{-1}$) e as estimadas de perda de solo (Figura 9.1), a Figura 9.2 mostra o diagnóstico das áreas produtoras de cana em relação às situações de planejamento, ou seja,

encontram-se em estágio de conservação as regiões onde as taxas estimadas de perda do solo são inferiores à taxa de renovação.

Figura 9.1 - Estimativas das taxas de perda de solo para o Estado de São Paulo nas áreas produtoras de cana-de-açúcar

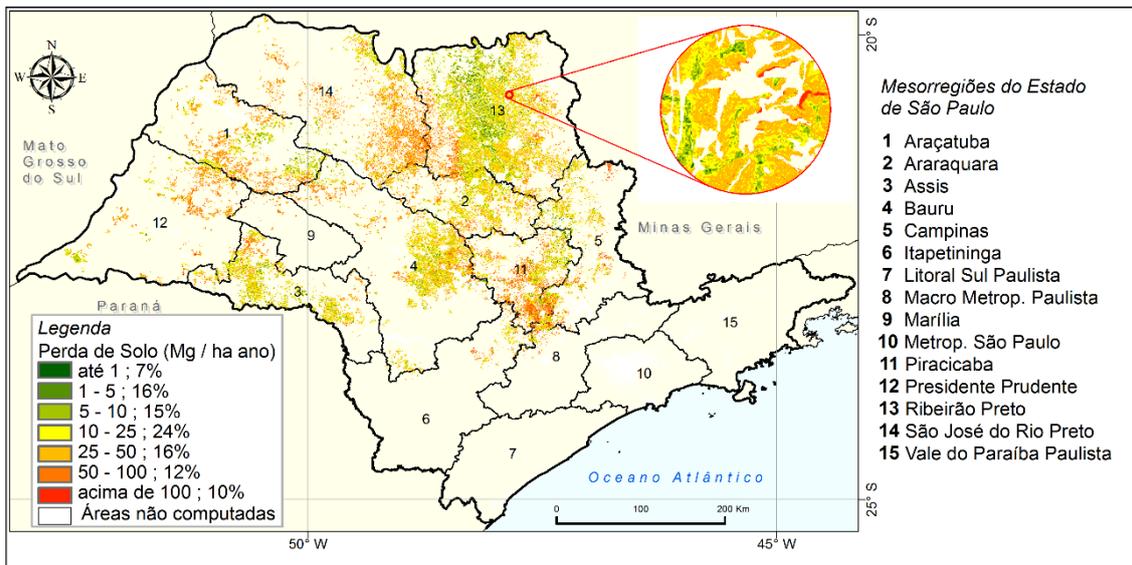
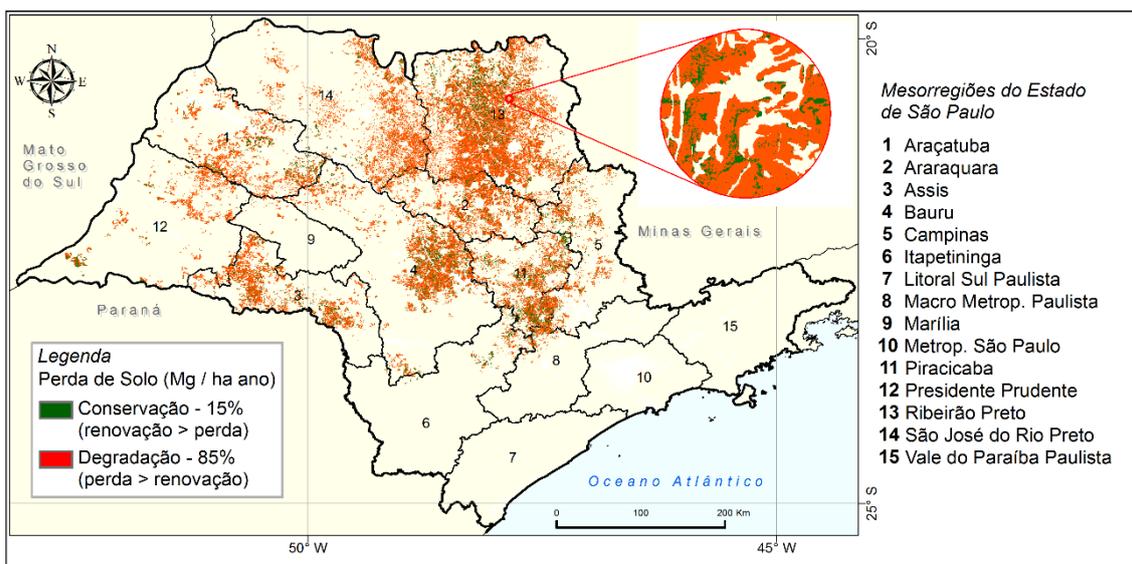


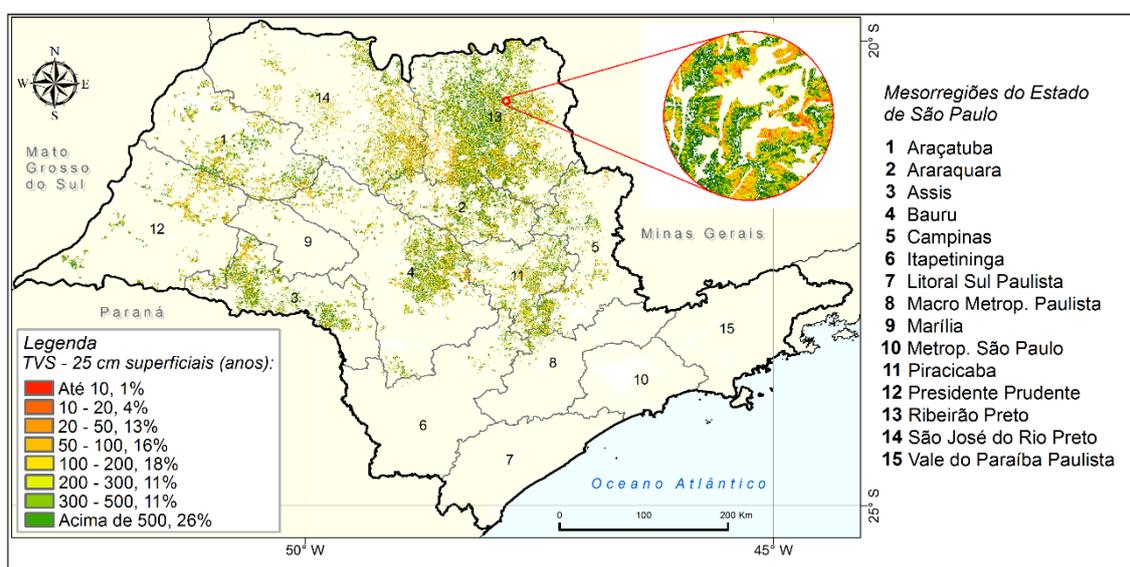
Figura 9.2 - Situações de planejamento das áreas produtoras de cana-de-açúcar localizadas no Estado de São Paulo



Com relação às situações de planejamento, 85% das regiões produtoras de cana-de-açúcar estão em estágio de degradação por erosão. Considerando-se todo o estado, as áreas em estágio de degradação atingem 65% do total.

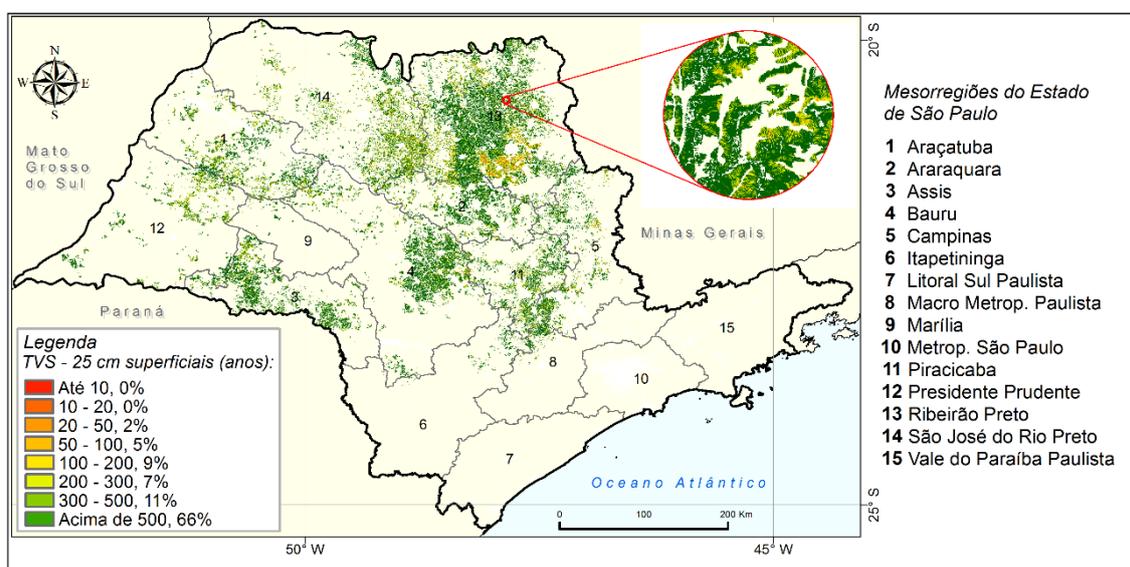
De acordo com o Índice do Tempo de Vida do Solo (ITVS) estimado para o desgaste dos 25 cm iniciais do solo (primeira classe no mapa) e referente ao ano de 2005 (mapa inicial da contagem do tempo de desgaste dos solos), notou-se que essa primeira camada foi perdida por erosão nos primeiros 10 anos, cerca de 341 km² ou 1% da área total (Figura 9.3). Para os próximos 10 anos, no entanto, categoria (10 – 20 anos) mais 4% da camada superficial será removida. Considerando um horizonte de 100 anos, 34 % das áreas com cana de açúcar terão sua camada superficial removidas. Isso pode implicar em abandonos de áreas e aumento no custo da produção devido à necessidade de repor minerais e nutrientes.

Figura 9.3 - Índice do Tempo de Vida do Solo (ITVS) considerando a remoção da camada superficial de 25 cm para as áreas produtoras de cana-de-açúcar localizadas no Estado de São Paulo



A Figura 9.4 apresenta o Índice do Tempo de Vida do Solo para o desgaste do perfil do solo até que reste apenas 1 metro (profundidade considerada crítica neste estudo).

Figura 9.4 - Índice do Tempo de Vida do Solo (ITVS) de acordo com o desgaste do perfil do solo até atingir uma profundidade crítica e 1m para as áreas produtoras de cana-de-açúcar localizadas no Estado de São Paulo



Com base nesses resultados, nenhuma área atingiu uma profundidade crítica de 1 m em 2015 (classe 1, até 10m) e também nos 10 anos seguintes isso não ocorrerá (até 2025). No entanto, considerando-se um horizonte de 100 anos (a partir do ano de 2005 usado como início das análises), 5% dos solos onde estão sendo cultivadas com cana-de-açúcar atingirão a profundidade crítica de 1 m, se mantidas as mesmas condições de exploração do recurso. É importante ressaltar que, embora esta seja uma abordagem importante, muitas regiões, muito antes de atingir uma profundidade crítica de 1 m, já estarão permanentemente degradadas por erosão. Nesse sentido, analisando-se as áreas com plantio de cana-de-açúcar no período 2005-2010 através dos mapeamentos realizados pelo projeto CANASAT, as áreas abandonadas que antes possuíam a produção de cana, ou seja, áreas que em 2005 eram utilizadas para o plantio da cultura, mas que em 2010 deixaram de possuir este uso, equivalem a 400 km².

As razões atribuídas a esta diferença são diversas e através deste estudo não é possível mensurar qual a contribuição da erosão para esse contexto, visto que

devem ser considerados processos de conversão entre a cana-de-açúcar e outras culturas agrícolas ou pastagem, por exemplo.

