



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

sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/06.19.03.49-TDI

**VULNERABILIDADE AOS DESASTRES NATURAIS
DECORRENTES DE DESLIZAMENTOS DE TERRA EM
CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA
PORÇÃO PAULISTA DA SERRA DO MAR**

Pedro Ivo Mioni Camarinha

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelas Dras. Regina Célia dos Santos Alvalá, e Chou Sin Chan, aprovada em 25 de maio de 2016.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3LT6C4S>

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/2016/06.19.03.49-TDI

**VULNERABILIDADE AOS DESASTRES NATURAIS
DECORRENTES DE DESLIZAMENTOS DE TERRA EM
CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA
PORÇÃO PAULISTA DA SERRA DO MAR**

Pedro Ivo Mioni Camarinha

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelas Dras. Regina Célia dos Santos Alvalá, e Chou Sin Chan, aprovada em 25 de maio de 2016.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3LT6C4S>>

INPE
São José dos Campos
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Camarinha, Pedro Ivo Mioni.
C14v Vulnerabilidade aos desastres naturais decorrentes de deslizamentos de terra em cenários de mudanças climáticas na porção paulista da Serra do Mar / Pedro Ivo Mioni Camarinha. – São José dos Campos : INPE, 2016.
xxii + 252 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/06.19.03.49-TDI)

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

Orientadoras : Dras. Regina Célia dos Santos Alvalá, e Chou Sin Chan.

1. Vulnerabilidade. 2. Desastres naturais. 3. Mudanças climáticas. 4. Deslizamento de terra. 5. Serra do Mar. I.Título.

CDU 504.4:551.583(238.316)



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): **Pedro Ivo Mioni Camarinha**

Título: "VULNERABILIDADE AOS DESASTRES NATURAIS DECORRENTES DE DESLIZAMENTOS DE TERRA EM CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA PORÇÃO PAULISTA DA SERRA DO MAR".

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

Dr. José Antônio Marengo Orsini



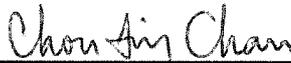
Presidente / CEMADEN / Cachoeira Paulista - SP

Dra. Regina Célia dos Santos Alvalá



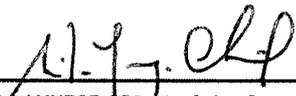
Orientador(a) / CEMADEN / Cachoeira Paulista - SP

Dra. Chou Sin Chan



Orientador(a) / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Silvio Jorge Coelho Simões



Convidado(a) / UNESP / São José dos Campos - SP

Dra. Luci Hidalgo Nunes



Convidado(a) / UNICAMP / Campinas - SP

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 25 de Maio de 2016

“A natureza só é comandada quando é obedecida”
Francis Bacon

*Dedico este trabalho
a meus pais e avós, pelo eterno amor.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar capacidade de concluir mais essa grande etapa da minha vida e de poder reconhecer, cada dia mais, sua grandiosidade e perfeição.

À Dra. Regina Alvalá, pela amizade, confiança, orientação e estímulo existente desde o nosso primeiro contato e que foram essenciais para o cumprimento do curso.

À Dra. Chou Sin Chan, pela orientação e esforços demandados para a conclusão deste trabalho, bem como por seus comentários e direcionamentos, sempre pertinentes.

A minha mãe Lucienne e meu pai Pedro Tarciso, pelo exemplo, dedicação e incentivo dado nessa grande caminhada que é a vida.

A toda minha família, por sempre me apoiarem e acreditarem em mim.

Aos meus eternos amigos que me acompanham desde tempos que precedem o doutorado (sobretudo aos catequistas) e que sempre irei ter, com carinho, a meu lado.

Aos amigos do doutorado, que compartilharam dos mesmos momentos e ajudaram a superar cada dificuldade durante este período.

Ao Dr. José Marengo Orsini, pelas oportunidades concedidas durante o doutorado e pelas conversas sempre produtivas.

Ao Programa de Pós-Graduação, bem como à Secretária de Pós-graduação, por sempre estarem dispostos a me ajudar a resolver os eventuais problemas que surgiram.

E a todos aqueles que pela minha vida passaram e me agregaram valores, conhecimento e virtudes, deixando boas lembranças.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma abordagem multidisciplinar da avaliação da vulnerabilidade aos desastres naturais decorrentes de deslizamentos de terra, considerando os efeitos mudanças climáticas. O foco das análises foi a região da Serra do Mar paulista, que possui um grande histórico de desastres desta natureza e que se caracteriza como uma região de grande importância econômica, ambiental e turística do estado de São Paulo. A primeira etapa de trabalho analisou a vulnerabilidade aos desastres naturais para todos os municípios paulistas, considerando dados de modelagem climática para o clima presente (1961-1990) e futuro (2011-2040; 2041-2070 e 2071-2100), além de variáveis físico-ambientais, demográficas, socioeconômicas e de governança. Esta análise culminou na identificação de diferentes contrastes de vulnerabilidades dentro do estado de São Paulo e destacou a alta vulnerabilidade dos municípios localizados da região da Serra do Mar, sobretudo o Litoral Norte paulista. Em um segundo momento, o foco foi direcionado para quatro municípios localizados nesta região crítica, sendo eles: Santos, Cubatão, Caraguatatuba e Ubatuba. Nesta etapa, foi proposta uma metodologia de mapeamento da suscetibilidade aos deslizamentos de terra utilizando a Álgebra de Mapas e a técnica Fuzzy Gamma. O mapeamento possibilitou identificar encostas que oferecem risco à população, que foram comparadas com os setores de risco previamente mapeados pela CPRM. Os resultados indicaram a boa eficiência do método empregado e ressaltaram que o crescimento urbano avançando em direção as encostas tem estabelecido cenários de risco que demandam especial atenção por parte dos gestores públicos. Em um terceiro momento, Caraguatatuba foi escolhida para um estudo piloto que objetivou avaliar a influência das mudanças climática no aumento dos eventos extremos de precipitação, especificamente aqueles que ultrapassam o limiar de 110 mm / 72 h, que são considerados aqueles com grande potencial de deflagrar os deslizamentos de terra. Os resultados desta etapa apresentaram-se em concordância com aqueles observados na análise feita para todo estado de São Paulo, e sugerem que há um aumento significativo dos eventos extremos durante o verão, sobretudo entre 2041 até 2100. De forma geral, os resultados do presente trabalho permitiram, juntos, evidenciar a vulnerabilidade da região da Serra do Mar, sugerindo que em algumas porções haverá intensificação dos eventos extremos, mas que existe todo um outro contexto não climático determinante para a ocorrência dos desastres naturais que precisa ser considerado em políticas públicas de redução de risco aos desastres e adaptação.

ANALYSIS OF VULNERABILITY TO NATURAL DISASTERS CAUSED BY LANDSLIDES CONSIDERING THE CONTEXT OF CLIMATE CHANGE, IN SERRA DO MAR IN SÃO PAULO STATE

ABSTRACT

This study presents a multidisciplinary approach to the assessment of vulnerability to natural disasters caused by landslides, considering the effects of climate change. The focus was the region of the Serra do Mar in São Paulo State, which has a great historical disasters and is one of most important region by economic, environmental and touristic point of view. The first stage of work has analyzed the vulnerability to natural disasters for all counties, considering data from climate modeling to the present (1961-1990) and future (2011-2040; 2041-2070 and 2071-2100), as well as physical, environmental, demographic, socioeconomic variables. This analysis resulted in the identification of different vulnerabilities contrasts for São Paulo State and highlighted the high vulnerability of Serra do Mar region, especially in the North Coast. In a second stage, Caraguatatuba was chosen for a pilot study aimed to assess the influence of climate change on the increase in extreme precipitation events, specifically those that exceed the threshold of 110 mm / 72 h. The results of this step were in agreement with the first step and suggest that there is a significant increase of extreme events during the summer, especially between 2041 to 2100. In the third step, the focus was directed to four municipalities located in a critical region: Santos, Cubatão, Caraguatatuba and Ubatuba. At this stage, it was proposed a methodology for susceptibility mapping to landslides using algebra maps and Fuzzy Gamma technics. The mapping has allowed the identification of slopes that offer risk to the population, which were compared with the risk sectors previously mapped by CPRM. The results showed good efficiency of the method and emphasized that urban growth advancing toward the slopes has established risk scenarios that require special attention from public managers. Overall, the results of this work show the vulnerability of the Serra do Mar region, suggesting that in some portions the extreme events will be intensified. However, there is another non-climatic context that is determinant for the occurrence of natural disasters that needs to be considered in public policy of disaster risk reduction and adaptation.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1.1 - Componentes que levam à condição de desastre natural.....	9
Figura 1.2 - Efeitos das mudanças climáticas na distribuição de extremos.....	12
Figura 1.3 - Anomalias de temperatura da superfície para América do Sul	17
Figura 1.4 - Evolução de chuvas extremas para algumas partes do Brasil.....	18
Figura 1.5 - Evolução do fator de segurança de uma encosta ao longo do tempo.....	30
Figura 2.1 - Anomalia do índice R95p para o estado de São Paulo.....	45
Figura 2.2 - Atlas de Desastres Naturais relacionados a movimentos de massa	46
Figura 2.3 - Divisão Geomorfológica segundo Almeida (1964).....	47
Figura 2.4 - Frequência mensal de movimentos de massa no estado de São Paulo.	49
Figura 2.5 – Média pluviométrica em 2010,, no estado de São Paulo.....	49
Figura 2.6 - Frequência de “acidentes” por escorregamentos.....	51
Figura 2.7 - Estrutura conceitual para definição da vulnerabilidade	52
Figura 2.8 - Índice de Perigo de Escorregamento de Terra do estado de São Paulo	67
Figura 2.9 - Mapa de Densidade Populacional do estado de São Paulo, ano de 2013. .	69
Figura 2.10 - Municípios com a Campanha “Construindo Cidades Resilientes”	71
Figura 2.11 - Sub-índice de vulnerabilidade socioeconômica para o Brasil.....	75
Figura 2.12 – Espacialização do índice de extremos de precipitação Rx1day.....	83
Figura 2.13 - Espacialização do índice de extremos de precipitação Rx5day.	83
Figura 2.14 - Espacialização do índice de extremos de precipitação R95p.....	84
Figura 2.15 - Espacialização do índice de extremos de precipitação CWD.....	84
Figura 2.16 - Mapa de Exposição para o <i>baseline</i> (perigos hidrometeorológicos).	86
Figura 2.17 - Sub-índice de Sensibilidade aos Desastres Naturais Relacionados com Deslizamentos De Terra.....	89
Figura 2.18 – Sub-índice de Capacidade Adaptativa.	94
Figura 2.19 – Índice de Vulnerabilidade aos Desastres Naturais relacionados com Deslizamentos de Terra, no período de 1961-1990 (<i>baseline</i>).	97
Figura 2.20 – Anomalias/incrementos do índice de extremo Rx1Day.....	102

Figura 2.21 - Anomalias/incrementos do índice de extremo Rx5Day	102
Figura 2.22 - Anomalias/incrementos do índice de extremo R95p.....	103
Figura 2.23 - Anomalias/incrementos do índice de extremo CWD.....	103
Figura 2.24 - Incrementos do sub-índice de Exposição.....	105
Figura 2.25 – Espacialização dos Índice de Vulnerabilidade aos Desastres Naturais relacionados a Deslizamentos de Terra (IVDDT)	109
Figura 2.26 - Evolução do IVDDT para alguns municípios paulistas.....	111
Figura 3.1 - Pontos de grade do modelo Eta com resolução espacial de 40km no domínio do estado de São Paulo.....	136
Figura 3.2 - Pluma de dispersão das simulações numéricas x dados observados.	141
Figura 3.3 - Gráfico boxplot das previsões sazonais do número de eventos extremos de precipitação para o período presente (1961-1990).....	142
Figura 3.4 - Boxplot das previsões sazonais, cenário A1B do IPCC AR-4, para os períodos futuros.....	152
Figura 4.1 – Municípios escolhidos para compor a área de estudo deste capítulo.	164
Figura 4.2 Normal climatológica dos municípios estudados (1961-1990).....	165
Figura 4.3 - Exemplo de ocupação em encostas suscetíveis, em Santos, SP.	167
Figura 4.4 - Fluxograma do método utilizado.	172
Figura 4.5 - Histogramas para as seis variáveis (mapas temáticos).....	174
Figura 4.6 - Três tipos de setores de risco encontrados no mapeamento CPRM.	191
Figura 4.7 - Frequências de ocorrência para cada classe de suscetibilidade.....	196
Figura 4.8 Mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos de terra	197
Figura 4.9 - Frequência das classes de suscetibilidade relacionadas com as três tipologias dos setores de risco (RC - Índice de Concentração de Risco).....	201
Figura 4.10 - Distribuição das classes de suscetibilidade para os quatro níveis de risco usado pela CPRM (R1, R2, R3 e R4).....	208
Figura 5.1 – Sobreposição dos resultados encontrados no Cap.3 e Cap.2.....	218

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 1.1 - Síntese de informações relevantes às relações dos tipos de desastres no Brasil, eventos extremos e mudanças climáticas.	15
Tabela 1.2 – Características dos principais tipos de movimentos de massa.	24
Tabela 1.3 - Principais fatores deflagradores de movimentos de massa.....	28
Tabela 2.1 - Índices de extremos sugeridos pelo IPCC.....	59
Tabela 2.2 - Ranking dos Municípios com Sensibilidade “Extremamente Alta”	92
Tabela 2.3 - Listagem dos 19 municípios classificados com vulnerabilidade “extremamente alta” e a composição do IVDDT com seus sub-índices.	98
Tabela 2.4 - Resultados do IVDDT ao longo dos períodos analisados.....	110
Tabela 3.1 - Limiares de precipitação para os dados observados e simulações numéricas, número de eventos extremos para o período de 1961-1990.	137
Tabela 3.2- Comparação dos resultados das simulações do modelo Eta/HadCM3 com os dados observados, período de 1961-1990.	140
Tabela 3.3 – Incrementos do número de eventos extremos a partir da projeção das mudanças climáticas no período 2011-2040	144
Tabela 3.4 - Incrementos do número de eventos extremos a partir da projeção das mudanças climáticas no período 2041-2070.	147
Tabela 3.5 - Incrementos do número de eventos extremos a partir da projeção das mudanças climáticas no período 2071-2100.	149
Tabela 4.1 - Características demográficas e geográficas dos municípios avaliados. ...	164
Tabela 4.2 - Resumo dos desastres de deslizamento de terra para os quatro municípios estudados entre 1993-2013.	166
Tabela 4.3 - Ponderação das classes temáticas em relação à suscetibilidade aos deslizamento de terras.	185
Tabela 4.4 – Classificação pela CPRM para hierarquizar os setores de risco.....	195
Tabela 4.5 - Índice de Risco Potencial para as Tipologias 1 (RP ₁); 2 (RP ₂) e 3 (RP ₃)....	206

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Hipóteses e Objetivos.....	4
1.2. Fundamentação Teórica Básica.....	6
1.2.1. Desastres Naturais: Conceitos e Definições.....	6
1.2.2. Mudanças Climáticas, Eventos Extremos de Precipitação e Desastres Relacionados.	10
1.2.3. Desastres Naturais Relacionados aos Movimentos de Massa.....	22
2. ANÁLISE DA VULNERABILIDADE DOS MUNICÍPIOS PAULISTAS AOS DESASTRES NATURAIS DE DESLIZAMENTOS DE TERRA, NO CONTEXTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS	31
2.1. Objetivos	34
2.2. Contextualização Teórico-Metodológica	35
2.3. Área de Estudo	42
2.4. Materiais e Métodos	52
2.4.1. O Sub-Índice de Exposição	54
2.4.1.1. O Modelo HADGEM2 ES.....	55
2.4.1.2. O modelo ETA.....	56
2.4.1.3. Cenários RCP4.5 e RCP8.5	57
2.4.1.4. Variáveis selecionadas para o sub-índice de Exposição.....	58
2.4.1.5. Cálculo do Sub-índice de Exposição para o <i>baseline</i>	61
2.4.1.6. Sub-índice de Exposição considerando o clima futuro	63
2.4.2. Sub-Índice de Sensibilidade.....	65
2.4.2.1. Variáveis selecionadas para o sub-índice de Sensibilidade	65

2.4.2.2.	Estrutura do Sub-Índice de Sensibilidade	72
2.4.3.	O Sub-Índice de Capacidade Adaptativa	73
2.4.3.1.	Estrutura do Sub-índice de Capacidade Adaptativa.....	76
2.4.4.	Estrutura do Índice de Vulnerabilidade	77
2.4.5.	Análise de Pertinência das Variáveis Escolhidas	79
2.4.6.	Agregação dos Resultados por Município.....	80
2.5.	Resultados e Discussões.....	82
2.5.1.	O Sub-Índice de Exposição para o <i>Baseline</i>	82
2.5.2.	Espacialização do Sub-Índice de Sensibilidade	88
2.5.3.	Espacialização do Sub-Índice de Capacidade Adaptativa	94
2.5.4.	Índice de Vulnerabilidade para o Baseline e Análise de Pertinência das Variáveis	96
2.5.5.	Índice de Vulnerabilidade para os Períodos Futuros	101
2.5.5.1.	Incremento do Sub-Índice de Exposição.....	101
2.5.5.2.	Espacialização do Índice de Vulnerabilidade para o Clima Futuro	108
2.6.	Considerações Finais	115
3.	AVALIAÇÃO DOS EXTREMOS DE CHUVA POTENCIALMENTE DEFLAGRADORES DE DESLIZAMENTOS DE TERRA. UM ESTUDO-PILOTO EM CARAGUATATUBA-SP, CONSIDERANDO O CLIMA PRESENTE E FUTURO.....	121
3.1.	Objetivo	122
3.2.	Referencial Teórico.....	123
3.2.1.	Relação entre eventos pluviométricos e mecanismos de Instabilidade no interior do solo	123
3.2.2.	Limiares críticos de precipitação.....	125

3.3.	Área De Estudo	127
3.4.	Materiais e Métodos	128
3.4.1.	Dados Observados.....	128
3.4.2.	Simulações numéricas.....	129
3.4.2.1.	O modelo regional Eta-CPTEC	131
3.4.2.2.	Configuração do modelo	133
3.4.3.	Climatologia dos eventos extremos observados em Caraguatatuba	133
3.4.4.	Determinação dos eventos de precipitação nas simulações do MRC Eta/HadCM3	135
3.5.	Resultados e Discussões.....	137
3.5.1.	Simulações do clima atual (1961-1990)	137
3.5.2.	Projeções do clima futuro: 2011-2040.....	143
3.5.3.	Projeções do clima futuro: 2041-2070.....	146
3.5.4.	Projeções do clima futuro: 2071-2100.....	148
3.5.5.	Discussões gerais sobre as simulações do clima futuro.....	151
3.6.	Considerações Finais	153
4.	ANÁLISE DE SUSCETIBILIDADE AOS DESLIZAMENTOS DE TERRA NO LITORAL NORTE PAULISTA. UMA PROPOSTA METODOLÓGICA BASEADA EM SOFTWARE E DADOS DE DOMÍNIO PÚBLICO.....	159
4.1.	Objetivo	162
4.2.	Área de Estudo	163
4.3.	Materiais e Métodos	167
4.3.1.	Pesquisa e Pré-Processamento do Banco de Dados Espaciais.....	173
4.3.1.1.	Mapa Geológico	174

4.3.1.2.	Mapas Topográficos	175
4.3.1.3.	Mapa Pedológico.....	175
4.3.1.4.	Mapa de Uso e Cobertura da Terra.....	177
4.3.2.	Preparação do Banco de Dados Espacial e Ponderação das Classes Temáticas	177
4.3.2.1.	Ponderação das Classes Geológicas	178
4.3.2.2.	Ponderação da Topografia: declividade, curvaturas horizontal e vertical	179
4.3.2.3.	Ponderação dos tipos de Solos	181
4.3.2.4.	Ponderação das classes de Uso e da Terra	183
4.3.3.	Construção do Mapa de Suscetibilidade e a Técnica Fuzzy Gama.....	185
4.3.4.	Validação dos Resultados.....	188
4.3.4.1.	Os setores de risco mapeados pela CPRM	189
4.3.4.2.	Tipologias dos setores de risco	190
4.3.4.3.	Métricas de avaliação.....	192
4.3.4.4.	Avaliação considerando os Níveis de Risco.....	194
4.4.	Resultados e Discussões.....	195
4.4.1.	Discussões gerais sobre os mapas de suscetibilidade	195
4.4.2.	Avaliação a partir de estudos relacionados	203
4.4.3.	Análise considerando Níveis de Risco	207
4.5.	Considerações Finais	210
5.	INTEGRAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES FINAIS	217
5.1.	Conclusões.....	223
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	227

1. INTRODUÇÃO

A prevenção e mitigação dos desastres naturais têm se tornando um dos grandes desafios do século XXI, não somente devido ao aumento na frequência e nas proporções alcançadas, mas também pela sua complexidade, abrangendo diferentes áreas da ciência para compreendê-los.

No Brasil, destacam-se os desastres causados por eventos meteorológicos extremos, sobretudo os que envolvem as chuvas. Estes eventos são caracterizados por deflagrarem intensos processos físicos de curta duração, tais como os movimentos de massa e inundações. A rapidez com que estes fenômenos ocorrem dá condições para que, em um curto período de tempo, uma grande quantidade de pessoas seja atingida, deixando-as desabrigadas/desalojadas e causando altos índices de morbidez e mortalidade (MARENGO, 2009).

O foco desta tese é voltado para os movimentos de massa (particularmente os deslizamentos de terra) que, anualmente, causam milhares de mortes em todo o mundo, situando-se abaixo apenas dos terremotos e inundações no elenco de desastres naturais que mais afetam a humanidade (MCBEAN; RODGERS, 2009). Diversos projetos de pesquisa, desenvolvidos em várias instituições mundiais, procuram estudar as causas e mecanismos indutores dos movimentos de massa nas encostas. Em todos eles, vislumbra-se que os resultados subsidiem e promovam políticas públicas que se municiem do conhecimento disponível, para a mitigação dos desastres, principalmente considerando os principais fatores causais, inclusive relacionando também as possíveis interferências antrópicas para o desenvolvimento do fenômeno.

Os deslizamentos de terra translacionais (ou planares) são aqueles que ocorrem com maior frequência no Brasil (Guidicini; Nieble, 1996; Fernandes; Amaral, 1984; Tominaga, 2007). Naturalmente, este tipo de movimento de massa acontece em regiões com relevo acidentado, com declividades elevadas, combinadas com solos mais jovens e pouco espessos e em grandes

encostas/taludes. Estas características físicas, associadas a um grande aporte de água que infiltra no solo proveniente das chuvas, são os condicionantes naturais que deflagram os deslizamentos. Porém, é possível que localidades com estas características, como as regiões serranas, sejam alvo do processo de ocupação humana que, por sua vez, se manifesta na forma de diferentes graus de alteração da paisagem. Dependendo de como é a relação entre os elementos naturais e antrópicos, a ocupação humana pode tanto se dar de forma harmoniosa, quanto causar uma indução e/ou aceleração catastrófica do processo natural, dependendo principalmente da posição geográfica onde se sobrepõem os dois processos.

Exemplos desta interação não harmoniosa já ocorreram no passado em várias regiões do Brasil, resultando em grandes desastres, tais como: Caraguatatuba, SP, março de 1967, com estimativas chegando em 400 mortos; Petrópolis, RJ, fevereiro de 1971, com 171 mortos, e dezembro de 2001, com cerca de 70 mortos; Salvador, BA, julho de 1989, com cerca de 100 mortos; e, Recife, PE, abril de 1996, com 66 mortos, Angra dos Reis, RJ, em 2003, com 40 mortos e 2010, com 30 mortos; Região Serrana do Rio de Janeiro, 2011, com estimativas que excedem 890 mortes (Relatório Final do Projeto “Estudos da Previsibilidade de Eventos Meteorológicos Extremos na Serra do Mar”, 2009; ABMS, 2011); entre muitos outros. Consta-se que muitos destes desastres ocorreram na região da Serra do Mar (Caraguatatuba, Petrópolis, Angra dos Reis, Região Serrana do Rio de Janeiro etc.). Em razão do número expressivo de desastres ocorridos nesta região e por ela apresentar grande importância econômica e ambiental para o estado de São Paulo, a Serra do Mar foi escolhida como região de foco principal desta tese.

Independente de onde ocorrem, os desastres envolvendo deslizamentos de terra são relevantes também pela possibilidade de serem incrementados em razão da interferência das mudanças climáticas globais (MC), uma vez que estão relacionados diretamente com a ocorrência dos eventos extremos hidrometeorológicos. No clima atual, já é possível observar o aumento dos eventos severos relacionados à precipitação, sobretudo na amplitude destes

fenômenos, nas regiões tropicais, como no sudeste brasileiro (MARENGO et. al, 2007). Para o clima futuro, estudos recentes apresentam resultados que alertam sobre a mesma tendência de aumentar até o fim do século XXI, nas mesmas regiões (*Intergovernmental Panel on Climate Change* - IPCC, 2012). Ou seja, nas regiões onde comumente estes eventos extremos se desenvolvem e causam impactos, há grande probabilidade de intensificarem ainda mais futuramente.

Estes resultados, entretanto, referem-se a análises que levam em consideração uma abordagem em contexto global, o que não permite avaliar com precisão os fenômenos que acontecem em escalas continentais e regionais. Desta forma, estudos complementares devem ser elaborados, em especial, focando o uso de modelos climáticos regionalizados e com maior resolução espacial. A partir deste tipo de abordagem será possível identificar com maior detalhe a influência das mudanças climáticas na ocorrência e na magnitude de diferentes tipos de eventos extremos em escala mais refinada.

Neste âmbito, as regiões que apresentam indicativos de que serão fortemente impactadas pelas mudanças climáticas futuras têm ganhado especial atenção por parte da comunidade científica. Há necessidade, portanto, da elaboração de estudos específicos que avaliem detalhadamente todo o processo de desenvolvimento dos desastres naturais, que foquem em análises dos fatores disparadores do processo (chuvas), dos condicionantes físicos (susceptibilidade) e também as vulnerabilidades humanas.

Estudos focando os aspectos hidrometeorológicos e geológico-geotécnicos têm sido conduzidos no Brasil, particularmente visando avaliar regiões-alvo do estado de São Paulo. No tocante à previsibilidade de ocorrência de deslizamentos na região Serra do Mar, citam-se os trabalhos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT e do Instituto Geológico - IG, que identificaram e mapearam as áreas de risco associadas às diversas formas de uso e ocupação do solo, estes reportados no Relatório Instabilidade da Serra do Mar no estado de São Paulo – Situações de Risco (SECRETARIA DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA E SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE, 1988). Igualmente,

ferramentas de sensoriamento remoto foram desenvolvidas para identificar e mapear áreas de risco na Serra do Mar, tais como as propostas por CREPANI e MEDEIROS (2000) e CREPANI et al. (2001). No escopo do projeto temático “Estudos da Previsibilidade de Eventos Meteorológicos Extremos na Serra do Mar”, realizado entre 2005 e 2009, esforços foram dispendidos pelas várias instituições envolvidas (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, Instituto Tecnológico da Aeronáutica - ITA, IPT, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ e Universidade de Campinas – UNICAMP), em especial com foco na previsão meteorológica de curto prazo, voltada para a percepção do risco existente e emissão de alertas, o que gerou resultados relevantes para a compreensão da dinâmica do clima regional.

Neste contexto, a presente tese foi desenvolvida com o intuito de avaliar a vulnerabilidade dos municípios paulistas aos desastres relacionados aos deslizamentos de terra em seu sentido mais amplo, integrando informações provenientes de modelagem climática, aspectos físico-ambientais, socioeconômicos, mapeamento de suscetibilidade e análises específicas de eventos extremos potencialmente deflagradores dos movimentos de massa. Como contribuição adicional, a tese apresenta-se como uma proposição de sequencia metodológica, onde as análises foram divididas em etapas que avaliam as diferentes nuances da vulnerabilidade indo desde a escala macro (objetivando encontrar *hotspots* de vulnerabilidade), regional e até contexto municipal.

1.1. Hipóteses e Objetivos

Em diversas partes do mundo, foram observados o aumento da frequência e a intensidade de eventos externos de precipitação, incluindo algumas regiões brasileiras, como o Sudeste brasileiro (IPCC, 2012). Concomitantemente, durante as últimas décadas, nestas regiões também têm sido observado que os desastres envolvendo os deslizamentos de terra se tornaram mais

frequentes e severos, incluindo a região da Serra do Mar (CEPED, 2013). Tais fatos são acompanhados do rápido crescimento populacional, econômico e urbano e de conseqüente degradação ambiental, dificultando determinar qual é a influência das mudanças climáticas na caracterização da vulnerabilidade aos desastres desta natureza. Logo, a hipótese norteadora deste trabalho considera que: as mudanças climáticas possuem relações com o incremento dos desastres naturais decorrentes de deslizamentos de terra, mas esta relação é variável no tempo e espaço, e depende também de outros fatores ambientais e socioeconômicos.

Desta forma, objetivo do presente trabalho é analisar interdisciplinarmente a vulnerabilidade dos municípios da região da Serra do Mar paulista aos desastres naturais decorrentes de deslizamentos de terra, no clima presente e cenários futuros de mudanças climáticas. Os objetivos específicos a tese são:

- Elaborar e espacializar um índice de vulnerabilidade aos desastres relacionados aos deslizamentos de terra, para os municípios de todo estado de São Paulo, para o clima presente (1961-1990) e futuro (2011-2040; 2041-2070; 2071-2100). Esta etapa compõe o Capítulo 2;
- Escolher um município crítico avaliado no Capítulo 2 e definir limiares críticos de precipitação que caracterizem grande probabilidade de deflagrar os deslizamentos de terra na região de estudo;
- A partir dos resultados de simulações climáticas (provenientes de outros estudos), realizar um estudo-piloto para contabilizar a ocorrência dos eventos extremos de precipitação que ultrapassaram os limiares críticos definidos anteriormente, comparando o período de base (1961-1990) com os períodos futuros (2011-2040; 2041-2070; 2071-2100). Estas duas últimas etapas estão apresentadas no Capítulo 3.
- Identificar uma região crítica no Capítulo 2 para propor uma técnica de mapeamento de suscetibilidade aos deslizamentos de terra que possa ser

facilmente replicada em outras regiões, utilizando apenas *software* e dados de domínio público. Esta etapa compõe o Capítulo 4;

Destaca-se que os Capítulos 2, 3 e 4 foram construídos de forma independente e são autoexplicativos, isto é, cada um possui sua própria introdução, objetivos, referencial teórico, explicações sobre os materiais e métodos utilizados e os respectivos resultados e discussões. Ao final do trabalho, no Capítulo 5, se discute os principais resultados observados de forma integrada, objetivando destacar os aspectos conclusivos a respeito da vulnerabilidade da Serra do Mar em seu sentido mais amplo, considerando os possíveis impactos das mudanças climáticas.

1.2. Fundamentação Teórica Básica

Este item apresenta o material de base para a compreensão do presente trabalho como um todo, explorando conceitos, nomenclaturas e definições que permeiam os principais assuntos discutidos nos capítulos subsequentes. Aprofundamentos mais técnicos e específicos para cada tipo de abordagem estão apresentados nos respectivos capítulos, cabendo aqui apenas explanações no âmbito geral da temática apresentada.

1.2.1. Desastres Naturais: Conceitos e Definições

Eventos que se caracterizam por atingir valores anormais, quando comparados com um estado climático médio observado ao longo do tempo, são comumente chamados de "eventos extremos". Estes eventos ocorrem em escalas temporais que variam de horas, dias, anos e até mesmo milênios, sendo que os mais importantes para as atividades humanas são os extremos de curto prazo (relacionados com o tempo) e os de médio prazo (relacionados com o clima), pois são eventos com potencial para causar impactos significativos aos sistemas humanos (MARENGO, 2009). Os eventos extremos de tempo e clima

são também associados à variabilidade climática, e suas frequências e intensidades podem também variar de acordo com a mudança climática (MARENGO et al. 2009a), sejam elas naturais (como El Niño e La Niña), ou aquelas induzidas pelas ações antrópicas. Ao se deslocarem para localidades caracterizadas por atividades humanas, estes eventos criam uma condição de perigo (tais como as inundações, deslizamentos de terra, entre outros) que, dependendo das vulnerabilidades existentes, podem causar impactos severos e levar à condição de um *desastre natural*.

Concernente ao termo “desastre natural”, várias definições são encontradas na literatura. Algumas delas estabelecem limites mínimos de prejuízos financeiros que devem ser causados e/ou uma quantidade mínima de pessoas atingidas para que os impactos de um evento extremo caracterizem um “desastre” (BURTON et al. 1978). Entretanto, esta definição não é universal quando são levados em consideração os diferentes níveis de preparação e estruturação das sociedades. Normalmente, nações mais ricas podem estar mais preparadas para responder rapidamente e sem grandes dificuldades aos prejuízos financeiros ou humanos, enquanto outras nações, menos preparadas, podem demorar anos ou décadas, podendo até mesmo entrar em colapso.

Diante da diversidade de conceitos, no presente trabalho adotou-se a definição baseada em Alexander (1993) e Tonbin; Montz (1997), em que os desastres naturais são conceituados como: o resultado de eventos e fenômenos naturais intensos ou extremos que atingem qualquer sistema social que não seja capaz de refleti-los, absorvê-los e/ou amortecê-los, causando impactos significativos para a conservação do equilíbrio social, econômico, físico, psicológico ou ambiental, sendo difícil a recuperação para a condição existente antes da ocorrência de tal evento. Seus impactos dependerão das vulnerabilidades existentes para cada indivíduo, propriedade ou grupo social atingido.

Entende-se por vulnerabilidade as características intrínsecas de um elemento e que representa a propensão e/ou predisposição para que ele seja afetado adversamente (IPCC, 2012). Na área de desastres, especificamente, vulnerabilidade refere-se às situações e características de uma pessoa ou

grupo social que dificulte ter capacidade para antecipar, lidar, resistir e responder aos efeitos adversos de um evento físico (WISNER et al., 2004), inserindo-se aqui também as características que aceleram ou induzem uma situação de perigo. Alguns tipos de vulnerabilidades são apresentados por AYSAN (1994), como se segue: econômica (falta de acesso a recursos/materiais); social (desintegração de padrões sociais), organizacional (falta de um Estado forte e estruturas institucionais); atitudinal e motivacional (falta de consciência pública); política (acesso limitado ao poder e representação, corrupção); cultural (crenças e costumes), física (construções frágeis e indivíduos fracos). Existem vários tipos de vulnerabilidade para os sistemas humanos; entretanto, Alcántara-Ayala (2002) ressalva que todas elas podem se enquadrar nos quatro tipos principais: social, econômica, política e cultural.

O termo “vulnerabilidade natural”, embora não usual, é utilizado para se referir tanto à probabilidade de uma região ser atingida por um evento natural extremo (no caso do clima) quanto às condições existentes para que um fenômeno natural severo ocorra (no caso de processos físicos, como os deslizamentos). A “vulnerabilidade natural” é intrínseca à localização geográfica de uma determinada região e de suas características (ALCÁNTARA-AYALA, 2002). Para que não haja interpretações errôneas, neste trabalho optou-se por diferenciar os dois tipos de “vulnerabilidade natural”. Será denominada “vulnerabilidade climática” as condições estabelecidas no clima, presente e futuro, que favoreçam à ocorrência de eventos climáticos extremos, ora chamada também de “exposição”. Para este trabalho em particular, a denotação de uma região com “alta vulnerabilidade climática” refere-se à uma maior probabilidade de ser atingida por eventos extremos de precipitação, embora o mesmo termo seja utilizado na literatura para relacionar também outros tipos de extremos (temperatura, umidade, etc.).

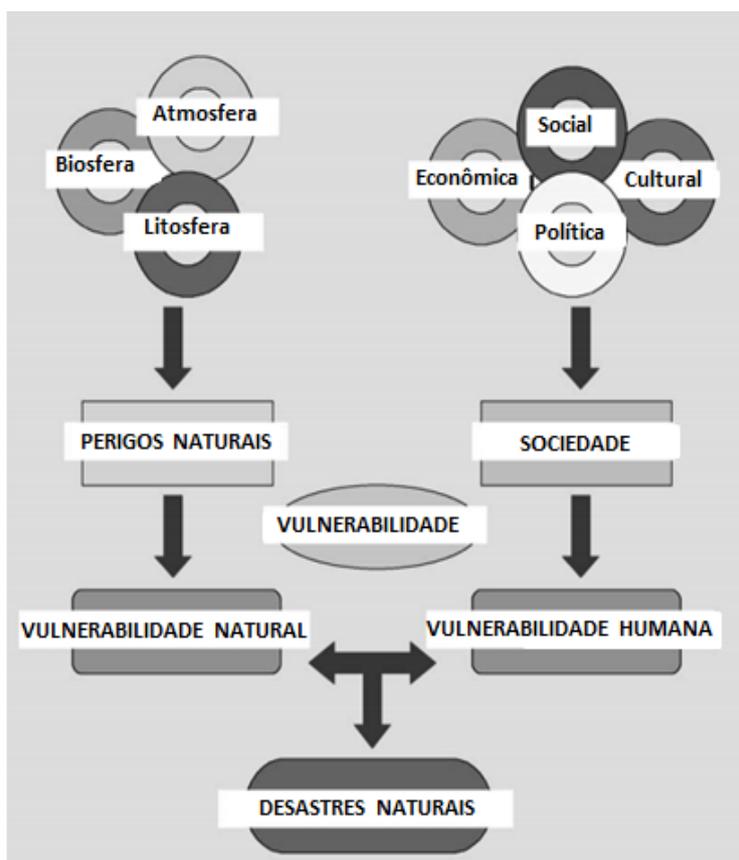
O termo “susceptibilidade” é bastante abrangente e comumente usado em diferentes temáticas. Porém, neste trabalho o termo associa-se às características do relevo, solos, geologia e usos e coberturas da terra que,

juntos, estabelecem condições favoráveis para a ocorrência do processo de deslizamento de terra. Assim, regiões com alta suscetibilidade são aquelas onde os deslizamentos de terra têm maior probabilidade de ocorrer.

De forma geral, é necessário haver uma sobreposição entre a vulnerabilidade natural (denominada neste trabalho como “susceptibilidade”) e humana para que seja estabelecida a condição de ocorrência dos desastres naturais (Figura 1.1).

Adger (2006) ressalta que vulnerabilidade para as mudanças climáticas também está relacionada com as características do sistema e suas funções no que concerne à exposição, sensibilidade/percepção e capacidade adaptativa para estas mudanças.

Figura 1.1 - Componentes que levam à condição de desastre natural.



Fonte: Adaptado de Alcátara-Ayala (2002)

A identificação das vulnerabilidades existentes, nos níveis local e regional, é imprescindível, principalmente para que as mesmas sejam contornadas. Como ressalta o IPCC (2012), a severidade dos impactos causados pelos extremos climáticos depende fortemente do nível de exposição e das vulnerabilidades das pessoas, atividades humanas ou grupos sociais atingidos.

No contexto de desastres naturais também se faz importante definir o termo resiliência, o qual, segundo o IPCC (2012), refere-se à capacidade de um sistema e seus componentes em antecipar, absorver, acomodar, ou se recuperar dos efeitos de um perigo natural de uma maneira oportuna e eficiente, garantindo a preservação, restauração e reorganização ou melhoria de suas estruturas essenciais, bem como suas funções básicas que mantêm o sistema em equilíbrio. Este termo também é utilizado na literatura como o oposto da vulnerabilidade, com a diferença que a resiliência está vinculada diretamente à capacidade de recuperação e da perpetuação dos sistemas atingidos e, principalmente, de haver recombinações das estruturas e processos envolvidos nos desastres e a renovação do sistema a partir das novas oportunidades criadas após os impactos (FOLKE, 2006). Neste sentido, a resiliência está diretamente relacionada com a capacidade adaptativa (SMIT; WANDEL, 2006) e permite um desenvolvimento contínuo que deve interagir com as mudanças identificadas e observadas.

1.2.2. Mudanças Climáticas, Eventos Extremos de Precipitação e Desastres Relacionados.

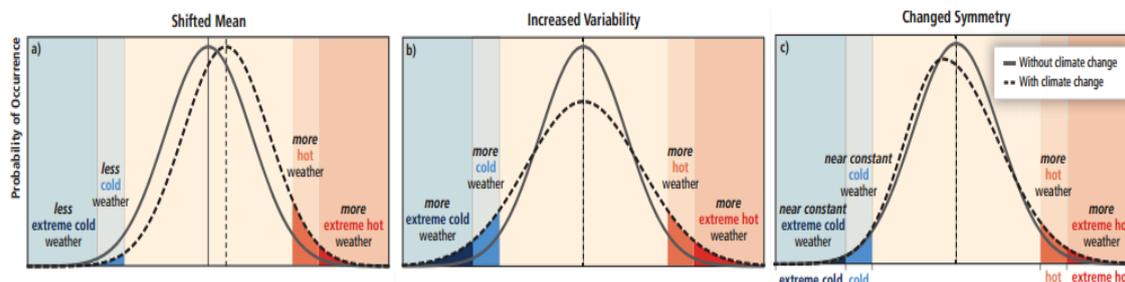
Desde a década de 90 o IPCC informa, através de seus relatórios e projeções de cenários climáticos, que há evidências de uma maior frequência dos extremos de temperatura e precipitação no planeta, tanto para o clima presente quanto para o futuro (IPCC, 2001; 2007b; 2013). Evidências climáticas observadas a partir de 1950 sugerem uma variabilidade nas alterações dos extremos climáticos, entretanto, a confiabilidade em mudanças observadas nos

extremos depende da qualidade e quantidade dos dados, bem como da disponibilidade de estudos considerando análises dos dados, podendo variar de região para região, e para diferentes tipos de extremos (IPCC, 2013).

Apesar das flutuações do clima que alteram, naturalmente, a frequência destes eventos em certos períodos, constata-se que atividades antrópicas (emissão de gases de efeito estufa e mudanças do uso da terra) corroboram na intensificação de alguns fenômenos climáticos como as secas, tornados, enchentes, vendavais, e na alteração da circulação de massas de ar em larga e meso e grande escala (HANSEN et al., 2010). Em consonância com as projeções dos últimos cenários *pessimistas* (RCP8.5) do relatório AR5 do IPCC (2013), algumas regiões do globo já apresentam sinais de mudanças com episódios frequentes de estiagens, eventos de precipitações severas, e temperaturas extremas ocorrendo com maior frequência e magnitude.

No que se refere aos efeitos das mudanças climáticas globais, os extremos de clima e tempo podem sofrer alterações em suas frequências, intensidades, distribuição espacial, duração, sincronismo entre eventos e até mesmo resultar em condições extremas nunca antes observadas (IPCC, 2012). As mudanças em extremos podem estar associadas às alterações na média, variância e/ou forma da distribuição de probabilidade de ocorrência dos mesmos (Figura 1.2), embora identificá-las não seja uma tarefa simples. É preciso ressaltar que os eventos extremos são raros e difíceis de contabilizar, em razão da não disponibilidade de séries longas de dados suficientes para a realização de avaliações referentes a tais mudanças. Quanto mais raro o evento, mais difícil é identificar suas mudanças em longo prazo.

Figura 1.2 - Efeitos das mudanças climáticas na distribuição de extremos.



Exemplos para os extremos de temperatura. Diferentes mudanças em distribuições de temperatura e seus efeitos sobre os valores extremos das distribuições: (a) os efeitos de uma simples mudança de toda a distribuição para um clima mais quente, (b) os efeitos de um aumento da variabilidade de temperatura, sem mudança na média, (c) efeitos de uma forma alterada da distribuição que, neste exemplo, assimetria para a parte mais quente da distribuição.

Fonte: IPCC, 2012.

Previamente, no quarto relatório (AR-4) publicado pelo IPCC (2007a), foram apresentadas evidências de alterações na frequência e magnitude em eventos extremos, a partir de dados observacionais desde 1950. Entretanto, o grau de confiabilidade a respeito de como estas mudanças e suas tendências ocorrem a nível global e, principalmente, regional depende diretamente da qualidade, quantidade e da disponibilidade dos dados históricos para avaliar cada tipo de extremo em específico (IPCC, 2012). A análise mais complexa é a da precipitação extrema, devido ao baixo grau de correlação com os eventos de precipitação (MARENGO et al. 2009). Assim, estimativas confiáveis de tendências em eventos extremos de precipitação são possíveis somente para regiões que disponham de redes observacionais com alta densidade de equipamentos, que permaneçam estáveis ao longo do tempo, as quais ainda precisam ser mais exploradas para que evidências mais concretas sejam encontradas.

Ressalta-se que os eventos extremos, por si só, nem sempre caracterizam situações de desastres, bem como, alguns desastres podem ser causados por eventos não extremos, pois os impactos gerados dependem diretamente do arranjo físico-ambiental e das características socioeconômicas que determinam a vulnerabilidade dos sistemas humanos atingidos. Ou seja, a análise de uma

possível relação das mudanças climáticas com o aumento da ocorrência de desastres naturais é algo complexo e deve considerar todos estes aspectos de forma integrada.

Considerando que o presente trabalho visou abordar os desastres naturais associados com as mudanças climáticas, optou-se por apresentar os objetivos em capítulos distintos, mas que contemplam assuntos transversais e complementares. Além disso, ressalta-se que alguns tipos de desastres são fortemente induzidos pelas ações antrópicas que ocorrem em nível local, o que dificulta ainda mais atribuir relações entre as mudanças climáticas e a ocorrência dos mesmos. Os próprios desastres relacionados aos fenômenos de deslizamentos de terra, foco deste trabalho, são tipicamente influenciados por ações e características que se desenvolvem ao nível local, conforme detalhado nos capítulos posteriores.

A fim de melhor compreender como são as relações entre as mudanças climáticas e cada tipo de desastre que atinge o Brasil, sumarizou-se, na Tabela 1.1, as informações relevantes extraídas do relatório especial de extremos climáticos do IPCC (2013) e do último relatório AR-5 (IPCC, 2013), incluindo informações complementares de outros estudos relevantes sobre mudanças climáticas e eventos extremos em nível global (HELD; SODEN, 2006; HAYLOCK et al., 2006; TRENBERTH; SHEA, 2006) em nível continental/regional (LIEBMANN, 2001; CARVALHO, 2002; VINCENT et al., 2005; GROISMAN et al., 2005) e outros a nível local que avaliam também impactos na ocorrência dos processos físicos relacionados aos desastres (SILVA; GUETTER, 2003; VICENTE; NUNES, 2004; MARCELINO et al., 2004; MARENGO et al., 2009b; OBREGÓN et al., 2014). As estatísticas apresentadas nas colunas 2 e 3 são provenientes do levantamento elaborado pela CEPED (2013) referentes ao período compreendido entre 1991-2012, as quais subsidiam a avaliação de prioridades para as medidas de adaptação. Para ponderar a leitura da Tabela 2, recomenda-se a leitura do Box SPM.2, intitulado de “Treatment of Uncertainty” no relatório SREX do IPCC (2012). Nele estão contidas as informações referentes à definição dos *graus*

qualitativos de confiança e de probabilidade que estão apresentados nas colunas 6, 7 e 9 da Tabela 2. Do AR5, foi utilizado particularmente o capítulo 14 (IPCC, 2012) que trata das análises regionais, incluindo a América do Sul.

Segundo Marengo (2007), as regiões brasileiras, sem exceção, foram impactadas por extremos climáticos de maior ou menor intensidade no último século. Entre vários episódios severos incluem-se as secas na Amazônia nos anos de 2005 e 2010 (MARENGO et al., 2011); o furacão Catarina no ano de 2004 (MCTAGGART-COWAN et al., 2006); as enchentes e os deslizamentos de terra em 2008 e 2009, decorrentes de chuvas torrenciais observadas no Vale do Itajaí em Santa Catarina (FRANKE et al., 2009) e em 2011 na região serrana do Estado do Rio de Janeiro (DOURADO et al., 2012); episódios de estiagem (veranicos) no oeste dos Estados do Sul (GRIMM et al., 1998; DIAZ et al., 1998); secas prolongadas e enchentes súbitas no Semiárido Nordestino (RODRIGUES; MCPHADEN, 2014). Todos estes se caracterizam como eventos extremos sem precedentes, que ocasionaram impactos negativos de grande severidade para a sociedade, com significativos prejuízos financeiros e perdas de vidas humanas.

Tabela 1.1 - Síntese de informações relevantes às relações dos tipos de desastres no Brasil, eventos extremos e mudanças climáticas.

[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]
Tipologia de Desastres Naturais	% pessoas afetadas	% óbitos	AMEAÇA Eventos climáticos deflagradores de [1]	Efeitos das MC sobre a AMEAÇA apresentada em [4]	Grau de confiança da afirmação contida em [5]	Probabilidade dos efeitos [5] para projeções futuras	Principais interferências antrópicas e vulnerabilidades que favorecem a deflagração e impactos do processo apresentado em [1]	Analisando [5], [6], [7] e [8], há relação das Mudanças Climáticas com as ocorrências de desastres [1]?
Movimentos de massa (Deslizamentos de terra)	1.79	15.6	Eventos Extremos de Precipitação (tanto aqueles que ocorrem em poucas horas como ao longo de alguns dias)	Aumento da frequência e magnitude dos eventos extremos relacionados	ALTO no que se refere aos eventos extremos. BAIXO para ocorrência de deslizamentos e inundações (poucas evidências)	MUITO PROVÁVEL	Cortes irregulares de taludes, processos erosivos na base dos taludes, desmatamento de encostas, sistemas de drenagem de águas pluviais mal planejados, sobrecarga devido a construções em áreas de risco, entre outros.	Pouco provável. Entretanto, é considerado <i> muito difícil </i> fazer esta avaliação separadamente devido aos diversos condicionantes antrópicos e também às VULNERABILIDADES pois ambos são variáveis ao longo do tempo e espaço. Há poucos registros e métricas (indicadores) para realizar tal análise com resultados conclusivos. O aumento da EXPOSIÇÃO também é considerado um fator-chave para os dois tipos de desastres
Inundações bruscas, enxurradas e alagamentos	20.66	58.15	Eventos Extremos de Precipitação em períodos curtos de tempo (principalmente em poucas horas)				Desmatamento em áreas de APP, que favorecem para a supressão de serviços ecossistêmicos (ex: diminuição do potencial de infiltração, aumento do escoamento superficial, etc) uso degradante do solo, deficiência do sistema de águas pluviais, grandes superfícies impermeabilizadas, entre outros.	
Vendavais e Ciclones (efeitos do vento)	7.07	3.74	Tempestades acompanhadas de vento forte, as vezes com granizo	Aumento da frequência e Magnitude dos eventos extremos relacionados	BAIXO (falta de dados, análise complexa)	PROVÁVEL	Não há relação direta. A interferência antrópica se dá através da emissão de GEE e mudanças do uso e cobertura do solo, os quais estão relacionados com as mudanças climáticas globais e regionais/locais.	Provável. Mesmo com as incertezas, as ocorrências sem precedentes na região Sul durante a última década são evidências significativas (intensificação do vetor AMEAÇA)
Secas	51.31	7.57	Períodos de estiagem, má distribuição das chuvas, aumento da temperatura (aumento da evapotranspiração)	Intensificação dos eventos ENSO, anomalias de TSM no Atlântico Tropical ou Subtropical (diminuição das chuvas), deslocamento dos fluxos de umidade e aumento de temperatura da superfície terrestre.	MÉDIO para estação seca e BAIXO para estação chuvosa. (falta de dados e inconsistências)	MUITO PROVÁVEL para o NE e Amazônia Ocidental, sobretudo na estação seca. OBS: <i>Muito provável</i> que a variação interanual seja controlada por eventos ENSO.	Mudanças do uso e cobertura do solo. Entretanto, a "seca" no contexto de um desastre, depende muito mais das VULNERABILIDADES dos grupos sociais afetados que das condições climáticas (Castro, 2002). O uso degradante do solo também é visto como um fator que favorece, indiretamente, no armazenamento de água no solo e pode contribuir para este cenário	Improvável. Mas as mudanças nos padrões de temperatura e precipitação, tanto para as observações quanto modelagem, tem sido coerentes com a compreensão teórica da resposta hidrológica ao aquecimento global, onde regiões secas se tornam ainda mais secas e as úmidas se tornam ainda mais úmidas, em um mundo em aquecimento. Ainda é preciso avaliar com afinco a evolução dos desastres para ter conclusões significativas.
Cheias	12.04	13.4	Aumento da precipitação nos regimes sazonais	Intensificação dos eventos ENSO e anomalias de TSM no Atlântico Tropical ou Subtropical, causando alterações no regime de precipitação sazonal (aumento)	BAIXO (falta de dados e inconsistências)	MUITO PROVÁVEL para o Sul do Brasil e Amazônia Ocidental	Obras de engenharias que podem tanto favorecer quanto conter (diques e reservatórios); interferências no meio ambiente, principalmente mudanças no uso e cobertura da terra que não aparecem claramente nos registros históricos	

Fonte: autoria própria.

As ocorrências acima mencionadas alertam para um possível aumento da frequência e magnitude dos eventos extremos como consequência das mudanças climáticas em curso. Este aumento, associado ao crescimento populacional, e a ocupação de áreas de risco para assentamentos humanos, ou para produção agrícola, resultam em uma ameaça real para milhares de pessoas anualmente (GOLDEMBERG 2000; ROBERTS 2009; FEARNSIDE, 1989 e 1997; REIS; MARGULIS 1991; HECHET et al. 1993).

De modo geral, nota-se na Tabela 1.1 que para os desastres que causaram mais óbitos no Brasil (inundações bruscas e movimentos de massa), não se pode inferir que há interferência das mudanças climáticas no aumento dos desastres. Embora existam evidências sobre uma maior ocorrência dos eventos extremos relacionados, não há dados suficientes para apontar uma correlação entre esta intensificação e a ocorrência dos desastres. Os estudos realizados em âmbito nacional (CEPED, 2013) apontam maior correlação com o aumento da densidade demográfica, provavelmente devido ao aumento da exposição da população e dos consequentes padrões de urbanização, acompanhados das desigualdades sociais e vulnerabilidades socioeconômicas.

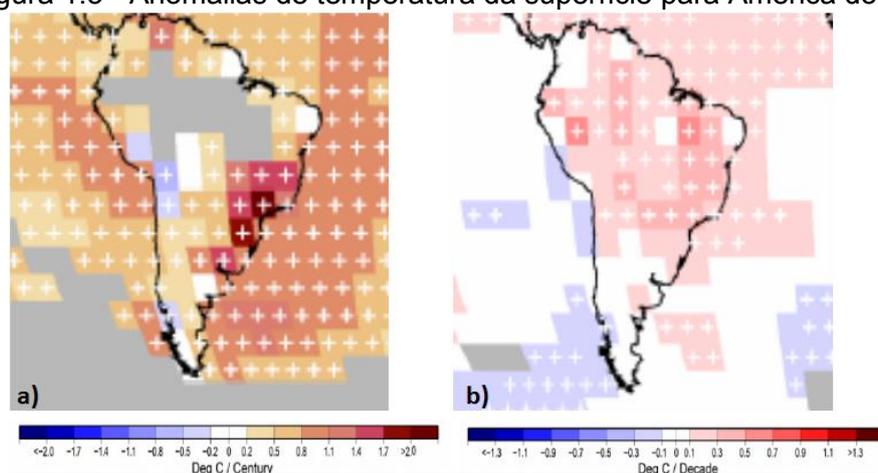
Porém, estas hipóteses se baseiam em análises que utilizam correlações simplificadas entre algumas variáveis, sempre buscando uma relação direta de causa e efeito, mas sem considerar amplamente a complexidade envolvida. Desta forma, análises entre as possíveis relações das mudanças climáticas com o aumento de ocorrência de desastres constituem em tema pouco explorado no Brasil, principalmente em razão da escassez de dados confiáveis, relacionados tanto aos eventos extremos quanto à ocorrência dos desastres.

Destaca-se que a base de dados observacionais de chuvas e, conseqüentemente, de eventos extremos de precipitação do Brasil não contempla informações para muitas localidades. Portanto, não se dispõe de séries de dados longas com boa distribuição espacial e temporal. A costa Leste do país, onde se concentra a maior parte da população, é a região para a qual se dispõe de base de dados mais ampla, enquanto no Centro-Oeste e grande parte da Amazônia os dados são mais escassos, conforme ressaltado em

Groisman et al. (2005). Além disso, o número de estudos que avaliam historicamente as mudanças climáticas e eventos extremos de clima e tempo para o Brasil é relativamente pequeno, destacando-se Liebmann (2001), Carvalho (2002), Vincent et al. (2005), Groisman et al. (2005), Haylock et al. (2006) e Marengo et al. (2009b).

No que concerne aos mecanismos de relação entre as mudanças climáticas e a possível intensificação dos eventos extremos, ressalta-se que o aquecimento médio da baixa atmosfera (popularmente chamado de “aquecimento global”) pode interferir na ocorrência dos eventos, devido à aceleração do ciclo hidrológico e da dinâmica da água na atmosfera. No período de 1960 a 2010 o Brasil teve um aquecimento médio de 0,7°C (2007a), valor este mais elevado que a melhor estimativa do aumento médio global fornecido pelo IPCC (2007a), de 0,64 °C. Esta variação da temperatura na superfície não acontece de forma homogênea, logo, há locais com incrementos maiores outros em que s’e manteve estagnada. As variações observadas no Brasil, entre 1979-2005 estão apresentadas na Figura 1.3 (IPCC, 2007a).

Figura 1.3 - Anomalias de temperatura da superfície para América do Sul



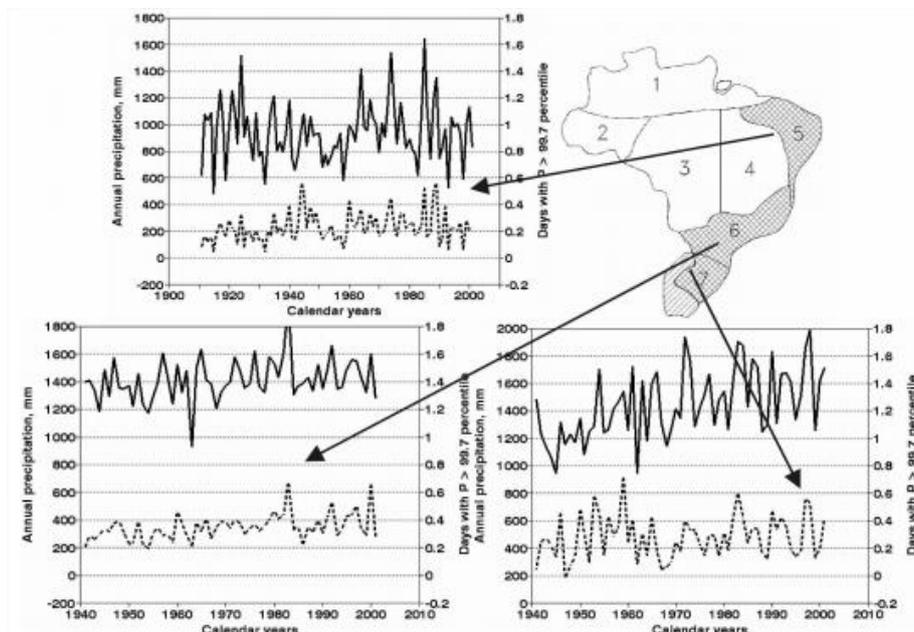
a) Anomalias de temperatura da superfície de 1901-2005 e b) Mudanças de temperatura da superfície de 1979 a 2005. Tendência linear sazonal MAM, JJA, SON e DJF da temperatura de 1979 a 2005 (°C por década). Tendências significantes no nível 5% são indicadas por “+”.

Fonte: IPCC (2007a).

Com este aumento de temperatura, uma maior quantidade de água é evaporada, aumentando os níveis de umidade na atmosfera. Além disso, pela relação de Clausius-Capeyron, um acréscimo na temperatura aumenta a pressão de saturação do vapor d'água, o que permite que mais umidade se acumule (WENTZ, 2007). Com o aumento da pressão de saturação do vapor e mantendo-se constantes os demais fatores, mais processos dinâmicos podem ocorrer e, conseqüentemente, acarretar em eventos extremos com maior frequência e intensidade (MARENGO, 2009; IPCC, 2012; WENTZ, 2007).

Devido à variabilidade do incremento da temperatura na superfície, há também mudanças nos fluxos de umidade. Em consequência, regimes sazonais de precipitação e os acumulados anuais de chuva também podem sofrer mudanças. Groisman (2005), por exemplo, encontrou evidências significativas de mudanças no regime anual de precipitação e extremos para três regiões do Brasil durante o século XX (Figura 1.4).

Figura 1.4 - Evolução de chuvas extremas para algumas partes do Brasil.



Precipitação anual (linhas sólidas) e frequência de chuvas extremas (linhas tracejadas) ao longo de três regiões do Brasil, Uruguai e Argentina e áreas adjacentes no Paraguai (regiões hachuradas).

Fonte: Groisman (2005).

A partir da série de dados utilizados, Groisman (2005) observou que a média das chuvas consideradas muito fortes representam 0,3% das chuvas anuais e são eventos com intensidades superiores a 100, 95 e 120mm respectivamente, com períodos de retorno de 3 a 4 anos. Para as três regiões, houve um aumento significativo de ocorrência de chuvas muito fortes. Para a região Nordeste, observou-se um aumento de 40% no período relativo a 1900-2001, o qual ocorreu na primeira metade do século XX. Para as outras regiões, destacou-se o aumento sistemático, principalmente a partir de 1940, com a cidade de São Paulo destacando-se por um aumento de 58%.

Vicente e Nunes (2004) observaram que o número de dias com chuvas fortes (>50 mm/h) no município de Campinas, SP, aumentou consideravelmente, passando de aproximadamente 12 dias/ano nas décadas de 60 e 70, para mais de 25 dias/ano nas décadas de 80 e 90. Padrão similar também foi encontrado para a região metropolitana de Curitiba, PR. Nessa região, os índices de precipitação alteraram a partir da década de 70, com elevação significativa no número de dias com precipitações acima de 40 mm / h (SILVA; GUETTER, 2003). No estado de Santa Catarina, observou-se aumento considerável de inundações bruscas a partir da década de 90, quando os registros ultrapassaram a média de 23 casos/ano para o período 1980-2003 (MARCELINO et al., 2004). Por outro lado, o IPCC (2012) destacou que, embora existam estudos locais baseados em observação e argumentos físicos plausíveis a respeito de como o aquecimento global (antrópico) pode interferir nas mudanças nos extremos de chuva, ainda faltam evidências concretas para identificar o quanto destas alterações é atribuído à variabilidade natural e o quanto é devido à emissão de gases de efeito estufa (GEE), principalmente a nível regional.

No caso das inundações rápidas e deslizamentos de terra, as incertezas são devidas, principalmente, às interferências antrópicas no meio ambiente como agentes condicionantes que contribuem significativamente para a ocorrência dos mesmos. Ainda segundo o IPCC (2012), há poucas evidências para avaliar

se as mudanças climáticas são responsáveis pelo aumento na frequência e magnitude dos desastres, razão da necessidade de mais estudos, em diferentes escalas, para avaliações mais conclusivas. Embora haja probabilidade (nível médio de confiança) do aquecimento global antrópico contribuir para aumento dos extremos de precipitação, ainda há escassez de dados históricos e atuais, especialmente representativos, que subsidiem estudos correlacionado extremos e aumento de desastres em escala mais ampla e precisa.

Em complemento, o IPCC (2012) destaca que há pouca confiança a respeito de alterações observadas nas tendências de secas para a América do Sul, em parte devido à falta de dados e, em outra parte devido a algumas inconsistências. No caso da Amazônia, por exemplo, embora tenham ocorrido repetidas secas intensas nas últimas décadas, nenhuma tendência em particular foi relatada. Segundo o relatório AR4 (IPCC, 2007) não é provável que a influência antrópica nas mudanças climáticas tenha contribuído para o aumento de secas a partir da segunda metade do século XX, devido à falta de dados para avaliações mais consistentes, além das incertezas existentes sobre os *feedbacks* entre a superfície-atmosfera e as interferências causadas pelas alterações dos usos e cobertura da terra (IPCC, 2012).

Por outro lado, as mudanças nos padrões de temperatura e precipitação global, tanto no que concerne às observações quanto em simulações com modelos numéricos, têm sido coerentes com a compreensão teórica da resposta hidrológica ao aquecimento global, com as regiões úmidas tornando-se mais úmidas e regiões secas ainda mais secas em um planeta aquecido (HELD e SODEN, 2006). Resumidamente, o IPCC (2012) destacou que, devido às alterações observadas nos padrões de temperatura e precipitação (não exatamente considerando-se todas as variáveis associadas à deflagração das secas) há um nível médio de confiança no que se refere às mudanças climáticas (antrópicas) incrementarem a ocorrência e magnitude das secas a nível global. Além disso, análises considerando-se regiões específicas, apontam que as incertezas são ainda maiores, caracterizando um nível baixo

de confiança. Para as inundações graduais, as incertezas e evidências apresentadas pelo IPCC (2012) são praticamente as mesmas que para as secas, adicionando-se as interferências causadas por obras de engenharias que podem tanto favorecer quanto conter as inundações graduais (diques e reservatórios) e interferências no meio ambiente (mudanças nos usos e cobertura da terra, principalmente) que não aparecem claramente nos registros históricos ao ponto de não se poder diferenciar as análises para estes casos.

Segundo Haylock et al. (2006), há consenso na comunidade científica em apontar que as alterações na ocorrência de eventos extremos de precipitação no Brasil (eventos severos, máximas e déficits hídricos) estão associadas com as variações na temperatura média da superfície do mar (TSM). Estas variações se dão principalmente do Atlântico Norte e Pacífico Equatorial, tanto pela atuação dos eventos ENSO, quanto em anos sem estes eventos, as quais não possuem claras evidências sobre suas causas. Por exemplo, as grandes secas na Amazônia em 1925-26, 1982-83 e 1997-98 estiveram fortemente relacionadas com intensos eventos ENSO, exceto a grande seca de 2005. Marengo et al. (2008) encontraram evidências de que esta seca foi associada à anomalias nas diferenças de TSM entre o Atlântico Tropical Norte e Sul, da ordem de 1,2°C, e possivelmente relacionada à oscilação interdecadal da TSM no Atlântico Norte. Porém, Trenberth e SHEA (2006), avaliando a intensa temporada de furacões que ocorreu em 2005 no Atlântico Norte, ressaltaram que pelo menos 0,5°C das anomalias recordes na TSM neste oceano se devem ao aquecimento global ocorrido durante o último século, o que indica, mesmo que indiretamente, que parte destes extremos relacionados a estas anomalias da TSM estão associadas com interferências das mudanças climáticas antrópicas.

A partir de estudos que utilizam modelagem climática, o consenso atual é de que as regiões mais chuvosas tendem a receber ainda mais chuvas em um cenário de aquecimento da atmosfera, sendo a situação contrária também verdadeira. No entanto, em razão das limitações observacionais, não é possível uma avaliação objetiva dos modelos no que se refere às mudanças

projetadas para precipitação extrema. Com base em dados observacionais, Allan e Soden (2008) ressaltaram que há de fato a tendência das chuvas extremas aumentarem em períodos mais quentes, e diminuírem em períodos mais frios. Além disso, afirmaram que a amplificação observada a partir de dados reais (observação de satélites) dos eventos extremos de chuva foi subestimada em comparação com as respostas de vários modelos climáticos, levantando a importância de estudos mais detalhados que considerem melhor resolução espacial para as regiões que requerem maior atenção.

No contexto do acima exposto, o IPCC (2012) destacou que, embora existam estudos locais baseados em observações e argumentos físicos plausíveis a respeito de como o aquecimento global (antrópico) pode interferir nas mudanças nos extremos de chuva, ainda faltam evidências concretas para identificar o quanto destas alterações é atribuído à variabilidade natural e o quanto é devido à emissão de GEE, principalmente a nível regional. Nesta escala de detalhe, ainda pode haver mudanças climáticas que sejam induzidas por outras forçantes locais, tais como as alterações nos usos e cobertura da terra, devido, principalmente, às alterações das taxas de evapotranspiração e do albedo, que podem estar relacionadas diretamente com a formação das chuvas convectivas.

1.2.3. Desastres Naturais Relacionados aos Movimentos de Massa

Dentre os eventos extremos hidrometeorológicos que impactam o Brasil, os de precipitação são os mais preocupantes. São fenômenos caracterizados pela alta velocidade com que se desenvolvem e se deslocam, muitas vezes surpreendendo as populações atingidas e causando inundações bruscas e movimentos de massa. Estes dois processos correspondem aos perigos naturais que mais causam mortes no Brasil (ver Tabela 1.1).

Seguindo a nomenclatura da Classificação Brasileira de Desastres (COBRADE), os movimentos de massa estão na categoria de desastres naturais do tipo geológico. Esses movimentos estão associados a deslocamentos rápidos de solo e rocha de uma encosta, em que o centro de gravidade deste material se desloca para fora e para baixo desta feição; e quando ocorrem de forma imperceptível ao longo do tempo são denominados de rastejo (TERZAGHI, 1952).

No âmbito do presente trabalho, neste item apresenta-se informações gerais referentes aos deslizamentos de terra, relacionando-os com os processos meteorológicos que têm relação com sua deflagração. Complementarmente, no Capítulo 3 estarão destacados os aspectos mais técnicos sobre o fenômeno.

Os movimentos de massa estão relacionados a condicionantes geológicos e geomorfológicos, aspectos climáticos e hidrológicos, vegetação e à ação do homem relativa quanto aos usos e ocupação da terra (TOMINAGA, 2007). Este tipo de desastre representa grande importância em função de sua interferência na evolução das encostas e pelas implicações socioeconômicas associadas aos seus impactos.

Existem vários fenômenos que se enquadram na categoria dos movimentos de massa, sendo classificados como processos geológicos-geotécnicos relacionados ao movimento de descida de solos, rochas, detritos e/ou material orgânico, sob o efeito da gravidade. De uma forma genérica, no Brasil é comum relacionar estes fenômenos aos chamados deslizamentos de terra, os quais têm sido responsáveis pelo maior número de vítimas fatais no Brasil (ANUÁRIO BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS, 2012). Normalmente são induzidos pelas atividades antrópicas, sendo que no Brasil sua deflagração quase sempre é relacionada com acumulados da chuva. Augusto Filho (1992) ajustou a classificação dos movimentos de massa proposta por Varnes (1978) à dinâmica ambiental brasileira, relacionando os diferentes tipos desses movimentos com suas características, material envolvido e geometria, conforme apresentados na Tabela 1.2.

Tabela 1.2 – Características dos principais tipos de movimentos de massa.

Processos	Características do movimento, material e geometria
Rastejo ou fluência	Vários planos de deslocamento (internos) Velocidade de muito baixas (cm/ano) a baixas e descendentes com a profundidade Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes Solo, depósitos, rocha alterada/fraturada Geometria indefinida
Escorregamentos	Poucos planos de deslocamento (externos) Velocidade de médias (km/h) a altas (m/s) Pequenos a grandes volumes de material Geometria e materiais variáveis Planares ou translacionais em solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza Circulares em solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas Em cunha quando em solo e rochas com dois planos de fraqueza
Quedas	Sem planos de deslocamento Movimentos do tipo queda livre ou em plano inclinado Velocidades muito altas (vários m/s) Material rochoso Pequenos a médios volumes Geometria variável: lascas, placas, blocos Rolamento de matacões Tombamento
Corridas	Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimentação) Movimento semelhante ao de líquido viscoso Desenvolvimento ao longo de drenagens Velocidades de média a altas Mobilização de solo, rocha, detritos e água Grandes volumes de material Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas

Fonte: Augusto Filho (1992).

Dentre as tipologias de maior interesse ao presente trabalho, estão aqueles denominados de escorregamentos. Estes movimentos podem apresentar diversos formatos: cunha, planares e circulares. A tipologia mais recorrente no Brasil (especificamente na região da Serra do Mar) são os escorregamentos planares (ou translacionais), que normalmente ocorrem em encostas com solos pouco espessos e jovens, geralmente encontradas em regiões de relevo escarpados e acidentados (GUIDICINI; NIEBLE, 1996; FERNANDES; AMARAL, 1984; TOMINAGA, 2007).

Os movimentos de massa estão diretamente relacionados aos aspectos geológicos e geomorfológicos, que são indicadores dos locais mais prováveis para a deflagração deste tipo de dinâmica de superfície. Fernandes e Amaral (1996) destacaram, entre diversos aspectos geológicos e geomorfológicos, as fraturas, falhas, foliação e bandamento composicional, descontinuidades no solo, morfologia da encosta e depósitos de encosta. As principais associações destes aspectos em relação aos movimentos de massa são as seguintes:

- As fraturas e as falhas representam um aspecto de destaque na medida em que afetam a dinâmica hidrológica, favorecem o intemperismo e podem também gerar uma barreira ao fluxo de água quando estes planos de fraqueza forem silicificados ou colmatados.
- As foliações e bandamento são importantes em locais onde afloram rochas metamórficas; e estas descontinuidades interceptam a superfície da encosta com uma atitude desfavorável.
- As descontinuidades do solo estão presentes nos solos residuais no horizonte saprolítico, também conhecido como horizonte residual jovem. Este horizonte tem como principal característica o fato de apresentar estrutura reliquiar herdada da rocha de origem e geralmente apresenta uma condutividade hidráulica maior atuando muitas vezes como um dreno para os horizontes mais superficiais (FERNANDES; AMARAL, 1996). Essas estruturas reliquias são planos de fraqueza que podem condicionar os movimentos de massa.
- A morfologia da encosta pode condicionar de forma direta ou indireta os movimentos de massa. Existe uma correlação direta entre a declividade e os locais de movimentos de massa. Os escorregamentos translacionais observados na Serra do Mar estão associados diretamente às encostas retilíneas com inclinações superiores a 30° (SANTOS, 2004). A atuação indireta da morfologia da encosta está relacionada ao seu formato, que determina a convergência ou a divergência dos fluxos de água subterrânea e de superfície.

- Os depósitos de tálus e de colúvio são heterogêneos e geralmente apresentam um aquífero suspenso. A instabilização destes depósitos ocorre por intervenção humana através de desmatamento ou algum corte para execução de obras civis. As instabilizações assim geradas são problemáticas devido à grande massa de material posta em movimento (SANTOS, 2004).

As causas dos movimentos de massa podem ser divididas em externas e internas. As externas são solicitações que provocam um aumento das tensões cisalhantes sem que haja um aumento da resistência ao cisalhamento do material da encosta. Estas solicitações estão relacionadas ao aumento da declividade da encosta por processos de erosão ou escavações feitas pelo homem ou ainda a deposição de material na parte superior da encosta (TERZAGHI, 1952).

Entre as causas externas dos movimentos de massa induzidos estão os cortes excessivos no pé das encostas durante a construção de rodovias e a forma de ocupação desordenada das encostas pelo homem. Neste tipo de ocupação os principais problemas estão associados aos cortes e aterros, efetuados para se criar uma região plana para a construção de estradas, ruas, moradias e empreendimentos, à drenagem das águas servidas e águas pluviais e também ao lançamento inadequado de lixo (CARVALHO et al., 2007; CASTRO et al., 2002 e 2003; FURTADO et al., 2013). Tais causas externas provocam o aumento das tensões de cisalhamento ao longo da superfície potencial de ruptura. Se estas tensões induzidas se igualarem à resistência de cisalhamento do solo, ocorrerão os movimentos de massa.

As causas internas são aquelas que deflagram os movimentos de massa sem haver alterações nas condições da superfície da encosta, ou seja, sem o aumento das tensões cisalhantes. Neste caso, ocorre a redução da resistência ao cisalhamento do solo, onde as formas mais comuns para que isso ocorra estão associadas: ao aumento da poropressão, redução da coesão (normalmente em solos com alta fração de argila) e variações nível freático (TERZAGHI, 1952). Estas causas internas, portanto, estão relacionadas

principalmente à presença da água, que pode afetar a estabilidade da encosta de diferentes maneiras.