Com relação aos cenários de expansão da cana-de-açúcar obtidos no Capítulo 8, foram gerados novos mapas para 2050 da estimativa de perda de solo considerando a expansão da área cultivada com a cultura e seus reflexos no ITVS. No entanto, algumas inferências devem ser feitas porque os resultados das simulações de área plantada com cana-de-açúcar para 2050 pelo modelo LUCCEME são contínuos. Ou seja, cada célula (ou pixel) contém uma quantidade de área com cana de açúcar que varia de 0 a 100%. Se tivesse sido construído um modelo discreto, cada célula apenas corresponderia a um uso majoritário. Portanto, ao serem construídos modelos contínuos, a informação que cada célula contém é a porcentagem de cana-de-açúcar, porém não é possível determinar onde estão localizadas as plantações de cana-de-açúcar dentro de cada célula.

Então, considerando-se esta limitação dos modelos contínuos, foi feita uma inferência: todas as células que apresentaram 50% ou mais de área plantada com cana-de-açúcar foram consideradas totalmente preenchidas por esta cultura. As consequências deste procedimento são que as células que apresentaram uma porcentagem de cana-de-açúcar inferior a 50% foram desconsideradas e aquelas que apresentaram porcentagem acima de 50%, mas inferior a 100%, foram tomadas por cana totalmente. Na verdade, o que esta inferência traduz é um arredondamento considerando o raciocínio da classe majoritária, ou seja, as células onde a área com cana-de-açúcar é superior à 50% fica estabelecida que seria cana, ao passo que as células onde a área com cana-de-açúcar é inferior à 50% não seria cana.

Outro ponto a ressaltar em relação a esta inferência é que o plano celular utilizado nesta pesquisa apresenta pixels regulares de 16 km² (4 km x 4 km) e, por isso, desconsiderar células que apresentaram até 50% (8 km²) ou considerar como 'totalmente cana' células com mais de 50%, porém com menos de 100% de preenchimento com essa cultura infere erros nas análises. No entanto, sem esta generalização não é possível prosseguir com a análise do Índice do Tempo de Vida do Solo para o ano de 2050, objetivo do trabalho.

Dessa forma, portanto, pode-se observar a expansão da área ocupada com cana-de-açúcar para o ano de 2050 de acordo com as projeções climáticas do modelo HadGEM2-ES (Figura 4.44). Já o resultado da generalização (classe majoritária), descrito anteriormente, pode ser encontrado na Figura 9.5. Para estas áreas foram estimadas as taxas de perda de solo a partir da USLE, onde atribuiu-se para toda a área estudada o valor 0,3066, correspondente ao fator C (fator uso e manejo do solo). O resultado dessa análise é apresentado na Figura 9.6.

Figura 9.5 - Áreas com cana-de-açúcar resultante da simulação apresentada no Capítulo 8 considerando as projeções climáticas RCP 4.5.

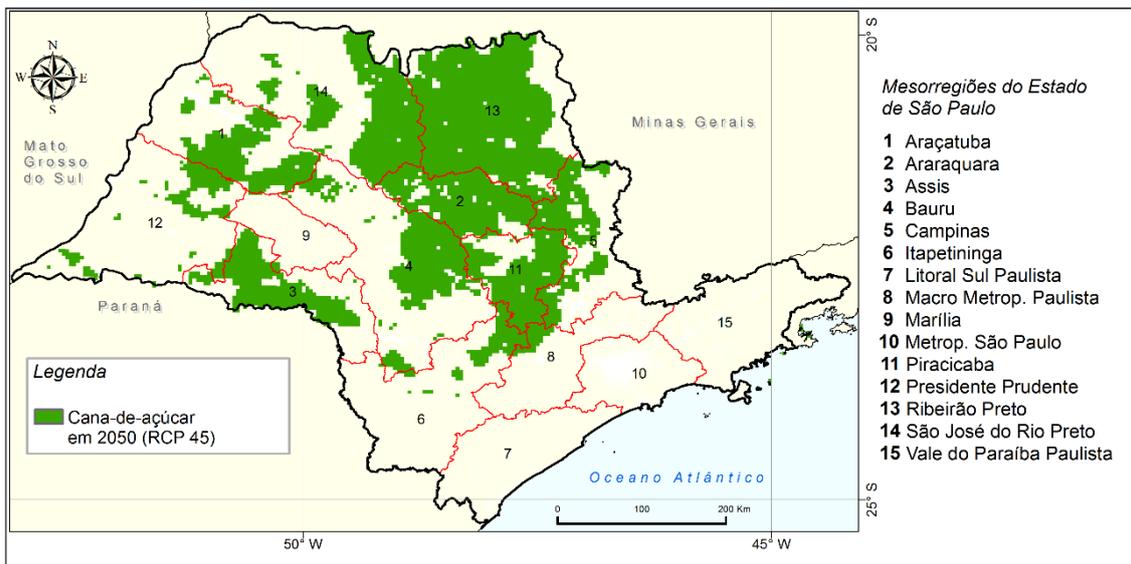
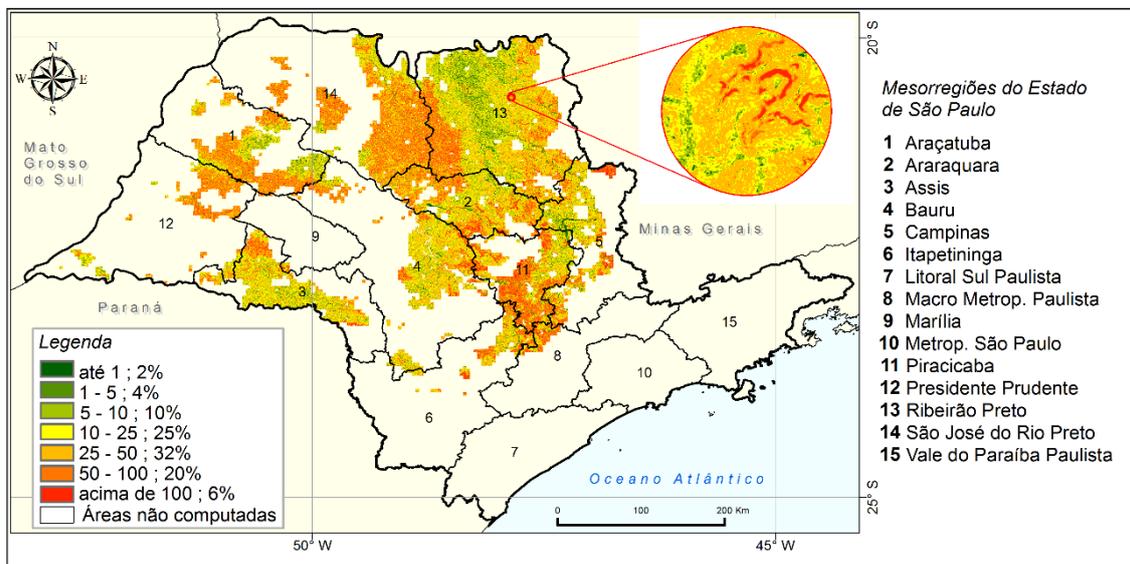


Figura 9.6 - Mapa das estimativas de perda de solo para as áreas cultivadas com cana-de-açúcar simuladas a partir do modelo apresentado no Capítulo 8 considerando as projeções climáticas RCP 4.5



Embora devesse ser considerada a variação da erosividade para as projeções de precipitação em 2050, o mapa da perda de solo para as regiões produtoras de cana-de-açúcar em 2050 indica que a maior parte da área apresentará taxas de perda de solo elevadas. Ao analisar a Figura 9.1, verifica-se que para as áreas de expansão, o fato de se ter uniformizado para toda a região o valor de C para 0,3066 (pois anteriormente estas áreas correspondiam a outros usos e, portanto, apresentavam outros valores de C) fez com que novas taxas de perda de solo para estas regiões fossem estimadas.

Sendo assim, novos mapas de tempo de vida do solo foram gerados, mas apenas para as áreas produtoras de cana-de-açúcar previstas neste trabalho (Capítulo 8), a partir das projeções climáticas RCP 4.5. Tanto para os mapas do ITVS considerando o tempo remanescente para a degradação de todo o perfil do solo, quanto para a remoção apenas da camada superficial (Figuras 9.7 e 9.8, respectivamente) observa-se que houve expansão para regiões cuja susceptibilidade do solo para erosão é mais alta, como é o caso principalmente da mesorregião de São José do Rio Preto. Ou seja, houve expansão principalmente para áreas com a presença de Argissolos, cujo valor médio de erodibilidade chega a atingir $0,0425 \text{ Mg ano}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$.

Portanto, a expansão da cana-de-açúcar no estado de São Paulo prevista neste trabalho e considerando-se as previsões climáticas RCP 4.5 poderá conduzir a prejuízos no que diz respeito à degradação do solo, uma vez que, essas regiões apresentam solos susceptíveis à erosão, de forma geral.

Figura 9.7 - Mapa do Índice do Tempo de Vida do Solo considerando o tempo remanescente para que o perfil do solo se desgaste de modo que reste apenas 1 m para as áreas cultivadas com cana-de-açúcar simuladas a partir do modelo apresentado no Capítulo 8 considerando as projeções climáticas RCP 4.5

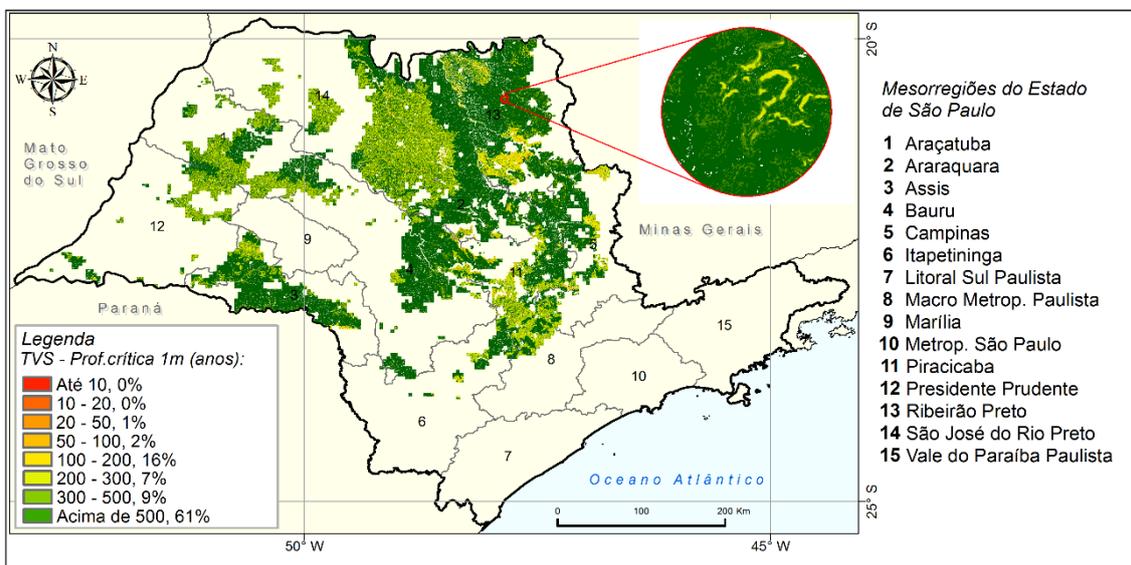
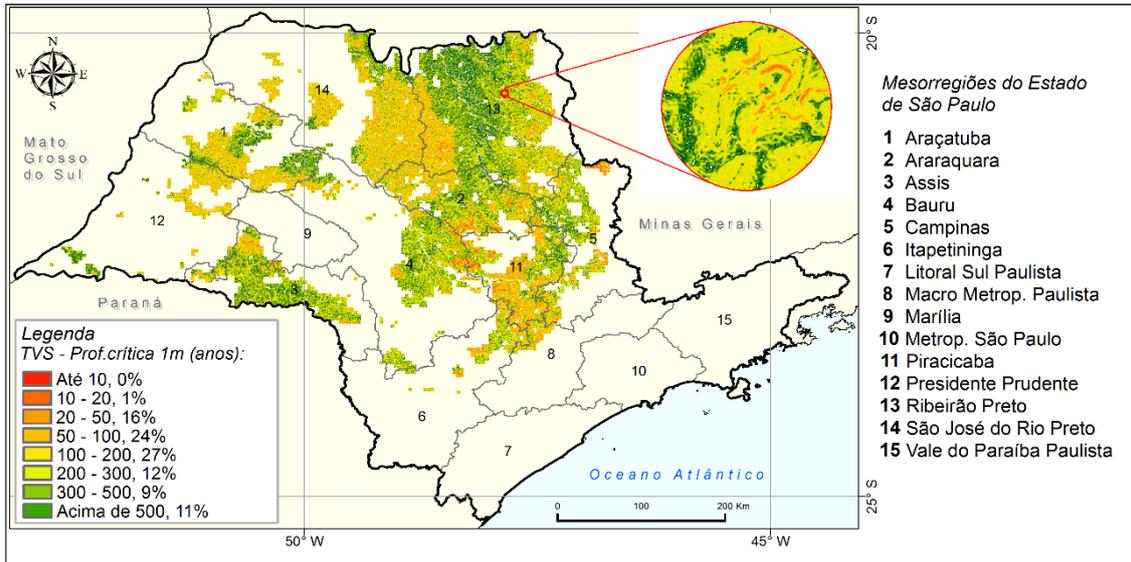