No interior da massa do solo a água pode estar presente na zona de aeração (acima do nível freático) ou na zona de saturação (abaixo do nível freático). Na zona de aeração o solo está parcialmente saturado e a água forma meniscos entre as partículas de solo que atraem uma de encontro à outra. Esta força entre as partículas do solo é chamada de sucção e, quando atuante, caracteriza no aumento da resistência ao cisalhamento do solo. A água da chuva que se infiltra na encosta reduz estas forças de contato entre as partículas de solo e, conseqüentemente provoca a redução da resistência disponível naquele instante. A água que se infiltrou no solo e que atingiu a zona de saturação pode provocar também a elevação do nível freático. Na zona de saturação a pressão da água reduz as forças de contato entre as partículas do solo reduzindo assim a tensão efetiva e, conseqüentemente, a resistência ao cisalhamento disponível. Portanto, a infiltração da água pela superfície do solo e o aumento do nível do nível freático reduzem a resistência ao cisalhamento de forma que pode ocorrer a ruptura da encosta sem haver a necessidade de que a mesma esteja saturada (TERZAGHI, 1952; VARNES, 1978; GUIDICINI; NIEBLE, 1984)

Os movimentos de massa também podem ser deflagrados por um rebaixamento rápido do nível freático. Este tipo de movimento é comum nas encostas localizadas ao longo das margens dos rios (fenômeno comumente chamado de “terras caídas” na região Norte do Brasil). A variação do nível de água do rio interfere no nível de água subterrânea de suas margens. Nos momentos em que o nível de água do rio aumenta, o nível da água subterrânea tende a acompanhar este movimento. Quando há um rebaixamento rápido do nível do rio, o nível de água subterrânea pode não acompanhar este rebaixamento deixando uma região da encosta, acima da superfície crítica de escorregamento, saturada, o que aumenta o peso do solo, e diminui as tensões efetivas com a conseqüente redução da resistência ao cisalhamento disponível (CEPED, 2013).

Portanto, os fatores deflagradores dos movimentos de massa estão associados às causas externas, que fazem com que ocorra um aumento das tensões solicitantes, e às causas internas, que promovem uma redução da resistência ao cisalhamento disponível. A Tabela 1.3 apresenta a ação destes fatores associada aos fenômenos deflagradores do movimento de massa.

Tabela 1.3 - Principais fatores deflagradores de movimentos de massa.

Ação	Fatores	Fenômenos Geológicos/antrópicos
Aumento da Solicitação	Remoção de massa (lateral ou da base)	Eosão, escorregamentos , cortes
	Sobrecarga	Peso da água da chuva, neve, granizo etc. Acúmulo natural de material (depósitos) Peso da vegetação Construção de estruturas, aterros etc.
	Solicitações dinamicas	Terremotos, ondas, vulcões etc. Explosões, tráfego, sismos induzidos.
	Pressões Laterais	Água em trincas, congelamento, material expansivo
Redução da Resistência	Características inerantes ao material (geometria, estruturas)	Características geomecânicas do material, tensões
	Mudanças ou fatores variáveis	Intemperismo – redução da coesão e atrito Elevação do nível d'água.

Fonte: Adaptado de Varnes (1978)

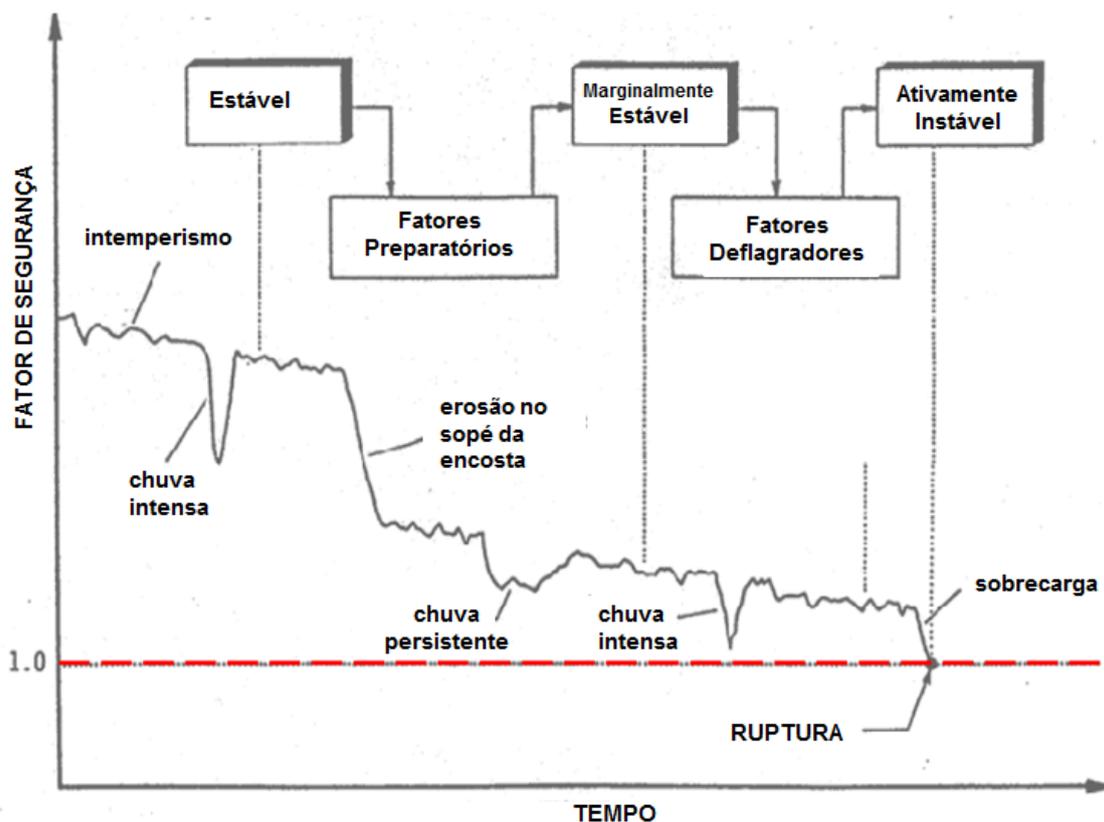
Embora as altas declividades não favoreçam tanto o processo de infiltração, encostas íngremes tendem a ser mais suscetíveis aos deslizamentos de terra. Isto porque as regiões com encostas declivosas estão, normalmente, associadas a solos mais jovens (geralmente de perfil mais arenoso) e pouco espessos, facilitando a saturação da massa de solo acima da rocha permeável (geralmente rocha sã ou alterada) e promovendo o fluxo subsuperficial. Por isso as regiões de serra são aquelas que têm maior potencial natural para a ocorrência dos deslizamentos, sobretudo aqueles que são classificados como *escorregamentos planares* ou *translacionais rasos* (GUIDICINI; NIEBLE, 1996; FERNANDES; AMARAL, 1984; TOMINAGA, 2007).

Por outro lado, precipitações que acumulam um grande volume de água em um curto período de tempo também têm um papel importante na dinâmica dos deslizamentos. Este tipo de chuva favorece o escoamento superficial, uma vez que grande parte da água precipitada não consegue se infiltrar no solo. Em regiões declivosas, a água escoar rapidamente pela superfície, carreando partículas de solo mais facilmente, favorecendo os processos erosivos. Desta forma, dependendo das condições de drenagem, por muitas vezes as bases (sopés) das encostas acabam sendo erodidas rapidamente, desestabilizando-as e favorecendo para que as camadas de solo subjacentes se desloquem e causem deslizamentos mais facilmente.

Na Figura 1.5 estão expostos todos os fatores citados anteriormente que induzem ou aceleram para que os deslizamentos ocorram, diminuindo o fator de segurança de uma encosta que, quando é igual ao valor unitário, corresponde à situação da ruptura da massa de solo

A população atingida normalmente ocupa encostas que se movimentam, por opção (condomínios de alto padrão com vista privilegiada) ou exclusão (população marginalizada, favelas, núcleos de urbanização não planejada) e podem estar acima, abaixo ou na própria encosta onde ocorre o deslizamento. Em casos muito extremos, é possível que ocorram as chamadas “corrida de detritos” e/ou “corrida de lama”, em que o volume de água é tão grande que os leitos das vertentes cedem, fazendo com que a água e solo se comportem como um fluido viscoso, com imensa força de devastação e que podem levar árvores e rochas conforme se deslocam. Um exemplo deste fenômeno ocorreu no início de 2011, atingindo a Região Serrana do Rio de Janeiro, considerado o maior desastre hidrometeorológico e geotécnico do Brasil, com 890 mortes e cerca de 35mil pessoas desabrigadas (ABMS, 2011).

Figura 1.5 - Evolução do fator de segurança de uma encosta ao longo do tempo.



As condições do solo (sobretudo a umidade), sobrecargas, alterações de propriedades geotécnicas devido à água infiltrada e intensidade do intemperismo são os fatores que afetam a estabilidade do talude, levando a sua ruptura (fator de segurança igual a 1.0).
Fonte: Adaptado de: Popescu (2002).

2. ANÁLISE DA VULNERABILIDADE DOS MUNICÍPIOS PAULISTAS AOS DESASTRES NATURAIS DE DESLIZAMENTOS DE TERRA, NO CONTEXTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

No Capítulo 1 deste trabalho foram apresentadas, brevemente, algumas evidências da relação entre as mudanças climáticas e a intensificação dos eventos extremos hidrometeorológicos. No Brasil, estes eventos estabelecem diferentes tipos de perigos para as populações e suas atividades econômicas, os quais podem impactá-los ao ponto de causar desastres naturais. Neste sentido, estudos que avaliem a vulnerabilidade dos sistemas humanos têm se tornado cada vez mais demandado, tanto para avaliar a possível intensificação dos eventos hidrometeorológicos extremos, quanto do crescimento populacional *versus* a degradação ambiental, que são fatores que contribuem diretamente na ocorrência dos desastres.

A partir da interação relacional entre os efeitos das mudanças climáticas, do meio ambiente e da sociedade, o presente Capítulo foi estruturado, com vistas a apresentar uma análise interdisciplinar da vulnerabilidade aos desastres naturais associados aos deslizamentos de terra. Portanto, focou-se na avaliação espacial e quantitativa sobre como as mudanças climáticas futuras poderão aumentar ou diminuir a vulnerabilidade deste tipo de desastre natural nos municípios do estado de São Paulo.

Conforme mencionado anteriormente, existem diversas justificativas para se avaliar a vulnerabilidade aos desastres naturais no contexto das mudanças climáticas. A avaliação da vulnerabilidade, como um todo (objeto de estudo deste Capítulo), é requisito para o desenvolvimento efetivo da capacidade de gerir situações de emergência, sendo a avaliação específica da vulnerabilidade social considerada relevante para a compreensão dos riscos relacionados aos fenômenos e eventos extremos que podem alcançar a proporção de desastres (BLAIKIE *et al.*, 1994). Nos Estados Unidos, o furacão Katrina, como outros de intensidade devastadora, evidenciou que os efeitos sociais associados às

tempestades e inundações que impactam as populações socialmente vulneráveis foram, e têm sido, lamentavelmente negligenciados e subestimados (DUNNING, 2009). Isto também foi observado na Europa, como no caso da grande inundação na Bacia do Rio Elba, em 2002, caracterizada como a maior inundação da história da Alemanha (SCHWARZE e WAGNER, 2007), ou nas ondas de calor que atingiram o continente europeu em 2003, chegando a culminar na morte de cerca de 50.000 pessoas (KOSATSKY, 2005); ou ainda no Brasil, com o desastre ocorrido na Região Serrana do Rio de Janeiro em 2011, considerado o maior desastre do Brasil neste século, com 890 registros de óbitos e cerca de 35 mil pessoas desabrigadas (ABMS, 2011).

Nestes exemplos, e em muitos outros, a vulnerabilidade social é mais aparente após a ocorrência de um evento extremo, quando diferentes padrões de impactos e de recuperação são observados entre certos grupos da população (CUTTER *et al.*, 2003). Embora todas as pessoas que vivem em áreas de risco sejam vulneráveis, os impactos sociais da exposição ao risco caem desproporcionalmente sobre as pessoas/grupos mais vulneráveis da sociedade, como sejam, os pobres, as minorias, crianças, idosos e pessoas com deficiência. Estes grupos são os menos preparados para uma situação de emergência, pois contam com menos recursos para se preparar a uma situação de perigo; tendem a viver nos locais de maior risco, em habitações precárias; bem como desconhecem ou pouco sabem sobre as conexões sociais e políticas necessárias para tirar proveito dos recursos que poderiam acelerar a sua recuperação em uma situação de desastres (DUNNING, 2009; NRC, 2006).

Há, portanto, compreensão de que a prevenção de desastres naturais e mitigação de seus impactos demandam considerar não apenas os fatores hidrometeorológicos e ambientais, mas também dos fatores econômicos, sociais e políticos que influenciam a sociedade em geral e suportam os impactos causados por eventos extremos (WHITE, 2004). Para desenvolver estratégias eficazes de combate aos desastres é essencial compreender os processos e fatores específicos que podem alterar os impactos destes eventos.

Segundo Van der Veen *et al.*, (2009), alguns fatores são identificados como significantivos para mudar as abordagens de gestão de risco e de resposta aos desastres, incluindo: a) o custo econômico e financeiro crescente dos desastres, o aumento de impactos potenciais, e a percepção de que não é possível se proteger contra todos os tipos de catástrofes naturais; b) a densidade de infraestrutura existente e o número absoluto de pessoas que vivem em áreas de risco; c) a expansão e a intensificação dos usos da terra, o aumento dos conflitos entre os usos da terra para fins socioeconômicos, e a política de mitigação de riscos; d) a necessidade de melhor compreender as inter-relações e dinâmicas sociais de percepção de risco, preparação, e seus impactos; e) disparidades de riqueza e do status socioeconômico (desigualdade social); f) a compreensão da importância dos impactos considerados intangíveis e a necessidade crescente de apoio pós-desastre e recuperação. Assim, há necessidade de determinar: quem e/ou o que são os elementos mais vulneráveis; como é possível identificar grupos sociais expostos e quais grupos se beneficiariam mais em ter suas capacidades de resistências aumentadas; e quais atributos ou características pessoais/sociais podem reduzir a vulnerabilidade e aumentar tanto a resiliência quanto a capacidade adaptativa.

Entretanto, a dificuldade e a complexidade inerentes a este tipo de análise aumentam proporcionalmente conforme o tamanho da área de estudo. Por um lado, há dificuldade em se expressar as diferentes nuances da vulnerabilidade quando se considera grandes extensões territoriais, uma vez que há aumento da heterogeneidade dos arranjos sociais, ambientais e climáticos (BOGARDI and BIRKMANN 2004; BARNETT et al. 2008). Em paralelo, tem-se a dificuldade em se dispor de dados confiáveis que sejam temporal e espacialmente bem distribuídos para representar tais dimensões da vulnerabilidade (CUTTER et al. 2009). Além disso, muitos autores apontam para a dificuldade de se encontrar dados históricos de ocorrência de desastres que possam ser utilizados como base para a análise de vulnerabilidade. Dentre os mais importantes estão a quantidade de eventos, suas naturezas/tipologias, o número de pessoas atingidas, número de óbitos e prejuízos financeiros.

No Brasil, estas lacunas são também identificadas, dificultando a avaliação da vulnerabilidade aos desastres, sobretudo quando se considera a variabilidade climática. Porém, a ocorrência de grandes desastres, principalmente nos últimos quinze anos, ressaltam a importância e a necessidade de estudos detalhados. Se de um lado ainda não há consenso sobre os efeitos das mudanças climáticas na ocorrência dos desastres, o crescimento populacional, aliado à urbanização (muitas vezes de forma não planejada) são considerados fatores relevantes neste contexto. Portanto, compreender como as mudanças climáticas podem interferir na dinâmica dos desastres é imprescindível para criar novas estratégias, tanto para a gestão dos riscos relacionados quanto para adaptação.

2.1 Objetivos

O objetivo deste Capítulo é analisar a vulnerabilidade dos municípios do estado de São Paulo aos desastres naturais de deslizamentos de terra a partir da proposição, avaliação, validação e discussão de um novo índice de vulnerabilidade (IVDDT), que seja aplicável ao tempo presente (1961-1990) e períodos futuros (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100), considerando os efeitos das mudanças climáticas. A metodologia contempla as seguintes etapas:

- estruturar o índice de vulnerabilidade a partir da estrutura conceitual proposta pelo IPCC (2007), considerando os vetores de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa;
- compor três sub-índices distintos a partir da agregação de variáveis representativas, para cada um dos vetores de vulnerabilidade;
- elaborar mapas para os sub-índices de Exposição, Sensibilidade e Capacidade Adaptativa;

- para o sub-índice de Exposição, foram considerados dados de modelagem climática para avaliar o clima presente (1961-1990) e futuro (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100);
- relacionar os sub-índices de Exposição, Sensibilidade e Capacidade Adaptativa para elaboração dos mapas de vulnerabilidade (IVDDT);
- avaliar, discutir e validar os resultados a partir da comparação com dados de registros oficiais de desastres;
- identificar *hotspots* de vulnerabilidade dentro do estado de São Paulo.

2.2. Contextualização Teórico-Metodológica

Diferentes estudos têm propostos índices quantitativos da vulnerabilidade às mudanças climáticas e de adaptação aos perigos climáticos, em várias escalas de análise temporais e espaciais. Entre eles, citam-se os de Leichenko e O'Brien (2002); Moss et al. (2002); O'Brien et al. (2004); Brenkert e Malone (2005); Brooks et al. (2005); Sullivan e Meigh (2005); Ericksen e Kelly (2007); Deressa et al. (2008); Torresan et al. (2008); Hahn et al. (2009). Dois estudos recentes desenvolvidos para o Brasil (DEBORTOLI et al. 2015; CAMARINHA et al. 2015) são detalhados no decorrer deste item, com o objetivo de trazer exemplo de tais aplicações em nosso país. De forma geral, a proposição de índices de vulnerabilidade e adaptação às mudanças climáticas (que algumas vezes consideram também variabilidade climática natural) têm os mesmos desafios que outros índices de vulnerabilidade (LEICHENKO; O'BRIEN 2002; ERICKSEN; KELLY 2007), ou seja, a ciência ainda não é tão avançada no que se refere à compreensão da vulnerabilidade aos impactos das mudanças climáticas, se comparada à avaliação específica dos perigos/riscos climáticos. Considera-se, portanto, que o desenvolvimento de indicadores de vulnerabilidade para esta natureza ainda é incipiente, embora haja considerável interesse científico e político sobre este tema.

Um dos aspectos relevantes e difíceis de abordar é como incorporar indicadores de risco aos desastres em avaliações de vulnerabilidade que consideram as alterações climáticas. Por exemplo, Brooks e Adger (2003) defendem a inclusão de riscos de desastres naturais (particularmente desastres relacionados ao clima) na avaliação da vulnerabilidade às mudanças climáticas. No estudo, os autores utilizaram dados de número de vítimas mortais e indivíduos afetados por desastres para construir indicadores de riscos climáticos globais, fornecendo informações sobre quais grupos serão mais capazes de se adaptar e lidar com os impactos de longo prazo das mudanças climáticas, característica esta que os autores definem como resiliência. Com extensão deste trabalho, Brooks et al. (2005) desenvolveram um conjunto de indicadores de nível nacional para países africanos que medem a vulnerabilidade às alterações climáticas e a capacidade de adaptação.

O'brien et al. (2004) usaram a definição de vulnerabilidade fornecida pelo IPCC, que inclui os elementos de exposição, sensibilidade e capacidade de adaptação, para mapear a vulnerabilidade da agricultura na Índia em nível sub-nacional, considerando as mudanças climáticas. Composto por três conjuntos de indicadores biofísicos, sociais e tecnológicos, os autores usaram uma combinação de técnicas de mapeamento e estudos de casos locais para identificar os distritos mais vulneráveis. Deressa et al. (2008) também examinaram a vulnerabilidade às mudanças climáticas dos agricultores locais com base na definição da vulnerabilidade do IPCC. Eles também usaram uma combinação de indicadores socioeconômicos e biofísicos, a partir dos quais desenvolveram um índice de vulnerabilidade que foi aplicado para um estudo de caso de sete regiões na Etiópia.

Outros índices, baseados empiricamente na vulnerabilidade às mudanças climáticas, também foram propostos na literatura. Por exemplo, Hahn et al. (2009) desenvolveram o *Livelihood Vulnerability Index* (LVI) a partir de vários indicadores secundários para avaliar os impactos das mudanças climáticas e a variabilidade dentre os indivíduos que residem em dois distritos em Moçambique. Para tanto, utilizaram dados primários coletados a partir de

questionários domiciliares com base nos seguintes componentes: perfil sociodemográfico, estratégias de subsistência, redes sociais, saúde, alimentação, água e variabilidade da ocorrência de desastres naturais e extremos climáticos. Este índice considerou um “peso” igual para todos os indicadores ao avaliar os fatores que determinam a sensibilidade e exposição aos impactos das mudanças climáticas.

Outra abordagem proposta para a avaliação da vulnerabilidade às mudanças climáticas foi a ferramenta *Dynamic International Vulnerability Assessment* (DIVA). Desenvolvida por Torresan et al. (2008), foi utilizada para avaliar a vulnerabilidade às mudanças climáticas e à elevação do nível do mar ao longo da costa de Veneza, na Itália. A maioria dos indicadores utilizados são biofísicos e englobam dimensões como geomorfologia, topografia e vegetação. Em razão das poucas análises de vulnerabilidade regionais que consideram as mudanças climáticas, em ambientes costeiros, os autores fizeram análises considerando escala regional, posteriormente compararam-as com a análise de escala global, a partir das mesmas variáveis.

Além dos estudos de casos considerando avaliações de escala local, também foram desenvolvidos diversos índices de vulnerabilidade às mudanças climáticas em nível nacional, a fim de comparar os resultados obtidos para diferentes países. Nesta abordagem, Moss et al. (2002) desenvolveram um modelo denominado *Vulnerability-Resilience Indicator Prototype* (VRIP) que avaliou a capacidade dos diferentes grupos para se adaptar e lidar com a mudança climática em 38 países. Foram utilizados sub-índices que refletiam a sensibilidade e a capacidade adaptativa, os quais incluíram uma combinação de fatores ambientais e sociais, tais como dados sobre produção de alimentos, água, saúde, meio ambiente e economia. Os *proxies* de vulnerabilidade foram escalados em relação aos dados globais (EM-DAT, sigla para *Emergency Events Database*) para obter a linha de base nacional que representasse a vulnerabilidade e resiliência para cada um dos países. Brenkert e Malone (2005) reaplicaram o modelo VRIP para a Índia, em uma análise mais detalhada da vulnerabilidade às mudanças climáticas.

Sullivan e Meigh (2005) desenvolveram o *Climate Vulnerability Index* (CVI), aperfeiçoado posteriormente por Sullivan e Huntingford (2009), que é composto por seis indicadores que abrangem recursos econômicos, acesso à água, capacidade das pessoas e instituições, utilização e eficiência no uso da água, características ambientais e ainda a variabilidade geoespacial. Os autores sugeriram que o índice tem aplicabilidade e comparabilidade entre diferentes escalas de análises de pequenas nações em desenvolvimento para o nível nacional. No entanto, não há nenhuma discussão teórica sobre como deve ser feita a escolha deste índice perante os demais ou dos indicadores específicos que o compõe. De um lado, tal fato permite que sejam feitas reflexões sobre a representatividade do índice quando há o intuito de incorporá-lo. De outro, permite também que índices semelhantes sejam elaborados tomando como base as mesmas premissas, mas levando em consideração os dados disponíveis para o país ou região de interesse, adaptando-os, se necessário.

Vincent (2004) elaborou um índice de vulnerabilidade social às mudanças climáticas para a África (*Social Vulnerability Index* - SVA). O autor utilizou a implementação conceitual que trata o alinhamento da vulnerabilidade social às mudanças climáticas das comunidades com a capacidade adaptativa (Adger 2006; Gallopin 2006;. Klein et al 2003). O SVA concentra-se em avaliar a vulnerabilidade social às mudanças climáticas, particularmente no que se refere à disponibilidade de água. Isso culmina em um viés inerente em direção aos eventos de secas, deixando de lado a representação de todos os outros tipos de perigos climáticos (GALL, 2007). Entretanto, este tipo de análise permite uma avaliação mais minuciosa e específica dentro da grande diversidade de impactos relacionados às mudanças climáticas. A estrutura conceitual de vulnerabilidade utilizada uniu conceitos de vulnerabilidade social, capacidade de enfrentamento e capacidade de adaptação. O SVA usa 9 indicadores para seu *proxy* de vulnerabilidade social, que varia de quantidade de população em situação de pobreza até a disponibilidade de telefones comunitários ou familiares. Embora o SVA limite sua cobertura espacial às nações africanas, o índice poderia ser expandido geograficamente, desde que todos os indicadores estejam disponíveis (GALL, 2007). Para a pontuação final

do índice, o SVA utiliza uma combinação de cálculos da média ponderada e não ponderada para sua agregação. Embora este índice tenha utilizado uma estrutura básica de agregação, tal etapa depende fortemente do conhecimento especializado sobre os indicadores utilizados e sua representatividade dentro do *framework* escolhido. Assim, o SVA é considerado como um índice, em grande parte, subjetivo, impulsionado pelas escolhas não testadas do autor (GALL, 2007). No entanto, muitos avanços referentes às estratégias de adaptação puderam ser elaborados a partir dos resultados obtidos, fato este que, dentro desta temática, quase sempre é o de maior interesse.

Adger et al. (2004) elaboraram o *Predictive Indicators of Vulnerability Index* (PIV) para avaliar a vulnerabilidade tanto para a variabilidade climática quanto aos efeitos das mudanças climáticas. O PIV utiliza a estrutura conceitual na qual o risco é uma função tanto da vulnerabilidade biofísica quanto social. O objetivo do PIV foi identificar fatores determinantes de vulnerabilidade social e também da capacidade de adaptação. Este índice utiliza como base os dados de óbitos para cada tipologia de perigo climático objetivando encontrar quais são os principais fatores de vulnerabilidade; logo, agregou os dados de mortalidade relacionadas com o clima oriundos do banco de dados EM-DAT, por década, entre 1971-2000, e em seguida padronizou a mortalidade pelo tamanho da população. Os autores sugerem o uso de um conjunto de 45 variáveis de vulnerabilidade social, as quais são reduzidas em um sub-conjunto de 11 indicadores que foram escolhidos pelas correlações mais fortes com os dados de mortalidade. Para chegar a um valor final (*score*), é calculado a média simples destes onze indicadores de vulnerabilidade social, sem impor pesos. Enquanto a estrutura de agregação do PIV é simples, a sua abordagem à normalização dos indicadores se difere significativamente da maioria dos índices, agrupando-os em quantis que recebem pontuações que variam de um a cinco (ponderação), dependendo da sua pertinência dentro da análise. Salienta-se que o PIV se baseia em índices que foram elaborados para avaliar desenvolvimento, tais como o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), ao invés de tratar puramente a vulnerabilidade social. Esta é uma estratégia que

facilita sua implementação, ou de índices correlatos, quando não se dispõe de dados sociais mais apurados para avaliar a dimensão social da vulnerabilidade.

Diante desta apresentação dos índices mais relevantes encontrados e citados na literatura, destaca-se que ainda não há um consenso sobre qual a melhor forma de medir a vulnerabilidade. Dentre diversas dificuldades expostas, existem muitos desafios relacionados à questão de dados que sejam representativos para toda a área de estudo, especialmente quando se trata de níveis nacionais ou subnacionais. Tais fatos forçam a criação e/ou adaptação de indicadores que permitam a análise para determinada região de estudo, mesmo que, por algumas vezes, a técnica empregada não seja, conceitualmente, a mais adequada. Esta estratégia parece ser a mais utilizada em estudos atuais, visto que muitos países e regiões necessitam identificar, emergencialmente, seus *hotspots* de vulnerabilidade para mitigar, minimizar e reduzir os impactos das mudanças climáticas. e amplificar a capacidade de adaptação dos grupos mais vulneráveis.

Neste contexto, Debortoli et al. (2015) realizaram estudo focando o Brasil, com vistas a prover informações para o capítulo de Desastres Naturais da *Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima*. Para tal, criaram dois índices de vulnerabilidade às mudanças climáticas, os quais tratavam especificamente a questão dos desastres naturais relacionados com deslizamentos de terra e inundações bruscas, que são as tipologias que mais causam óbitos no país. Antes de definir qual metodologia utilizar, identificaram todas as bases de dados disponíveis no país, de domínio público ou fornecidas mediante solicitação, além de identificar suas limitações quanto à forma de manuseá-las e constataram as limitações e inconsistências das bases de dados brasileiras para nível municipal. Após a escolha e aquisição das variáveis, os autores definiram que os índices se baseariam em 3 sub-índices, que representam diferentes dimensões da vulnerabilidade: i) climática, expressada pela combinação dos índices de extremos climáticos sugeridos pelo IPCC, a partir de dados fornecidos pelo INPE; ii) socioeconômica, representada pela

combinação de índices socioeconômicos fornecidos pelo IBGE (2010); iii) ambiental, baseada no cruzamento de diferentes mapas temáticos, variáveis físicas e ambientais que refletem a suscetibilidade de cada ponto geográfico em deflagrar os fenômenos relacionados aos dois tipos de desastres. Neste trabalho os autores utilizaram uma estrutura conceitual de vulnerabilidade diferente daquela sugerido pelo IPCC, mas que representam analogamente a exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa. A técnica empregada se baseou em utilizar os dados de registros de desastres no Brasil, provenientes do Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (CEPED, 2012) como referência para calcular os pesos de cada variável utilizada na composição dos sub-índices. A partir de dados de modelagem climática para o período de 1961-1990, os autores encontraram um modelo representativo da vulnerabilidade, que foi replicado utilizando dados climáticos de projeções futuras até 2100. Com isso, foi possível prever regiões que se tornariam mais vulneráveis no futuro e, então, subsidiar as estratégias futuras de gestão de risco aos desastres e de políticas públicas voltadas para aumentar a capacidade adaptativa nestas localidades.

Camarinha et. al (2015) realizaram um estudo complementar para avaliar a vulnerabilidade às secas, considerando as mudanças climáticas. Usaram uma metodologia similar à acima mencionada, utilizando também os dados do Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (CEPED, 2012), como referência para validar o método utilizado. A diferença se dá na adaptação da estrutura conceitual de vulnerabilidade, que considerou a proposta sugerida pelo IPCC. Com isso, foram desenvolvidos 3 sub-índices de Exposição, Sensibilidade e Capacidade Adaptativa. Na dimensão climática (Exposição) houve um aperfeiçoamento do método, que neste trabalho considerou os impactos das mudanças climáticas provenientes dos incrementos/anomalias das variáveis climáticas observadas no futuro, levando em consideração os resultados do clima do período de base (1961-1990). Desta forma, o valor do sub-índice climático é a soma destas anomalias (levando em consideração se as variáveis são direta ou indiretamente proporcional à intensificação das secas), objetivando encontrar

as regiões onde os efeitos das mudanças climáticas se sobrepõe ao ponto de tornar este tipo de desastres mais recorrente ou intenso.

Particularmente para o presente estudo, a metodologia utilizada baseou-se principalmente nos dois últimos estudos citados (DEBORTOLI et al. 2015 e Camarinha et al. 2015), incluindo também considerações relevantes em outros estudos, em especial a parte conceitual de Sullivan e Meigh (2005), Sullivan e Huntingford (2009) e, no que se refere à análise da vulnerabilidade social, a proposta de Vicent (2004). Nos próximos itens deste Capítulo são apresentados os detalhes metodológicos utilizados na elaboração do índice de vulnerabilidade, especificamente para o estado de São Paulo.

2.3. Área de Estudo

Neste item estão apresentadas as principais características da área de estudo que são importantes para contextualizar sua vulnerabilidade aos desastres envolvendo movimentos de massa. A área de estudo selecionada para aplicação do índice de vulnerabilidade aos desastres naturais decorrentes de deslizamentos de terra, no contexto das mudanças climáticas (IVDDT) foi o estado de São Paulo. Tal escolha se deu, primeiramente, pelo fato do presente estudo estar associado ao Projeto Temático FAPESP, do Programa “Pesquisa em Mudanças Climáticas Globais”, intitulado “*Assessment of Impacts and Vulnerability to Climate Change in Brazil and Strategies for Adaptation Option*”, e mais especificamente à sua Componente 4, “*Study of impact and vulnerability to natural disasters due to climate change in the Serra do Mar region (in presente climate and future climate change scenarios)*”. Embora o foco da tese seja a região da Serra do Mar paulista, optou-se por avaliar o IVDDT para todo o Estado, com o intuito de melhor compreender como o índice de vulnerabilidade (e as variáveis que o compõem) pode variar espacialmente e, posteriormente, subsidiar estratégias futuras de gestão de risco aos desastres e de promoção da capacidade adaptativas nos municípios mais vulneráveis.

Desta forma, neste capítulo apresentam-se informações específicas da dinâmica dos desastres que envolvem os movimentos de massa, com algumas complementaridades consideradas importantes para contextualizar as características regionais.

São Paulo é o estado com a maior população do Brasil, ultrapassando 44 milhões habitantes (IBGE, 2015a), o que corresponde a 22% da população brasileira, que estão distribuídos em 645 municípios. Possui grande importância dentro da economia do Brasil e da América Latina, pois é responsável por mais de 32% do PIB nacional, cerca de R\$ 1.7 trilhões (IBGE, 2015b), sendo que a agricultura a produção industrial são as atividades econômicas mais relevantes para o estado.

O estado de São Paulo sofreu grande processo de degradação ambiental/florestal, principalmente após 1850, com a era do café e do intenso processo de industrialização. A área coberta por florestas nativas (maioria pertencente ao bioma da Mata Atlântica) diminuiu de 85% no ano de 1500 para 13% em 2000. Cerca de 60% destes remanescentes de floresta nativa estão na Serra do Mar e no Vale do Ribeira, sendo que 50% estão em dentro de parques estaduais.

Está localizado na região subtropical e é influenciado por sistemas meteorológicos tropicais e extratropicais. A estação chuvosa no Estado, que ocorre no verão, é bem definida, enquanto o inverno é normalmente muito seco (com exceção do litoral), sendo toda sua extensão bastante sensível às anomalias climáticas. Carvalho et al. (2002) constataram que a maioria dos eventos extremos no estado de São Paulo ocorrem historicamente quando a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) se localiza, no Estado, de forma intensa. Carvalho et al. (2004) examinaram eventos extremos de precipitação em relação à oscilação Madden-Julian (OMJ). Os autores descobriram que quando a atividade convectiva ligada à OMJ se apresenta fraca sobre a Indonésia, os eventos extremos de precipitação de curta duração tendem a aumentar ao longo da ZCAS, incluindo o Centro-Oeste brasileiro, mas se enfraquecem no Sudeste.

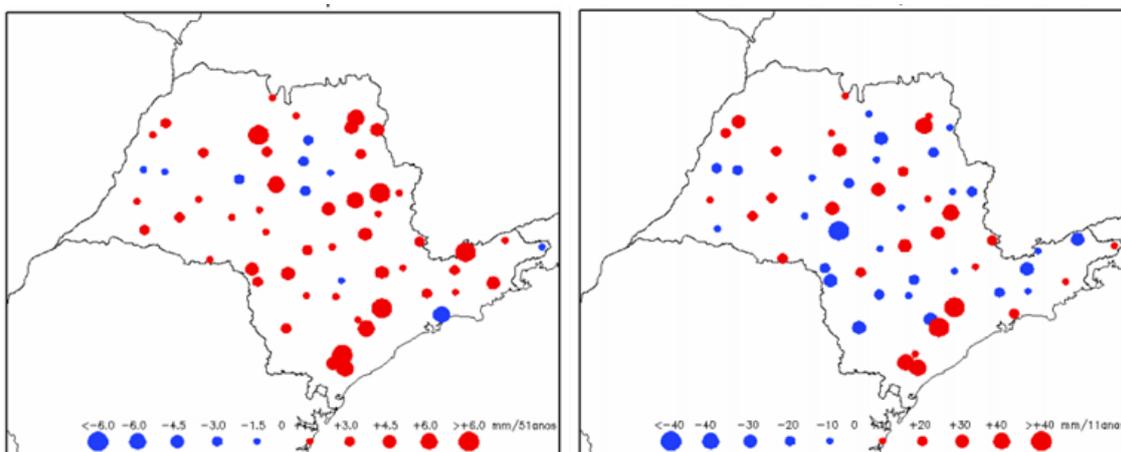
Há também estudos que associam eventos extremos de chuva nas condições de El Niño e La Niña, mas as evidências relacionadas à variabilidade interanual sobre o Estado São Paulo não estão bem definida (COELHO et al., 2002 e referências).

Sobre eventos extremos de precipitação e sua distribuição espacial na área de estudo, há poucos estudos tratando diretamente esta temática. Um dos principais trabalhos foi elaborado por Dufek e Ambrizzi (2007), que avaliaram a variabilidade da precipitação para todo estado de São Paulo. Os autores avaliaram as séries históricas de 59 estações pluviométricas entre o período de 1950-1999 e também uma sub-divisão deste período, compreendido entre 1990-1999, como forma de representar as particularidades do clima mais próximo ao presente. As variáveis analisadas foram decorrentes de dados de precipitação total (PRCPTOT), dias com precipitação muito forte (R20mm), os eventos mais intensos que o percentil 95, denominado também de dias muito úmidos (R95p) e o máximo de precipitação acumulada em 5 dias consecutivos (Rx5day), o máximo de dias consecutivos úmidos (CWD) e o máximo de dias consecutivos secos (CDD).