Figura 9.8 - Mapa do Índice do Tempo de Vida do Solo considerando o tempo remanescente para a camada superficial do solo (25 cm) seja removida para as áreas cultivadas com cana-de-açúcar simuladas a partir do modelo apresentado no Capítulo 8 considerando as projeções climáticas RCP 4.5



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMI, M. et al. Remote sensing time series to evaluate direct land use change of recent expanded sugarcane crop in Brazil. **Sustainability**, v. 4, n. 4, p. 574-585, 2012.

AGUIAR, A. P. D. et al. **Trabalhando com LUCCME 2.1**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2015. Disponível em: <www.luccme.ccst.inpe.br/conteudo_pt/downloads/LuccME_GuiaUsuario.pdf> Acesso em: 10 jan. 2015.

AGUIAR, A. P. D., CÂMARA, G., ESCADA, M. I. S. Spatial statistical analysis of land-use determinants in the Brazilian Amazonia: Exploring intra-regional heterogeneity. **Ecological Modelling**, v. 209, p. 169–188, 2007.

AGUIAR, A.P.D. **Modelagem de mudança do uso da terra na amazônia: explorando a heterogeneidade intra-regional**. 2006. 206p. . (sid.inpe.br/MTC-m13@80/2006/08.10.18.21-TDI). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2006. Disponível em: <<http://urlib.net/6qtX3pFwXQZGivnJSY/M7t7e>>. Acesso em: 30 jun. 2016.

ALBUQUERQUE, J. A. et al. Variabilidade de solo e planta em Podzólico Vermelho-Amarelo. **R Bras Ci Solo**, v. 20, p. 151-157, 1996.

ALMEIDA, C. O. S. **Erosividade das chuvas no estado de Mato Grosso**. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciência Agrárias) - Universidade de Brasília (UNB), Brasília, 2009.

ALVARES, C.A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorol Z**, v. 22, p. 711–728, 2013.

AMUNDSON, R. et al. Soil and human security in the 21st century. **Science**, v. 348, p. 1261071- 1261076, 2015.

ANSELIN, L. et al. GeoDa: an introduction to spatial data analysis. **Geographical analysis**, v. 38, n. 1, p. 5-22, 2006.

ANSELIN, L. et al. Simple diagnostic tests for spatial dependence. **Regional science and urban economics**, v. 26, n. 1, p. 77-104, 1996.

AQUINO, R. F. et al. Spatial variability of the rainfall erosivity in Southern region of Minas Gerais State, Brazil. **Ci Agrotec**, v. 36, p. 533-542, 2012.

ARCOVERDE, G. F. B. **Modelagem dinâmica espacial da expansão da área de cana-de-açúcar: Quirinópolis (GO)**. 2013. 207 p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2014/01.07.01.11-TDI). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2013. Disponível em: <<http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2013/09.26.14.25.22/doc/mirror.cgi>>. Acesso em: 25 jan. 2016.

ASSAD, E. D. et al. **Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil**. 1 ed. Brasília: Embaixada Britânica, 2008.

BAKKER, M. M. et al. The crop productivity – erosion relationship: an analysis based on experimental work. **Catena**. v. 57, p. 55–76, 2004.

BELLINAZZI JR, R., BERTONI, D., LOMBARDI NETO, F. A ocorrência de erosão rural no Estado de São Paulo. In: **Simpósio sobre o controle da erosão**, 2ª edição, São Paulo. Anais... Sao Paulo: ABGE, 1981. p.117-137.

BERTOL, I. et al. Soil water erosion under different cultivation systems and different fertilization rates and forms over 10 years. **R Bras Ci Solo**, v. 38, p. 1918-1928, 2014.

BERTOL, I.; ALMEIDA, J.A. Tolerância de perda de solo por erosão para os principais solos do estado de Santa Catarina. **R Bras Ci Solo**, v. 24, n. 3, p. 657-668, 2000.

BERTONI, J. et al. Conclusões gerais das pesquisas sobre conservação do solo no Instituto Agronômico. In: LOMBARDI NETO, F.; BELLINAZZI JR., R. **Simpósio sobre Terraceamento Agrícola**. Campinas: Instituto Agronômico; 1998.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 8 ed. São Paulo: Ícone, 2012.

BOARDMAN, J. Soil erosion science: Reflections on the limitations of current approaches. **Catena**. v. 68, p. 73–86, 2006.

BOCKHEIM, J. G.; GENNADIYEV, A. N. Soil-factorial models and earth-system science: A review. **Geoderma**, v. 159, p. 243–251, 2010.

BOUMA, J. Soil science contributions towards Sustainable Development Goals and their implementation: linking soil functions with ecosystem services. **J Plant Nutr Soil Sci**, v. 177, p. 111-120, 2014.

BRASIL. **Lei nº 9985, de 18 de julho de 2000**. Regulamenta o art. 225, § 1o, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. 2000. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9985.htm >. Acesso em: 20 nov. 2015.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Projeções do agronegócio: Brasil 2014/2015 a 2024/2025**. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2015. 108 p. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/PROJECOES_DO_AGRONEGOCIO_2025_WEB.pdf>. Acesso: 22 jan. 2016.

CÂMARA, G. Representação computacional de dados geográficos. In: CASANOVA, M. et al. (Ed.). **Bancos de dados geográficos**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais; 2005. p. 1–44.

CAMARGO, F. A. et al. Brazilian soil science: from its inception to the future, and beyond. **R Bras Ci Solo**. v. 1, p. 589–599, 2010.

- CAMARINHA, P. I. M.; CANAVESI, V.; ALVALÁ, R. C. S. Shallow landslide prediction and analysis with risk assessment using a spatial model in a coastal region in the state of São Paulo, Brazil. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 14, n. 9, p. 2449-2468, 2014.
- CANTALICE, J. R. B. et al. Linhas isoerosivas do estado de Pernambuco – 1ª aproximação. **Caatinga**, v. 22, p. 75-80, 2009.
- CARVALHO, D. F. et al. Padrões de precipitação e índices de erosividade para as chuvas de Seropédica e Nova Friburgo, RJ. **R Bras Eng Agríc. Amb**, v. 9, p. 7-14, 2005.
- CARVALHO, M. P. et al. Erosividade da chuva de Mococa (SP) analisada pelo índice EI30. **R Bras Ci Solo**, v. 13, p. 243-249, 1989.
- CASTRO, P. R. C. Maturadores químicos em cana-de-açúcar. In: SEMANA DA CANA-DE-AÇÚCAR DE PIRACICABA, 4, 1999, Piracicaba. **Anais...**, Piracicaba: Saccharum, 1999. p. 46-48.
- CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA (CEPEA). **PIB do Agronegócio**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2013.
- CHAVES, H. M. L. Incertezas na predição da erosão com a USLE: impactos e mitigação. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 34, p. 2021-2029, 2010.
- CHOU, S. C. et al. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 05, p. 512, 2014.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1999. 236 p.
- COLLINS, W. J. et al. Development and evaluation of an Earth-system model – HadGEM2. **Geosci. Model Dev.**, v. 4, p. 997–1062, 2011.
- COLODRO, G. et al. Erosividade da chuva: distribuição e correlação com a precipitação pluviométrica de Teodoro Sampaio (SP). **R Bras Ci Solo**, v. 26, p. 809-818, 2002.
- COSTA et al. **Integrated Model of Land Surface Processes (INLAND)**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa. Research Group on Atmosphere-Biosphere Interaction, 2016. Disponível em: <<http://www.biosfera.dea.ufv.br/en-US/software/inland-eng>>. Acesso em: 05 fev. 2016.
- CUADRA, S. V. **Desenvolvimento de um modelo biofísico de crescimento da cana-de-açúcar para estudos globais**. 2010. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, 2010. Disponível em: <<http://alexandria.cpd.ufv.br:8000/teses/meteorologia%20agricola/2010/232318f.pdf>>. Acesso em 20 mar. 2016.
- D'AGOSTINI, L. R. Erosão: o problema mais que o processo. Florianópolis: Ed. UFSC, 1999.

DE LA ROSA, D. et al. Assessment of soil erosion vulnerability in western Europe and potential impact on crop productivity due to loss of soil depth using the ImpelERO model. **Agric Ecosyst Environ**, v. 81, p. 179–90, 2000.

DE MARIA, I. C. **Perdas de terra por erosão hídrica e razão de perdas de solo para sistemas de manejo da cultura de milho**. 1995. Tese (Doutorado em Agronomia - Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade de São Paulo (USP), Piracicaba, 1995.

DENARDIN, J. E. **Erodibilidade do solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos**. 1990. Tese (Doutorado em Agronomia - Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade de São Paulo (USP), Piracicaba, 1990.

DESMET, P. J. J.; GOVERS, G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. **J Soil Water Conserv**, v. 51, p.427–33, 1996.

DÍAZ-FIERROS, V. F. What does the future hold for internal comms? **Spanish J Soil Sci**, v. 5, p. 54–59, 2015.

DOORENBOS, J. et al. **Yield response to water**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (Irrigation and Drainage paper 33), 1979. 193 p.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1979. 193 p. (FAO-Irrigation and Drainage Paper n. 33).

DOTTERWEICH, M. The history of human-induced soil erosion: Geomorphic legacies, early descriptions and research, and the development of soil conservation-A global synopsis. **Geomorphology**, v. 201, p. 1–34, 2013.

DUAN, X. et al. Effects of soil erosion on long-term soil productivity in the black soil region of northeastern China. **Catena**, v. 87, p. 268–275, 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Árvore do conhecimento cana-de-açúcar**. Desenvolvido por Fábio Ricardo Marin. Brasília: Agência Embrapa de Informação Tecnológica, ca 2015. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_10_711200516716.html>. Acesso em: 21 jan. 2016.

ESRI, ArcGIS DESKTOP 10.1. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute, 2014. CD- ROM.

FERREIRA FILHO, J. B. D. S.; HORRIDGE, M. Ethanol expansion and indirect land use change in Brazil. **Land Use Policy**, v. 36, p. 595–604, 2014.

FOLEY, J A. et al. Global consequences of land use. **Science**, v. 309, p. 570-574, 2005.

FOLEY, J. A. et al. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 10, n. 4, p. 603 – 628, 1996.

FOLEY, J.A. et al. Solutions for a cultivated planet. **Nature**, v. 478, p. 337-404, 2011.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). **Crop water information: sugarcane**. Desenvolvido por Land and Water Division. Itália. 2015. Disponível em: < http://www.fao.org/nr/water/cropinfo_sugarcane.html>. Acesso em: 21 jan. 2016.

FU, B. J. et al. Assessment of soil erosion at large watershed scale using RUSLE and GIS: a case study in the loess plateau of China. **Land Degrad Dev.**, v. 16, p. 73–85, 2005.

FUSS, S. et al. Betting on negative emissions. *Nat Clim Chang*. **Nature Publishing Group**, v. 4, n. 10, p. 850–3, 2014.

GALDINO, S. **Estimativa da perda de terra sob pastagens cultivadas em solos arenosos da bacia hidrográfica do Alto Taquari – MS/MT**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, 2012. Disponível em: < <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=000872767>>. Acesso em: 20 maio 2014.

GALDINO, S. et al. Large-scale modeling of soil erosion with RUSLE for conservationist planning of degraded cultivated brazilian pastures. **Land Degrad Dev.**, v. 27, p. 773-784 2015.

GALHARTE, C. A. **Estimativa do escorrimento superficial e da produção de sedimentos em áreas de atividades agrossilvopastoris**, no Estado de São Paulo, em função da mudança de uso e cobertura do solo. 2011. 206 p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2011. Disponível em: < <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-19122011-144406/>>. Acesso em 20 jun. 2013.

GODFRAY, H.C.J. et al. Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People. **Science**, v. 327, n. 5967, p. 812 -818, 2010.

GREGORICH, E. G. et al. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. **Can J Soil Sci**, v.74, p. 367–386, 1994.

HADDAD, E. A.; TEIXEIRA, E. Economic impacts of natural disasters in megacities: The case of floods in São Paulo, Brazil. **Habitat International**, v. 45, p. 106-113, 2015.

HANSEN, J. W. Is agricultural sustainability a useful concept? **Agric Syst**, v. 50, p. 117-143, 1996.

HARTEMINK, A. E. Soils are back on the global agenda. **Soil Use Manag**, v. 24, p. 327–330, 2008.

HARTEMINK, A. E.; MCBRATNEY, A. A soil science renaissance. **Geoderma**, v. 148, p. 123–129, 2008.

HARTEMINK, A. The future of soil science. In: HARTEMINK, A. (Ed.) **The future of Soil Science**. Wageningen: IUSS, 2006. Disponível em: <<http://doi.org/10.1017/S0014479706414538>> Acesso em: 20 mar. 2015.

Hijmans, R. J. et al. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, v. 25, n. 15, p. 1965-1978, 2005.

HOOKE, R. L.B. et al. Land transformation by humans: A review. **GSA Today**, v. 22, p. 4-10, 2012.

INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, v. 92, n. 2-3, p. 185–202, 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Banco de Dados Agregados. **Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA**. Disponível em: < <http://www.ibge.gov.br> >. Acesso em: 22 mar. 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Agropecuário 2006**. Rio de Janeiro: IBGE. 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Contas Regionais do Brasil 2011**. Rio de Janeiro: IBGE. 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Divisão Territorial Brasileira**. Rio de Janeiro: IBGE. 2002.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT, DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE. 1997. **Mapa de Tecnológicas Erosão do Estado de São Paulo, SP**. São Paulo.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT, DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE. 1995. **Mapa de Erosão do Estado de São Paulo, SP**. São Paulo. (IPT. Relatório, 33.402).

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). TERRALIB. Desenvolvido por Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais et al. São José dos Campos, 2015b. Disponível em: <<http://www.terralib.org/index.php>> Acesso em: 18 nov. 2015.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **TERRAVIEW**. Desenvolvido por Juan Carlos Pinto de Garrido et al. São José dos Campos, 2015a. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/terraview/index.php>> Acesso em: 18 nov. 2015.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. In: STOCKER, T.F. et al. (Ed.). Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Switzerland: IPCC, 2013. 1535 p.

INTERNATIONAL SOIL REFERENCE AND INFORMATION CENTER (ISRIC). **Soil grids: an automated system for global soil mapping**. Desenvolvido por

- International Soil Science Society. Wageningen: 2014. Disponível em: <
<http://www.isric.org/>>. Acesso: 20 fev. 2016.
- JANZEN, H. H. Carbon cycling in earth systems - a soil science perspective. **Agric Ecosyst Environ**, v. 104, p. 399–417, 2004.
- JANZEN, H. H. et al. Global prospects rooted in soil science. **Soil Sci Soc Am J**, v. 75, p. 1-8, 2011.
- JÚNIOR, O. A. C.; GUIMARÃES, R. F. Implementação em ambiente computacional e análise do emprego da área de contribuição no cálculo do fator topográfico (LS) da USLE. VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão. **Anais...** . p.1–9, 2001. Goiânia.
- KEATING, B. A. ET AL. Modelling sugarcane production systems I. Development and performance of the sugarcane module. **Field Crops Research**, v. 61, p. 253–271, 1999.
- KERTZMAN, F. F. et al. Mapa de erosão do Estado de São Paulo. **R Inst Geol**, v. 16, p. 31–36, 1995.
- KINNELL, P. I. A. Event soil loss, runoff and the Universal Soil Loss Equation family of models: a review. **J Hydrol**, v. 385, p. 384–397, 2010.
- KÖPPEN, W. Das Geographische System der Klimate, In: KÖPPEN, W.; GEIGER, R. (Ed.). **Handbuch der klimatologie**. Berlin: Gebrüder Bornmträger; 1936. p.1-44.
- KRUSEMAN, G. et al. An alytical framework for disentangling the concept of sustainable land use. **Agric Syst**, v. 50, p. 191-207, 1996.
- KUCHARIK, C. J.; BRYE, K. R. Integrated Blosphere Simulator (IBIS) yield and nitrate loss predictions for Wisconsin maize receiving varied amounts of nitrogen fertilizer. **Journal of Environment Quality**, v. 32, n. 1, 247–268, 2003.
- LAGROTTI, C. A. A. **Planejamento agroambiental do município de Santo Antônio do Jardim – SP**: estudo de caso na microbacia hidrográfica do córrego do Jardim. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, 2000. Disponível em: <
<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/zeus/auth.php?back=http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000240611&go=x&code=x&unit=x> >. Acesso em: 25 nov. 2013.
- LAL, R. Soil erosion and the global carbon budget. **Environ Int**, v. 29, p. 437–50, 2003.
- LAL, R. Soil Erosion Impact on Agronomic Productivity and Environment Quality. **Crc Cr Rev Plant Sci.**, v. 17, p. 319–464, 1998.
- LAL, R. Soil Science and the Carbon Civilization. **Soil Sci Soc Am J**, v. 71, p. 1425, 2007b.

- LAL, R. Soils and sustainable agriculture. A review. **Agron Sustain Dev**, v. 28, p. 57–64, 2007a.
- LAPOLA, D. M. et al. Exploring the range of climate biome projections for tropical South America: the role of CO₂ fertilization and seasonality. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 23, n. 3, 2009.
- LAPOLA, D. M. et al. Pervasive transition of the Brazilian land-use system. **Nat Clim Chang**, v. 4, p. 27 -35, 2014.
- LEE, J. H.; HEO, J. H. Evaluation of estimation methods for rainfall erosivity based on annual precipitation in Korea. **J Hydrol**, v. 409, p. 30-48, 2011.
- LEPSCH, I.F. **Formação e conservação do solo**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- LINO, J. S. **Evolução do sistema plantio direto e produção de sedimentos no Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade de São Paulo (USP), Piracicaba, 2010.
- LISSON, S. N. et al. The historical and future contribution of crop physiology and modelling research to sugarcane production systems. **Field Crops Research**, v. 92, p. 321–335, 2005.
- LOARIE, S. R. et al. Direct impacts on local climate of sugar-cane expansion in Brazil. **Nature Climate Change**, v. 1, n. 2, p. 105-109, 2011.
- LOMBARDI NETO, F. et al. Potencial de erosão das chuvas no estado de São Paulo. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA SOBRE CONSERVAÇÃO DO SOLO, 3, 1980, Recife. **Anais...** Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco; 1980. fl. 13-A.
- LOMBARDI NETO, F.; BERTONI, J. **Tolerância de perdas de terra para solos do Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1975.
- LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W. C. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com perdas de solo em Campinas. **Bragantia**, v. 51, p. 189-196, 1992.
- LU, D.; LI, G. et al. Mapping Soil Erosion Risk in Rondonia, Brazilian Amazonia: Using RUSLE, Remote Sensing and GIS. **L Degrad Dev**, v. 15, p. 499–512, 2004.
- LUIS, M de et al. Precipitation concentration changes in Spain 1946 – 2005. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 11, p. 1259 – 1265, 2011.
- MANNIGEL, A.R. et al. Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo. **Acta Scient**, v. 24, p. 1335–1340, 2002.
- MANZATTO, C. V. et al. **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002.
- MANZATTO, C. V. et al. **Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 2009.

- MARIN, F. R. et al. Climate change impacts on sugarcane attainable yield in southern Brazil. **Clim Change**, v. 117, n. 1, p. 227–239, 2013.
- MARIN, F. R. et al. Parameterization and Evaluation of Predictions of DSSAT/CANEGRO for Brazilian Sugarcane. **Agron J**, v. 103, n. 2, p. 304, 2011.
- MARIN, F. R. et al. Prospects for Increasing Sugarcane and Bioethanol Production on Existing Crop Area in Brazil. **Bioscience**, v. 66, n. 4, p. 307-316, 2016.
- MARIN, F. R.; DE CARVALHO, G. L. Spatio-temporal variability of sugarcane yield efficiency in the state of São Paulo, Brazil. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 4, n. 2, p. 149–156, 2012.
- MARIN, F. R.; JONES, J. W. Process-based simple model for simulating sugarcane growth and production. **Scientia Agricola**, v. 71, n. 1, p. 1-16, 2014.
- MARIN, F.; NASSIF, D. S. P. Mudanças climáticas e a cana-de-açúcar no Brasil: fisiologia, conjuntura e cenário futuro. **Rev Bras Eng Agrícola e Ambient**, v. 17, n 2, p. 232–239, 2013.
- MARQUES, J. Q. A. et al. Perdas por erosão no Estado de São Paulo. **Bragantia**, v. 20, p. 1143-1181, 1961.
- MARQUES, J.Q. **A política de conservação do solo**. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, 1949. 73p. (Boletim do Serviço de Informação Agrícola, 734)
- MARTIN, G. M. et al. The physical properties of the atmosphere in the new Hadley Centre Global Environmental Model (HadGEM1). Part I: Model description and global climatology. **J. Climate**, v. 19, p. 1274–1301, 2006.
- MARTÍN-FERNÁNDEZ, L.; MARTÍNEZ-NÚÑEZ, M. An empirical approach to estimate soil erosion risk in Spain. **Sci Total Environ**, v. 409, p. 3114–3123, 2011.
- MCCOOL, D. K. et al. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation. **Am Soc Agric Eng**, v. 30, p. 1387–1396, 1987.
- MCDONAGH, J. Rural geography II: Discourses of food and sustainable rural futures. **Progr Human Geogr**, v. 38, p. 1-7, 2014.
- MELLO, C. R. et al. Agricultural watershed modeling: a review for hydrology and soil erosion processes. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 40, n. 1, p. 7-25, 2016.
- MELLO, C. R. et al. Assessing the climate change impacts on the rainfall erosivity throughout the twenty-first century in the Grande River Basin (GRB) headwaters, Southeastern Brazil. **Environ. Earth Sci**, v. 73, p. 8683-8698, 2015.
- MELLO, C. R. et al. Multivariate models for annual rainfall erosivity in Brazil. **Geoderma**, v. 202-203, p. 88-102, 2013.