Dentre os principais resultados, Dufek e Ambrizzi (2007) observaram aumento sistemático da PRCPTOT durante 1950-1999. Os dias muito úmidos (R95p) e os dias com chuvas muito forte (R20mm) apresentaram uma forte relação com o incremento do PRCPTOT durante 1950-1990. Entretanto, os padrões observados para o clima mais recente (1990-1999) são diferentes, sugerindo um pequeno decréscimo da PRCPTOT. Além disso, os autores observaram um decréscimo significativo para o Rx5Day e um aumento para o CDD e R20mm, o que sugere que os eventos extremos estariam se concentrando em períodos mais curtos. Uma particularidade observada neste trabalho, não foi explorada pelos autores, é que praticamente todos os índices (com exceção dos dias consecutivos secos – CDD) apresentaram uma tendência positiva para toda a porção costeira da região da Serra do Mar paulista, o que sugere a intensificação do aporte de umidade levado até esta região, o qual estaria sendo distribuído na forma de eventos extremos de curta duração. Esta

constatação é relevante para compreender como o sub-índice de exposição foi equacionado no presente trabalho, uma vez que nele considera-se favorável a intensificação dos eventos extremos para a situação de decréscimo do índice CWD associado com incrementos positivos dos demais índices. Na Figura 2.1 apresenta os mapas de Dufek e Ambrizzi (2007) com os dados do índice R95p para todo o Estado.

Figura 2.1 - Anomalia do índice R95p para o estado de São Paulo.

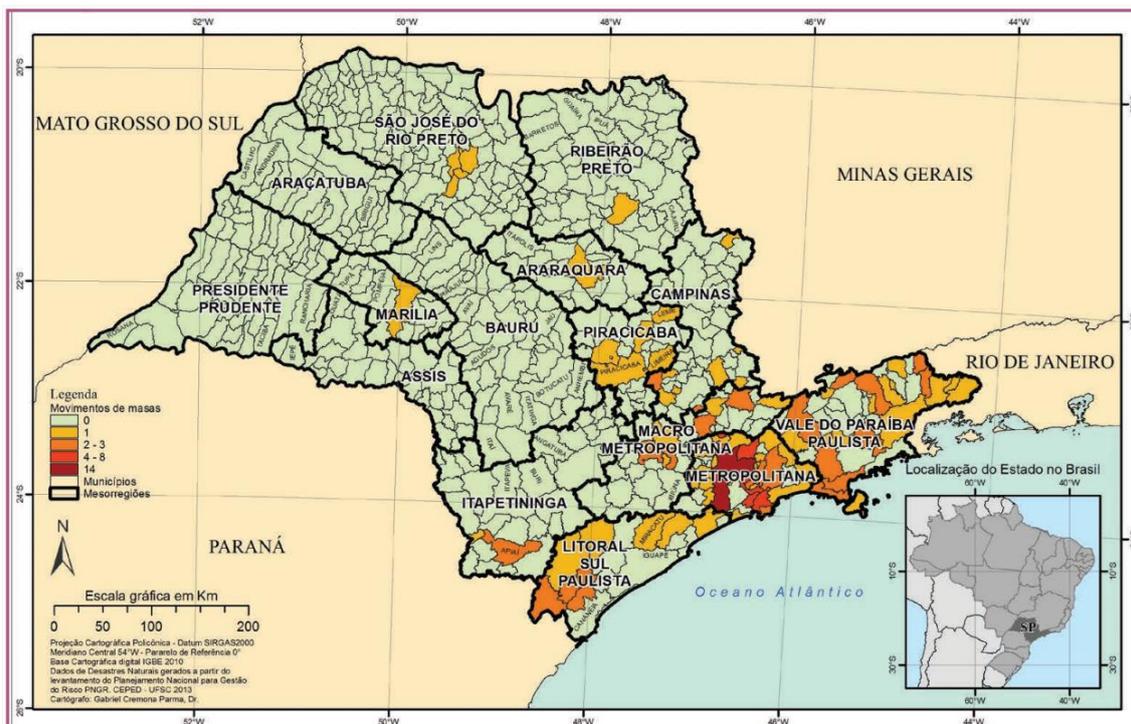


Varição dos registros de “dias muito úmidos” (R95p) para o estado de São Paulo durante 1950-1999 (esquerda) e 1990-1999 (direita).

Fonte: (DUFEK e AMBRIZZI (2008).

No estado de São Paulo, os desastres causados por movimentos de massa somam 165 registros oficiais, que estão distribuídos em 93 municípios. Na Figura 2.2 estão destacados todos os municípios atingidos por esta tipologia de desastre no período de 1991 a 2012 com as respectivas quantidades de ocorrências, segundo o Atlas de Brasileiro de Desastres Naturais, Volume São Paulo CEPED (2013).

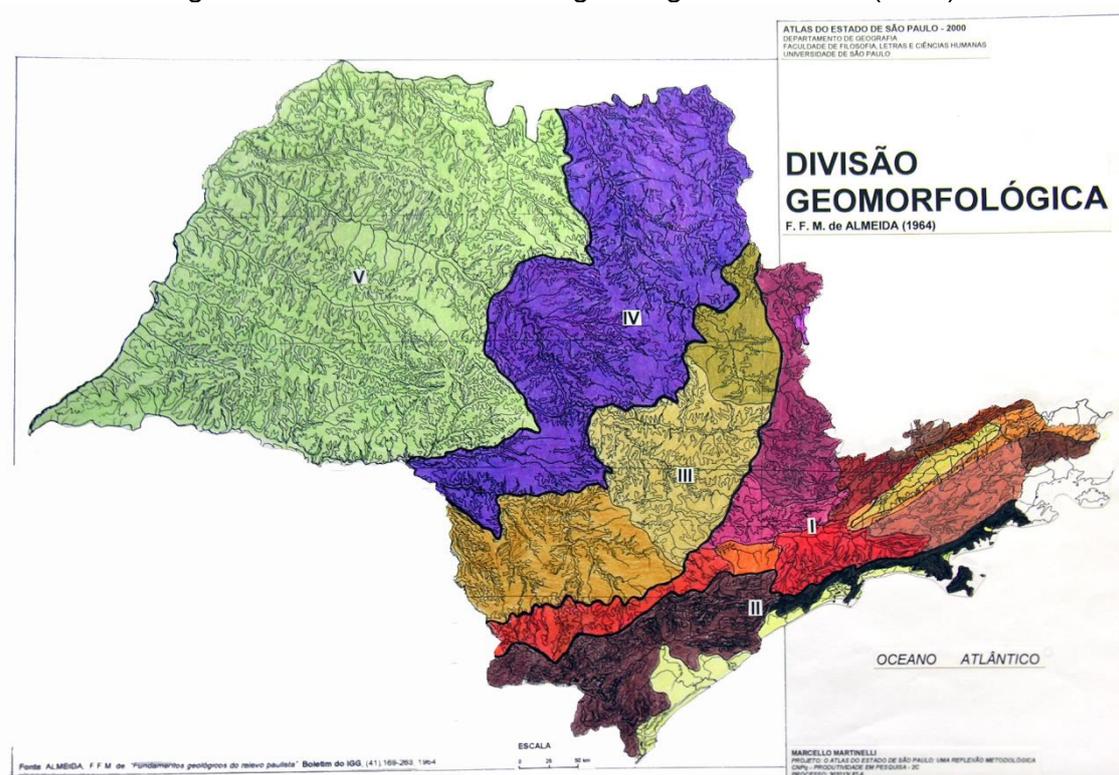
Figura 2.2- Atlas de Desastres Naturais relacionados a movimentos de massa - Volume para o estado de São Paulo.



Fonte: CEPED (2013).

Observa-se no mapa da Figura 2.2 que os desastres de movimentos de massa ocorreram preponderantemente nas regiões mais próximas do litoral, tais como o Vale do Paraíba Paulista, Litoral Sul, Metropolitana de São Paulo, sendo esta última, segundo CEPED (2013), a mais impactada pelos movimentos de massa, apresentando 79 registros. Nota-se claramente que há concentração dos eventos dentro da faixa delimitada pelo Planalto Atlântico e a Província Costeira do estado de São Paulo, representados pelos Algarismos I e II da Figura 2.3. A Serra do Mar está localizada exatamente na linha limite entre estas duas regiões, correspondendo assim à escarpa montanhosa de transição entre a borda do Planalto Atlântico e as Baixadas Litorâneas (SANTOS, 2004).

Figura 2.3- Divisão Geomorfológica segundo Almeida (1964).



Os algarismos em romano se referem a: I) Planalto Atlântico; II) Província Costeira; III) Depressão Periférica; IV) Cuestas Basálticas e V) Planalto Ocidental.

Fonte: Martinelli (2009)

As encostas da Serra do Mar são conhecidas pela sua suscetibilidade natural a movimentos de massa sendo o principal palco de ocorrências deste tipo de desastre no Brasil (WOLLE; CARVALHO, 1989). Na compartimentação geológica apresentadas pelas regiões I e II da Figura 2.3 há o predomínio das sequências vulcanossedimentares proterozoicas dobradas, metamorfizadas de baixo a alto grau, que cobrem uma área de quase 12 mil km²; dos complexos granitóides, que cobrem uma área de 14 mil km²; e dos complexos granito-gnaiss migmatíticos e granulitos que ocorrem em uma área superior a 21 mil km² (PEIXOTO, 2010).

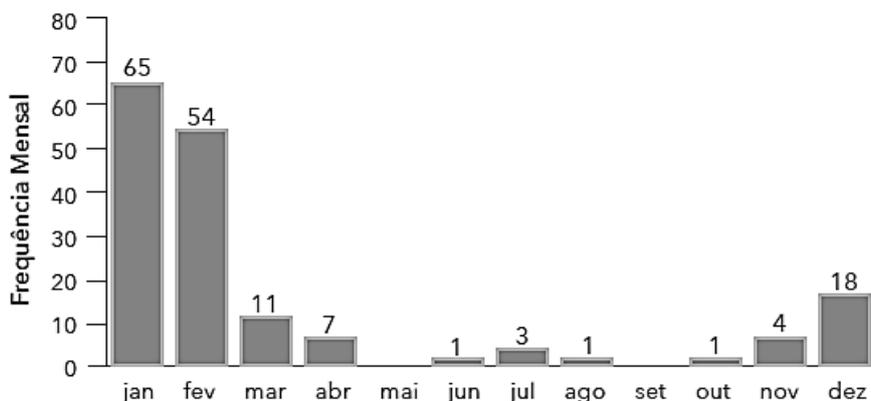
A sequência vulcanossedimentar, com rochas pertencentes aos grupos Açungui e Setuva, são formadas principalmente por xistos e rochas calcárias. O domínio dos complexos granitóides apresenta na maior porção de sua área a

presença de granito com relevo acidentado de morros baixos a montanhosos e escarpas serranas, sendo susceptível a processos de movimentos de massa, rolamentos, quedas e tombamentos de blocos de rocha. O domínio dos complexos granito-gnaiss migmatíticos e granulitos apresenta como principais rochas o migmatito, gnaisses e granulitos. Estas rochas podem originar localmente solos expansivos com forte potencial para ocorrência de movimentos naturais de massa, mesmo onde as declividades sejam pouco acentuadas (PEIXOTO, 2010).

Os movimentos de massa na Serra do Mar estão associados a um conjunto de fatores composto pela combinação da alta declividade de suas encostas, elevados índices pluviométricos e características geológicas, devendo somar-se a isto a ação do homem sobre o meio físico. Devido à elevada declividade, as encostas da Serra do Mar apresentam uma pequena espessura de solo, diferenciando-se da região do Planalto Atlântico, onde a massa de solo pode chegar a uma espessura de dezenas de metros. Neste contexto, os escorregamentos translacionais rasos são o principal tipo de movimento de massa das encostas da Serra do Mar, mobilizando o solo pouco profundo desta região, sendo este tipo de movimento o que oferece maior risco para as atividades humanas (SANTOS, 2004). Os diversos estudos focando a Serra Mar permitiram a delimitação das condições em que existe uma maior probabilidade de ocorrência de movimentos de massa. Desta forma, os escorregamentos translacionais estão associados a encostas que apresentam inclinações superiores a 30°, onde tenha ocorrido uma chuva com intensidade maior que 100 mm/dia antecedida por 3 a 4 dias de chuvas contínuas de preparação que permitam a saturação do solo (SANTOS, 2004).

A frequência mensal dos 165 desastres relacionados com movimentos de massa oficialmente registrados no estado de São Paulo dentro do período de estudo (1991-2012) está apresentada na Figura 2.4.

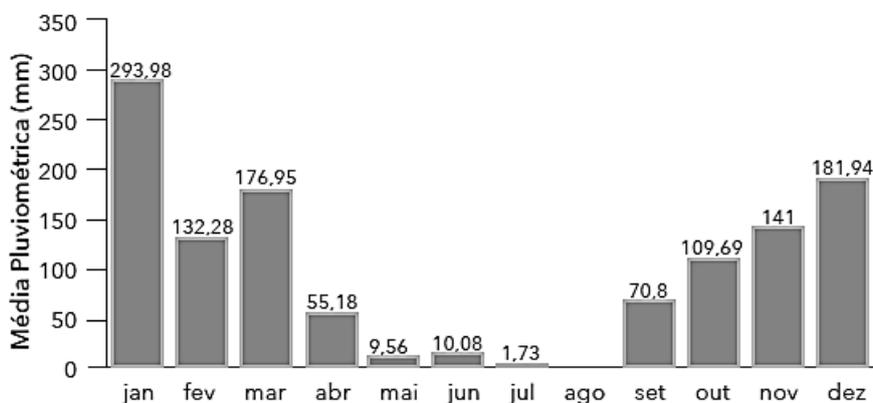
Figura 2.4- Frequência mensal de movimentos de massa no estado de São Paulo para o período de 1991 a 2010.



Fonte: Brasil (2013).

Nos meses de Janeiro e Fevereiro, que fazem parte do verão, no qual os índices pluviométricos são mais elevados, foram registradas as maiores quantidades deste tipo de desastre. Comparando-se este gráfico com a Figura 2.5, das médias pluviométricas do estado de São Paulo em 2010, observa-se uma boa correlação entre os meses mais chuvosos e os meses com maior número de registros.

Figura 2.5 – Média pluviométrica em 2010, com base nos dados das Estações Pluviométricas da Agência Nacional de Águas, no estado de São Paulo.

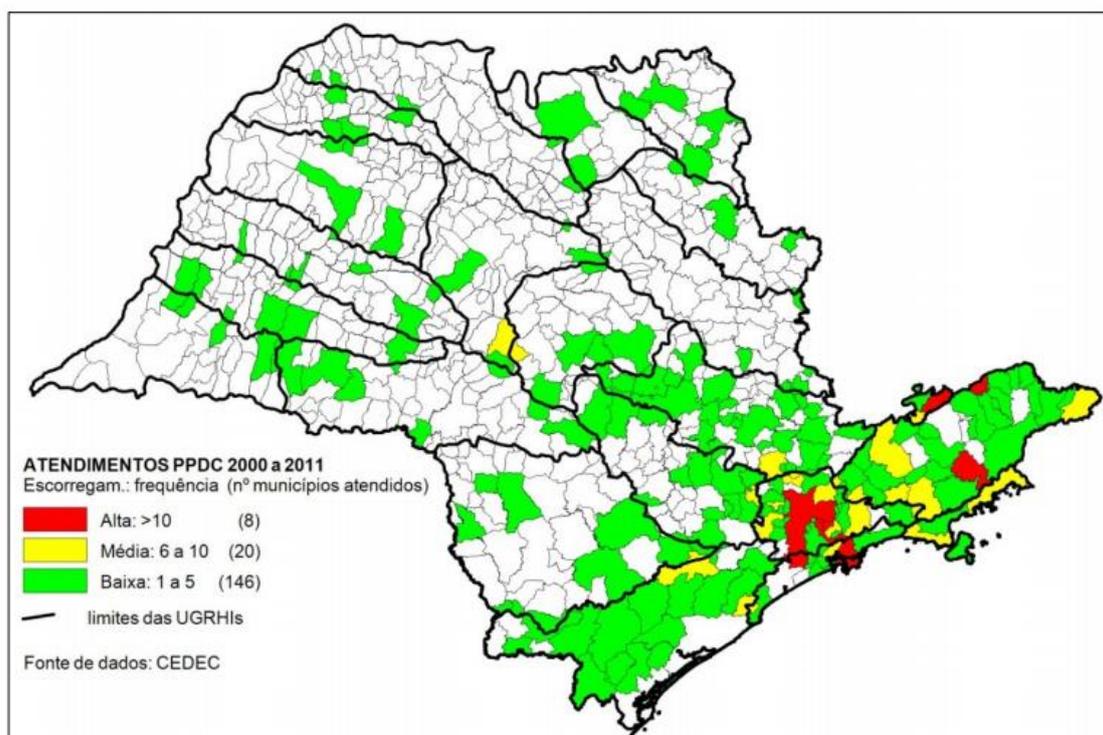


Fonte: ANA (2010), adaptado por CEPED (2012).

Segundo o levantamento do CEPED (2013), os danos humanos associados aos 165 registros oficiais de movimentos de massa indicam que 605.966 pessoas foram de alguma forma afetadas por estes desastres. O número de vítimas fatais no período levantado foi de 61 pessoas, ficando 10.572 pessoas desabrigadas e com um total de 150 pessoas feridas. Entretanto, ressalta-se que estes dados apresentados pelo CEPED (2013) se referem a uma compilação de informações coletadas pelo Ministério da Integração Nacional e pela Secretaria Nacional de Defesa Civil (SEDEC), os quais têm muitas lacunas entre a realidade e os dados oficiais. Este estudo foi pioneiro no Brasil e na própria publicação são levantados alguns aspectos sobre estas deficiências, que são ainda maiores na década de 90. Portanto, estes dados devem ser observados e utilizados com caráter indicativo, os quais conseguem captar os contrastes entre as regiões mais ou menos atingidas pelos desastres, mas que ainda não são capazes de representar com precisão os impactos reais que foram causados. Esta limitação implica também em algumas dificuldades com a avaliação proposta nesta etapa, pois o mapa apresentado na Figura 2.2 é a principal referência para avaliar a pertinência das variáveis escolhidas na análise de vulnerabilidade, bem como validar os resultados da espacialização do IVDDT para o estado de São Paulo.

Outra base de dados complementar para avaliar a ocorrência dos desastres relacionados aos deslizamentos de terra em São Paulo foi apresentada pelo Instituto Geológico (BROLLO e TOMINAGA, 2012), elaborada no contexto do Programa Estadual de Prevenção de Desastres Naturais e de Redução de Riscos Geológicos. Dentre as diferentes informações apresentadas neste boletim, consta a contabilização dos “acidentes” causados por escorregamentos de terra nos municípios paulistas entre o período de janeiro de 2000 até dezembro de 2012 (Figura 2.6). Entretanto, o conceito de “acidentes” se difere dos “desastres”, pois são considerados impactos adversos, normalmente de menor escala, mas que não caracterizam, necessariamente, a situação de desastre. Neste sentido, estas informações não puderam ser utilizadas como base para as análises feitas neste Capítulo, pois toda a estrutura do índice elaborada se remete às condições mais críticas.

Figura 2.6- Frequência de “acidentes” por escorregamentos em atendimentos emergenciais da Operação Verão no período janeiro/2000 a dezembro/2011.



Fonte: Brollo et al. (2011); CEDEC 2011 *apud* Brollo e Tominaga (2012).

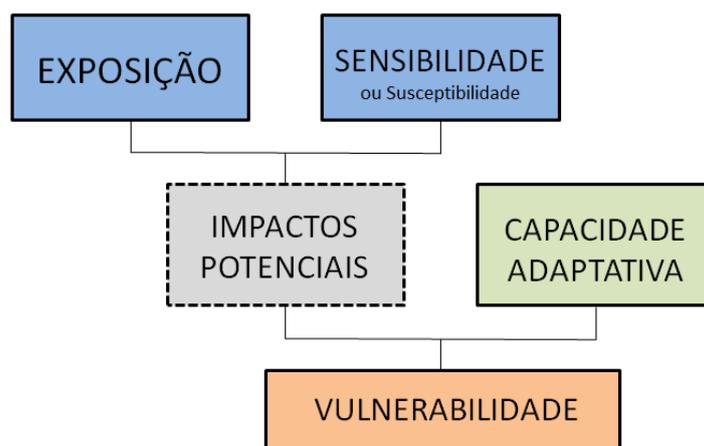
O padrão espacial das ocorrências apresentadas na Figura 2.6 se assemelha àquelas observadas no Atlas do CEPED (2013), apresentado na Figura 2.4. Porém, nota-se que novos municípios estão contemplados neste levantamento, sobretudo na porção Central do estado de São Paulo. Esta diferença reflete o fato dos “acidentes” serem impactos bem menores e com maior probabilidade de ocorrência quando comparados aos desastres propriamente ditos, além de não estarem necessariamente relacionados com as mesmas características. É possível observar que a RMSP, algumas cidades do Litoral Norte e do Vale do Paraíba são as regiões que mais se destacam em comparação com o restante do Estado. Esta é uma característica que se espera que o IVDDT consiga refletir para o caso do período de base (1961-1990) e, assim, para que o mesmo possa ser representativo nas análises de vulnerabilidade dos períodos futuros.

2.4. Materiais e Métodos

Conforme explicado ao final do item 2.2 deste Capítulo, o método utilizado para o cálculo do IVDDT se baseia nos trabalhos de Debortoli et al. (2015) e Camarinha et al. (2015), com adaptações específicas para a área de estudo e para a tipologia de desastre escolhida (deslizamentos de terra). Ambos os estudos citados foram feitos em escala nacional, com dados existentes para todo o território brasileiro, o que decorreu em várias limitações para aquisição de dados. Quando a escala espacial foi reduzida para o estado de São Paulo, foi possível utilizar variáveis adicionais mais representativas para as diferentes dimensões da vulnerabilidade, permitindo o aperfeiçoamento do índice.

Inicialmente, neste item é exposto o *framework* que compõe a vulnerabilidade, o qual se baseia na definição sugerida pelo IPCC AR-4 (2007), em que a vulnerabilidade é uma função que depende da exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa (Figura 2.7). Essa concepção é imprescindível para compreender as etapas futuras para a construção do IVDDT, que essencialmente reflete as interações desta estrutura conceitual.

Figura 2.7 - Estrutura conceitual para definição da vulnerabilidade, no contexto de mudanças climáticas.



Adaptado de: IPCC (2007).

Levando-se em consideração a estrutura apresentada na Figura 2.7, adaptaram-se as definições de cada componente do *framework* para a temática da vulnerabilidade aos desastres relacionados aos deslizamentos de terra. Desta forma, no presente trabalho foram utilizadas as seguintes definições, adaptadas do SREX do IPCC (2012):

- **Exposição:** é definida como a natureza e o grau em que um sistema está exposto às variações do clima, incluindo a variabilidade natural e as mudanças climáticas. Ela depende das tendências globais das mudanças climáticas e, devido às variações espaciais, da localização do sistema. Neste estudo, as características do clima de interesse são os eventos pluviométricos potencialmente deflagradores dos deslizamentos de terra. Para avaliar o grau e a natureza desta dimensão da vulnerabilidade, escolheram-se índices de eventos extremos sugeridos por Frich et al. (2002) e que são utilizados pelo IPCC.
- **Sensibilidade / Susceptibilidade:** representa o grau que o sistema será afetado como resposta aos processos climáticos/meteorológicos. Particularmente para este trabalho, é entendida como o conjunto de características de cada município que reflete o potencial de ocorrência de deslizamentos de terra, naturais e induzidos, considerando o contexto socioeconômico e ambiental. Para expressá-la foram utilizados dados ambientais, demográficos e socioeconômicos.
- **Capacidade Adaptativa:** representa a capacidade de resposta e de reordenamento dos sistemas humanos frente às possíveis mudanças do clima, as quais são capazes de abrandar/reduzir os impactos potenciais provenientes das mudanças climáticas. A representação desta dimensão é dada a partir de um conjunto de dados socioeconômicos censitários.

Cada uma destas dimensões da vulnerabilidade compõe um dos sub-índices do IVDDT que, por sua vez, representam diferentes características de um determinado município em ser mais ou menos vulnerável aos desastres relacionados aos deslizamentos de terra. É preciso compreender que os

vetores Exposição e Sensibilidade são aqueles que determinam os impactos potenciais provenientes das mudanças climáticas, sendo que estes impactos podem ser “amortizados” dependendo da capacidade adaptativa. Porém, diferente de muitas abordagens que analisam todos os efeitos das mudanças climáticas (incluindo outras variáveis, como temperatura e vento, por exemplo), neste capítulo focou-se analisar a vulnerabilidade apenas aos desastres naturais relacionados os deslizamentos de terra e considerando apenas alterações que se referem eventos aos extremos de precipitação.

2.4.1. O Sub-Índice de Exposição

O vetor Exposição é definido nesta tese como a natureza e a intensidade do estresse ambiental, causado pelo clima, sobre um território ou sistema humano. As características desse estresse incluem a sua magnitude, frequência, duração e a abrangência espacial. No contexto das mudanças climáticas, está diretamente relacionada com as variações do clima futuro quando comparado com o comportamento observado em um período de referência que, neste trabalho, é denominado de *baseline*, sendo este compreendido entre 1961-1990, conforme a convenção sugerida pela OMM (Organização Mundial Meteorológica). Para o presente estudo, o vetor Exposição foi representado por um sub-índice, composto pela anomalia (incremento) de quatro variáveis climáticas, conforme apresentado no Tabela 2.1. Ou seja, primeiramente fez-se necessário conhecer o comportamento de tais variáveis no clima presente (*baseline*) e calcular seu incremento nos períodos futuros e, desta forma, poder mensurar o estresse causado pelas mudanças climáticas.

Especificamente neste trabalho, o sub-índice de Exposição reflete diretamente os efeitos das mudanças climáticas relacionados aos eventos hidrometeorológicos extremos que podem deflagrar, entre outros processos, deslizamentos de terra. Ou seja, é a parte do IVDDT que avalia

especificamente o papel das mudanças climáticas, considerando o comportamento normal do clima (*baseline*) na caracterização da vulnerabilidade aos desastres relacionados.

A composição deste sub-índice depende diretamente dos dados de modelagem climática, especificamente dos dados de precipitação, tanto para o *baseline* quanto para os períodos futuros. Nesta tese, optou-se por utilizar os dados resultantes do aninhamento do modelo regional Eta com o modelo de circulação global da atmosfera HadGEM2-ES, associação esta que é mencionada neste trabalho como Eta/HadGEM2-ES. As informações básicas a respeito destes modelos estão apresentadas nos itens a seguir, juntamente com as principais referências bibliográficas que devem ser consultadas para maiores detalhes.

2.4.1.1. O Modelo HADGEM2 ES

O modelo HadGEM2-ES é composto de um modelo de circulação global da atmosfera (MCGA) na resolução horizontal N96 (aproximadamente 1.875° x 1.250° em longitude por latitude) e 38 níveis verticais, e um modelo oceânico com resolução horizontal de 1 grau (aumentando para 1/3 de grau no equador) e 40 níveis verticais (COLLINS et al. 2011). As componentes do sistema terrestre no modelo incluem: o ciclo do carbono terrestre e oceânico, e a química da troposfera. A vegetação e o ciclo do carbono terrestre são representados pelo modelo de vegetação dinâmica global, TRIFFID (Top-down Representation of Interactive Foliage Including Dynamics; COX 2001), que simula a cobertura e balanço do carbono de 5 tipos de vegetação (árvores de folhas grandes (broadleaf tree), coníferas (needleleaf tree), gramíneas C3 (C3 grass), gramíneas C4 (C4 grass) e vegetação arbustiva (shrub). A biologia e química do oceano são representadas pelo modelo Diat-HadOCC que inclui a limitação de crescimento do plâncton por macro e 16 micronutrientes. Ele

também simula a emissão de Dimetil Sulfeto (DMS) incluindo novas espécies de aerossóis (carbono orgânico e poeira).

2.4.1.2. O modelo ETA

A condição de contorno utilizada nas simulações com o Modelo Eta foi proveniente do UK Met Office Hadley Centre Global Environmental Model, version 2 (HadGEM2-ES) com as chamadas componentes de sistema terrestre (“ES” representa Earth System). O modelo regional Eta foi desenvolvido na Universidade de Belgrado (MESINGER et al. 1988) e utilizado operacionalmente no NCEP (BLACK 1994) . Atualmente, é utilizado no CPTEC (CHOU et al. 2000) na previsão de tempo. Tal modelo foi modificado para simulações climáticas (BUSTAMANTE et al. 2002) e foi utilizado anteriormente em estudos de previsão sazonal sobre a América do Sul (BUSTAMANTE et al. 2006; ALVES et al. 2004; CHOU et al. 2005), apresentando melhores resultados, isto é, mais próximos das observações do que o modelo global T062, usado como condições iniciais e de contorno. Recentemente o modelo foi adaptado para realizar integrações de escala de décadas para estudos de cenários de mudanças climáticas (PESQUERO et al. 2009).

A avaliação das simulações do modelo regional Eta foi apresentada por Chou et al. (2014), a qual envolveu uma análise detalhada das principais características observacionais do clima na escala de tempo sazonal sobre a América do Sul descritas em Satyamurty et al. (1998), Lima (1996), Cavalcanti et al. (2002), e Marengo et al. (2003). Para esta análise foram utilizados campos médios mensais, sazonais (DJF, MAM, JJA, SON) e frequências anuais climatológicos da precipitação e temperatura. Em relação aos resultados encontrados pelo modelo Eta nas projeções dos cenários, é preciso levar em consideração que pequenas mudanças nas médias de variáveis-chaves do clima podem corresponder a grandes mudanças no tempo. Mudanças substanciais na frequência e intensidade de ECEs podem resultar de uma mudança relativamente pequena na média de uma distribuição de temperaturas, precipitação ou outras variáveis climáticas (KARL 2008; KARL e

TRENBERTH 1999; GUTOWSKI et al. 2008). Recentes mudanças observadas nas precipitações têm sido maiores que aquelas previstas nos modelos. Isto se dá, muito provavelmente, porque o ar mais quente retém uma quantidade maior de umidade, alimentando a intensidade das precipitações; o que tem sido comprovado por meio de dados observacionais e modelos climáticos (GUTOWSKI et al. 2008; ALLAN; SODEN 2008; TEBALDI et al. 2006). Portanto, mesmo com limitações, os modelos atuais capturam os processos físicos associados aos aumentos observados nas precipitações severas.

2.4.1.3. Cenários RCP4.5 e RCP8.5

Os RCPs (*Representative Concentration Pathways*) são a Terceira geração de cenários de mudanças climáticas do IPCC. O primeiro grupo foi publicado em 1992 e foi composto por seis cenários, denominados IS92. O segundo grupo, chamado de SRES (Relatório Especial sobre Cenários de Emissões) em 2000. Assim como seus predecessores, os RCPs são um grupo de cenários padronizados, utilizados primariamente pelos modeladores. Levando em conta que as pesquisas desta natureza ocorrem em muitos países e os modelos corroboram na fundamentação básica da modelagem de mudança do clima, é importante que todos pesquisadores comecem seus estudos a partir de um ponto comum. Os cenários representam esse ponto consensual para as modelagens, permitindo comparações ao considerar as mesmas hipóteses.

Estes novos cenários do IPCC têm como objetivo dar o norte, diminuir os gastos com as modelagens, e comunicar os resultados de forma compreensível para um grande público de interesses distintos. Os RCPs referem-se ao número de forçantes radiativas (desequilíbrios de energia global) medidos em watts por metro quadrado por ano até 2100. A forçante (parâmetro chave dos RCPs), não é a única variável utilizada, também são inclusas taxas de emissões de GEEs, e a concentração em partes por milhão para cada um destes. Cada "*pathway*" fixa a trajetória de dois valores até o ano de 2100: (a) o quanto o planeta aqueceu, e (b) a concentração de gases de efeito estufa. Essas taxas ou trajetórias diferentes formam os "*pathways*" (IPCC, 2013).

O cenário RCP4.5, por exemplo, estabiliza o forçamento radiativo em 4,5 Wm² no ano de 2100. Simulado com o Modelo de Avaliação de Mudança Global (GCAM, sigla em inglês), o cenário RCP4.5 inclui, a longo prazo, as emissões globais de gases de efeito estufa de vida curta, e o uso da terra em um quadro econômico global. O RCP4.5 foi atualizado a partir de cenários GCAM anteriores para incorporar as emissões históricas e informações de cobertura da terra, seguindo um caminho de minimização de custo para alcançar o alvo radiativo forçado. Embora existam muitos caminhos alternativos para atingir um nível de forçamento radiativo de 4,5 Wm², a aplicação do RCP4.5 fornece uma plataforma comum para os modelos climáticos, explorando a resposta do sistema climático ao estabilizar as componentes antrópicas de forçamento radiativo (THOMSON et al. 2011). Já o cenário RCP8.5, combina suposições sobre alto crescimento populacional e de renda relativamente baixa, com taxas modestas de mudanças e melhorias de energia de intensidade tecnológica, contabilizando em longo prazo a alta demanda de energia e as emissões de GEE na ausência de políticas de mudanças climáticas. Comparando com o conjunto total de Caminhos de concentração Representante (PCRs), o RCP8.5 corresponde a via com as maiores emissões de gases de efeito estufa (RIAHN et al. 2011). Embora não seja usual definir os cenários RCP desta forma, pode-se dizer que, comparando os cenários RCP4.5 e 8.5, o primeiro pode ser compreendido como um cenário mais realista, enquanto o segundo seria mais pessimista.

2.4.1.4. Variáveis selecionadas para o sub-índice de Exposição

Para a composição deste sub-índice foi necessário escolher variáveis climáticas que, potencialmente, tivessem relação com os processos de movimentos de massa. Seguindo a proposta de Debortoli et al. (2015), as variáveis escolhidas são índices que avaliam, indiretamente, o comportamento extremo dos eventos de precipitação, baseado na distribuição estatística de

uma série de dados. Desta forma, optou-se em utilizar os índices apresentados na Tabela 2.1 como as variáveis que compõem o sub-índice de Exposição.

Tabela 2.1- Índices de extremos sugeridos pelo IPCC para avaliação dos eventos de precipitação.

ID	Descrição	Definição	Unidade
Rx1day	Quantidade máxima de precipitação em um dia	Máximo de precipitação ocorrido em 1 dia	mm/dia
Rx5day	Quantidade máxima de precipitação em cinco dias	Máximo de precipitação acumulada considerando 5 dias consecutivos	mm/5dias
CWD	No. de dias úmidos (RR> 1mm consecutivos)	Número máximo de dias consecutivos com RR≥1 mm	dias
R95p	Dias muito úmidos	Precipitação diária total em que RR> percentil 95, considerando a estatística de um período (ex: ano)	mm/dia

Fonte: Adaptado de Frich et al. (2002).

Todas as variáveis são provenientes dos dados brutos de precipitação total diária do modelo climático Eta/HadGEM2-ES 2, que representa o aninhamento do modelo regional Eta com o respectivo modelo global (CHOU et al. 2005; 2012). A versão do Eta utilizado possui downscaling (regionalização climática de 20km de resolução espacial para o Brasil,) e foi adaptado para estudos de cenários de mudanças climáticas (PESQUERO et al. 2009).

Todos os índices se referem a métricas de extremos climáticos de precipitação que podem ocorrer durante um período específico de análise (ex: mês, estação ou ano), que pode variar conforme o interesse da pesquisa. Para as análises desta tese, estes índices foram calculados considerando o calendário de cada ano (360 dias para o modelo climático, de 01 de Janeiro até 30 de Dezembro), agrupados através do cálculo da média, para cada período histórico: 1961-1990 (*baseline*) e clima futuro 2011-2040, 2041-2070, 2071-2099. O resultado calculado para cada variável, portanto, é a média encontrada para cada um destes períodos e foi calculado para cada ponto de grade do território do

estado de São Paulo (na escala de 20 km). A seguir estão apresentados cada índice de extremo detalhadamente:

- O índice RX1day indica a máxima precipitação contabilizada no período de um dia, para as precipitações que ocorreram dentro de um determinado ano. O índice Rx5day é similar ao Rx1day, porém indica o máximo de precipitação acumulada considerando um período de cinco dias consecutivos.
- O índice R95p refere-se à fração total anual de precipitação devido a eventos de chuva acima do percentil 95, ou seja, é quantidade de chuva acumulada nos dias considerados “muito úmidos”. Para regiões tropicais ele normalmente está associado a eventos extremos de chuva que podem produzir inundações bruscas, enxurradas e também deslizamentos de terra. Em análises do clima futuro, utilizam-se os dados do Baseline (1961-1990) como referência para comparações. Nestes casos, o aumento deste índice para o clima futuro significa que as mesmas chuvas consideradas extremas no período histórico acontecerão com maior frequência e/ou em maior magnitude.
- O índice CWD indica a maior sequência de dias consecutivos úmidos (chuvosos, com precipitação superior a 1mm) identificada no calendário anual. Este índice, quando apresenta valores elevados, pode ser útil para identificar áreas sujeitas a inundações graduais. Quando este índice é baixo (valores em torno de 7 dias), e coincide com elevados índices extremos (como o Rx5day), pode indicar que fenômenos extremos de precipitação se dão em uma escala curta de tempo, facilitando a deflagração de deslizamentos de terra e inundações bruscas (DEBORTOLI et al. 2015).

Conforme mencionado anteriormente, os deslizamentos de terra normalmente são deflagrados a partir de uma determinada tipologia de evento de precipitação e/ou acumulação de água no solo. No caso da região da Serra do Mar, estes eventos relacionam-se com volumes de água acumulados durante

alguns dias (acima de 100 mm), normalmente condicionados à passagem de frentes frias, frentes estacionárias, a permanência da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (Vasconcellos, 2008; Lima et al., 2010). Desta forma, considerou-se que o uso dos referidos índices climáticos representam estas características, uma vez que não se dispunha de séries de dados específicos para avaliar esta tipologia de evento para toda extensão do estado de São Paulo.

A fim de avaliar a pertinência do uso destas variáveis, previamente à implementação no cálculo do IVDDT, considerou-se uma etapa de validação, a qual é detalhada no item 2.4.5. A apresentação da espacialização dos dados é apresentada no item 2.5.1.