- MELLO, C. R. et al. Sea surface temperature (SST) and rainfall erosivity in the Upper Grande River Basin, Southeast Brazil. **Ci Agrotec**, v. 36, p. 53-9, 2012.
- MELLO, C. R.; et al. Erosividade mensal e anual da chuva no Estado de Minas Gerais. *Pesq. agropec. Bras*, v. 42, n. 1, p. 537-45, 2007.
- MERRITT, W. S. et al. A review of erosion and sediment transport models. **Environ Model Softw**, v. 18, n. 8-9, p. 761-799, 2003.
- MEUSBURGER, K. et al. Spatial and temporal variability of rainfall erosivity factor for Switzerland. **Hydrol Earth Syst Sci**. v. 16, n. 1, p. 167-177, 2012.
- MICHETTE, J. F. **Modelos de previsão de erosão pluvial utilizando SIG: estudo na bacia hidrográfica da Represa do Lobo (BROA), SP.** 2015. Dissertação (Mestrado em Ciência) - Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 2015.
- MONTEIRO, J. A. F. et al. Modelling the effect of riparian vegetation restoration on sediment transport in a human impacted Brazilian catchment. **Ecohydrology**, 2016.
- MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C. Potential and Actual Sugarcane Yields in Southern Brazil as a Function of Climate Conditions and Crop Management. **Sugar Tech**, v. 16, n. 3, p. 264-276, 2014.
- MOORE, I. D. et al. Digital Terrain Modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. **Hydrol Process**, v. 5, p. 3-30, 1991.
- MOORE, I. D.; BURCH, G. J. Physical Basis of the Length-slope Factor in the Universal Soil Loss Equation. **Soil Sci Soc Am J**, v. 50, p. 1294-1298, 1986.
- MOORE, I.; WILSON, J. P. Length slope factor for the revised universal soil loss equation: Simplified method of solution. **J Soil Water Conserv**, v. 47, p. 423-428, 1992.
- MOSS, R. H., et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, v. 463, n. 7282, p. 747-756, 2010.
- MOURÃO, C.; CHOU, S. C.; MARENGO, J. Downscaling Climate Projections over La Plata Basin. **Atmospheric and Climate Sciences**, v. 6, n. 01, p. 1, 2015.
- NASSAR, A. M. et al. Prospects of the sugarcane expansion in Brazil: impacts on direct and indirect land use changes. **Sugarcane ethanol: contributions to climate change mitigation and the environment**, p. 63-93, 2008.
- NEARING, M. A. et al. Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover. **Catena**, v. 61, p. 131-54, 2005.
- OLIVEIRA, A. M. M. D. et al. Caracterização de indicadores da erosão do solo em bacias hidrográficas com o suporte de geotecnologias e modelo predictivo. **Estudos Geográficos**, v. 5, p. 63-86, 2007.

- OLIVEIRA, F. P. et al. Potencial erosivo da chuva no vale do Rio Doce, região Centro-Leste do Estado de Minas Gerais — primeira aproximação. **Ciênc. Agrotec**, v. 33, n. 1569-1577, 2009.
- OLIVEIRA, J. B. et al. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo**: legenda expandida. Campinas: Instituto Agrônômico e Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999b.
- OLIVEIRA, J. B. **Solos do Estado de São Paulo**: descrição das classes registradas no mapa pedológico. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas, 1999a.
- OLIVEIRA, P. T. S. et al. Rainfall erosivity in Brazil: A review. **Catena**, v. 100, p. 139-147, 2012a.
- OLIVEIRA, P. T. S. et al. Spatial variability of the rainfall erosive potential in the state of Mato Grosso do Sul, Brazil. **Eng Agríc**, v. 32, p. 69-79, 2012b.
- OLIVER, J. E. Monthly precipitation distribution: a comparative index. *Prof Geogr*, v. 32, p. 300-309, 1980.
- OMETTO, J. P.; AGUIAR, A. P. D.; MARTINELLI, L. A. Amazon deforestation in Brazil: effects, drivers and challenges. *Carbon Management*, v. 2, n. 5, p. 575-585, 2011.
- OYEDELE, D.; AINA, P. O. A study of soil factors in relation to erosion and yield of maize on a Nigerian soil. **Soil Till Res**, v. 48, p. 115–25, 1998.
- PARMESAN, C. et al. Beyond climate change attribution in conservation and ecological research. **Ecol Lett**, n. 16, p. 58-71, 2013.
- PEREIRA, H. H. G. **Índices de erosividade da chuva**: distribuição e relações com a precipitação em Piracicaba/SP. 1983. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade de São Paulo (USP), Piracicaba, 1983.
- PIMENTEL, D. et al. Environmental and Economic Coasts of Soil Erosion and Conservation Benefits. **Science**, v. 267, p. 1117–1123, 1995.
- PUGLIESE, A. C. V. et al. Valoração econômica do efeito da erosão em sistemas de manejo do solo empregando o método custo de reposição. **Bragantia**, v. 70, p. 113-121, 2011.
- PUIG, M.; BELLACASA, D. Making time for soil : technoscientific futurity and the pace of care. **Soc Stud Sci**, v. 1, p. 691–716, 2015.
- PULIDO-GÓMEZ, J. D. **Estimativa de erosão pela Equação Universal de Perda de Solo (USLE) e transferência de sedimentos** Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade de São Paulo (USP), Piracicaba, 2012.
- QUINTILIANO, J. et al. Perdas por erosão no Estado de São Paulo. **Bragantina**, v. 20, 1139-1182, 1961.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Desenvolvido por R Foundation for Statistical

- Computing. Vienna, Austria, 2011. ISBN 3-900051-07-0. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>. Acesso: 22 fev. 2016.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. **RStudio**: integrated development for R. Desenvolvido por RS Team – Rstudio. Boston, 2014. Disponível em: <<http://www.RStudio.com/ide>>. Acesso: 22 fev. 2016.
- REID, W. et al. Earth System Science for Global Sustainability: Grand Challenges. **Science**, v. 330, n. 916–917, 2010.
- RENSCHLER, C. S.; HARBOR, J. Soil erosion assessment tools from point to regional scales — the role of geomorphologists in land management research and implementation. **Geomorphology**, n. 47, p. 189–209, 2002.
- RESENDE, M.; ALMEIDA, J. R. Modelos de predição de perda de solo: uma ferramenta para manejo e conservação do solo. **Inf Agropec**, v. 11, p. 38-54, 1985.
- RIO DE JANEIRO (Estado). FUNDAÇÃO CENTRO DE INFORMAÇÃO E DADOS DO RIO DE JANEIRO (CIDE). **Índice de qualidade dos municípios – verde (IQM – Verde)**. Rio de Janeiro: CIDE, 2000.
- ROCHA, G. C. **Aplicação da estimativa espaço-temporal da tolerância à perda de solo no planejamento do uso da terra**. 2013. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade de São Paulo (USP), Piracicaba, 2013.
- ROCKSTRÖM, J. et al. A safe operating space for humanity. **Nature**, v. 461, p. 472–475, 2009.
- RODRIGUES, G. O. et al. Accelerated soil erosion diagnosis in the São Paulo State: Estimated annual soil loss rates. **R Bras Ci Solo**. 2016. (aceito)
- RODRIGUES, G. O. et al. Regionalized and Updated Rainfall Erosivity to São Paulo State. **R bras Ci Solo**. (no prelo)
- ROLIM, G. de S. et al. Classificação climática de Koppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o Estado de São Paulo. **Bragantia**, v. 66, n. 4, p. 711–720, 2007.
- ROQUE, C. G. Fator erosividade da chuva de Piraju (SP): distribuição, probabilidade de ocorrência, período de retorno e correlação com o coeficiente de chuva. **R Bras Ci Solo**, v. 25, p. 147-156, 2001.
- RUDORFF, B. F. T. et al. Studies on the Rapid Expansion of Sugarcane for Ethanol Production in São Paulo State (Brazil) Using Landsat Data. **Remote Sensing**, v. 2, v. 4, p. 1057-1076, 2010.
- RUFINO, R.L et al. Determinação do potencial erosivo da chuva do estado do Paraná através da pluviometria: terceira aproximação. **R Bras Ci Solo**, v. 17, p. 439-444, 1993.
- SANT'ANNA NETO, J. L. A Erosividade das chuvas no Estado de São Paulo. **R. bras. Geogr.**, v. 9, p. 35-49, 1995.

SANTOS, D.L.; SENTELHAS, P. C. Climate change scenarios and their impact on water balance and sugarcane yield in Southern Brazil. **Sugar Tech**, v. 16, n. 4, p. 356–365, 2014.

SANTOS, J. G. M. **Transporte de umidade na Amazônia e sua relação com a temperatura da superfície do mar dos oceanos adjacentes utilizando as simulações do CMIP5**. 2015. 130 p. (sid.inpe.br/mtc-m18/2015/02.27.16.42-TDI). Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2015. Disponível em:<<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/3J3GFRL>>. Acesso em: 01 fev. 2016.

SÃO PAULO (Estado). Departamento de Água e Energia Elétrica (DAEE). **Áreas Degradadas**. São Paulo: DAEE, 2000.

SÃO PAULO (Estado). Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados (SEADE). **PIB Mensal do Estado de São Paulo**. São Paulo: SEADE, 2016.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Agricultura e Abastecimento. **O zoneamento de culturas bioenergéticas no Estado de São Paulo**. São Paulo: Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios, 2008.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria do Meio Ambiente. **Mapeamento de Cobertura da Terra do Estado de São Paulo 2005 – Escala 1:100.000**. São Paulo: Coordenadoria de Planejamento Ambiental, 2013.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria Estadual de Meio Ambiente. **Resolução SMA Nº 88**, de 19 de dezembro de 2008. Diário Oficial [do] Estado de São Paulo, São Paulo, 26 mar. 2009.

SCHEFFER, M. et al. Catastrophic shifts in ecosystems. **Nature**, v. 413, n. 6856. p. 591–596, 2001.

SCHUMACHER, T. E et al. Modeling spatial variation in productivity due to tillage and water erosion. **Soil Till Res.** v. 51, p. 331-339, 1999.

SILVA, A. M. Rainfall erosivity map for Brazil. **Catena**, n. 57, p. 251-259, 2004.

SILVA, A. M.; ALVARES, C. A. Levantamento de informações e estruturação de um banco de dados sobre a erodibilidade de classes de solos no Estado de São Paulo. **Geociências**, v. 24, p. 33-41, 2005.

SILVA, J. R. da et al. Valor da produção agropecuária do Estado de São Paulo, resultado Final de 2014. **Análises e Indicadores do Agronegócio**, v. 10, n. 6, 2015.

SILVA, M. A. et al. Avaliação e espacialização da erosividade da chuva no Vale do Rio Doce, região centro-leste do Estado de Minas Gerais. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 34, p. 1029–1039, 2010.

SILVA, M. L. N. et al. Índices de erosividades das chuvas da região de Goiânia, GO. **Pesq Agropec Bras**, v. 32, p. 275-289, 1997.

SILVA, R. B. et al. Proposição e validações de equações para estimativa da erosividade de dois municípios do Estado de São Paulo. **Irriga**, v. 14, p. 533-547, 2009.

SILVA, V. C. Cálculo automático do fator topográfico (LS) da USLE, na bacia do Rio Paracatu. **Pesq Agrop Trop.**, v. 33, p. 29–34, 2003.

SILVEIRA, C. S. et al. Avaliação de desempenho dos modelos do CMIP5 quanto à representação dos padrões de variação da precipitação no Século XX sobre a região do Nordeste do Brasil, Amazônia e Bacia do Prata e análise das projeções para o cenário RCP 8.5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 3, p. 317-330, 2013.

SINGELS, A. **Crop Models. Sugarcane: Physiology, Biochemistry and Functional Biology** (eds P. H. Moore and F. C. Botha), John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK.

SINGELS, A. et al. Predicting climate change impacts on sugarcane production at sites in Australia, Brazil and South Africa using the Canegro Model. **Sugar Tech**, v. 16, n. 4, p. 347–355, 2014.

SINGELS, A.; BEZUIDENHOUT, C. N. A new method of simulating dry matter partitioning in the Canegro sugarcane model. **Field Crops Research**, v. 78, n. 2, p. 151-164, 2002.

SIQUEIRA, B. **Estimativas de índices de chuva para o Estado de São Paulo**. 2016. 90 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, 2016.

SKIDMORE, E. L. Soil loss tolerance. In: AMERICAN SOCIETY OF AGRONOMY. **Determinants of soil loss tolerance**. Madison: ASA, 1982.