2.4.1.5. Cálculo do Sub-índice de Exposição para o *baseline*

Este sub-índice corresponde ao ponto de partida das análises dos impactos das mudanças climáticas. Ele foi elaborado tomando como base a estrutura conceitual de vulnerabilidade apresentada na Figura 2.7, em que os impactos potenciais são subproduto da interação entre o vetor Exposição e Sensibilidade. O intuito de se calcular o vetor Exposição especificamente para o *baseline* justifica-se por dois motivos: i) primeiramente porque as análises que envolvem os efeitos das mudanças climáticas demandam a quantificação de um valor de referência, seja para uma variável isolada ou para um índice composto, para compreender as variações no futuro e, ii) posteriormente, porque o conhecimento do comportamento climático em um período histórico permite avaliar a representatividade dos dados de simulações do clima, que por muitas vezes apresentam erros e/ou vieses que devem ser considerados nas análises conclusivas.

A composição deste sub-índice é uma adaptação da proposta de Debortoli et al. (2015), em que foram utilizadas as mesmas variáveis Rx1day, Rx5day, R95p e CWD para avaliar a dimensão climática do índice de vulnerabilidade

(mas de forma ponderada), com a estrutura conceitual apresentado em Camarinha et al. (2015), que consideraram uma relação linear entre as variáveis climáticas ao compor o sub-índice de Exposição. Desta forma, o cálculo deste sub-índice para o *baseline* foi feito a partir da Equação 2.1.

$$EXP_{BASELINE} = \frac{[(\overline{Rx1day})_N + (\overline{Rx5day})_N + (\overline{R95P})_N + (1 - \overline{CWD}_N)]}{4} \quad (2.1)$$

Onde o operador N representa a normalização das variáveis para a escala entre 0 e 1, que segue a seguinte formulação:

$$x_N = \frac{\bar{x} - \bar{x}_{min}}{\bar{x}_{máx} - \bar{x}_{min}} \quad (2.2)$$

Sendo que x_N representa qualquer uma das quatro variáveis climáticas, quando normalizadas; \bar{x} é o valor médio da variável, considerando os 30 valores anuais encontrados entre 1961-1990, em um determinado ponto, antes da normalização; \bar{x}_{min} e $\bar{x}_{máx}$ representam o menor e o maior valor dentre todos os \bar{x} encontrados dentro do universo amostral (pontos de grade dentro do estado de São Paulo), respectivamente.

Os valores resultantes variam na escala entre 0 e 1, sendo 1 a situação onde existe a maior probabilidade de ocorrência de eventos extremos de precipitação que podem deflagrar tanto deslizamentos de terra quanto outros fenômenos associados, como inundações, enxurradas e alagamentos.

Na Equação 2.1 considerou-se que quanto maior é a intensidade dos eventos de precipitação (representados pelos índices Rx1day, Rx5day e R95p), maior serão os impactos potenciais, pois, sob o ponto de vista climático, há maior probabilidade de deflagração de movimentos de massa (e outros fenômenos, como inundações). Por outro lado, quanto menor for o índice CWD (dias consecutivos de chuvas), maior será esta probabilidade. Esta hipótese foi

apresentada em Debortoli et al. (2015) ao realizarem testes de correlação entre os desastres ocorridos e as mesmas variáveis, e é explicada pelo fato de que regiões com muitos dias consecutivos de chuva (acima de 20, por exemplo) geralmente não recebem eventos de grande volume de precipitação acumulados em poucos dias (ex: 120mm/72h) quando comparados com regiões com CWD baixo.

2.4.1.6. Sub-índice de Exposição considerando o clima futuro

Na elaboração do sub-índice de Exposição para os períodos futuros, 2011-2040; 2041-2070 e 2071-2100; considerou-se o resultado obtido no *baseline* e associaram-se os efeitos das mudanças do clima na alteração do comportamento dos eventos extremos. Portanto, foi necessário calcular todas as anomalias/incrementos das variáveis utilizadas, e equacioná-las com o resultado obtido através da aplicação da Equação 2.1, usando-se as Equações 2 abaixo:

$$EXP_T = EXP_{BASELINE} + \Delta EXP_T \quad (2.3)$$

$$\Delta EXP_T = \Delta(Rx1day)_T + \Delta(Rx5day)_T + \Delta(R95p)_T - \Delta(CWD)_T \quad (2.4)$$

$$\Delta(x)_{T futuro} = \frac{(\bar{x}_{T futuro} - \bar{x}_{baseline})}{\bar{x}_{baseline}} \quad (2.5)$$

Logo, o incremento do sub-índice de Exposição (ΔEXP_T) é o somatório das anomalias/incrementos das quatro variáveis utilizadas. Em conformidade com as premissas apresentadas no item 2.3, a variável CWD a única que é inversamente proporcional ao vetor Exposição.

O valor das anomalias/incrementos, representadas por $\Delta(x)$ na Equação 2.4, reflete as diferenças na distribuição estatística da série de precipitação do clima

futuro, especificamente para os casos dos eventos extremos. Para este cálculo, comparou-se o valor futuro de cada variável ($\bar{x}_{T \text{ futuro}}$) com aquele encontrado no *baseline* ($\bar{x}_{baseline}$), de modo que o resultado obtido é um valor que representa a proporcionalidade crescente (valor positivo) ou decrescente (negativo) para cada ponto da área de estudo. Na Equação 2.5, x representa uma das 4 variáveis escolhidas (Rx1day, Rx5day, R95p ou CWD), sendo \bar{x} o valor médio encontrada para um determinado período T de 30 anos (2011-204, 2041-2070 ou 2071-2100). Δ representa o valor da anomalia/incremento da variável, tendo como referência o período de 1961-1990 (*baseline*).

Diante do exposto nas Equações 2.3, 2.4 e 2.5, tem-se que o sub-índice de Exposição (EXP_T , sendo T um dos períodos futuros) é considerado o ponto-chave para a análise de vulnerabilidade, uma vez que corresponde à conjunção dos diferentes tipos de impactos das mudanças climáticas, que podem tanto aumentar quanto diminuir a probabilidade de ocorrência de desastres relacionados aos deslizamentos de terra. Embora as variáveis que o compoñham tenham sido apresentadas de forma isolada, a integração das quatro anomalias permite identificar as regiões mais críticas a futuros processos de desestabilização de encostas através de extremos de precipitação. O cenário considerado mais severo é aquele em que há anomalia positiva dos três índices que representam a magnitude dos eventos extremos (Rx1day, Rx5day e R95p) combinado com a situação de decréscimo do CWD, pois, conforme sugerido por Dufek E Ambrizzi (2008), os eventos poderiam se acumular num período mais curto de tempo. Entretanto, é possível que outras combinações caracterizem situações de alta vulnerabilidade do ponto de vista climático, situações estas em que, por exemplo, uma das variáveis apresenta valores de anomalia muito elevados, ao ponto de caracterizar um alto sub-índice de exposição, mesmo que as outras variáveis tenham incrementos medianos ou até mesmo negativos.

É importante ressaltar que a caracterização de uma localidade com Exposição extremamente alta não significa, necessariamente, que a mesma será

impactada amplamente por desastres relacionados aos deslizamentos de terra. Além de terem outros fatores determinantes para a construção de um “desastre”, como as características de Sensibilidade e Capacidade Adaptativa, o mapa de Exposição representa a situação futura onde as regiões serão potencialmente mais ou menos atingidas por eventos extremos de precipitação, mas sempre tendo como base comparativa a situação observada no *baseline* (1961-1990).

2.4.2. Sub-Índice de Sensibilidade

A sensibilidade é definida como a intensidade com a qual um sistema pode sofrer danos, ou ser afetado por perturbações externas (no caso, climáticas), levando em consideração suas características intrínsecas. Desta forma, representa como o sistema responde às anomalias climáticas provenientes das mudanças climáticas. No presente trabalho este vetor foi representado por variáveis que possam refletir espacialmente a fragilidade ou suscetibilidade dos municípios paulistas em receber eventos hidrometeorológicos extremos potencialmente deflagradores de movimentos de massa. Foram utilizadas variáveis demográficas, ambientais e institucionais que, ao interagirem com o vetor exposição, compreendem os impactos potenciais das mudanças climáticas, no que se refere à deflagração de desastres relacionados às secas.

2.4.2.1. Variáveis selecionadas para o sub-índice de Sensibilidade

Para representar o vetor Sensibilidade, selecionaram-se variáveis disponíveis espacialmente para toda a área de estudo e que representam as características desta dimensão da vulnerabilidade. Assim, primeiramente fez-se uma ampla pesquisa na literatura com vistas a identificar quais seriam as variáveis mais pertinentes para este estudo. Em seguida, buscou-se encontrar,

nas bases de dados de domínio público, informações que pudessem ser especializadas em ambiente de sistemas de informações geográficas (SIG)tal que , permitisse a interação com as demais variáveis

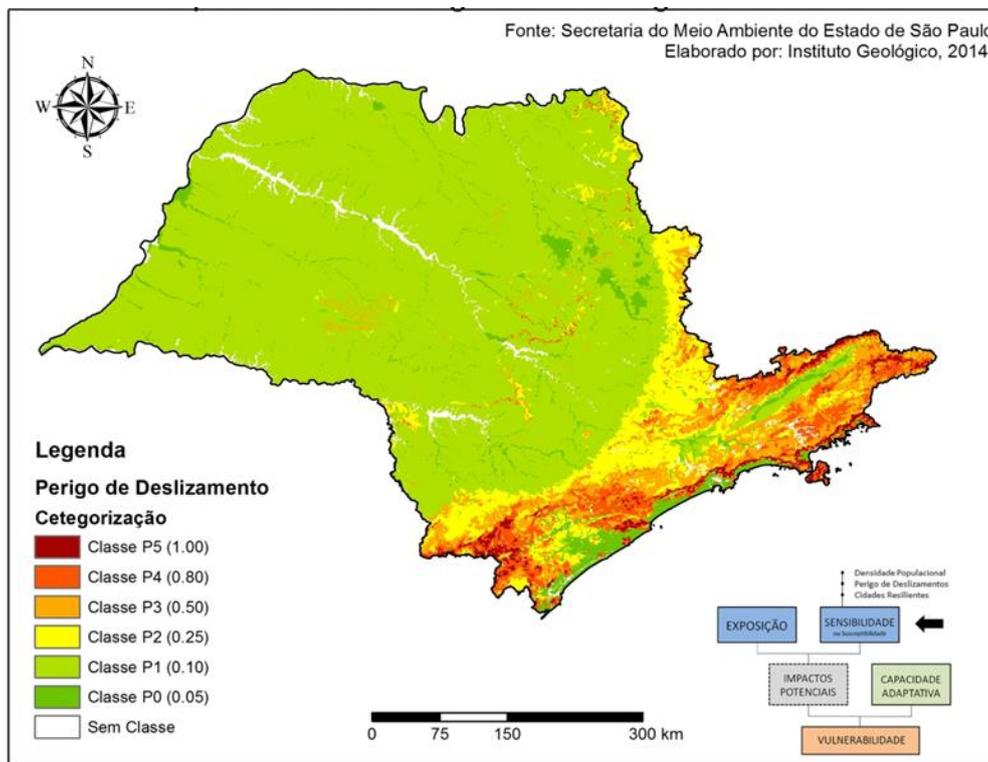
Debortoli et al. (2015) elaboraram um índice de vulnerabilidade para os desastres relacionados aos movimentos de massa no Brasil, que inclui variáveis topográficas (declividade) e geomorfológicas (unidades de relevo) para representar a dimensão ambiental da vulnerabilidade, ou seja, a suscetibilidade a estes fenômenos. No presente estudo, considerou-se outras bases de dados mais específicas para avaliar a dinâmica dos desastres relacionados aos movimentos de massa, permitindo uma análise mais acurada. Especificamente para o estado de São Paulo, considerou-se **Mapeamento de Potencial de Perigo a Escorregamentos**, desenvolvido pelo Instituto Geológico - IG (2014) e disponibilizado online pela Secretaria do Meio Ambiente do estado de São Paulo (SMA-SP).

No mapeamento mencionado, para o cálculo do índice de Perigo de Escorregamentos, o IG adotou a definição de perigo da ONU (2009), que considera perigo como fenômeno, substância, atividade humana ou condição que pode causar perda de vidas, ferimentos ou outros impactos na saúde, danos às propriedades, perda de bens e serviços, distúrbios sociais e econômicos e danos ao meio ambiente. Para exprimir o grau de perigo, os autores estabeleceram seis classes de perigo, entre P0 a P5, onde P0 representa uma probabilidade nula a quase nula de ocorrência do processo e P5 a probabilidade máxima de ocorrência do processo perigoso (classe Muito Alta). As demais classes representam situações intermediárias entre estes extremos: P4 (Alta), P3 (Média), P2 (Baixa) e P1 (Muito Baixa). Destaca-se que neste índice a sua estrutura é robusta do ponto de vista técnico, pois se baseia em cinco variáveis explicativas para os escorregamentos de terra: declividade; amplitude altimétrica; densidade de drenagem; excedente hídrico e intensidade de foliação. Desta forma, o produto elaborado pelo IG (2014) é relevante tanto para à gestão de risco aos desastres quanto para as análises de

vulnerabilidade aos impactos futuros, sendo, portanto, uma variável muito importante para a composição do sub-índice de Sensibilidade.

O *shapefile* disponibilizado na plataforma online da SMA-SP foi manuseado em ambiente SIG e a espacialização do Índice de Perigo de Escorregamento de Terra está apresentada na Figura 2.8.

Figura 2.8 - Índice de Perigo de Escorregamento de Terra do estado de São Paulo



Fonte: Adaptado de IG (2014).

Para que esta variável pudesse se relacionar com as demais, as classes P0, P1, P2, P3, P4 e P5 foram ponderadas em uma escala que varia de 0 (menor sensibilidade) até 1 (maior sensibilidade). Desta forma, na legenda da Figura 2.8 estão apresentados os valores ponderados de cada classe, com P5 representando a maior sensibilidade (valor 1,0) e P0 a situação oposta (0,05). Nota-se que as regiões com maior perigo aos escorregamentos são majoritariamente as porções que se desenvolvem ao longo da Serra do Mar e,

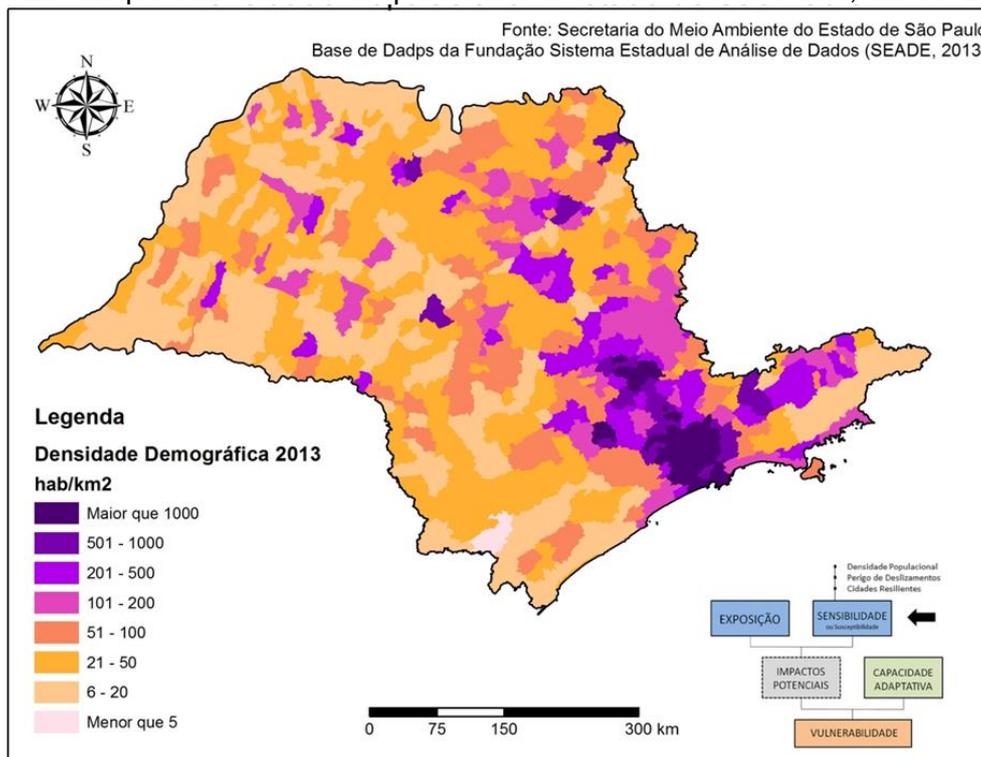
posteriormente, na Serra da Mantiqueira (no Vale do Paraíba, na divisa com Minas Gerais). Esta variável é importante no escopo da análise da sensibilidade, pois representa integralmente a suscetibilidade aos escorregamentos de terra em toda a área de estudo.

A segunda variável escolhida foi a **Densidade Populacional** dos municípios paulistas. Embora essa variável não tenha relações diretas com a suscetibilidade aos fenômenos físicos de movimentos de massa, ela representa o tamanho do impacto que uma determinada região pode sofrer ao haver a deflagração de tal fenômeno. Neste aspecto, as regiões com alta densidade populacional têm maior probabilidade de dispor de vetores de urbanização em áreas de risco, tais como em planícies de inundações e encostas íngremes, sendo este último caso o de mais relevância para a presente análise. Com isso, a deflagração de processos de movimentos de massa em regiões densamente urbanizadas tem um potencial de impacto maior que aquelas com baixa densidade populacional e/ou conservadas. Exemplos de contrastes deste tipo podem ser observados quando se compara a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) com o extremo Sudoeste paulista. Embora a RMSP se encontre em áreas de perigo medianamente alto (ver Figura 2.8), é a porção do Estado em que mais se teve registro de desastres deste tipo no período de 1991-2012 (ver Figura 2.2). Por outro lado, em grande parte da sub-região do Sudoeste Paulista encontra-se a mais alta classe de perigo (P5 – ver Figura 2.8) e os registros de desastres são bem inferiores aos da RMSP (ver Figura 2.2), sendo que em alguns municípios chega a ser nulo. A espacialização desta variável é mostrada na Figura 2.9

O mapa da Figura 2.9 ilustra a maior concentração populacional existente próximo à capital São Paulo. O eixo que vai da Região Metropolitana de Campinas, passa pela RMSP e chega na Baixada Santista é caracterizado pelas maiores densidades populacionais, com mais de 30 municípios com valores acima de 1.000 hab/km². Diadema e Taboão da Serra são as duas cidades com os maiores índices, ultrapassando 12.000 hab/km². Dentre as regiões que se encontram sob o domínio de serras e relevos acidentados,

destacam-se também as cidades do Litoral Norte e do Vale do Paraíba, ao longo da Serra da Mantiqueira.

Figura 2.9- Mapa de Densidade Populacional do estado de São Paulo, ano de 2013.



Fonte: Adaptado de SEADE (2013).

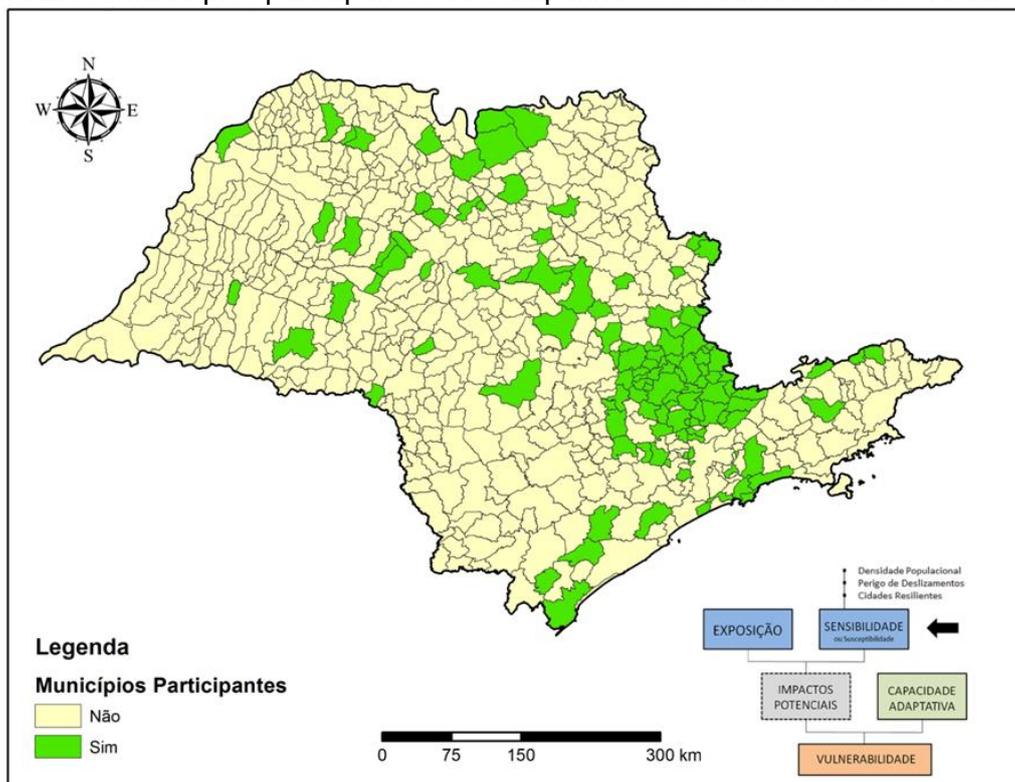
Para que esta variável pudesse se relacionar com as demais consideradas, ponderou-se os dados com pesos que variam entre 0 e 1, utilizando o mesmo fatiamento apresentado na Figura 2.9. Os pesos atribuídos, em ordem crescente, foram 0,05 – 0,10 – 0,15 – 0,30 – 0,60 – 0,75 – 0,90 e 1,0. Não se optou por normalizar os dados linearmente, em razão da discrepância entre o máximo e mínimo valores desta variável, o que decorreria de um viés extremamente alto para os municípios acima de 1.000 hab/km² e praticamente insignificância para os demais.

A terceira variável utilizada representa o aspecto institucional dos municípios, no que se refere ao conjunto de ações que ajudam a minimizar os impactos causados pelas mudanças climáticas e perigos climáticos. Neste escopo, destaca-se a campanha “**Construindo Cidades Resilientes**” que faz parte da Estratégia Internacional para a Redução de Desastres (EIRD), da Organização das Nações Unidas (ONU), é iniciativa adotada em vários municípios brasileiros. O objetivo da campanha é promover uma maior capacidade de preparação, adaptação, antecipação, aprendizagem e auto-organização em função de choques externos, sensibilizando governos e cidadãos para os benefícios de se reduzir os riscos, por meio da implementação de dez providências essenciais a serem implementadas por prefeitos e gestores públicos locais. Cinco delas tem como origem as prioridades estabelecidas em 2005 pelo Marco de Ação de Hyogo (Japão), quando 168 países se comprometeram a adotar medidas para reduzir o risco de desastres até 2015. Estas providências envolvem a participação social, a orientação para redução de risco, foco nas famílias de baixa renda expostas em áreas de risco, estudos municipais específicos de vulnerabilidade, investimentos em infraestrutura, fiscalização e controle sobre novas construções e uso do solo, programas educativos, proteção de ecossistemas e zonas naturais, instalação de sistemas de alertas e capacitação de gestores e sociedade civil, esforços de reconstrução, entre outros. Mais detalhes encontram no site da campanha (www.integracao.gov.br/cidadesresilientes).

Teoricamente, uma cidade resiliente é menos vulnerável e está melhor preparada para lidar com as mudanças (incluindo climática), com a complexidade dos riscos existentes, com crises e perturbações múltiplas, evitando disrupções e colapsos como consequência de um desastre natural. Portanto, quando um município adere a esta campanha ele assume o compromisso de investir em iniciativas que aumentam a eficiência das ações de Defesa Civil de várias formas, aumentando significativamente a capacidade de se recuperar de forma eficiente de um desastre (ou um evento extremo que poderia causar esta situação) de maneira organizada, visando prevenir que

vidas e bens sejam perdidos. Na Figura 2.10 estão apresentados os municípios que em 2013 participavam desta campanha.

Figura 2.10 -Municípios participantes da Campanha “Construindo Cidades Resilientes”



Fonte: Adaptado dos dados fornecidos pela SMA-SP (2013).

Nota-se que os municípios que mais aderiram a esta campanha estão próximos a Campinas e na divisa com Minas Gerais, e se caracterizam por serem impactados por inundações e enxurradas. Entretanto, outros municípios que são alvos de diferentes perigos climáticos também aderiram à campanha, tais como os da Baixada Santista.

Para compor o sub-índice de Sensibilidade, transformou-se esta listagem de municípios em uma variável binária, considerando que os municípios que aderiram à campanha tem uma menor Sensibilidade (peso 1.00), enquanto os demais estão na situação oposta (peso zero - 0.00).

2.4.2.2. Estrutura do Sub-Índice de Sensibilidade

O Sub-índice de Sensibilidade foi estruturado de forma simples, tal que seu valor é apresentado pela média linear das três variáveis que o compõem, conforme apresentado na Equação 2.4:

$$SENS = \frac{(Perigo_{ponderado} + DPop_{ponderada} + CR)}{3} \quad (2.4)$$

em que $Perigo_{ponderado}$ é a variável do Mapeamento de Potencial de Perigo a Escorregamentos em sua forma ponderada entre 0 e 1, $DPop_{ponderada}$ é a variável densidade populacional ponderada e CR se refere à variável binária da aderência dos municípios à campanha Construindo Cidades Resilientes.

Há na literatura diversos indicadores que representam vulnerabilidade, alguns associados a diferentes pesos para as variáveis representativas. Debortoli et al. (2015) obtiveram valores ótimos dos pesos para calibrar um modelo de vulnerabilidade para movimentos de massa; entretanto, elaboraram um estudo para todo o Brasil, cujo base de dados possibilitou, estatisticamente, obter correlações mais altas do que se considerasse o caso particular do estado de São Paulo. Por outro lado, dependendo do objetivo específico do estudo de interesse, alguns autores sugerem que médias lineares podem ser boas para construir os índices de vulnerabilidade, tais como os apresentado em Camarinha et. al (2015). Neste último estudo, o objetivo se assemelhava aos propostos no presente trabalho, isto é, determinar os principais contrastes de vulnerabilidade na área de estudo.

Para assegurar a representatividade deste sub-índice, incluiu-se etapa de validação juntamente com as variáveis climáticas, objetivando encontrar as correlações entre a interação destas duas dimensões e o mapa de registro de desastres relacionados aos movimentos de massa apresentado na Figura 2.2. Esta etapa é detalhada no item 2.4.5, enquanto os resultados são apresentados no item 2.5.4.

2.4.3. O Sub-Índice de Capacidade Adaptativa

Para a construção deste sub-índice adotou-se a metodologia proposta por Camarinha et al. (2015), que utilizaram uma estrutura conceitual considerando a dimensão socioeconômica da vulnerabilidade. Entretanto, para que as terminologias pudessem se adequar às necessidades do presente estudo, o sub-índice denominado “vulnerabilidade socioeconômica” definido em Debortoli et al. (2015) deve ser entendido como uma forma de representar a falta da capacidade adaptativa (ou incapacidade adaptativa). Portanto, durante este item, o termo “vulnerabilidade socioeconômica” deve ser lido como o inverso da capacidade adaptativa.

Para a sua elaboração, adotou-se a base de dados disponibilizada pelo Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil 2013, uma plataforma de consulta ao Índice de Desenvolvimento Humano Municipal – IDHm - dos 5.565 municípios brasileiros, além de mais de 180 indicadores de população, educação, habitação, saúde, trabalho, renda e vulnerabilidade, esta elaborada a partir de dados extraídos dos Censos Demográficos de 1991, 2000 e 2010.

Dentre os 180 indicadores, selecionaram-se aqueles que apresentaram relação direta com a vulnerabilidade socioeconômica relacionada aos desastres naturais. O primeiro indicador utilizado é o próprio IDHm, que trata do Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) adaptado para o nível municipal e que sintetiza vários indicadores de subáreas (educação, longevidade, saúde, renda, etc.) de interesse para a análise. Estas variáveis apresentam, de alguma forma, uma relação direta com grupos sociais que são amplamente os mais atingidos pelos desastres associados com inundações e movimentos de massa no Brasil.

Seis indicadores foram selecionados: PPOB – Porcentagem de Pessoas na classe de Pobreza; PVULPOB – Porcentagem de pessoas vulneráveis a entrar na classe de pobreza; PEXTPOB – Porcentagem de Pessoas Extremamente Pobres; PSAGUAESG – Porcentagem de Pessoas sem acesso a Serviços de água e esgoto; PPAREDE – Porcentagem de Pessoas que vivem em

domicílios com paredes impróprias; e PSENERG – Porcentagem de pessoas sem acesso a energia elétrica.

Embora em alguns desastres as classes sociais mais favorecidas também podem ser impactadas, como no caso da Região Serrana no Rio de Janeiro em 2011, a grande maioria está relacionada com a população de baixa de renda e marginalizada, que será o foco da análise que se segue. Além disso, o perfil dos desastres relacionados com deslizamentos de terra ocorridos no estado de São Paulo geralmente está ligado com a ocupação irregular em encostas, que em grande parte corresponde ao crescimento urbano não planejado que acompanha as mazelas sociais enraizadas na sociedade brasileira.

Além destas seis variáveis e do IDHm, inseriu-se também o índice GINI como parte integrante da vulnerabilidade socioeconômica. Este índice mede o grau de desigualdade social existente na distribuição de indivíduos segundo a renda domiciliar per capita. Seu valor varia de 0, quando não há desigualdade, a 1, quando a desigualdade é máxima. A importância deste índice está justificada em Van der Veen et al. (2009) que ressaltam a desigualdade social como um dos fatores propulsores da marginalização de certos grupos sociais, que podem facilmente vir a habitar locais inadequados onde o risco a inundações e movimentos de massa se faz presente, devido aos processos de segregação social. Segundo Valencio (2008), a desigualdade torna-se mais perceptível nas localidades que vivem os grupos mais vulneráveis, mas esta percepção, dentro das atuais políticas implementadas, não resolve a problemática e ainda pode acentuar a desigualdade conforme os desastres acontecem.

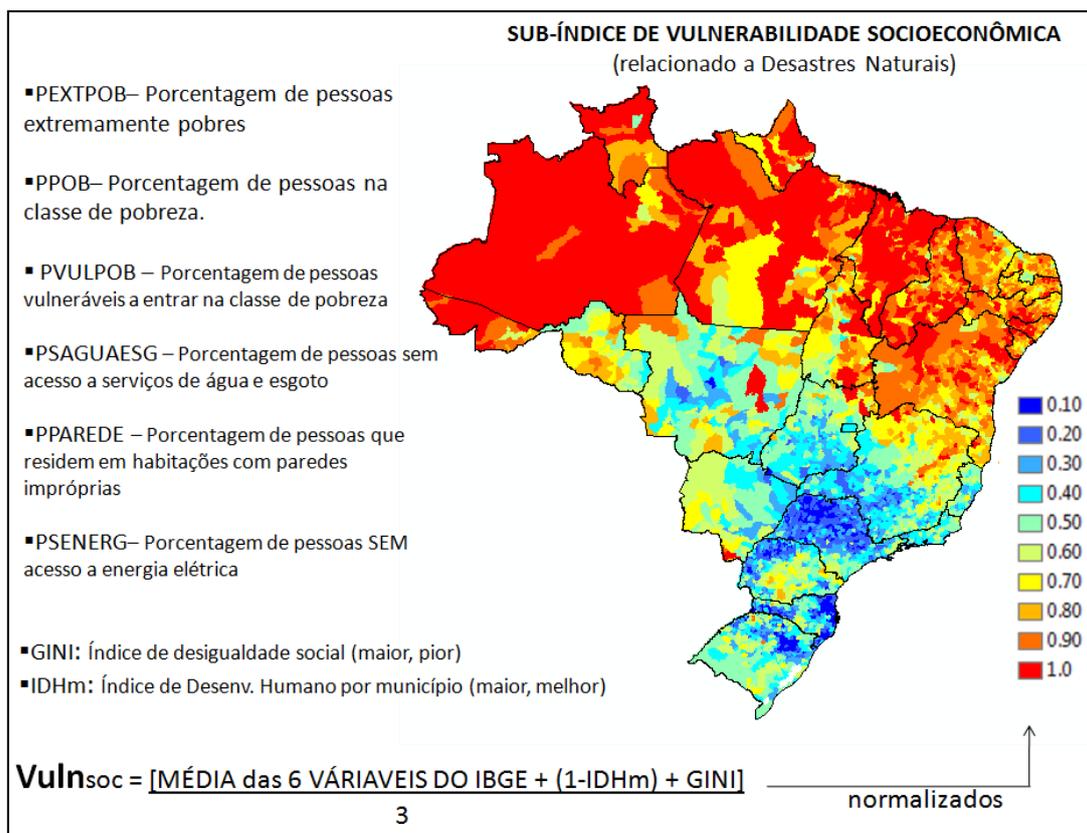
Após a definição dos indicadores, fez-se necessário manuseá-los antes de elaborar e espacializar o sub-índice de vulnerabilidade socioeconômica. Nesta etapa, os dados disponibilizados pelo site do Atlas do Desenvolvimento Humano do Brasil (PNUD, 2013) foram digitalizados. Em seguida, calculou-se o sub-índice vulnerabilidade socioeconômica e, na sequência, o mesmo foi normalizado em uma escala variando de 0,00 até 1,00, para posterior associação com os demais sub-índices .

Na

Figura 2.11, extraída de Debortoli et al. (2015), o sub-índice foi aplicado para todo o Brasil. As seis variáveis apresentadas refletem características da vulnerabilidade socioeconômica da população que, ao ser impactada por ameaças naturais de alta severidade, poderão entrar em colapso e ter grandes dificuldades para retomar à situação precedente.

Em suma, o sub-índice vulnerabilidade socioeconômica de Debortoli et al. (2015) reflete a fragilidade das diversas regiões brasileiras no que tange às suas capacidades de lidar com os desastres naturais. Este sub-índice tem o objetivo de nortear e sinalizar em quais regiões há maior fragilidade social demandando fomento e implementação de políticas públicas eficazes de adaptação em escala regional e local aos desastres naturais.

Figura 2.11 - Sub-índice de vulnerabilidade socioeconômica para o Brasil.



Fonte: Debortoli et al. (2015).

Nota-se que na escala apresentada na

Figura 2.11, quanto maior o valor do sub-índice, maior será a vulnerabilidade socioeconômica e, portanto, menor será a capacidade adaptativa. Portanto, para que este mesmo sub-índice pudesse ser aplicado no contexto do presente trabalho fez-se necessário inverter a escala utilizada, conforme explicitado no próximo item.

2.4.3.1. Estrutura do Sub-índice de Capacidade Adaptativa

Com a metodologia proposta, o sub-índice de Capacidade Adaptativa tem um fator de abrandamento no escopo do índice total de IVDDT e, de acordo com o *framework* proposto na Figura 2.7, considera-se que quanto maior for a capacidade adaptativa, menor será a vulnerabilidade. Isso significa que os municípios com os piores índices (valores inferiores) têm poucas condições de antecipar, minimizar ou evitar os impactos potenciais decorrentes dos perigos hidrometeorológicos, tornando-se mais vulneráveis quando comparado com outros que apresentam indicadores socioeconômicos melhores. Desta forma, o sub-índice de vulnerabilidade socioeconômica apresentado por Camarinha et al. (2015) é inversamente proporcional a estas premissas e, portanto, o mesmo foi adaptado, conforme proposto na Equação 2.5.

$$CA = (1 - VULN_{soc}) \quad (2.5)$$

Devido ao fato do sub-índice capacidade adaptativa ter sido retrabalhado para se adequar à Equação 4, sua espacialização no estado de São Paulo é apresentada na discussão dos resultados deste capítulo.

2.4.4. Estrutura do Índice de Vulnerabilidade

O IVDDT foi estruturado levando-se em consideração o *framework* sugerido pelo IPCC (2007), apresentado na Figura 2.7, em que a vulnerabilidade resulta da interação direta entre os vetores de Exposição (*EXP*) e Sensibilidade (*SENS*), caracterizando os impactos potenciais que podem ser abrandados dependendo da Capacidade Adaptativa (*CA*) dos sistemas humanos. Assim, o IVDDT incorpora todos os sub-índices apresentados anteriormente (itens 2.4.1, 2.4.2 e 2.4.3), representados na relação explicitada pela Equação 2.9.

$$IVDDT = \left[\frac{(EXP_{BASELINE} + \Delta EXP_T) + SENS}{2} \right] \times \left[0,5 + \frac{(1 - CA)}{2} \right] \quad (2.6)$$

Na primeira parte da equação 2.6, $(EXP_{BASELINE} + \Delta EXP_T)$ representa o valor do sub-índice de Exposição para um período T futuro. Soma-se a ele o fator de Sensibilidade que, juntos, caracterizam os impactos potenciais das mudanças climáticas, especificamente no que se refere à deflagração de deslizamentos de terra, uma vez que o sub-índice de Sensibilidade foi estruturado utilizando variáveis diretamente relacionada à suscetibilidade destes fenômenos. Embora, teoricamente, esta relação nem sempre seja linear, o intuito deste arranjo é encontrar regiões onde alta sensibilidade e altas exposições coexistam, pois estas localidades serão diretamente mais vulneráveis aos impactos causados por deslizamentos de terra.

A segunda parte representa a parcela destes impactos potenciais que pode ser abrandada, a partir da capacidade de adaptação dos municípios e suas respectivas populações. Desta forma, quanto maior for a capacidade adaptativa (*CA*), maior será o abrandamento destes impactos potenciais. A Equação 2.6 foi ajustada para que este abrandamento fosse, no máximo, de 50%. Este é um valor subjetivo que foi estipulado tendo em vista que a adaptação permite, principalmente, que os sistemas humanos se reorganizem ao ponto de

conseguirem diminuir os impactos potenciais modificando as características que são explicitadas pelo vetor de Sensibilidade, o qual é responsável por uma parte dos impactos potenciais. Por definição, não seria possível a Capacidade Adaptativa também promover uma reorganização dos sistemas humanos ao ponto de minimizar também as alterações causadas no clima, especificamente a intensificação dos eventos extremos. Esta seria uma parcela que poderia ser abrandada pelas ações de mitigação das mudanças climáticas, as quais não se encaixam no *framework* proposto e que se desenvolvem em uma escala de tempo muito longa para ser representada.