SMITH, P. et al. Global change pressures on soils from land use and management. **Glob Chang Biol.**, 2015. Aceito.

SPAROVEK, G. et al. Environmental, land-use and economic implications of Brazilian sugarcane expansion 1996-2006. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 14, p. 285–298, 2009.

SPAROVEK, G. et al. Forecasting crop yield for some Piracicaba soils as a functions of erosion. **R Bras Ci Solo.**, v. 17, p. 465-470, 1993.

SPAROVEK, G.; van LIER, Q J. Definition of tolerable soil erosion values. **R Bras Ci Solo**. v. 1, p. 467–471, 1997.

SPAROVEK, Gerd et al. The revision of the Brazilian Forest Act: increased deforestation or a historic step towards balancing agricultural development and nature conservation?. **Environmental Science & Policy**, v. 16, p. 65-72, 2012.

SPERA, Stephanie A. et al. Land- Use Change Affects Water Recycling in Brazil's Last Agricultural Frontier. **Global change biology**, 2016.

STAMEY WL, SMITH RM. A conservation definition of erosion tolerance. **Soil Sci.**, v. 97, p. 183-186, 1964.

- STINE MA, WEIL RR. The relationship between soil quality and crop productivity across three tillage systems in south central Honduras. **Am J Altern Agric.** v. 17, p. 2-8, 2002.
- STOCKING, M.; Erosion and crop yield. In: CHESWORTH, W. [ed.]. **Encyclopedia of soil science.** New York: Marcel Dekker, 2003. p.1-4.
- SYVITSKI, J. P. M.; KETTNER, A. Sediment flux and the Anthropocene. **Philos Trans R Soc.** v, 369, n. 1938, p. 957-975, 2015.
- TELLES, T. S. **Os custos da erosão do solo.** 2010. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual de Londrina (UEL), Londrina, 2010.
- TETZLAFF, B. et al. Distributed modelling of mean annual soil erosion and sediment delivery rates to surface waters. **Catena,** v. 102, p. 13–20, 2013.
- TSCHARNTKE, T. et al. Global food security, biodiversity conservation and the future of agricultural intensification. **Biol Conserv,** v. 151, p. 53-59, 2012.
- VAL, L. A. et al. Erosividade das chuvas em Lavras, MG. **Ci. Prática,** v. 10, p. 199-209, 1986.
- VALERIANO, M. M. **TOPODATA:** guia de utilização de dados geomorfométricos locais. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2008.
- VENTE, J. et al. Predicting soil erosion and sediment yield at regional scales: Where do we stand? **Earth Sci Rev,** v. 127, p. 16–29, 2013.
- VERBURG, P. H. et al. A spatial explicit allocation procedure for modelling the pattern of land use change based upon actual land use. **Ecological modelling,** v. 116, n. 1, p. 45-61, 1999.
- VIANNA, M. D. S.; SENTELHAS, P. C. Simulação do risco de deficit hídrico em regiões de expansão do cultivo de cana-de-açúcar no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** v. 49, n. 1, p. 237–246, 2014.
- VIOLA, M. R. et al. Distribuição e potencial erosivo das chuvas no Estado do Tocantins. **Pesq. agropec. bras,** v. 49, p. 125–135, 2014.
- WALTRICK, P. C. et al. Estimativa da erosividade de chuvas no Estado do Paraná pelo método da pluviometria: atualização com dados de 1986 a 2008. **R. Bras. Ci. Solo,** v. 39, p. 256-67, 2015.
- WEILL, M. A. M.; SPAROVEK, G. Estudo da erosão na microbacia do Ceveiro (Piracicaba, SP): II - Interpretação da tolerância de perda de solo utilizando o método do Índice de Tempo de Vida. **R Bras Ci Solo,** v. 32, p. 815-824, 2008.
- WEILL, M. de A. M. **Estimativa da erosão do solo e a avaliação do seu impacto na microbacia do Ceveiro (Piracicaba, SP) através do Índice de Tempo de Vida.** 1999. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade de São Paulo (USP), Piracicaba, 1999.

WIEBER, K. **Agricultural economic report n. 823**. Washington: United States of Department of Agriculture, 2003.

WILDING, L. P.; LIN, H. Advancing the frontiers of soil science towards a geoscience. **Geoderma**, v. 131, p. 257–274, 2006.

WISCHMEIER, W. H. E.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains**. Washington: United States of Department of Agriculture, 1965.

WISCHMEIER, W. H. E.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Washington: United States Department of Agriculture, 1978.

WU, S. et al, An evaluation of grid size uncertainty in empirical soil loss modeling with digital elevation models. **Environ Model Assess**, v. 10, p. 33-42, 2005.

XU, C.; WIDÉN, E.; HALLDIN, S. Modelling hydrological consequences of climate change—progress and challenges. **Advances in Atmospheric Sciences**, v. 22, n. 6, p. 789-797, 2005.

ZHANG, L. et al. Spatial analysis of soil erosion in catchments: a review of modelling approaches. **Water Resources and Ecology**, v. 3, p. 58–64, 1995.

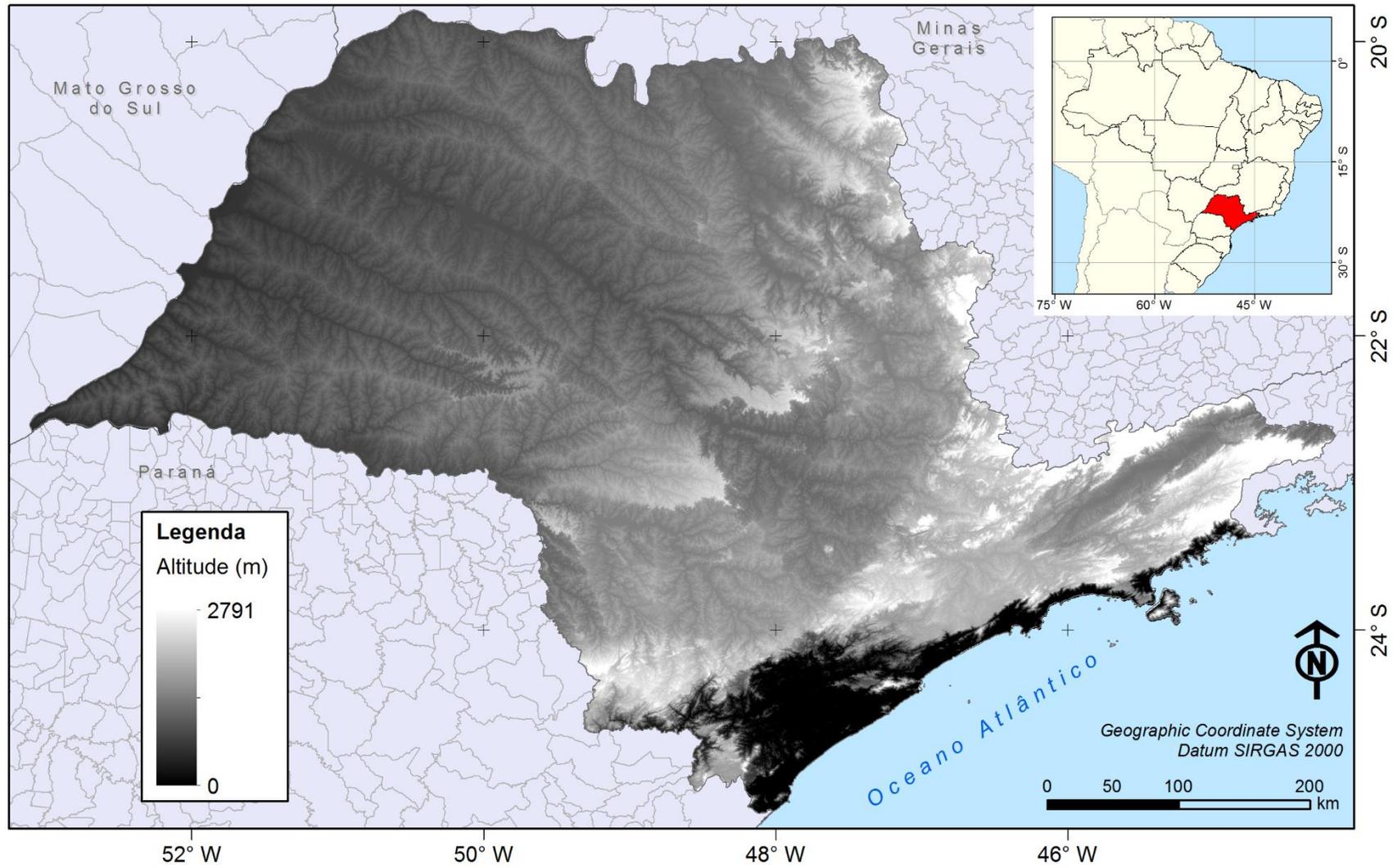
ZHAO, D.; LI, Y. Climate Change and Sugarcane Production: Potential Impact and Mitigation Strategies. **Internacional Journal of Agronomy**, v. 2015, 2015. (Article ID 547386)

ZHAO, L. et al. A quantification of the effects of erosion on the productivity of purple soils. **J Mount Sci**, v. 9, p. 96–104, 2012.