A estrutura do IVDDT segue a proposta apresentada em Debortoli et al. (2015) e Camarinha (2015), que sugeriram que índices como este devem ser utilizados como ferramentas que podem indicar os municípios mais críticos e os diferentes contrastes regionais, mas que demandam análise pontual de cada sub-índice em específico para que se possa entender as diferentes nuances da vulnerabilidade. Quando analisado de forma fechada, o valor do IVDDT pode ser o mesmo para municípios que combinam exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa de formas diferentes e, portanto, necessitam de estratégias de adaptação distintas. Neste aspecto, recomenda-se que se analise paralelamente cada uma dos sub-índices que o compõem, a fim de encontrar *hotspots* de vulnerabilidade que sejam suficientes para nortear políticas públicas e estratégias de adaptação.

Na Equação 2.9, nota-se que apenas o sub-índice exposição é variável no tempo, enquanto os demais sub-índices e as variáveis que o compõem são fixos. Isto significa que na análise da vulnerabilidade para os períodos futuros, tanto o vetor sensibilidade quanto o de capacidade adaptativa são os mesmos calculados para o *baseline*. Embora esta não seja a premissa ideal, uma vez que todas as variáveis utilizadas no cálculo do IVDDT podem sofrer alterações com o passar do tempo, trata-se de uma proposta que permite entender como o clima pode ser determinante na construção da vulnerabilidade, caso não haja qualquer alteração nos sistemas ambientais, socioeconômicos e institucionais. Ou seja, a análise de vulnerabilidade que considera o clima como o único fator

variável no tempo permite que sejam feitas reflexões a respeito de quais as melhores estratégias de adaptação e de gestão de risco para minimizar a parcela dos impactos que é proveniente exclusivamente das mudanças climáticas. É possível que, em alguns municípios, a vulnerabilidade seja ainda maior no futuro, mas há também a possibilidade de que o cenário climático seja menos propício aos desastres. Constatações desta natureza permitem direcionar recursos e estratégias diferenciadas conforme a necessidade observada em cada caso, pois o IVDDT foi estruturado de forma fragmentada, permitindo que seus sub-índices sejam explorados como forma de encontrar onde e como ações devem ser implementadas para que a vulnerabilidade seja diminuída e, com isso, vidas e prejuízos econômicos sejam poupados de forma planejada.

2.4.5. Análise de Pertinência das Variáveis Escolhidas

Nos itens anteriores foram apresentadas as variáveis escolhidas para a construção do IVDDT, considerando como base as adequações metodológicas apresentadas na literatura e o fator limitante concernente à inexistência de dados necessários para compor tais variáveis. Como alternativa, selecionou-se os quatro índices de eventos extremos para compor o sub-índice de exposição (Rx1day, Rx5day, R95p e CWD), os quais foram disponibilizados pelo CPTEC/INPE. Estes dados foram disponibilizados juntamente com outras variáveis climáticas geradas a partir de simulação do clima para períodos entre 1961-1900 e 2011-2100 (ver CHOU et al. 2014).

Ressalta-se que os dados selecionados não garantem, necessariamente, que os sub-índices gerados e, conseqüentemente o IVDDT, sejam representativos da vulnerabilidade como um todo, embora sejam robustos o suficiente do ponto de vista técnico-científico para justificar o uso das variáveis apresentadas anteriormente. Portanto, incluiu-se etapa de validação, objetivando verificar se o cruzamento destas variáveis resultaria em um mapa que pudesse representar

os impactos potenciais dos deslizamentos de terra sob os municípios do estado de São Paulo. Esta validação consistiu em elaborar um mapa de vulnerabilidade aos desastres associados a deslizamentos de terra para o período compreendido entre 1961-1990, e posterior comparação com o Atlas de Desastres Naturais relacionados a movimentos de massa (apresentado na Figura 2.2). Assim, ao cruzar as informações climáticas, demográficas, ambientais, institucionais e socioeconômicas, esperou-se que pudessem ser encontrados os municípios mais impactados com os desastres relacionados a deslizamentos de terra. Uma vez validado para o tempo presente, justifica-se a aplicação destas mesmas variáveis para a avaliação da vulnerabilidade para os períodos futuros.

Embora a Equação 2.6 represente uma relação empírica para composição do IVDDT, o intuito desta etapa foi de checar se os contrastes de vulnerabilidade observados dentro do estado de São Paulo correspondem aos registros de desastres apresentados pelo Atlas do CEPED (2013). Embora, saiba-se que este Atlas contém limitações em representar a totalidade dos desastres ocorridos no período avaliado, trata-se de base de dados útil para subsidiar a avaliação se os padrões espaciais encontrados estão de acordo com o esperado, ou para reavaliar as variáveis utilizadas, sugerindo a exclusão de algumas delas e a inclusão de outras e/ou para definir uma melhor forma de relacioná-las (por exemplo, não linearmente), atribuindo-se diferentes pesos conforme a pertinência da análise.

2.4.6. Agregação dos Resultados por Município

Os dados utilizados para compor o IVDDT são de diferentes naturezas e fontes, bem como têm diferentes escalas espaciais. Os dados climáticos, por exemplo, têm resolução espacial de 20km, enquanto os dados de perigo de escorregamentos têm resolução mais alta, aproximadamente 90m. Estas diferentes escalas não inviabilizam o cruzamento de tais informações, embora caracterizem padrão espacialmente heterogêneo que nem sempre atende ao

tipo de análise em questão. Assim, optou-se por agregar os resultados finais de cada sub-índice e também do IVDDT para cada município paulista, embora todos eles tenham sido feitos originalmente respeitando sua escala original.

Esta etapa foi elaborada adotando-se os seguintes passos:

- i. Transformou-se todos as variáveis utilizadas para o formato Raster e seus manuseios foram feitos em ambiente SIG, mais especificamente a partir do software ArcGIS 10.1;
- ii. O cruzamento das variáveis para composição de cada sub-índice e também do IVDDT foi feito através da ferramenta Raster Calculator do ArcGIS 10.1, considerando as equações apresentadas;
- iii. A partir dos sub-índices e do IVDDT em formato Raster, criou-se um novo arquivo de mesmo formato (.tif) fragmentando-se cada ponto de grade à resolução de 100m; respeitando as mesmas informações do resultado original. Por exemplo, se um dado estava na escala de 1 km, o mesmo ponto de grade foi transformado em 100 novos pontos (malha de 10 pontos x 10 pontos) com a dimensão 100 m x 100 m cada, considerando-se o mesmo valor numérico do dado original;
- iv. O novo arquivo Raster, na resolução de 100 m x 100 m, foi convertido em um shapefile de pontos. Cada ponto deste shapefile representa o centroide de um ponto de grade da malha de 100 m x 100 m e guardam o mesmo valor numérico do dado original;
- v. Utilizou-se a ferramenta Spatial Join para agregar as informações do shapefile dos pontos (com os valores das variáveis) ao shapefile da divisão política dos municípios do estado de São Paulo, composto por 645 polígonos que representam cada um dos 645 municípios paulistas. A ferramenta Spatial Join contabiliza todos os pontos que estão dentro de cada polígono (município) e permite calcular diferentes métricas

estatísticas. No caso, optou-se por calcular o valor médio (Mean) da variável, que representa, portanto, o valor agregado dos sub-índices ou do IVDDT para cada município.

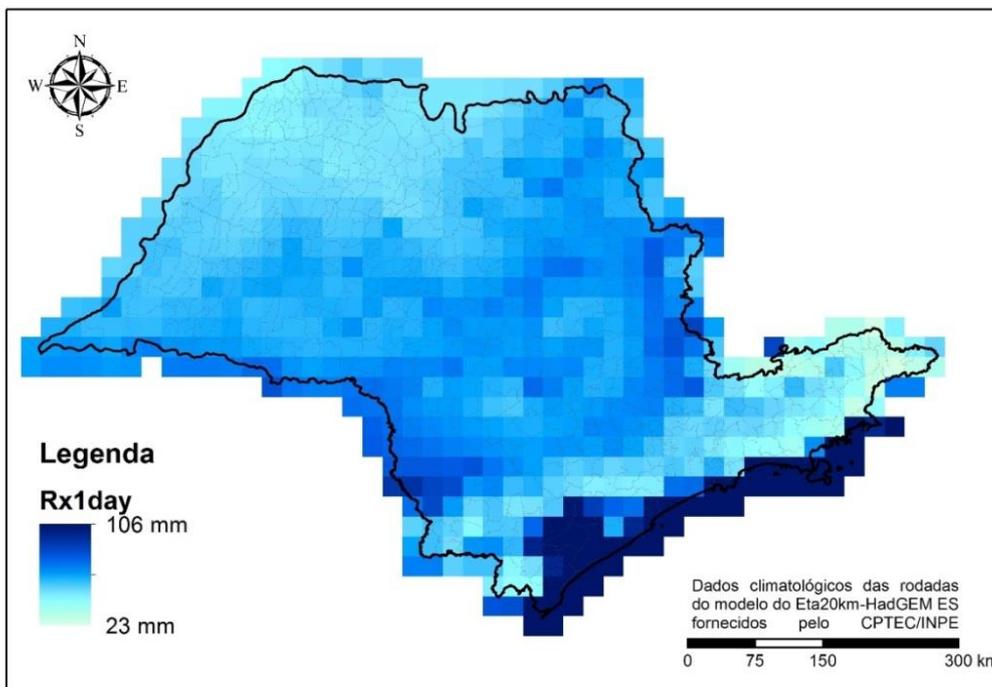
Ressalta-se que esta agregação pode caracterizar em algumas limitações quando existem discrepâncias muito grandes entre os tamanhos dos municípios analisados. Quanto maior a área de um município, maior será a quantidade de pontos utilizados para calcular a média resultante, o que pode mascarar resultados relevantes para a análise de vulnerabilidade. Para os municípios de maior interesse deste trabalho, localizados na região da Serra do Mar, a técnica pode ser empregada com sucesso, mas necessita de cautela ao se avaliar os resultados para outras regiões que detenham tais características previamente citadas.

2.5. Resultados e Discussões

2.5.1. O Sub-Índice de Exposição para o *Baseline*

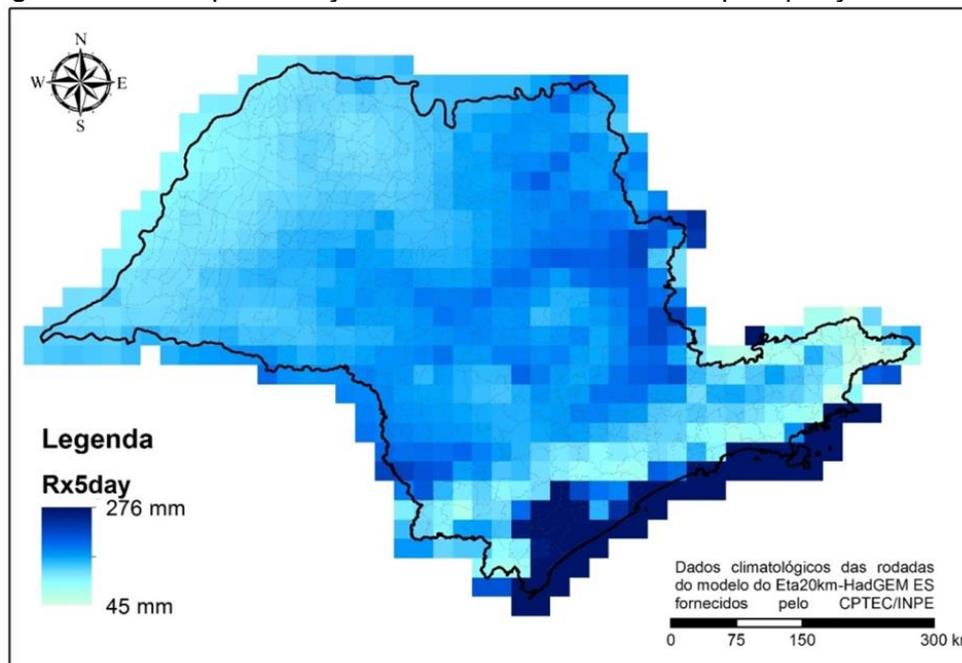
Inicialmente, são apresentados, de forma separada, os resultados da espacialização dos quatro índices de eventos extremos utilizados para compor o sub-índice de Exposição. Os resultados com os valores reais das variáveis (sem normalização) estão apresentados nas Figura 2.12, Figura 2.13, Figura 2.14 e Figura 2.15.

Figura 2.12 – Espacialização do índice de extremos de precipitação Rx1day.



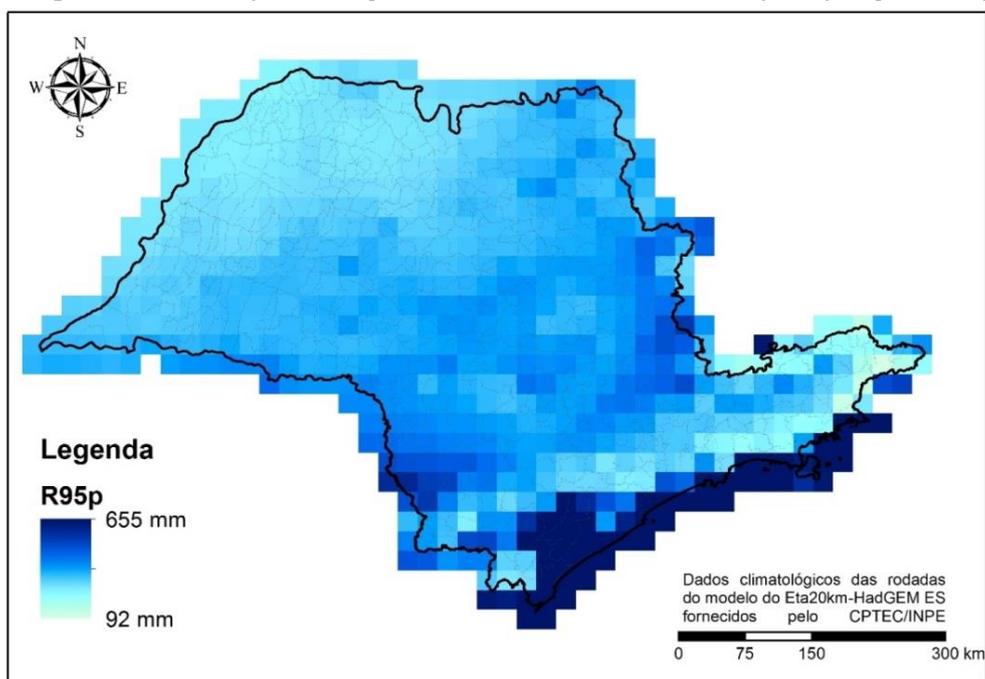
Valor médio do Rx1day calculado para o período do *baseline* (1961-1990).
Fonte: Autoria própria.

Figura 2.13 - Espacialização do índice de extremos de precipitação Rx5day.



Valor médio do Rx5day calculado para o período do *baseline* (1961-1990).
Fonte: Autoria própria.

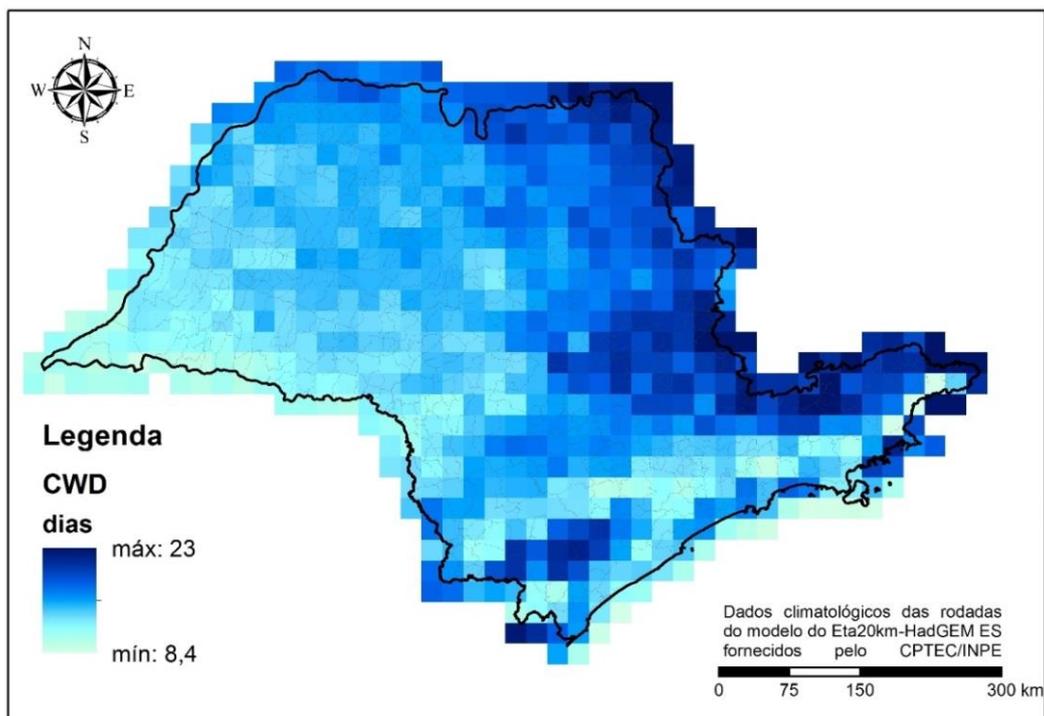
Figura 2.14 - Espacialização do índice de extremos de precipitação R95p.



Valor médio do R95p calculado para o período do *baseline* (1961-1990).

Fonte: Autoria própria.

Figura 2.15 - Espacialização do índice de extremos de precipitação CWD



Valor médio do CWD calculado para o período do *baseline* (1961-1990).

Fonte: Autoria própria.

A partir das Figuras anteriores, nota-se que para as três variáveis relacionadas à intensidade dos eventos pluviométricos extremos (Rx1day, Rx5day e R95p) que os maiores valores encontrados estão exatamente nos domínios da Serra do Mar. Já a variável CWD apresenta um comportamento diferente, ou seja, as regiões com a maior quantidade de dias consecutivos com chuvas estão localizadas na divisa do estado de São Paulo com Minas Gerais e em algumas porções ao Sul do Estado.

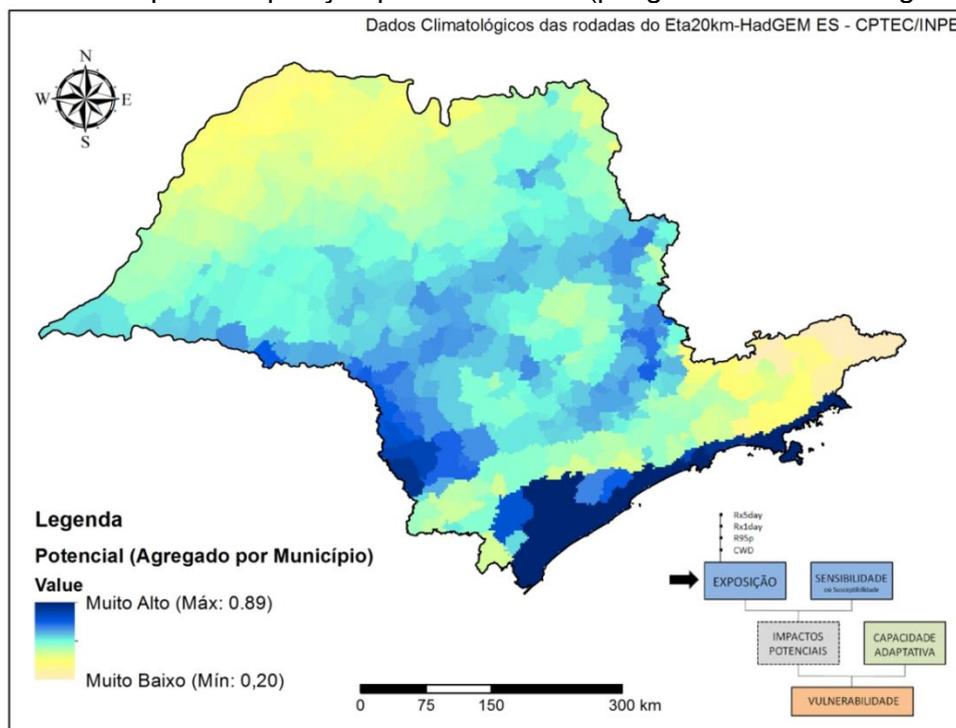
Chou et al. (2014) avaliaram os resultados das simulações de oito associações entre modelos climáticos, incluindo o Eta20km-HadGEM2-ES, para a América do Sul e concluíram que há grande dificuldade em validar os resultados de extremos de precipitação nas regiões montanhosas, onde nota-se uma tendência dos modelos em apresentar valores bem mais elevados nestas localidades se comparadas com outras regiões. Destacaram que a dificuldade em avaliar com precisão os resultados decorre-se, principalmente, da falta de dados históricos que permitam tais validações que, neste referido estudo, foi feito levando em consideração apenas os dados disponíveis no CRU (*Climate Research Unity Global Climate Dataset*). Complementarmente, no mesmo estudo os autores mostraram que, dentre os modelos avaliados, o Eta20km-HadGEM2-ES foi aquele que apresentou melhores correlações na análise de distribuição de frequência para a região Centro-Sul do Brasil.

Para as análises de interesse deste Capítulo, os resultados apresentados nas Figura 2.12 a Figura 2.15 não permitem outras explanações a respeito de sua validade enquanto analisados de forma separada. *A priori*, considerou-se os argumentos apresentados por Chou et. (2014) como plausíveis para sua utilização na construção do IVDDT. Entretanto, para avaliar especificamente a pertinência das variáveis na composição do índice de vulnerabilidade, é preciso compor o sub-índice de Exposição (Figura 2.16) para o *baseline* e, posteriormente, o IVDDT para compará-lo com o Atlas de Desastres de Movimentos de Massa do estado de São Paulo (CEPED, 2013). Ressalta-se que o vetor Exposição para o período de referência (*baseline*) pode ser entendido como um Mapa de Perigos Hidrometeorológicos, uma vez que

permite a identificação de quais regiões estão concentrados os eventos extremos de precipitação que potencialmente podem causar diversos tipos de impactos, tais como inundações bruscas, enxurradas, alagamentos, deslizamentos de terra e aceleração de processos erosivos.

O resultado referente ao sub-índice de Exposição (Figura 2.16) reflete algumas características esperadas para a análise de vulnerabilidade aos desastres. Embora este mapa reflita apenas o aspecto climático, é possível fazer algumas inferências a respeito da distribuição espacial deste sub-índice, principalmente nas regiões com maiores índices, foco do presente estudo. Nota-se que há concentração dos valores mais elevados de Exposição em toda a porção que abrange a face costeira da Serra do Mar e as áreas de planície litorânea, regiões que são comumente atingidas por eventos extremos de chuvas, sobretudo durante a primavera-verão, destacando-se os meses de janeiro e fevereiro.

Figura 2.16 - Mapa de Exposição para o *baseline* (perigos hidrometeorológicos).



Sub-índice calculado a partir da conjunção dos índices de extremos RX1day, RX5day, R95p e CWD provenientes do modelo Eta20km-HadGEM2-ES

Fonte: Autoria própria.

Nestas regiões próximas às faces costeiras da Serra do Mar, os fatores climáticos, topográficos e ambientais, conjugados, favorecem a ocorrência de eventos extremos mais severos que em outras regiões do Estado. Pode-se citar a orografia, que influencia na chegada e no deslocamento de umidade e massas de ar, a qual se torna mais definida nas porções onde a posição da Serra do Mar está bem próxima à costa, fazendo com que haja acentuada pluviosidade até mesmo no inverno. Segundo Sant'anna Neto (1990), a estrutura do relevo de algumas partes da Serra do Mar, como a enseada de Caraguatatuba, impulsiona o efeito de formação de chuvas orográficas e dificulta o deslocamento da Frente Polar Atlântica (FPA) na área.

Além disso, durante o verão é comum que as chuvas sejam condicionadas à atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), fenômeno atmosférico caracterizado pela elevada umidade localizada entre a Amazônia e o Sudeste brasileiro (SANTOS E GALVANI, 2014). Além destes fatores, o litoral paulista localiza-se em uma zona de interface de transição entre climas quentes de latitudes baixas e climas mesotérmicos de latitudes médias (BORSATO E SOUZA FILHO, 2008), favorecendo o desenvolvimento de sistemas frontais intensos que são oriundos das latitudes mais altas.

Embora toda esta porção costeira da Serra do Mar seja caracterizada por uma alta pluviosidade, ela apresenta comportamentos diferenciados entre sua porção Sul, Central e Norte. O Litoral Central, por exemplo, é controlado por massas tropicais e polares, de clima úmido na face oriental e subtropical, com aumento da participação das massas polares, onde a serra se aproxima da costa quase no sentido oeste-leste, que aliado à direção oposta às correntes perturbadas do sul, faz com que parte deste trecho tenha a maior pluviosidade do Brasil (SÃO PAULO, 2006). Desta forma, análises particulares para cada município demandam de um aprofundamento que leve em consideração todos os aspectos supracitados. No Capítulo 4 apresenta-se uma análise para o município de Caraguatatuba, incluindo informações específicas deste núcleo, o que caracteriza uma melhor compreensão da dinâmica do clima e dos impactos das mudanças climáticas nesta região. Logo, nesta parte do trabalho

considerou-se aspectos gerais necessários para validar parcialmente os resultados apresentados na Figura 2.16, que nitidamente caracteriza a porção costeira da Serra do Mar como aquele que apresenta os maiores perigos hidrometeorológicos do estado de São Paulo.

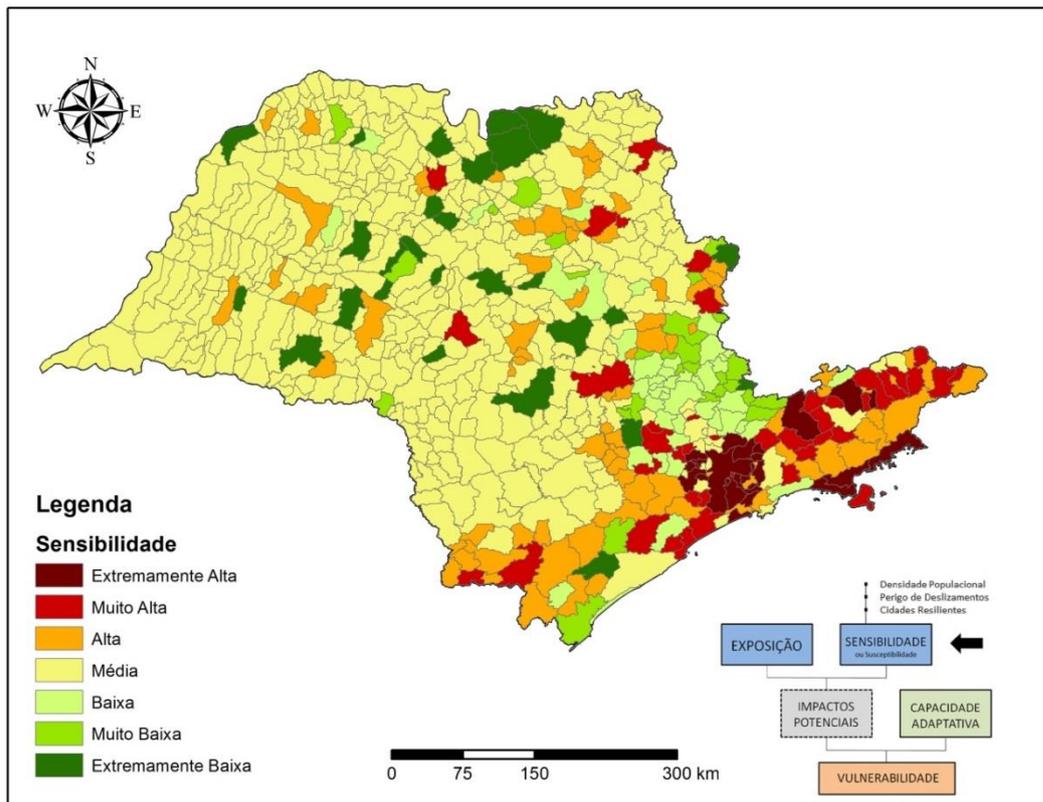
As demais regiões do Estado não fazem parte do escopo deste trabalho, entretanto, pode-se dizer que o resultado do sub-índice reflete algumas características marcantes a respeito da distribuição espacial dos eventos extremos de precipitação (perigos hidrometeorológicos), embora este tipo de análise tenha sido tema de poucos estudos publicados na literatura devido à falta de dados específicos. De forma geral, o sub-índice aponta boas correlações com as análises feitas por Santos (2012), principalmente na faixa que se estende pelas Mesorregiões de Itapetininga, RMSP, Piracicaba e de Campinas, incluindo a faixa próxima à divisa com Minas Gerais. Nestas regiões, o autor também inferiu valores medianamente altos na ocorrência e intensidade dos extremos de precipitação. A região próxima a Franca, no extremo Nordeste do Estado, também caracteriza-se por valores mais altos do sub-índice exposição quando comparado com as demais porções ao Norte do Estado pela modelagem feita por Santos (2012). De modo geral, feições semelhantes dentro do Estado foram observadas por Prado et al. (2006) (embora o enfoque tenha sido na quantidade de dias chuvosos) sendo que, de modo geral, a porção a Oeste (divisa com o Paraná) é aquela que apresenta maiores diferenças quando comparados com os estudos citados.

2.5.2. Espacialização do Sub-Índice de Sensibilidade

O sub-índice de Sensibilidade foi composto pela relação das variáveis de Densidade Populacional, Mapa de Perigo de Escorregamentos de Terra e do levantamento dos municípios que aderiram à campanha Construindo Cidades Resilientes. A espacialização deste sub-índice, considerando o resultado agregado por município, está apresentado na Figura 2.17. Os valores

numéricos (na escala entre 0.00 e 1.00) foram convertidos em sete categorias, sendo que o critério para este fatiamento foi a divisão em intervalos equidistantes.

Figura 2.17 - Sub-índice de Sensibilidade aos Desastres Naturais Relacionados com Deslizamentos De Terra.



Fonte: Autoria própria.

Ressalta-se que o mapa de sensibilidade não explicita apenas as regiões mais suscetíveis aos processos físicos dos deslizamentos de terra, mas sim a fragilidade dos municípios em serem impactos por este tipo de desastre. As localidades mais sensíveis representam a conjunção de municípios que apresentam áreas muito suscetíveis em seus territórios, combinados com uma alta densidade populacional e com a falta de ações estruturais e não estruturais como àquelas propostas pela campanha Construindo Cidades Resilientes. Ou seja, seriam aqueles municípios com encostas suscetíveis aos deslizamentos de terra, as quais podem ser eventualmente habitadas por processos de

urbanização pressionado pelo crescimento populacional - caracterizando em áreas de risco - e que ainda não implementaram uma série de ações que ajudariam no combate aos desastres e na efetividade do trabalho da Defesa Civil. É relevante, na análise de vulnerabilidade, identificar as localidades que apresentam sensibilidade igual ou superior à classe “alta, com foco principalmente nas cidades que estão nas categorias “muito alta” e “extremamente alta”. As classes inferiores (média até extremamente baixa) refletem a baixa probabilidade da ocorrência destes tipos de desastres, pois não apresentam em seus territórios alguma das condições básicas para que os desastres deste tipo venham a acontecer, principalmente por não apresentarem áreas significativas com perigo de escorregamentos nas classes P4 e P5 (mais suscetíveis); a densidade populacional ser baixa e/ou participarem da campanha Construindo Cidades Resilientes. Entretanto, ainda que raro, é possível que municípios com sensibilidade mediana sejam alvo de eventos extremos de precipitação muito intensos, aumentando a probabilidade dos impactos potenciais e, conseqüentemente, a vulnerabilidade. Neste sentido, é importante avaliar cada sub-índice isoladamente para que, ao final, o IVDDT possa ser discutido levando em consideração todos os aspectos que o compõe.

As regiões mais sensíveis identificadas foram as cidades do Litoral Norte paulista (sobretudo Caraguatatuba, São Sebastião, Ubatuba), a RMSP e cidades do Vale do Paraíba que têm avançando pelos domínios da Serra da Mantiqueira. Na face continental da Serra do Mar existem municípios do Vale do Paraíba e também no Litoral Sul que se caracterizam por sensibilidade na classe “alta”, mesmo encontrando-se em áreas de relevos muito acidentados e com alta suscetibilidade. Estas ocorrências se devem ao fato de haver municípios pouco povoados e que contam com a conservação de grande parte do território, fatores que os tornam menos sensíveis aos impactos de deslizamentos de terra. Mesmo que estes municípios estejam em áreas altamente suscetíveis, a probabilidade dos deslizamentos atingirem a população e suas atividades, bem como de serem induzidos por processos antrópicos, é menor que nos casos com alta densidade populacional.

As ocorrências de sensibilidade nas classes muito alta nas outras porções mais ao Norte e Oeste do Estado se devem pela conjunção de uma densidade populacional muito elevada (Figura 2.9), com a ausência da Campanha Construindo Cidades Resilientes (Figura 2.10) e um médio valor para o mapa de perigo de escorregamentos (Figura 2.8). Entretanto, salvo alguns taludes de corte e aterro, normalmente feito para grandes empreendimentos, estradas ou barragens, sabe-se que esta porção do estado de São Paulo não se caracteriza pelo desenvolvimento de deslizamentos de terra. As poucas localidades que aparecem no mapa de perigos de escorregamentos nas classes P4 e P5 se referem às margens de grandes reservatórios ou estão na divisa entre o Planalto Ocidental e a Depressão Periférica, o que caracteriza uma baixa probabilidade de ocorrência dos fenômenos que são de interesse neste Capítulo. Trata-se, portanto, de uma parcela dos resultados que não condiz com o esperado, refletindo uma limitação do sub-índice sensibilidade nestas poucas localidades.

Para melhor entender a composição do vetor Sensibilidade, a Tabela 2.2 estão apresenta os resultados para os 26 municípios paulistas que estão na categoria de sensibilidade “extremamente alta”. Os valores das 3 variáveis que compõem o sub-índice de Sensibilidade estão apresentados nas colunas 1, 3 e 5, lembrando que a variável Densidade Populacional foi posteriormente ponderada em categorias que variam entre 0 e 1, assim como a variável que avalia a presença/ausência da campanha Construindo Cidades Resiliente. Nas colunas 2 e 5 pode-se avaliar a posição de cada município no ranking das respectivas variáveis. A ordem dos municípios nesta tabela se refere à posição do ranking quando analisado o sub-índice de Sensibilidade. Por exemplo, Diadema é a 4ª cidade com o maior sub-índice de Sensibilidade, de modo que é a 1ª no quesito densidade populacional, e a 124ª quando se avaliou o índice médio de Perigo aos Escorregamentos.

Tabela 2.2 - Ranking dos Municípios com Sensibilidade “Extremamente Alta” e as variáveis que compõem o sub-índice.

[0]	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
Nome do Município	Perigo Escorreg.	Ranking de [1]	Dens.Pop. (hab/km ²)	Ranking de [3]	Cidades Resilientes	Sub-índice Sensibilidade	Ranking de [6]
1° Santo André	0,354	90	3878,82	13	Não	0,8014	1
2° Ferraz de Vasconcelos	0,375	84	5937,88	10	Não	0,7860	2
3° Mauá	0,367	86	6957,30	7	Não	0,7751	3
4° Diadema	0,272	124	12728,64	1	Não	0,7738	4
5° São Bernardo do Campo	0,317	101	1906,65	22	Não	0,7727	5
6° Cubatão	0,453	53	852,80	40	Não	0,7702	6
7° São Sebastião	0,643	13	195,05	111	Não	0,7671	7
8° Aparecida	0,587	28	290,87	78	Não	0,7627	8
9° Rio Grande da Serra	0,448	55	1257,84	30	Não	0,7608	9
10° Ubatuba	0,709	8	112,97	161	Não	0,7477	10
11° Caraguatatuba	0,623	17	217,63	95	Não	0,7474	11
12° São José dos Campos	0,442	60	595,62	53	Não	0,7441	12
13° Suzano	0,287	115	1313,71	29	Não	0,7421	13
14° São Paulo	0,241	145	7525,00	6	Não	0,7398	14
15° Guarulhos	0,288	113	3956,45	12	Não	0,7362	15
16° Santana do Parnaíba	0,353	91	653,41	50	Não	0,7294	16
17° Praia Grande	0,356	89	1895,20	23	Não	0,7262	17
18° Itapevi	0,288	114	2556,04	19	Não	0,7247	18
19° Jandira	0,250	134	6466,42	8	Não	0,7194	19
20° Embu	0,266	125	3544,10	15	Não	0,7138	20
21° Barueri	0,294	109	3774,32	14	Não	0,7083	21
22° Mairiporã	0,448	56	268,91	82	Não	0,7054	22
23° Itaquaquecetuba	0,191	161	4064,73	11	Não	0,7040	23
24° Cotia	0,245	141	663,29	49	Não	0,6992	24
25° Arujá	0,260	130	824,84	42	Não	0,6970	25
26° Pindamonhangaba	0,399	74	208,57	103	Não	0,6969	26

Fonte: Autoria própria.

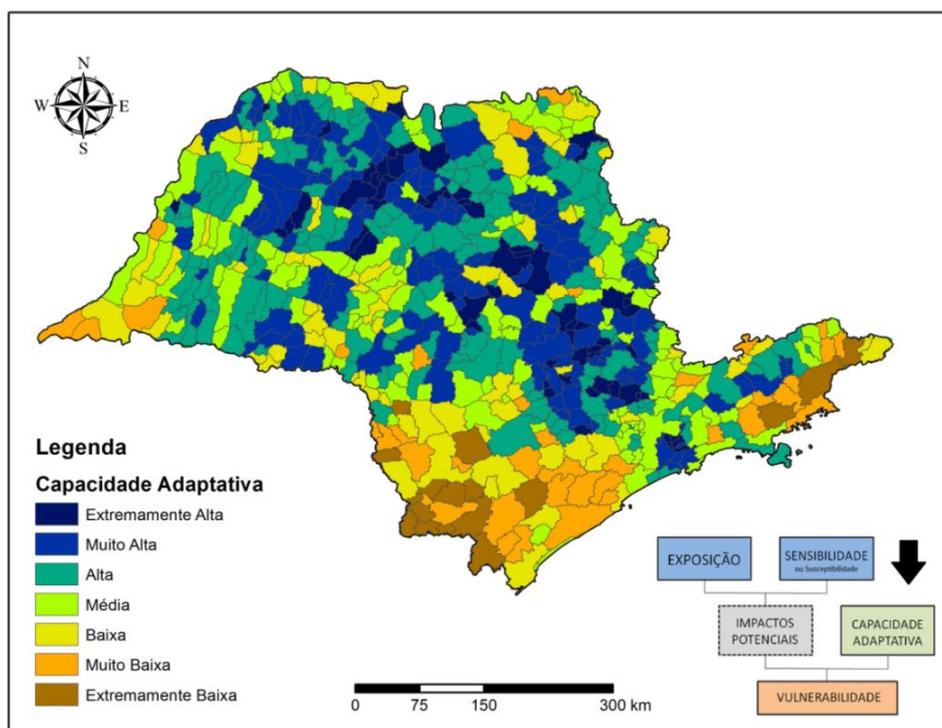
É importante ressaltar que tanto o mapa mostrado na Figura 2.17, quanto a Tabela 2.2 apresentam resultados agregados por município, conforme mencionado no item 2.4.6. Entretanto, é possível que existam pequenas áreas com sensibilidade “extremamente alta” dentro de alguns municípios que apresentem valores agregados inferiores. Isto acontece, normalmente, quando um município tem grande extensão territorial, de modo que a maior parte de seu território está sob planícies ou relevos suaves, mas também tem algumas regiões com encostas íngremes e suscetíveis.

Outra limitação inerente ao sub-índice de Sensibilidade refere-se ao dado de densidade populacional oficial do IBGE, que considera todo o território político do município em seu cálculo, e não apenas a sua área urbana. Isto faz com que alguns poucos municípios paulistas que são muito extensos apresentem baixa densidade populacional, pois sua taxa de urbanização (% em relação a área total) é baixa. Em alguns destes casos a população se concentra em uma região relativamente pequena perante todo seu território, mas mesmo assim têm focos de ocupação em áreas de risco da mesma forma que cidades mais povoadas, o que tornaria a sensibilidade, de fato, mais elevada. Exemplos deste tipo são Campos do Jordão e Cunha, na Região Metropolitana do Vale do Paraíba. Esta última, por exemplo, tem uma extensa área, de mais de 1400 km², mas apenas uma pequena parcela deste território é urbanizada. Entretanto, devido à sua localização na Serra do Quebra-Cangalha, frequentemente é palco de deslizamentos de terra, sobretudo aqueles que se desenvolvem em taludes de cortes e aterro nas beiras de estradas. Neste exemplo, a sensibilidade da população urbana seria mais elevada se considerado apenas o território urbano, além de que áreas rurais também poderiam estar expostas a este tipo de risco. Portanto, para uma análise mais aprofundada sobre os resultados recomenda-se explorar as informações de toda a área de estudo e consultar complementarmente os dados desagregados. Ressalta-se que as considerações finais a respeito do IVDDT, como um todo, foram elaboradas levando em conta estes aspectos específicos.

2.5.3. Espacialização do Sub-Índice de Capacidade Adaptativa

O sub-índice de Capacidade Adaptativa utilizado neste trabalho utilizou as mesmas sete variáveis propostas em Debortoli et al. (2015). O valor máximo encontrado para este sub-índice foi de 0.834 para o município de Americana (microrregião de Campinas) e o mínimo de 0.590, em Barra do Turvo (Microrregião de Registro). Destaca-se que este mesmo índice foi calculado para todo o Brasil em Debortoli et al. (2015), cujos valores máximos e mínimos são completamente diferentes e, levando em consideração o contexto nacional, todos os municípios paulistas estavam acima da média nacional. Entretanto, para conseguir identificar melhor os contrastes de vulnerabilidade intra-estadual, optou-se em dividir o sub-índice em sete classes equidistantes utilizando estes valores extremos (0.834 e 0.590) como limite superior e inferior, respectivamente. A espacialização do sub-índice de Capacidade Adaptativa é mostrada na Figura 2.18.

Figura 2.18 –Sub-índice de Capacidade Adaptativa.



Fonte: Autoria própria.

Cabe ressaltar que este índice é uma aproximação da representação da capacidade adaptativa, pois não há banco de dados específicos para representá-la de modo ideal, como, por exemplo, a partir de fatores de governança. Os resultados mostram algumas compartimentações dentro do estado de São Paulo. Enquanto a porção central apresenta os municípios com os maiores valores do sub-índice capacidade adaptativa, o Litoral Sul e os extremos Sudoeste e Leste (parte do Vale do Paraíba) se caracterizam pelo padrão contrário.

Destaca-se que nas proximidades de grandes cidades polos econômicos como Araraquara, Ribeirão Preto, Sorocaba, Jundiaí e São José dos Campos a tendência do sub-índice é de ser mais elevado, uma vez que contam com o IDH alto, indicadores relacionados à pobreza, inferiores e desigualdade social não é tão grande quanto nas grandes metrópoles (como São Paulo).

Por outro lado, as regiões ambientalmente mais conservadas, principalmente as que estão no domínio da Serra do Mar Paulista, tem a tendência de uma capacidade adaptativa reduzida, quando analisada através do sub-índice proposto. Para estes casos, os IDHs normalmente estão entre os mais baixos do Estado (excetuando-se os municípios da Baixada Santista e Litoral Norte), além de serem também os municípios com os piores índices relacionados à pobreza e à infraestrutura das residências (como a parcela da população que reside em moradias com paredes inadequadas e/ou não tem acesso à energia elétrica). A desigualdade social nestes municípios é mediana, sendo que Ubatuba está entre os 10 municípios com maior índice GINI.

Já nas grandes metrópoles, principalmente a RMSP, o sub-índice capacidade adaptativa é mediano. Nesta região, nos municípios (São Paulo, Santo André, Osasco, Carapicuíba e adjacências) o IDH tende a ser elevado, sobretudo por conta da componente que considera a renda. Porém, são neles também que coexiste os maiores índices de desigualdade social (GINI), que é um dos maiores “drivers” da falta da capacidade adaptativa e, conseqüentemente, da vulnerabilidade. Para casos como este de grande desigualdade, uma análise mais minuciosa da vulnerabilidade (como um todo) necessitaria de uma

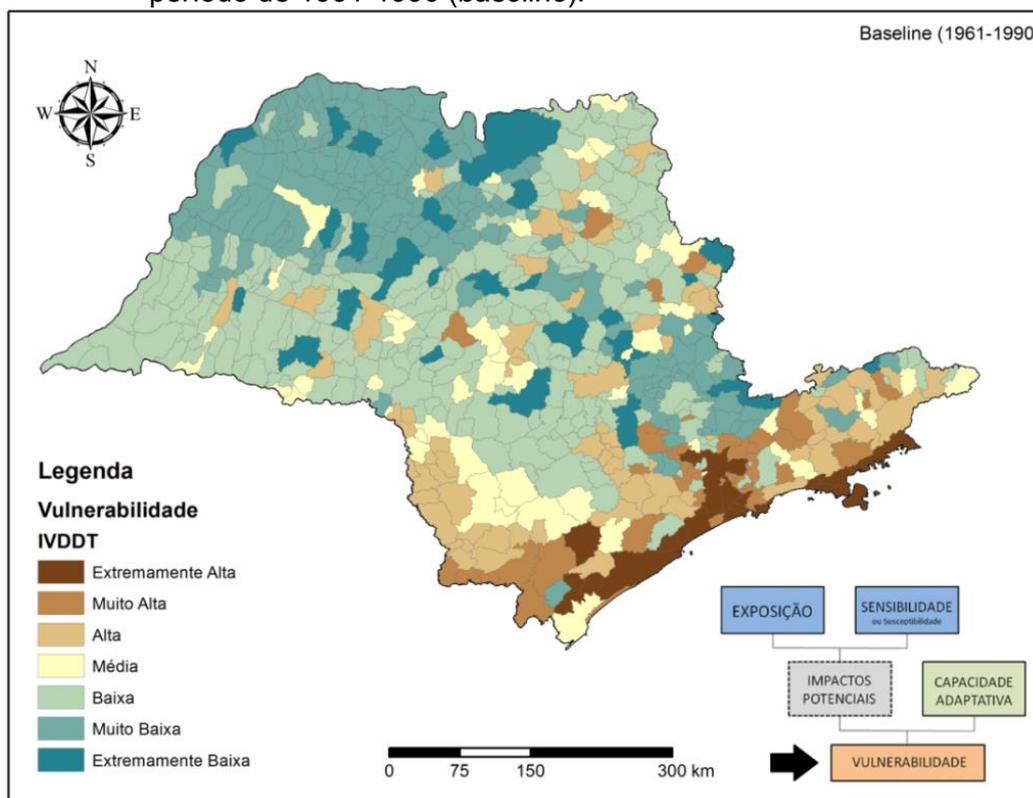
exploração dos dados em níveis mais específicos (ex: bairros), uma vez que seria preciso identificar espacialmente onde estão localizados os grupos mais vulneráveis, os quais são encobertos ao se fazer uso de um sub-índice agregado por município. Ressalta-se que os dados utilizados para compor o sub-índice de Capacidade Adaptativa foram aqueles disponibilizados pela plataforma do Atlas de Desenvolvimento Humano (PNUD, 2013), o qual não permite o acesso das informações em territórios menores que o municipal. Esta é uma limitação da metodologia apresentada, especificamente associada ao acesso de dados de domínio público que, para o Brasil, se limitam à agregação espacial por município, embora pudessem ser disponibilizados por setor censitário. Entretanto, o método apresentado pode ser facilmente adaptado caso existam outros dados disponíveis, o que culminaria em possibilitar análise mais profunda quando da necessidade de se estudar a vulnerabilidade de municípios mais críticos. Uma sugestão para etapas futuras que visam melhorias para este sub-índice é a implementação de dados de governança, tais como a presença de Defesa Civil Municipal atuante e políticas públicas específicas para redução de risco aos desastres.

2.5.4. Índice de Vulnerabilidade para o Baseline e Análise de Pertinência das Variáveis

Após o cálculo de todos os sub-índices necessários para a construção do IVDDT, passou-se às análises para o período de referência - *baseline* (1961-1990). Para tal, utilizou-se os resultados apresentados nas Figuras 2.16 a 2.18. Assim como todos os sub-índices que compõem o IVDDT, primeiramente o resultado foi gerado para todos os pontos de grade dentro da área de estudo e, posteriormente, foi agregado para cada município. O maior valor do IVDDT foi obtido para o município de São Vicente (0,424), enquanto o menor foi em Colômbia (0,118), no extremo Norte do estado. Para uma melhor apresentação dos resultados, optou-se pelo

fatiamento em sete classes pelo método *Natural Breaks*. O resultado da espacialização do IVDDT para o *baseline* está apresentado na Figura 2.19.

Figura 2.19 – Índice de Vulnerabilidade aos Desastres Naturais relacionados com Deslizamentos de Terra, considerando as variáveis climáticas do período de 1961-1990 (*baseline*).



Fonte: Autoria própria.

Objetivando uma melhor compreensão a respeito das dimensões que compõem o IVDDT, elaborou-se a Tabela 2.3. Nesta tabela estão apresentados os 19 municípios da classe “extremamente alta” e os respectivos valores agregados do IVDDT e seus sub-índices. Ressalta-se que o cálculo do IVDDT foi feito originalmente de forma desagregada (para cada ponto de grade), o que caracteriza em diferentes valores dentro de um mesmo município. Desta forma, a aplicação da Equação 2.9 (cálculo do IVDDT) não deve ser feita a partir dos valores agregados dos sub-índices. Portanto, esta tabela deve ser analisada apenas para o entendimento de quais são os principais *drivers* que caracterizam a vulnerabilidade e a ordem de grandeza entre eles. A coluna

denominada “Fator de Abrandamento” refere-se à parte relacionada com a Capacidade Adaptativa $\left[0,5 + \frac{(1-CA)}{2}\right]$, da Equação 2.9. Os sinais de (+) ou (-) representam se os sub-índices de Exposição (EXP), Sensibilidade (SENS) e Capacidade Adaptativa (CA) são diretamente ou inversamente proporcionais ao IVDDT.

Tabela 2.3 - Listagem dos 19 municípios classificados com vulnerabilidade “extremamente alta” e a composição do IVDDT com seus sub-índices.

RANKING IVDDT	MUNICÍPIO	IVDDT	EXP (+)	SENS (+)	CA (-)	Fator de Abrandamento
1	São Sebastião	0,433	▲0,651	▲0,767	▼0,775	38,8%
2	Ilhabela	0,421	▲0,669	▲0,677	▼0,769	38,4%
3	Peruíbe	0,413	▬0,625	▲0,647	▼0,728	36,4%
4	Ubatuba	0,407	▬0,592	▲0,748	▬0,697	34,8%
5	Guarujá	0,404	▲0,887	▼0,384	▼0,756	37,8%
6	Cubatão	0,403	▬0,493	▲0,770	▼0,793	39,7%
7	Praia Grande	0,402	▬0,603	▲0,726	▼0,772	38,6%
8	Itariri	0,389	▬0,573	▬0,630	▬0,679	34,0%
9	Itanhaém	0,388	▬0,581	▲0,649	▼0,747	37,3%
10	Caraguatatuba	0,385	▬0,566	▲0,747	▼0,757	37,8%
11	Pariquera-Açu	0,382	▲0,727	▬0,497	▼0,740	37,0%
12	Iguape	0,375	▲0,703	▬0,440	▬0,690	34,5%
13	São Vicente	0,374	▲0,767	▬0,521	▼0,785	39,2%
14	Santana do Parnaíba	0,372	▬0,404	▲0,729	▼0,717	35,8%
15	Jacupiranga	0,368	▬0,580	▬0,543	▬0,691	34,5%
16	Barueri	0,361	▼0,378	▲0,708	▼0,748	37,4%
17	Sete Barras	0,357	▬0,556	▬0,499	▬0,661	33,0%
18	São Bernardo do Campo	0,357	▼0,361	▲0,773	▼0,787	39,4%
19	São Paulo	0,354	▼0,378	▲0,740	▼0,744	37,2%

O traço em amarelo indica valores médios em torno da média, sendo que as setas verdes e vermelhas indicam valores acima e abaixo da média, respectivamente. O sinal de (+) e (-) indica que os sub-índices são diretamente e inversamente proporcionais ao IVDDT, respectivamente.

Fonte: autoria própria.

Analisando a Figura 2.19 e a Tabela 2.3 nota-se que a grande maioria dos municípios com o IVDDT mais altos estão localizados na região da Serra do Mar paulista, sendo que os demais estão na RMSP. Assim, pode-se afirmar que configuram duas situações distintas na caracterização da vulnerabilidade.

Para o primeiro caso, o IVDDT calculado é mais elevado para as cidades litorâneas, sendo que praticamente todo o litoral está classificado na classe “extremamente alta”, com a exceção de Cananéia, Ilha Comprida, Monguagá, Santos e Bertioga. Nota-se que em praticamente todos estes casos há uma conjunção de alta Exposição com alta Sensibilidade, o que reflete claramente a parcela da vulnerabilidade que é inerente da natureza regional em receber eventos de precipitação extrema juntamente com o processo de urbanização sob encostas suscetíveis, por muitas vezes de forma não planejada.

No segundo caso, das cidades da RMSP, o vetor Exposição não é o principal *driver* da vulnerabilidade, a qual é majoritariamente determinada pela alta Sensibilidade que, por sua vez, tem forte influência dos altos índices de densidade populacional e dos fatores relacionados. A grande desigualdade social (expressada pelo índice GINI, dentro do sub-índice de Capacidade Adaptativa) também é relevante na composição da alta vulnerabilidade. Estes fatores configuram um cenário para a RMSP diferente daquele das cidades litorâneas, de modo que os eventos extremos que se desenvolvem nestas regiões não têm a mesma intensidade e frequência, mas tendem a causar grandes impactos mesmo em situações não tão severas devido aos arranjos sócio-ambientais.

De modo geral, as cidades paulistas apresentam um bom sub-índice de Capacidade Adaptativa quando comparadas com o restante do país (ver DEBORTOLI et al. 2015a). Isto culminou em fatores de abrandamentos que quase sempre variam entre 30% e 40% dentro do Estado. Porém, como a análise apresentada nesta tese é focada na situação intra-estadual, estas pequenas diferenças entre os municípios podem ser significantes na caracterização da vulnerabilidade. Sendo assim, sugere-se explorar isoladamente as variáveis que compõem este sub-índice para identificar os pontos-chave com vistas a propor melhores estratégias de adaptação.

Quanto à validação deste resultado, foi preciso comparar o mapa de vulnerabilidade da Figura 2.19 com o mapa do Atlas de Desastres Naturais relacionados aos movimentos de massa do CEPED (2013), apresentado na

Figura 2.2. De forma geral, os dois mapas apresentam padrões espaciais muito semelhantes, com predomínio das regiões mais afetadas no domínio da Serra do Mar e também na RMSP. Destaca-se também a boa correlação em algumas cidades do Vale do Paraíba e alguns municípios isolados na porção Centro-Norte do Estado. Por outro lado, nota-se que os dois mapas nem sempre correspondem às mesmas interpretações, destacando-se a superestimativa da vulnerabilidade na Mesorregião de Itapetininga (Sudoeste do Estado, na divisa com o Paraná), decorrente do viés de alta Exposição mencionado no item 2.5.1, e também em algumas poucas localidades isoladas espalhadas pelo território paulista.

Porém, é preciso lembrar que a metodologia utilizada no mapeamento feito pelo CEPED (2013) considera apenas os desastres registrados entre 1991-2013, deixando de fora todos os outros eventos que aconteceram antes desse período. Além disso, no próprio Atlas são apresentadas algumas limitações da compilação dos dados, destacando-se o fato de que antes dos anos 2000 o registro oficial dos desastres era feito de modo simples e não obrigatório, tornando-se eficaz apenas e com maior confiabilidade após 2010. Ou seja, embora o Atlas refira-se aos registros entre os anos de 1991-2013, 90% das ocorrências oficialmente registradas são no período posterior ao ano de 2010.

Neste aspecto, as análises relacionadas aos eventos extremos, sejam elas voltadas apenas ao evento climático na forma isolada ou aos impactos por eles deflagrados, são considerados raros. Isto quer dizer que faz-se necessário dispor de uma grande quantidade de dados históricos para que possam ser explorados, compreendidos e correlacionados. Visto que não se dispõe de outras bases de dados oficiais (de séries históricas) para o Brasil que possa corroborar a avaliação a utilização do Atlas do CEPED (2013) representa uma limitação para a validação dos resultados, de modo que apenas os casos com maior número de registros devem ser levados em consideração.

Sob este ponto de vista, portanto, pode-se dizer que o IVDDT caracteriza como uma boa ferramenta para a análise de vulnerabilidade. Entretanto, sua aplicação necessita do conhecimento e exploração minuciosa dos dados para

que sejam compreendidos os diferentes arranjos que são determinantes nos *hotspots* de vulnerabilidade. Como em qualquer estudo que se baseia em dados de modelagem climática, é necessário também compreender os vieses dos modelos utilizados e suas limitações. Neste aspecto, destaca-se o fato de que o modelo Eta/HadGEM2-ES e os índices de eventos extremos utilizados foram capazes de refletir, com considerável acurácia, os perigos climáticos observados dentro do Estado, permitindo a continuação das análises do IVDDT para os períodos futuros (2011-2040; 2041-2070 e 2071-2100).

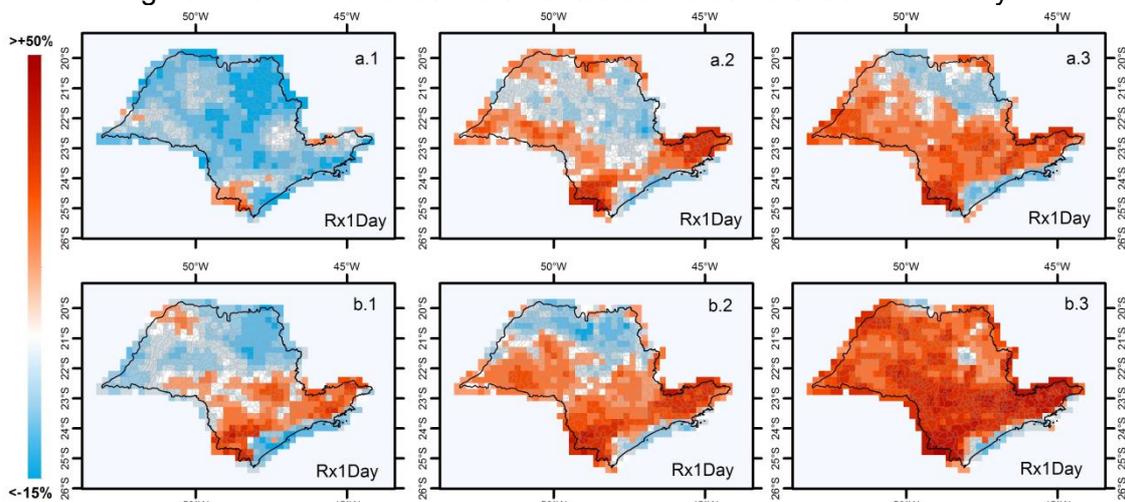
2.5.5. Índice de Vulnerabilidade para os Períodos Futuros

Em conformidade com o explicitado no item 2.4.4, o cálculo do IVDDT para os períodos futuros depende necessariamente do conhecimento das alterações do clima, tendo como referência os dados do *baseline*. Ou seja, foi preciso calcular os incrementos/anomalias de cada variável que compõe o sub-índice Exposição e recalculá-lo para cada período futuro de interesse. Destaca-se que o ideal seria também trabalhar com a modelagem das variáveis que compõem os demais sub-índices. Entretanto, estas etapas não foram objeto do presente estudo, que focou principalmente as análises relacionadas às mudanças climáticas. Sendo assim, os próximos itens se concentram, primeiramente, na apresentação dos resultados referentes ao sub-índice Exposição e, posteriormente, o IVDDT para os três períodos futuros de interesse.

2.5.5.1. Incremento do Sub-Índice de Exposição

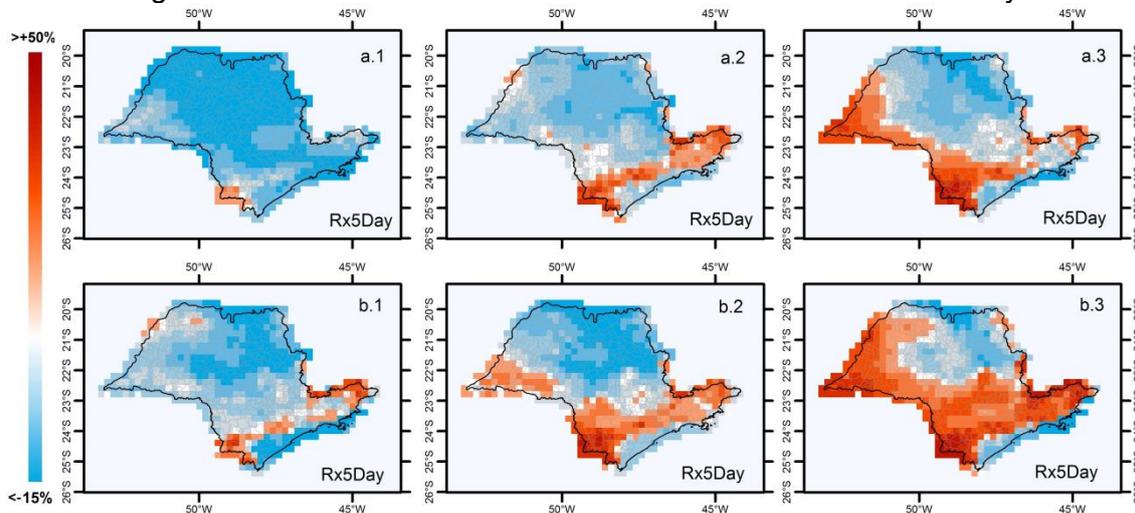
Em conformidade com as Equações 2.2 e 2.3, o sub-índice exposição depende dos incrementos/anomalias dos quatro índices de extremos de precipitação. As Figuras 2.20 a 2.23 apresentam estes resultados. Os tons em vermelho indicam o incremento positivo (intensificação), enquanto os tons em azul representam o incremento negativo (abrandamento).

Figura 2.20 – Anomalias/incrementos do índice de extremo Rx1Day.



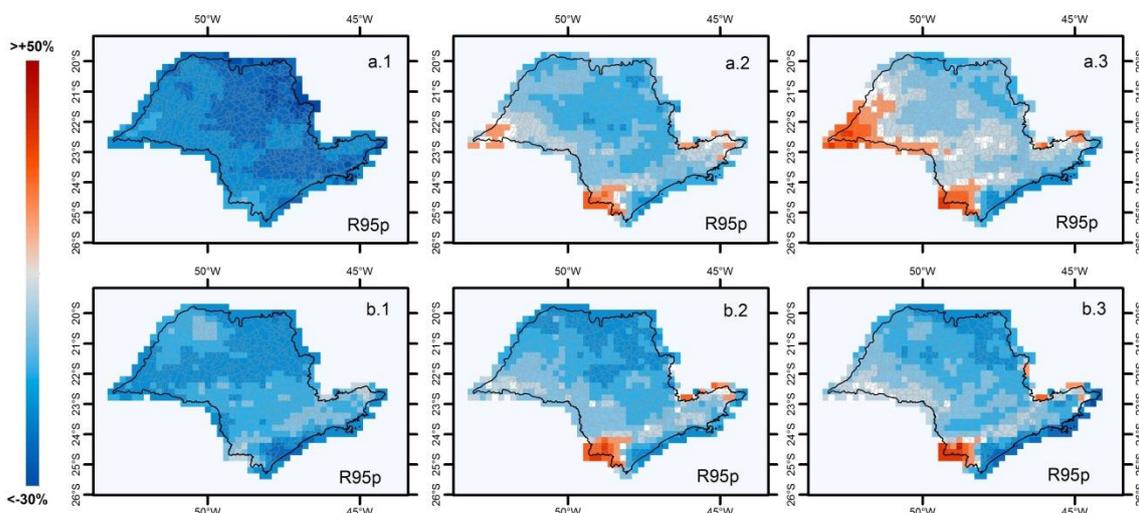
Os mapas em “a.” para o cenário RCP4.5 e em “b.” o cenário RCP8.5 do IPCC AR-4. 1, 2 e 3 referem-se aos períodos 2011-40, 2041-70 e 2071-2100, respectivamente. Fonte: Autoria própria.

Figura 2.21 - Anomalias/incrementos do índice de extremo Rx5Day.



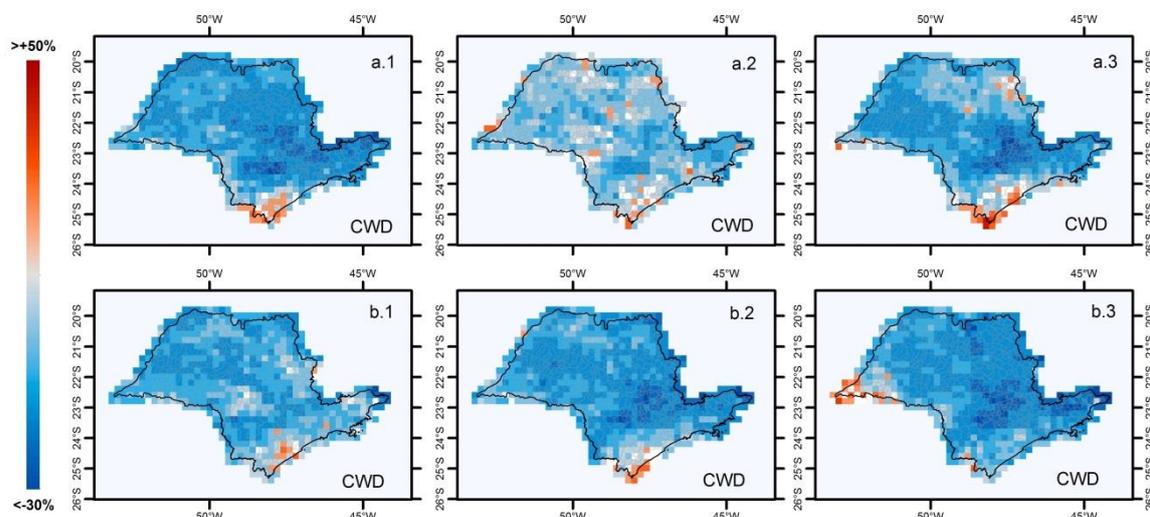
Os mapas em “a.” para o cenário RCP4.5 e em “b.” o cenário RCP8.5 do IPCC AR-4. 1, 2 e 3 referem-se aos períodos 2011-40, 2041-70 e 2071-2100, respectivamente. Fonte: Autoria própria.

Figura 2.22 - Anomalias/incrementos do índice de extremo R95p.



Os mapas em “a.” para o cenário RCP4.5 e em “b.” o cenário RCP8.5 do IPCC AR-4. 1, 2 e 3 referem-se aos períodos 2011-40, 2041-70 e 2071-2100, respectivamente. Fonte: Autoria própria.

Figura 2.23 - Anomalias/incrementos do índice de extremo CWD.



Os mapas em “a.” para o cenário RCP4.5 e em “b.” o cenário RCP8.5 do IPCC AR-4. 1, 2 e 3 referem-se aos períodos 2011-40, 2041-70 e 2071-2100, respectivamente. Fonte: Autoria própria.

Os resultados indicam novamente uma forte correlação nos padrões espaciais dos índices Rx1Day e Rx5Day (Figura 2.20 e Figura 2.21, respectivamente), seguindo a mesma constatação feita ao analisar os resultados para o *baseline*.

Ambos os índices apresentam pequenos incrementos negativos nas faces costeiras da Serra do Mar paulista e em praticamente todas as cidades litorâneas, em todos os períodos e cenários analisados. Isto sugere um abrandamento na magnitude dos eventos extremos que acontecem na escala diária ou por uma sequência curta de dias, o que promove também a diminuição do vetor Exposição. Ainda sobre estas regiões, não são observadas variações notórias do incremento destes dois índices ao longo dos períodos, mantendo-se praticamente estáveis com um decréscimo entre 5% e 10%. Isto sugere que grande parte deste efeito das mudanças climáticas que controla este padrão climático acontecerá no primeiro período de análise (2011-2040), mantendo-se praticamente constante até o final do século XXI.

Por outro lado, há um forte incremento positivo do Rx1Day e Rx5day em várias porções do Estado, destacando-se o eixo paralelo à Serra do Mar (face continental) que vai da Mesorregião de Itapetininga até o extremo do Vale do Paraíba, incluindo a Serra da Mantiqueira, onde a média observada é em torno de 30% positivo. Com a exceção do período de 2011-2040 no cenário RCP4.5, em todos os demais casos há um considerado incremento positivo na RMSP em torno de 10%, sendo um pouco mais elevado para o índice Rx1day.

Outras partes do estado de São Paulo também apresentam a tendência de ter os dois índices Rx1Day e Rx5day com incrementos positivos, que aumentam gradativamente até 2100, sendo maiores no cenário RCP8.5. Destacam-se as regiões que estão localizadas no extremo Oeste paulista, próximas à divisa com o Paraná.

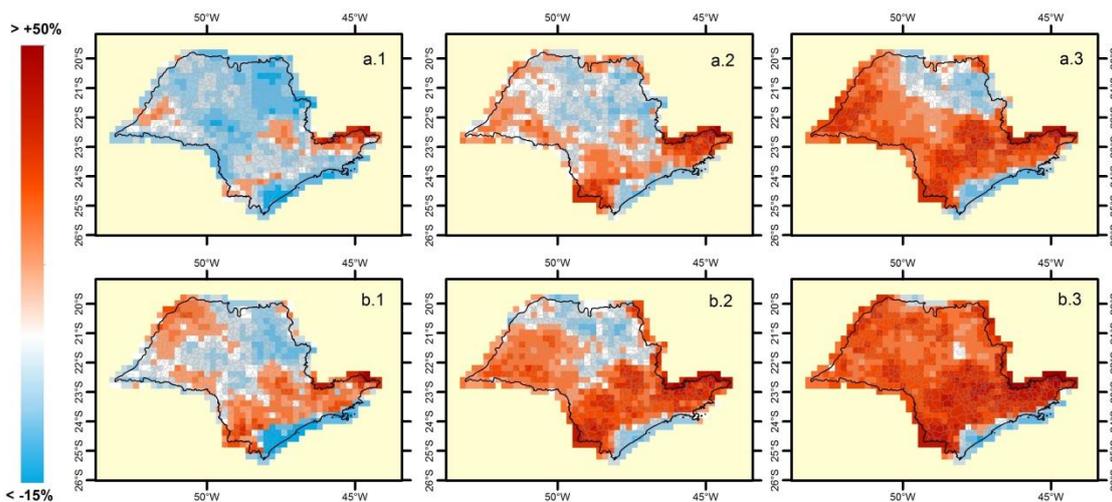
O índice R95p (Figura 2.22) apresentou um comportamento diferente, de modo que em praticamente todas as regiões, períodos e cenários, o padrão predominante observado é o de decréscimo, com incrementos negativos médios de 15%, chegando a 30%. Destaca-se também o fato de que o período 2011-2040, tanto para o cenário RCP4.5 quanto RCP8.5, apresentam as maiores anomalias negativas e, com o passar do tempo, elas diminuem, tornando-se positivas em algumas localidades como, por exemplo, a Mesorregião de Itapetininga. Na porção costeira da Serra do Mar, o padrão

observado é de decréscimo em todos os períodos, em todos os cenários, com valores médios entre 15% e 20%.

Os resultados do índice CWD (Figura 2.23) indicam que praticamente em todo o estado de São Paulo há um decréscimo dos dias consecutivos úmidos, excetuando-se algumas poucas localidades que são variáveis entre os períodos e cenários. Observa-se consenso nos resultados na indicação de um pequeno incremento positivo (entre 2% e 5%) no Litoral Sul paulista.

Aplicou-se a Equação 2.4 utilizando estes resultados para calcular o incremento do sub-índice de Exposição para os períodos futuros, os quais estão apresentados na Figura 2.24.

Figura 2.24 - Incrementos do sub-índice de Exposição.



Os mapas em a. representam os resultados utilizando o cenário RCP4.5 e os em b. o cenário RCP8.5 do IPCC AR-4, sendo que 1, 2 e 3 referem-se aos períodos 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100, respectivamente.

Fonte: Autoria própria.

No primeiro período de análise (2011-2040, Figura 2.24 – a.1 e b.1) nota-se o sub-índice de Exposição tende a decair em grande parte do estado de São Paulo, onde o maior decréscimo se dá na porção costeira Serra do Mar, que abrange todo o litoral. No cenário RCP4.5 os incrementos positivos estão concentrados no Vale do Paraíba, mais especificamente sob as encostas da

Serra da Mantiqueira (chegando a 25%), com alguns focos de menor intensidade na Mesorregião de Piracicaba, Itapetininga e de Presidente Prudente em torno de 5% e 10%. No cenário RCP8.5 os padrões espaciais observados são semelhantes, sendo que em toda porção que está ao Norte e à Oeste da Serra do Mar apresentou incrementos negativos menores que no cenário RCP4.5, além de que os incrementos positivos serem maiores e apresentarem maior abrangência espacial. Porém, no litoral o padrão observado é praticamente o mesmo, onde são observados os maiores incrementos negativos do sub-índice de Exposição.

Para o segundo período (2041-2070, Figura 2.24 – a.2 e b.2), os incrementos positivos parecem ganhar força, de modo que as regiões adjacentes àquelas apontadas no período de 2011-2040 e que apresentavam incremento negativo, passam a ter incrementos positivos, em torno de 10% no cenário RCP 4.5 e em torno de 20% no cenário RCP 8.5. Além disso, para os dois cenários RCP as regiões que no período de 2011-2040 apresentavam incrementos positivos tiveram um acréscimo de cerca de 10% no sub-índice exposição. De forma geral, nota-se um aumento positivo sistemático dentro do estado de São Paulo, sendo esse aumento mais brando no litoral, cujo incremento negativo passou de cerca de -10% para -5%. Este aumento é justificado por conta da intensificação dos índices Rx1day e Rx5day, sendo os maiores valores observados na situação em que há a conjugação do decréscimo do índice CWD. Ou seja, quando as chuvas se tornam mais intensas em curtos períodos de tempo (1 ou 5 dias) e o máximo de dias consecutivos chuvosos é diminuído.

Uma particularidade observada apenas neste período, é que Caraguatatuba e Ubatuba apresentam-se como as únicas cidades do litoral paulista com incrementos positivos, tanto para os resultados utilizando o RCP4.5 quanto 8.5. Porém, esta é uma região onde as escarpas da Serra do Mar estão muito próximas ao mar, característica esta que é difícil de ser representada no modelo de superfície acoplado ao modelo Eta/HadGEM com a escala de 20km. Por esta razão é preciso considerar a incerteza do modelo na representação dos extremos climáticos, uma vez que a tendência observada tanto para Leste

quanto no restante do litoral é completamente diferente. Sugere-se uma análise mais minuciosa para estas localidades, uma vez que estes municípios estão entre aqueles mais vulneráveis aos desastres relacionados com deslizamentos de terra. Em vista desta constatação, no Capítulo 4 apresenta-se estudo focando a região de Caraguatatuba, com o objetivo de melhor compreender qual é a dinâmica dos eventos extremos de precipitação potencialmente deflagradores de deslizamentos de terra ao longo do século.