APÊNDICE

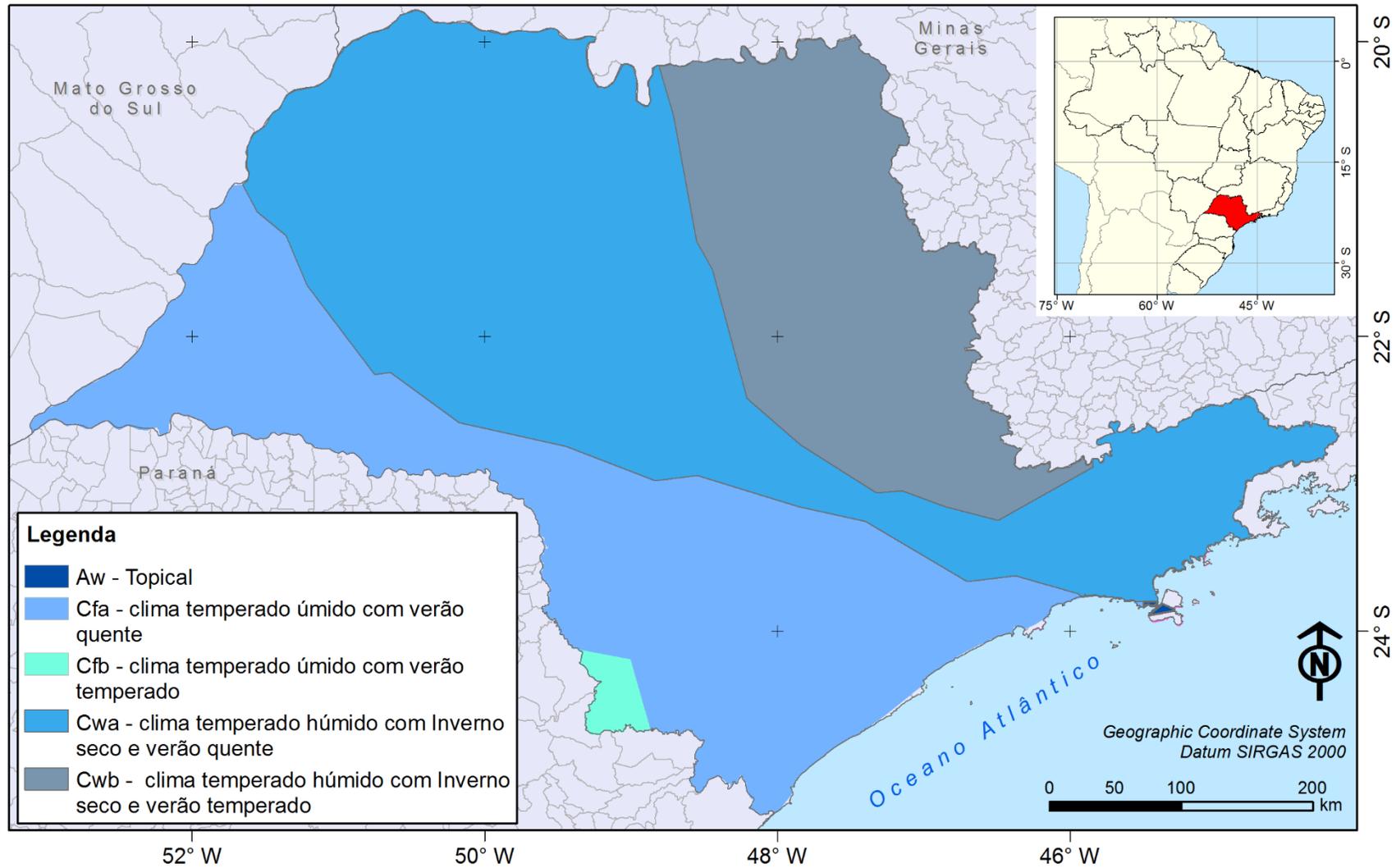
APÊNDICE A – Dados de entrada

Figura A1 - DEM



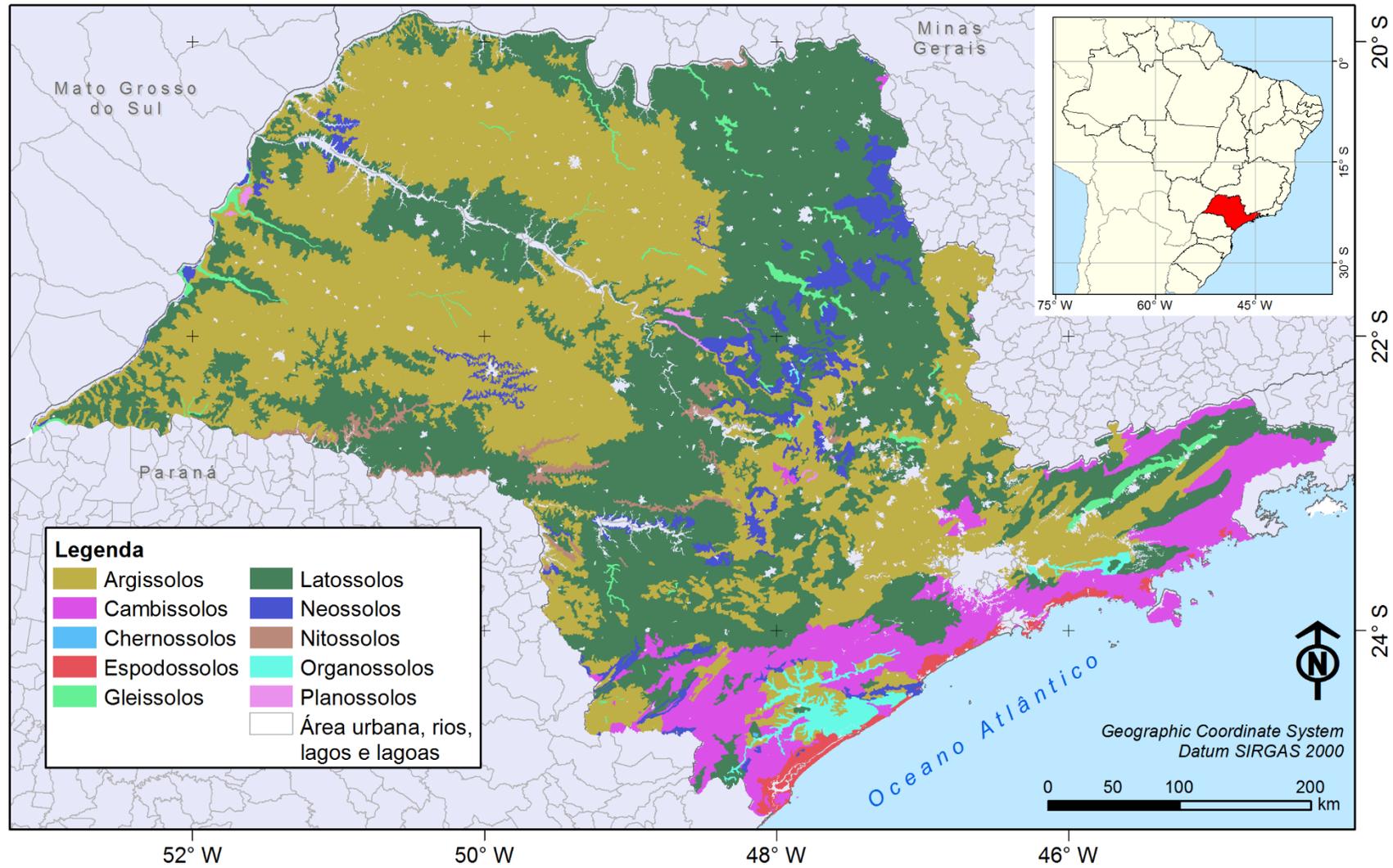
Fonte: TOPODATA (Valeriano, 2008)

Figura A2 - Clima Köppen para o Estado de São Paulo



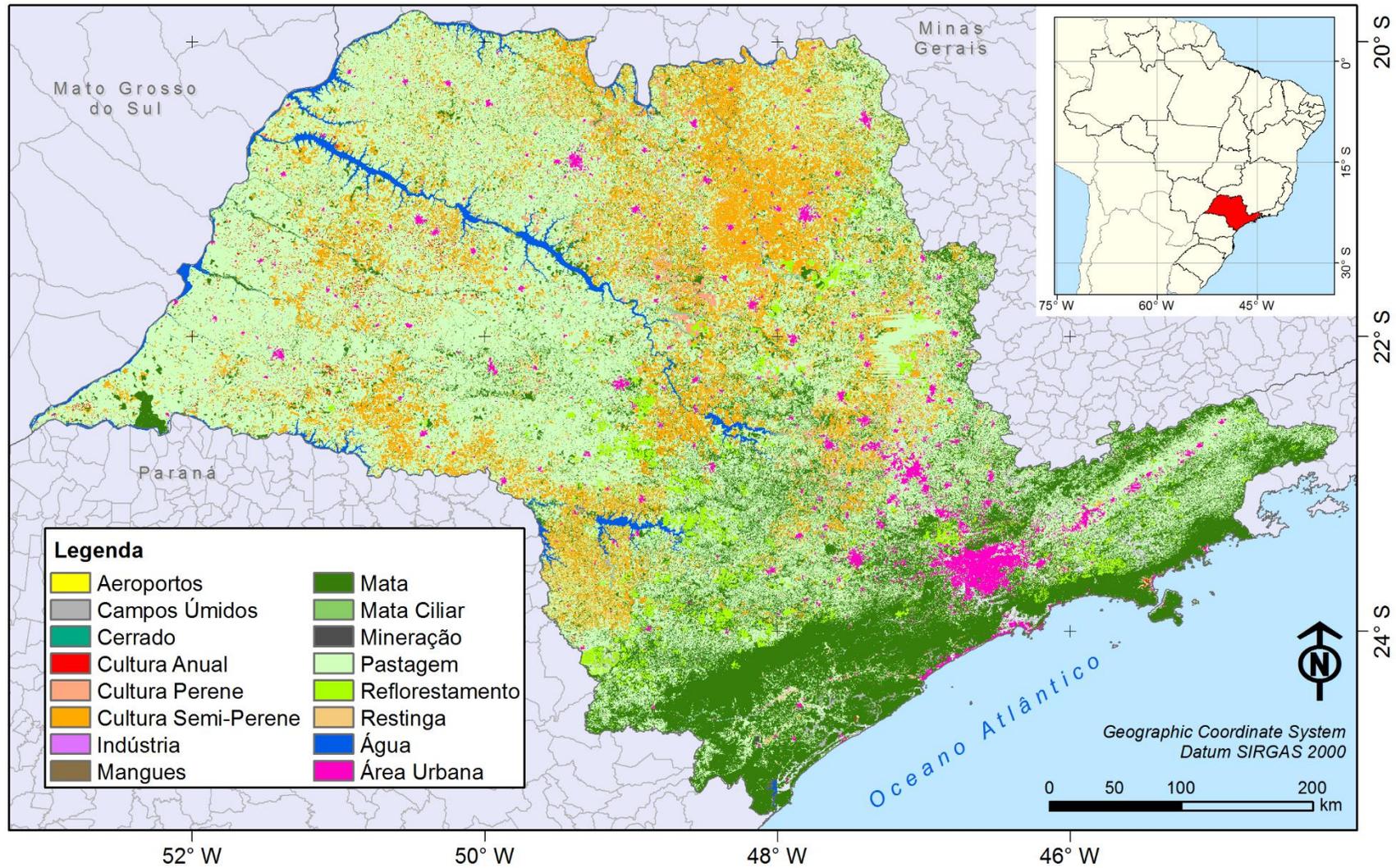
Fonte: Köppen (1936)

Figura A3 - Mapa pedológico do Estado de São Paulo



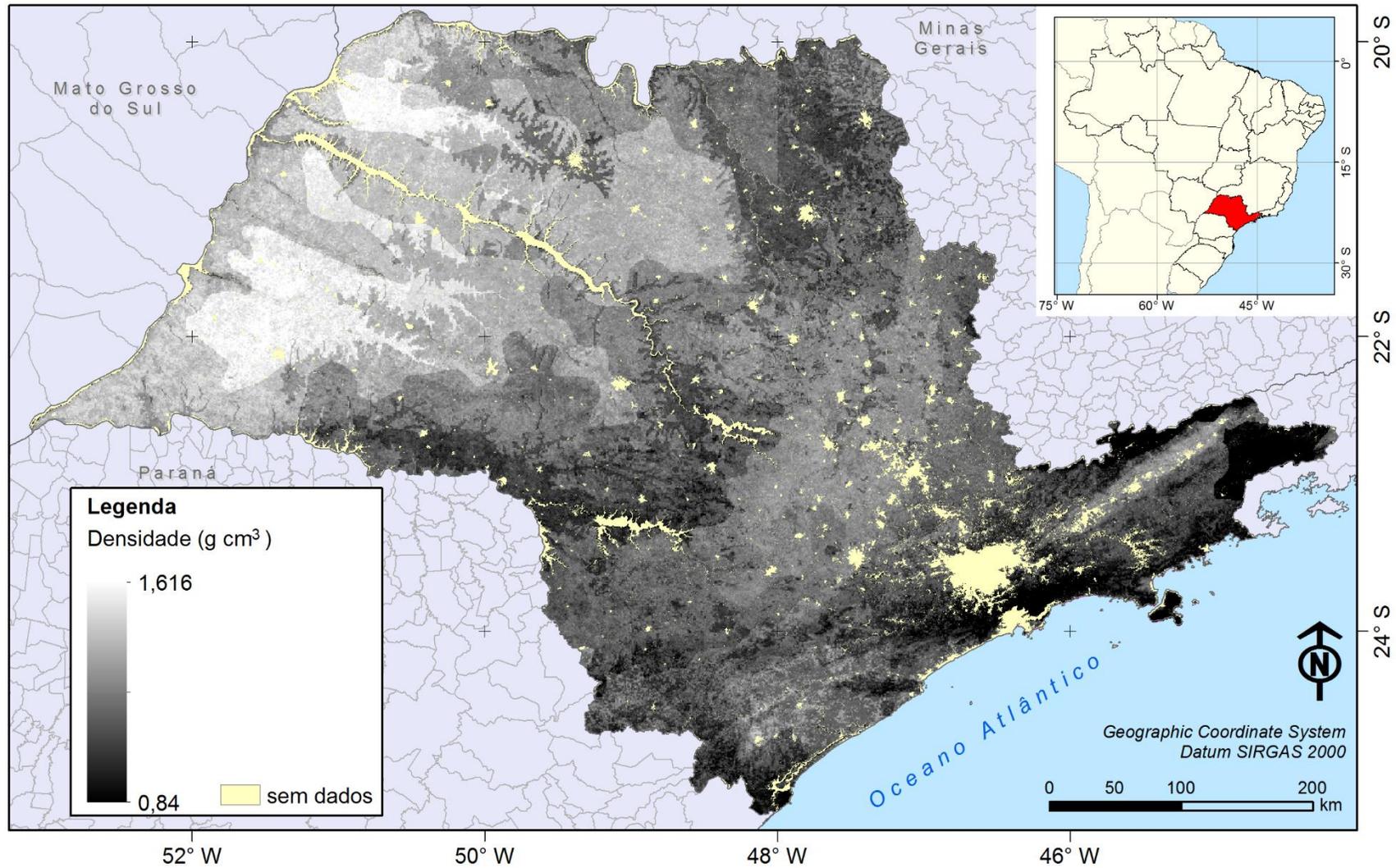
Fonte: Oliveira et al. (1999b)

Figura A4 - Mapa de uso e cobertura da terra do Estado de São Paulo em 2005



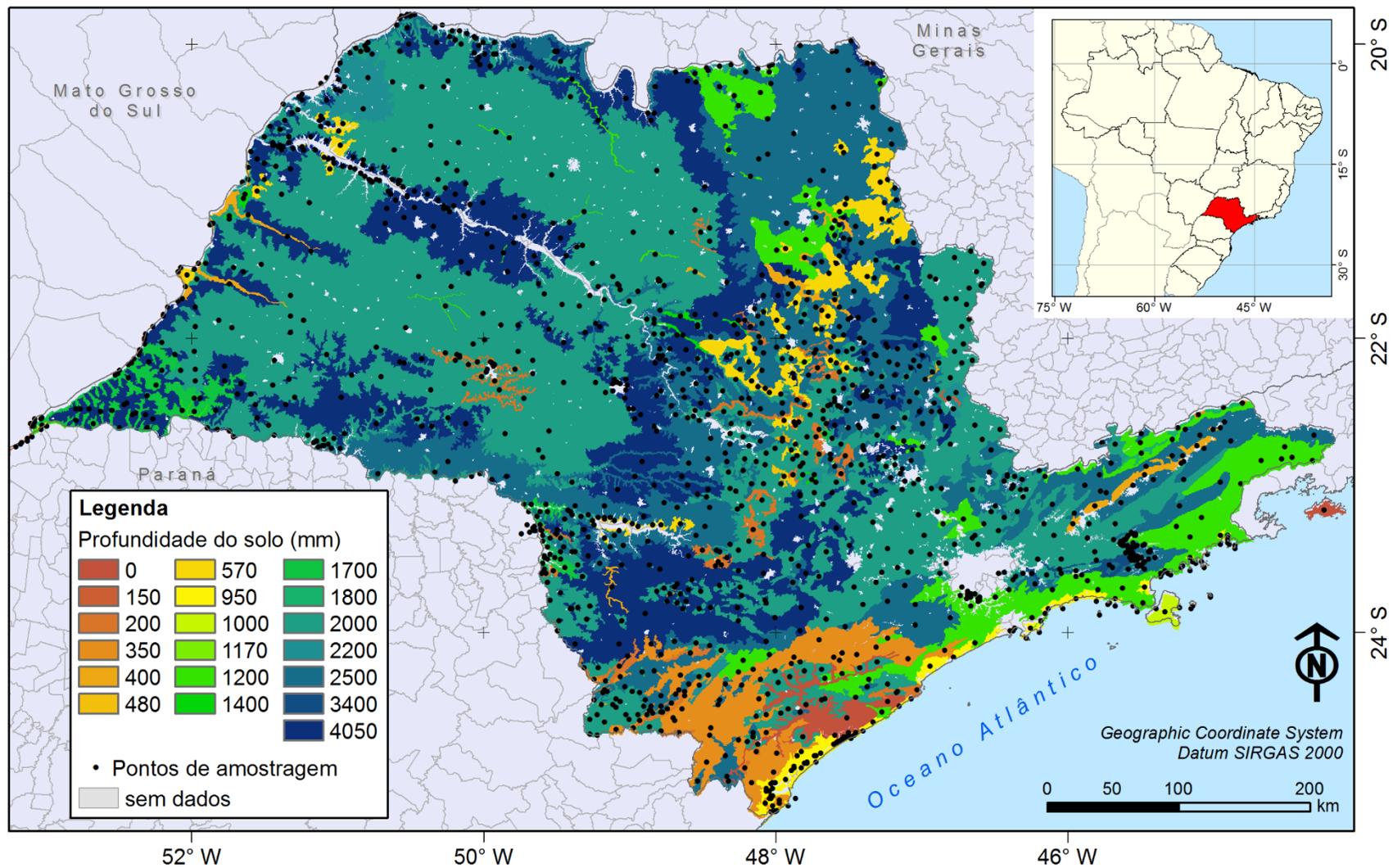
Fonte: São Paulo (2013)

Figura A 5 - Mapa de densidade do solo do Estado de São Paulo



Fonte: International Soil Reference and Information Center (2014)

Figura A 6 - Mapa da profundidade do solo do Estado de São Paulo



Fonte: Postos amostrados por Oliveira (1999b) e especializados pelo autor

APÊNDICE B – Código do "Modelo de expansão da área cultivada com cana-de-açúcar para o Estado de São Paulo"

9.1.1 Arquivo principal (*main*)

```
-----
-- This file contains a LUCCKME APPLICATION MODEL definition --
--   Compatible with LuccME 2.2           --
--   Generated with LuccMe Model Configurator   --
--   28/04/2016 at 10:23:16           --
-----

-----
-- Modelo da expansão da área cultivada com cana-de-açúcar --
--   para o Estado de São Paulo           --
--   GRASIELA DE OLIVEIRA RODRIGUES MEDEIROS   --
--   Última versão salva em : 28/04/2016 at 10:23:16   --
-----

require ("luccme")

dofile ("E:\\Etapa2\\BD\\SAOPAULO_CANA\\4x4Km\\R23_d2p3a1_rcp45_submodel.lua")

-----
--   LuccME APPLICATION MODEL DEFINITION   --
-----
R23_d2p3a1_rcp45 = LuccMEModel
{
    name = "R23_d2p3a1_rcp45",
-----
-- Temporal dimension definition   --
-----
    startTime = 2005,
    endTime = 2012,

-----
-- Spatial dimension definition   --
-----
    cs = CellularSpace
    {
        database
"E:\\Etapa2\\BD\\SAOPAULO_CANA\\4x4Km\\saopaulo_main_4x4_3_rcp45_2.mdb",
        theme = "cel",
        cellArea = 16,
    },
-----
-- Dynamic variables definition   --
-----
    updateYears = {2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2020, 2025,
        2030, 2035, 2039, 2045, 2050},
    scenarioStartTime = 2015,
    scenarioName = "rcp45",
-----
```

```

-- Land use variables definition      --
-----
landUseTypes =
{
    "cana", "diversos", "outros"
},

landUseNoData= "outros",

-----

-- Behaviour dimension definition:    --
-- DEMAND, POTENTIAL AND ALLOCATION COMPONENTS  --
-----

demand = D1,
potential = P1,
allocation = A1,

save =
{
    outputTheme = "R23_d2p3a1_rcp45",
    mode = "multiple",
    saveYears = {2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012},
    saveAttrs =
    {
        "cana_out",
        "cana_change",
        "cana_pot",
    },
},

    isCoupled = false
} -- END LuccME application model definition

-----

-- ENVIRONMENT DEFINITION      --
-----

timer = Timer
{
    Event
    {
        time = R23_d2p3a1_rcp45.startTime,
        period = 1,
        priority = 1,
        action = function(event)
            R23_d2p3a1_rcp45.execute(event)
        end
    }
}

env_R23_d2p3a1_rcp45 = Environment{}
env_R23_d2p3a1_rcp45:add(timer)

-----

-- ENVIRONMENT EXECUTION      --
-----

if R23_d2p3a1_rcp45.isCoupled == false then
    tsave = databaseSave(R23_d2p3a1_rcp45)
    env_R23_d2p3a1_rcp45:add(tsave)
    env_R23_d2p3a1_rcp45:execute(R23_d2p3a1_rcp45.endTime)

```

```
saveSingleTheme (R23_d2p3a1_rcp45, true)
end
```

9.1.2 Arquivo Secundário (*submain*)

```
-----
-- This file contains the COMPONENTS definition --
-- Compatible with LuccME 2.2 --
-- Generated with LuccMe Model Configurator --
-- 28/04/2016 at 10:23:16 --
-----

-----
-- Modelo da expansão da área cultivada com cana-de-açúcar --
-- para o Estado de São Paulo --
-- GRASIELA DE OLIVEIRA RODRIGUES MEDEIROS --
-- Última versão salva em : 28/04/2016 at 10:23:16 --
-----
```

```
-----
-- Demand --
-----
```

D1 = PreComputedValuesINPE

```
{
  annualDemand =
  {
    -- "cana", "diversos", "outros"
    {34129, 210938, 12485}, -- 2005
    {37162, 207906, 12485}, -- 2006
    {42858, 202210, 12485}, -- 2007
    {48579, 196488, 12485}, -- 2008
    {52256, 192812, 12485}, -- 2009
    {52864, 192204, 12485}, -- 2010
    {53838, 191230, 12485}, -- 2011
    {55159, 189908, 12485}, -- 2012
    {57917, 187150, 12485}, -- 2013
    {59076, 185992, 12485}, -- 2014
    {60418, 184649, 12485}, -- 2015
    {61761, 183306, 12485}, -- 2016
    {63104, 181964, 12485}, -- 2017
    {64446, 180621, 12485}, -- 2018
    {65789, 179279, 12485}, -- 2019
    {67132, 177936, 12485}, -- 2020
    {68474, 176593, 12485}, -- 2021
    {69817, 175251, 12485}, -- 2022
    {71159, 173908, 12485}, -- 2023
    {72502, 172565, 12485}, -- 2024
    {73845, 171223, 12485}, -- 2025
    {74140, 170927, 12485}, -- 2026
    {74436, 170632, 12485}, -- 2027
    {74731, 170337, 12485}, -- 2028
    {75026, 170041, 12485}, -- 2029
    {75322, 169746, 12485}, -- 2030
    {75617, 169450, 12485}, -- 2031
  }
}
```

```

{75912, 169155, 12485}, -- 2032
{76208, 168860, 12485}, -- 2033
{76503, 168564, 12485}, -- 2034
{76799, 168269, 12485}, -- 2035
{77094, 167974, 12485}, -- 2036
{77389, 167678, 12485}, -- 2037
{77685, 167383, 12485}, -- 2038
{77980, 167087, 12485}, -- 2039
{78275, 166792, 12485}, -- 2040
{78571, 166497, 12485}, -- 2041
{78866, 166201, 12485}, -- 2042
{79162, 165906, 12485}, -- 2043
{79457, 165611, 12485}, -- 2044
{79752, 165315, 12485}, -- 2045
{80048, 165020, 12485}, -- 2046
{80343, 164724, 12485}, -- 2047
{80638, 164429, 12485}, -- 2048
{80934, 164134, 12485}, -- 2049
{81229, 163838, 12485} -- 2050
}
}

-----
-- Potential --
-----

P1 = SpatialLagRegression

{
  potentialData =
  {
    --Region 1
    {
      -- cana
      {
        isLog = true,
        const = -0.6534552,
        minReg = 0.2,
        maxReg = 1,
        ro = 0.791439,

        betas =
        {
          pastagem = -1.150777,
          l_usinas = -0.1006142,
          prec_apt = 0.0758071,
          temp_apt = 0.0922656,
          apt_solo = 0.2960072,
          profund = 0.3736069,
          produtividade2 = 0.003170011,
          uc = -0.1035066,
          zc_adeq = 0.2173097,
          slope_media = 0.001989228,
          fert_alta = 0.07682465
        }
      },
    },
    -- diversos
    {
      isLog = false,
      const = -0.1198969,

```