Desconsiderando as pequenas exceções apresentadas anteriormente, o mesmo comportamento observado na evolução entre 2011-2040 e 2041-2070 se prolonga para 2071-2100 (Figura 2.24 – a.3 e b.3). Neste último período, praticamente todo o estado de São Paulo apresenta um acréscimo do sub-índice de Exposição com valores entre 20% e 50%, com exceção da porção Nordeste no cenário RCP4.5 e também o litoral, nos dois cenários RCP.

Os maiores incrementos positivos estão no Vale do Paraíba (sobretudo na Serra da Mantiqueira), na Mesorregião de Itapetininga e algumas localidades entre a RMSP, Piracicaba e Bauru, que alcançam os 50%. Os maiores incrementos negativos não ultrapassam os 15% e estão e estão concentrados na porção central do litoral até São Sebastião e Ilhabela.

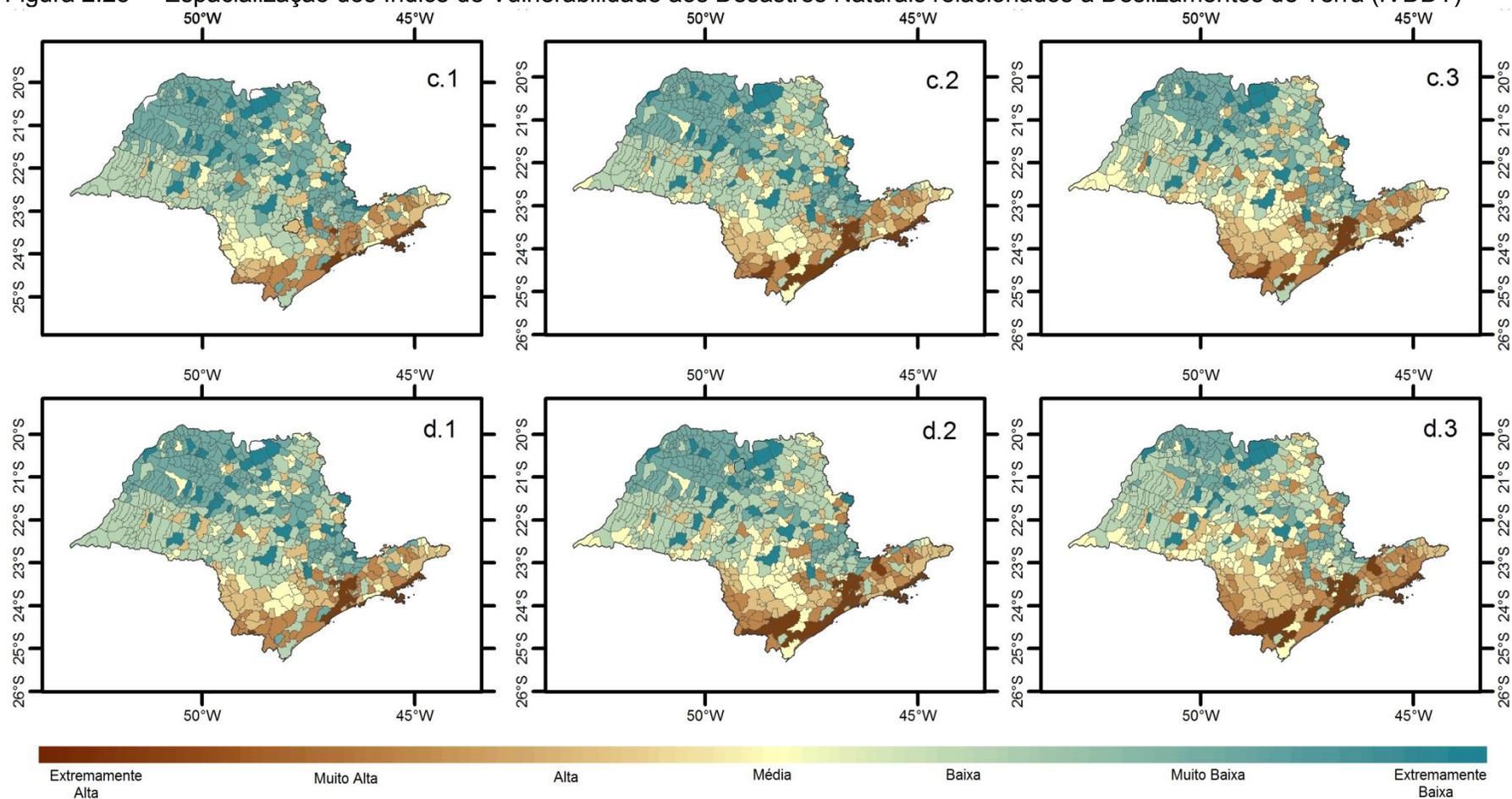
Do ponto de vista climático, o comportamento observado pelos resultados do Eta/HadGEM2-ES sugerem algumas hipótese para explicar a diminuição dos eventos extremos no litoral paulista (com exceção do extremo Litoral Norte) juntamente com a tendência de aumento nas demais regiões do Estado. Este comportamento pode esta vinculado às conclusões de PESQUERO et al. (2009), que utilizou dados de modelagem climática para o clima futuro e constatou que há uma redução da frequência das ZCAS no estado de São Paulo, as quais possuem forte relação com os eventos extremos que ocorrem na região da Serra do Mar.

2.5.5.2. Espacialização do Índice de Vulnerabilidade Considerando o Clima Futuro

Conforme proposto na Equação 2.9, o cálculo do IVDDT para os períodos futuros inclui o incremento do sub-índice Exposição (Figura 2.24) nos resultados encontrados para o *baseline* (Figura 2.19). A espacialização do IVDDT para os períodos futuros é apresentada na Figura 2.25. Apresentam-se, na Tabela 2.4, os valores do IVDDT ao longo de todos os períodos analisados, bem como suas respectivas posições no ranking dos municípios mais vulneráveis, em 20 municípios paulistas. A Figura 2.26 apresenta a evolução temporal do IVDDT para os dois cenários RCP utilizados. Para este caso, foram escolhidos municípios extremamente vulneráveis que apresentam comportamentos diferentes ao longo do tempo.

Ressalta-se que os resultados do IVDDT apresentados na Figura 2.25 estão estreitamente relacionados com os incrementos do sub-índice Exposição, uma vez que os demais sub-índices (Sensibilidade e Capacidade Adaptativa) são considerados constantes para os períodos futuros.

Figura 2.25 – Espacialização dos Índice de Vulnerabilidade aos Desastres Naturais relacionados a Deslizamentos de Terra (IVDDT)



Os mapas em c. representam os resultados utilizando o cenário RCP4.5 e os em d. o cenário RCP8.5 do IPCC AR-4, sendo que 1, 2 e 3 referem-se aos períodos 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100, respectivamente.

Fonte: Autoria própria.

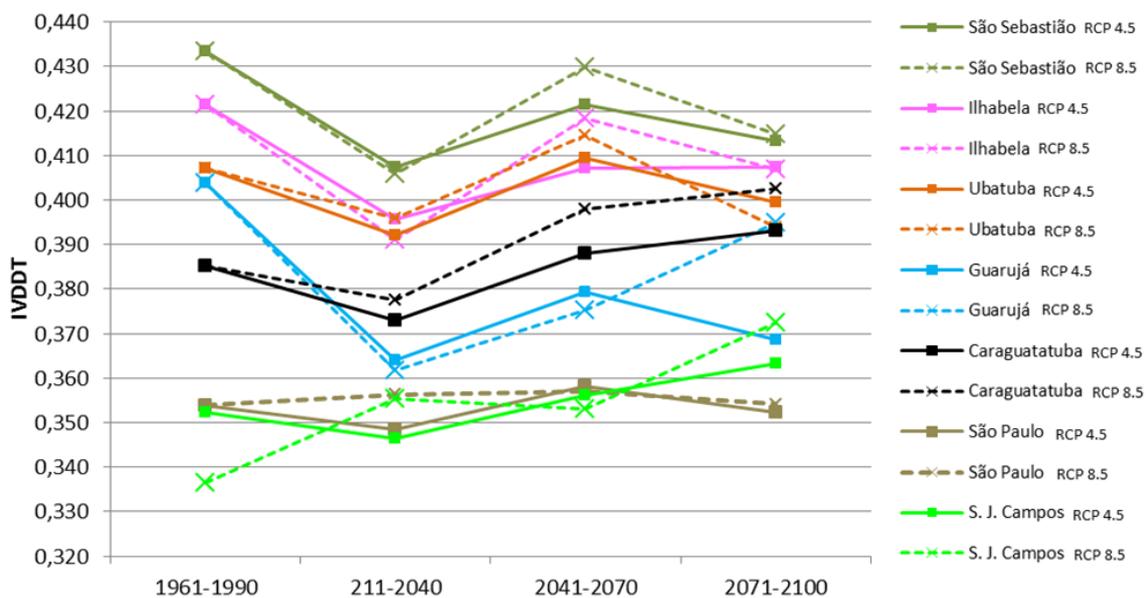
Tabela 2.4 - Resultados do IVDDT ao longo dos períodos analisados, para 20 municípios do estado de São Paulo.

MUNICÍPIO	BASELINE		2011-2040				2041-2070				2071-2100			
	IVDDT	RANKING	RCP 4.5		RCP 8.5		RCP 4.5		RCP 8.5		RCP 4.5		RCP 8.5	
			IVDDT	RANKING	IVDDT	RANKING	IVDDT	RANKING	IVDDT	RANKING	IVDDT	RANKING	IVDDT	RANKING
São Sebastião	0,4334	1	0,4075	1	0,4059	1	0,4215	1	0,4298	1	0,4132	1	0,4149	1
Ilhabela	0,4213	2	0,3958	2	0,3911	3	0,4073	3	0,4184	2	0,4075	2	0,4069	2
Peruíbe	0,4127	3	0,3918	4	0,3759	7	0,4013	4	0,3977	5	0,3869	6	0,384	9
Ubatuba	0,4072	4	0,3921	3	0,396	2	0,4094	2	0,4145	3	0,3995	3	0,3938	7
Guarujá	0,4039	5	0,364	10	0,3618	10	0,3793	9	0,3752	13	0,3686	11	0,395	5
Cubatão	0,4029	6	0,3846	5	0,385	4	0,3919	5	0,3955	7	0,3869	5	0,3957	4
Praia Grande	0,4021	7	0,379	6	0,3791	5	0,3914	6	0,3957	6	0,3806	8	0,3931	8
Itariri	0,3888	8	0,3676	9	0,3584	13	0,3818	8	0,3843	8	0,3846	7	0,3947	6
Itanhaém	0,3878	9	0,3683	8	0,3566	15	0,375	10	0,3817	9	0,3741	10	0,3766	14
Caraguatatuba	0,3852	10	0,3729	7	0,3775	6	0,3881	7	0,398	4	0,393	4	0,4025	3
Pariquera-Açu	0,3815	11	0,3426	21	0,3366	38	0,3698	12	0,3663	16	0,3639	16	0,3717	17
Iguape	0,3748	12	0,3377	30	0,3298	47	0,3578	20	0,3553	29	0,3486	37	0,3651	26
São Vicente	0,3737	13	0,3462	17	0,343	30	0,3592	18	0,3598	22	0,3563	22	0,3628	32
Santana do Parnaíba	0,3718	14	0,3632	11	0,3733	8	0,3697	13	0,3766	12	0,3656	15	0,3767	13
Jacupiranga	0,3678	15	0,3397	26	0,3417	33	0,3649	15	0,3786	11	0,3798	9	0,3829	10
Barueri	0,3610	16	0,3561	12	0,3658	9	0,3669	14	0,3634	19	0,3544	26	0,3571	39
Sete Barras	0,3575	17	0,3403	24	0,3375	37	0,3562	22	0,3573	26	0,35	34	0,3698	18
São Bern. do Campo	0,3571	18	0,351	14	0,3571	14	0,3609	17	0,359	24	0,3536	27	0,3581	38
São Paulo	0,3539	19	0,3485	15	0,3563	16	0,3583	19	0,3569	27	0,3524	31	0,3541	42
Guarulhos	0,3522	20	0,3464	16	0,3591	12	0,3562	21	0,3705	14	0,3632	17	0,3665	23

Valores na cor marrom indicam quando o município está na classe de vulnerabilidade “extremamente alta”.

Fonte: Autoria própria.

Figura 2.26 - Evolução do IVDDT para alguns municípios paulistas.



Fonte: Autoria própria.

Nota-se que mesmo havendo considerável diminuição do sub-índice de Exposição nas cidades litorâneas, em todos os períodos e nos dois cenários RCP, os municípios mais vulneráveis continuam nesta região. Destaca-se o Litoral Norte, com São Sebastião e Ubatuba sendo os dois municípios mais vulneráveis do estado de São Paulo, e Ilhabela e Caraguatatuba entre os dez municípios mais críticos em todos os casos. Esta constatação sugere que mesmo havendo a probabilidade dos perigos hidrológicos diminuir nesta região, as características físico-ambientais agregadas com os padrões de usos e cobertura da terra (sobretudo a urbanização de forma não-planejada em direção as encostas, pressionada pelo crescimento populacional), as vulnerabilidades socioeconômicas e a falta de programas e campanhas voltadas especificamente para o combate e suporte aos desastres, determinam a alta vulnerabilidade aos desastres futuros. Neste aspecto, o fato de ter considerado os sub-índices de Sensibilidade e Capacidade Adaptativa constantes indica que estes são os elementos-chave que devem ser trabalhados para a diminuição da vulnerabilidade e redução de risco de desastres. Para estes casos, sugere-se: melhor planejamento e desenvolvimento urbano, tanto para oferecer melhor infraestrutura e condições

de habitação em áreas planejadas quanto intensificar fiscalização no combate à ocupação de novas áreas de risco (sobretudo as encostas) e implementar ações seguindo as premissas sugeridas pela proposta da EIRD, o quadro de ações de Hyogo e o Marco de Sendai, incluindo o aumento da capacidade de resiliência das cidades.

Há também outras cidades que se destacam como extremamente vulneráveis em praticamente todos os períodos futuros e nos dois cenários RCP, tais como as que estão na RMSP. Para os municípios desta região, houve intensificação do sub-índice Exposição em todos os casos (com a exceção de 2011-2040 no cenário RCP4.5). Para estas localidades, além das estratégias de redução de risco de desastres citadas anteriormente, conforme sugerido na literatura propõe-se que também sejam incluídas ações que considerem o aumento da capacidade adaptativa, principalmente para grupos mais vulneráveis. Neste contexto, alguns autores, como Nobre et al. (2010) sugerem ações de adaptação baseadas em ecossistema (EbA), as quais incluem uma série de instrumentos vinculados à conservação e recuperação de áreas naturais, com os serviços ecossistêmicos apresentando um importante papel tanto na redução do risco aos desastres (por exemplo: estabilização de encostas e diminuição de processos erosivos), quanto a melhor manutenção dos recursos naturais, sobretudo a água. Deve-se levar em consideração que a densidade populacional, assim como todas as demais variáveis não climáticas, foi mantida constante para os períodos futuros.

Não obstante, alguns autores sugerem que a população urbana e, conseqüentemente, a área urbanizada devem continuar aumentando nas próximas décadas, o que caracterizaria aumento direto da vulnerabilidade caso não haja mudanças Nobre et al. (2010), por exemplo, sugerem que a mancha urbana da RMSP pode chegar ao dobro do seu tamanho em 2030, o que caracterizaria 20% da área de expansão em locais suscetíveis (inundações e deslizamentos de terra), sendo que mais de 11% destas novas áreas de expansão estariam em áreas de risco. Desta forma, há uma maior preocupação com o incremento da vulnerabilidade, visto que a tendência é que o vetor

Sensibilidade seria aumentado (maior densidade populacional e maior suscetibilidade aos deslizamentos de terra), havendo também a possibilidade das vulnerabilidades sociais permanecerem iguais ou ainda piorarem, caso haja, por exemplo, o aumento da desigualdade social.

Outra região do estado de São Paulo que merece atenção especial é o Vale do Paraíba, tanto na porção da Serra do Mar quanto na Serra da Mantiqueira, sendo esta última onde são observados os casos mais críticos. Conforme apresentado no item 2.5.1, nesta região há um considerável incremento da Exposição, com um aumento superior a 30% a partir de 2040. Isto acarretou no aumento da vulnerabilidade, ao ponto de caracterizar 9 novos municípios para a classe “muito alta”, além de São José dos Campos e Aparecida alcançarem a classe de vulnerabilidade “extremamente alta” nos dois últimos períodos do cenário RCP 8.5. Estas cidades apresentam uma configuração espacial de usos da terra e perfil socioeconômico diferente da RMSP, mas que também tende a continuar crescendo nas próximas décadas. Isto poderia favorecer a ocupação de novas áreas de risco, além de intensificar os processos de degradação ambiental e de desestabilização das encostas, se não houver o devido planejamento urbano e gestão do risco aos desastres.

Estas três regiões supracitadas se caracterizam como os *hotspots* de vulnerabilidade dos desastres relacionados aos deslizamentos de terra. Neste contexto, o Marco de Sendai (SFDRR, 2015) sugere para casos como estes que sejam implementados sistemas de monitoramento e alerta como uma das formas mais eficazes na redução do risco aos desastres, principalmente quando associados mecanismos de comunicação de emergência de risco aos desastres, tecnologias sociais e sistemas de telecomunicações voltados para o monitoramento dos diferentes perigos naturais; desenvolvimento de tais sistemas através de um processo participativo e adaptá-los às necessidades dos usuários, incluindo os requisitos sociais e culturais; promoção da aplicação de equipamentos de alerta precoce e instalações simples que sejam de baixo custo; e ampliação dos canais para o envio de alertas de desastres naturais.

As demais porções do estado de São Paulo apresentam uma tendência de aumento dos extremos de precipitação, identificado pelo incremento positivo do sub-índice de Exposição (ver item 2.5.5.1). Entretanto, a classe de vulnerabilidade da grande maioria dos municípios permanece inalterada ou, quando se tornam mais vulneráveis, não configuram uma situação crítica como os demais casos citados anteriormente. De qualquer forma, os municípios destas porções que estão classificados na classe “alta” e os poucos que se encontram na classe “muito alta”, devem se focar nos fatores indutores dos deslizamentos de terra, uma vez que se localizam em áreas pouco suscetíveis a estes processos. Ou seja, na maioria dos casos, os deslizamentos nestas regiões são deflagrados em taludes de corte e aterro, sobretudo próximo às estradas, além daqueles que são induzidos pelos processos erosivos, que são muito comuns em grande parte da porção Central do Estado.

Uma observação pertinente pode ser feita a respeito da diferença entre os cenários RCP 4.5 e 8.5. Normalmente, espera-se que o cenário RCP 8.5 seja mais “pessimista”, sugerindo as piores condições climáticas devido a um maior aquecimento da superfície terrestre. Realmente este é o padrão predominante observado na grande maioria dos municípios paulistas; no entanto, para alguns casos o resultado do cenário RCP 4.5 indica um incremento do sub-índice exposição e, conseqüentemente, da vulnerabilidade. Na Figura 2.26 ilustra-se um exemplo de ocorrência deste tipo em Ubatuba, em que o cenário RCP 4.5, no período de 2071-2100, apresenta maior vulnerabilidade que o cenário RCP 8.5. Em outros casos, os resultados sugerem que em ambos os cenários o incremento do sub-índice Exposição é o mesmo, caracterizando em IVDDT de valores praticamente iguais, como o caso de Ilhabela ao final do século ou São Paulo nos dois últimos períodos. Configurações deste tipo não representam, necessariamente, que o clima se comporta de uma mesma maneira, mas que a conjugação das anomalias dos índices de extremos (Rx1day, Rx5day, R95p e CWD) representam situações de mesmo potencial de impacto.

2.6. Considerações Finais

De modo geral, a aplicação do IVDDT permitiu avaliar a vulnerabilidade de forma integrada e compreender quais são os principais fatores que a determinam. A composição do IVDDT contemplando diferentes sub-índices permitiu também a compreensão de como as diferentes dimensões da vulnerabilidade podem se relacionar, explicitando, desta forma, quais são as características que podem ser melhoradas ou que ações devem ser tomadas para cada município diminuir os impactos futuros relacionados aos deslizamentos de terra no estado de São Paulo.

Constatou-se, também, que ainda existem muitas lacunas que devem ser preenchidas para que seja possível estruturar um índice ainda mais representativo da vulnerabilidade. A maioria destas lacunas está relacionada com os bancos de dados disponíveis para compor tal análise, sendo que o principal fator limitante refere-se aos registros oficiais de desastres e todos os parâmetros que caracterizam tal ocorrência (ex: severidade do evento hidrometeorológico, número de pessoas afetadas, número de óbitos, quantificação dos prejuízos financeiros, etc.). Neste contexto, constatou-se que existem diferentes bancos de dados para o estado de São Paulo, tais como o do CEPED (2013), utilizado como referência neste trabalho, e o do Instituto Geológico (Brollo e Tominaga, 2012), por exemplo, mas que não refletem necessariamente as mesmas informações, tampouco consideram as mesmas escalas temporal e espacial. Além disso, a série histórica destes registros de desastres é mais consistente após o ano 2000, sendo que somente após 2010 houve uma intensificação da sistematização destes dados. É essencial que sejam construídos e disponibilizados novos bancos de dados padronizados futuramente, uma vez que estes são considerados essenciais para estudos relacionados à vulnerabilidade, adaptação e risco aos desastres.

Devido a esta limitação, a estrutura do IVDDT foi focada em refletir os principais contrastes de vulnerabilidade dentro do estado de São Paulo, objetivo este que alcançado, destacando-se a identificação dos *hotspots* de

vulnerabilidade (municípios mais críticos). Entretanto, sabe-se que outras configurações intermediárias da vulnerabilidade devem ser compreendidas e avaliadas, pois são nestas condições que estão a maioria dos municípios do estado de São Paulo e que, portanto, podem representar uma parcela considerável dos impactos potenciais relacionados aos deslizamentos de terra. Além disto, a aplicação do IVDDT a partir dos dados de modelagem climática nos períodos futuros sugere que há maior probabilidade de novos desastres serem intensificados nestas mesmas localidades, que são regiões não tão vulneráveis no período presente (por exemplo, porção Central do estado de São Paulo). Isto fortalece ainda mais o argumento de que dados de registros de desastres sejam coletados com maior precisão e representatividade, além de serem disponibilizados publicamente.

Do ponto de vista climático, o modelo Eta-20km HadGEM ES conseguiu refletir os padrões espaciais dos eventos extremos de precipitação com considerável precisão. Embora não se tenha uma base de dados específica para validar este tipo de resultado, a comparação com alguns estudos encontrados na literatura permitiu verificar tal representatividade, a qual também se escora no estudo elaborado por Chou et al. (2014), específico para validar a representação do modelo em toda a América do Sul. Como o estudo apresentado neste capítulo foi um primeiro esforço abordando esta temática de forma espaço-temporal, a utilização de apenas um único modelo climático foi oportuna. Entretanto, as recomendações postuladas na literatura internacional, sobretudo os relatórios do IPCC, são de promover estas análises utilizando diferentes modelos, regionais e globais, além de explorar melhor os diferentes cenários possíveis (tais como o RCP 6.0 e 3-PD). Diferentes resultados obtidos a partir de diferentes simulações do clima serão capazes de evidenciar com maior precisão e confiabilidade os efeitos das mudanças climáticas e seus impactos. Tratando-se de eventos extremos de precipitação, ressalta-se também a necessidade de uma base de dados histórica mais rica e ampla para a área de estudo, a qual permita uma melhor identificação dos vieses dos modelos utilizados. Tal conhecimento permitiria agregar as incertezas das simulações do clima futuro nas análises de vulnerabilidade, permitindo que as estratégias

de adaptação e redução de risco sejam feitas de forma mais precisa, evitando, assim, medidas que causem arrependimento no futuro (denominadas também de “medidas de má adaptação”).

Os resultados para o clima futuro sugerem que em praticamente todo o litoral paulista haverá uma diminuição dos eventos extremos de precipitação (perigos hidrometeorológicos). As anomalias negativas do sub-índice de Exposição e dos respectivos índices de extremos que o compõem (Rx1Day, Rx5Day, R95p e CWD) foram observadas desde o período referente 2011-2040 e se estende até o final do século XXI, nos dois cenários RCPs utilizados nesta tese. Caraguatatuba e Ubatuba foram as únicas cidades do litoral paulista com incrementos positivos no período de 2041-2070, tanto para os cenários RCP4.5 quanto RCP8.5. Caraguatatuba em particular se destaca ainda mais por ser o único município em que o incremento do IVDDT se estende também por 2071-2100. Porém, esta é uma região onde as escarpas da Serra do Mar estão muito próximas ao oceano, característica esta que é difícil de ser representada no modelo de superfície acoplado ao modelo Eta/HadGEM com a escala de 20km. Desta forma, recomenda-se que em trabalhos futuros sejam utilizados modelos com escala mais precisas (5km, por exemplo) em regiões como esta, as quais apresentam mudanças bruscas do relevo que nem sempre conseguem ser representadas.

Mesmo com o padrão predominante de anomalias negativas, o Litoral Norte paulista foi considerado a região mais vulnerável do estado de São Paulo, tanto para o período presente, quanto para os períodos futuros. Ao verificar a posição dos municípios desta região no ranking de IVDDT ao longo dos períodos, constatou-se que em todos os casos, incluindo o período presente, São Sebastião foi considerado o município mais vulnerável do Estado, ocupando sempre a primeira posição. Ilhabela e Ubatuba alternaram entre a segunda e a terceira posição durante os períodos futuros e os cenários RCP. Caraguatatuba se mantém entre a quinta e oitava posição, estando, na média, em sétimo lugar dentre os municípios mais vulneráveis. Levando em consideração a alta incerteza das simulações do clima para esta região da

Serra do Mar, onde há grande mudança da cota altimétrica nem sempre captada com precisão pelo modelo Eta20km-HadGEM2-ES, há a possibilidade desta tendência negativa ser diferente para modelos com melhor resolução. Caso haja um incremento positivo dos eventos extremos, estes municípios podem ser amplamente impactados no futuro, podendo até mesmo configurar novos cenários de risco (como corridas de detritos, não avaliadas nesta tese) que precisariam ser estudados minuciosamente devido ao seu grande potencial de destruição. Para tal, é proposto que análises mais específicas sejam feitas para esta região, afim de diminuir as incertezas sob toda a análise de vulnerabilidade. Neste escopo, nos Capítulos 3 e 4 os esforços foram direcionados justamente para estes municípios, com o intuito de melhor compreender como estão distribuídas outras nuances da vulnerabilidade que são imperceptíveis na escala adotada neste Capítulo.

Para todo o restante do estado de São Paulo, os resultados das simulações do clima futuro sugerem que haverá um incremento positivo dos eventos extremos, sendo que algumas regiões merecem especial atenção, tais como a RMSP e o Vale do Paraíba. Nestes dois casos a preocupação se dá devido ao fato de serem regiões com um potencial econômico elevado, indicando que o crescimento populacional e a expansão urbana se intensificarão no futuro. Esta tendência, juntamente com as ações antrópicas que configuram a degradação ambiental e escassez de áreas apropriadas para a ocupação humana com devida infraestrutura, caracterizam a possibilidade de novas áreas de risco serem estabelecidas. Entretanto, estas hipóteses não foram consideradas no método aplicado ao IVDDT, pois os sub-índice de Sensibilidade e Capacidade Adaptativa não foram modelados para o tempo futuro. Caso houvesse a possibilidade destes cenários serem implementados, a vulnerabilidade destas duas regiões seria consideravelmente maior que aquelas apresentadas. Esta análise, mesmo que empírica, permite inferir que os municípios destas duas regiões teriam a vulnerabilidade exacerbada nas próximas décadas, necessitando de estudos complementares para identificar as melhores estratégias de adaptação frente aos novos impactos causados pelas mudanças climáticas.

Por fim, considera-se o IVDDT como uma boa ferramenta para contribuir tanto nas análises da vulnerabilidade sob o contexto das mudanças climáticas, quanto para subsidiar as iniciativas relacionadas à gestão do risco aos desastres e à adaptação. A construção dos sub-índices permitiu avaliar a vulnerabilidade sob diferentes aspectos, incluindo a importância de programas, campanhas e políticas públicas voltadas para a redução do risco aos desastres. Neste sentido, a utilização dos dados dos municípios que aderiram à Campanha “Construindo Cidades Resilientes” foi a única base de dados que refletiu o aspecto institucional, sendo que a metodologia apresentada permite que facilmente sejam inseridos dados adicionais em etapas futuras. Informações como a existência dos Planos Preventivos da Defesa Civil (PPDC), Planos Municipais de Redução de Risco (PMRR), municípios que possuem sistema de monitoramento e alerta integrados à Defesa Civil, entre outros, são de interesse para refletir com maior precisão o papel institucional na configuração da vulnerabilidade aos desastres. De qualquer forma, a estrutura utilizada evidenciou que ações desta natureza representam um papel importantíssimo na redução da vulnerabilidade, caracterizando-se como primordiais para diminuir os impactos relacionados aos eventos hidrometeorológicos, sejam eles intensificados ou não pelas mudanças climáticas. Desta forma, os resultados obtidos podem ser utilizados tanto pela comunidade científica que trabalha com esta temática, embora ainda incipiente no Brasil; quanto para os tomadores de decisão, servindo de base para o planejamento de estratégias e ações futuras, incluindo os investimentos em novos estudos que permitam preencher as lacunas identificadas durante este trabalho.

3. AVALIAÇÃO DOS EXTREMOS DE CHUVA POTENCIALMENTE DEFLAGRADORES DE DESLIZAMENTOS DE TERRA. UM ESTUDO-PILOTO EM CARAGUATATUBA-SP, CONSIDERANDO O CLIMA PRESENTE E FUTURO.

O aumento da ocorrência de eventos extremos hidrometeorológicos nas últimas décadas tem ganhado notoriedade pelos impactos causados, muitas vezes relacionados a desastres naturais que envolvem os deslizamentos de terra. Para o clima presente, já é possível observar o aumento dos eventos severos de precipitação, sobretudo na amplitude destes fenômenos, em regiões tropicais, como o sudeste brasileiro (MARENGO et. al, 2007). Para o clima futuro, estudos publicados recentemente apresentam resultados que sugerem esta mesma tendência, que continuará a aumentar até o fim do século XXI, para as mesmas regiões (IPCC, 2012). Estas evidências também se mostraram presentes no Capítulo 2 desta tese, o qual sugere o aumento da vulnerabilidade aos desastres de deslizamentos de terra até o final do século XXI em alguns municípios do estado de São Paulo, sendo que vários destes já são muito vulneráveis no clima atual.

Embora o IPCC tenha elencado alguns índices para avaliar especificamente os eventos extremos (como aqueles apresentados no Capítulo 2), a literatura relacionada sugere que existem índices/coeficientes específicos que podem ser mais precisos para avaliar a relação entre a intensidade de precipitação e a deflagração de deslizamentos de terra. Tais índices são entendidos como *limiares críticos de precipitação* que refletem uma grande probabilidade de ocorrência de deslizamentos de terra quando são alcançados. Estes limiares são variáveis no tempo e espaço, pois dependem diretamente das características físico-ambientais-climatológicas de cada região de interesse. Por este motivo, tais índices não foram utilizados no Capítulo 2 desta tese, pois demandaria um esforço considerável sobre todo o território do estado de São Paulo, sendo que para muitas localidades não há conhecimento prévio de quais são estes limiares críticos de precipitação.

Normalmente, tais limiares críticos de precipitação são utilizados na rotina de sistemas de monitoramento e alerta de desastres e para nortear ações da Defesa Civil, pois permitem uma avaliação rápida e prática dos impactos potenciais durante ou previamente a um evento extremo. No caso deste trabalho, o intuito é entender a distribuição destes eventos ao longo do passado e avaliar como as mudanças climáticas podem aumentar ou diminuir a quantidade e intensidade destes eventos potencialmente deflagradores de deslizamentos de terra no futuro.

Neste contexto, escolheu-se o município de Caraguatatuba, localizado em uma das regiões mais vulneráveis de São Paulo (ver Capítulo 2), para realizar este estudo piloto sobre a evolução do número de eventos extremos potencialmente deflagradores de movimentos de massa no clima futuro.

3.1. Objetivo

O objetivo deste Capítulo é avaliar o impacto das mudanças climáticas no número de eventos extremos de precipitação, especificamente aqueles potencialmente deflagradores de movimentos de massa na região da Serra do Mar, particularmente no município de Caraguatatuba no litoral norte paulista. Para caracterizar estes eventos extremos, será utilizado um limiar crítico de precipitação acumulada em 72h como referência (TATIZANA et al., 1987). Tem-se como objetivo específico a comparação dos resultados encontrados por este método com aqueles apresentados no Capítulo 2, especificamente os resultados agregados para o município de Caraguatatuba.

3.2. Referencial Teórico

3.2.1. Relação entre eventos pluviométricos e mecanismos de Instabilidade no interior do solo

No que se refere à influência da água na estabilidade das encostas, Viera et al. (2001) salienta que estudos indicam que a deflagração de deslizamentos depende diretamente do comportamento hidrológico dos solos durante os eventos pluviométricos. Dentre as diversas formas de ruptura, a mais amplamente discutida é a provocada pelo rápido aumento de pressões positivas durante intensos e/ou duradouros eventos pluviométricos. Neste caso, o aumento de poro-pressão é causado pelo fluxo d'água que se desenvolve aproximadamente em paralelo à encosta, decorrente da ocorrência de um horizonte menos permeável (que pode ser também uma rocha) sob uma camada passível de instabilização. Tal mecanismo pode ser condicionado por diferentes fatores, como a presença de descontinuidades hidráulicas nos mantos da alteração, que podem ser identificadas através da medição do coeficiente de condutividade hidráulica do solo em diferentes profundidades.

As condições de tensão efetiva no talude variam como resultado das variações anuais e sazonais de poro-pressão. Durante períodos de elevada poro-pressão, com a estação chuvosa, por exemplo, as tensões efetivas são reduzidas e ficam mais próximas das condições de estado limite, enquanto nos períodos de estiagem acontece a situação contrária. Enquanto na condição de uma quase ruptura, são esperadas altas taxas de deformações lenta do solo, também chamadas de *creep*. Esta situação de *creep* antecede a ruptura da massa de solo e, dependendo da condição de drenagem e coesão do solo, pode se estender por um longo período, sendo este um indicativo da instabilidade da encosta. Quando as tensões efetivas estão no estado limite, a ruptura se inicia localmente. Portanto, pode-se dizer que as poropressões

elevadas são o fator principal determinante da ocorrência de escorregamentos (CARREGÃ; BALZAN, 1997).

Tendo em vista a possibilidade da evolução dos fenômenos previamente descritos, eventos de precipitação de alta intensidade que ocorrem repetidamente em curto período de tempo (horas, dias e até mesmo semanas) são considerados aqueles com maior potencial de deflagração de deslizamentos de terra, particularmente do tipo planar, sobretudo quando esta associação se dá solos bem drenados. Segundo Deere e Patton (1971), a alta frequência de escorregamentos, característica de algumas regiões tropicais como a Serra do Mar, tem sido notada nos períodos de chuvas excepcionalmente altas e de longa duração, especificamente durante o verão. Neste contexto, os colúvios (solos onde ocorre a grande maioria dos deslizamentos na Serra do Mar) merecem atenção especial, pois são frequentemente mais permeáveis do que os horizontes de solo subjacentes, formando níveis d'água empoleirados. Estes níveis d'água geram forças de percolação instabilizantes, com direção aproximadamente paralela à superfície do talude. Durante períodos de alta pluviosidade, os dois níveis freáticos (superficial e subsuperficial), provocam o rastejo (pequenas deformações) de finas camadas de colúvios. Zonas de condutividade hidráulica distintas podem ocorrer dentro das camadas de colúvio ou entre as mesmas. O tamanho dos materiais, assim como a condutividade hidráulica, tende a diminuir a jusante do talude e, por este motivo, é comum que a água possa mais facilmente entrar a montante do talude do que sair a jusante do mesmo, provocando altas poropressões. Devido à combinação de altos níveis piezométricos com uma ou mais camadas de solo rico em argilas, um talude de solo coluvionar pode facilmente romper (DEERE; PATTON, 1971).

3.2.2. Limiares críticos de precipitação

Limiares de precipitação empíricos são definidos pelo estudo de eventos de chuvas que resultaram em deslizamentos de terra. Os limiares normalmente são obtidos traçando linhas que representam um limite inferior para as condições de chuva que resultaram em deslizamentos de terra, plotados em coordenadas cartesianas, semi-logarítmicas, ou logarítmicas. Os limiares são extraídos visualmente tendo como base estas curvas de relação entre chuvas e ocorrências, normalmente, sem qualquer critério rigoroso do ponto de vista matemático, estatístico ou mesmo físico. Quando as informações sobre as condições de precipitação que não resultaram em movimentos de massa está disponível (por exemplo, ONODERA et al., 1974; LUMB, 1975; TATIZANA et al., 1987; JIBSON, 1989; COROMINAS; MOYA, 1999; MARCHI et al., 2002; ZÊZERE; RODRIQUEZ, 2002; PEDROZZI, 2004; GIANNECCHINI, 2005), os limiares são definidos como os valores limítrofes que separam as condições de precipitação que resultam e não resultam em instabilidade das encostas. O número de ocorrências de processos deflagrados pelos eventos chuvosos (por exemplo, um evento isolado x eventos generalizados) também pode ser considerado para a construção dos limiares.

A revisão da literatura (por exemplo, WIECZOREK; GLADE, 2005) revela que não há um conjunto único de medições que caracterize as condições de chuvas necessárias para estabelecer a probabilidade (ou não probabilidade) de deflagrar a movimentação de encostas. Guzetti et al. (2007) apresenta ao menos 25 estudos diferentes que avaliam empiricamente os limiares de precipitação e sugerem que existem diferentes variáveis climáticas (tais como as condições prévias a um evento, acumulados por períodos, entre outros) para representa-los, além de todos os fatores relacionados ao cenário físico, litológico e também antrópico para sua determinação. Além disso, os autores indicam que há inconsistências linguísticas e desacordo sobre as variáveis utilizadas nestes estudos, tornando difícil a comparação entre os limiares.

O ponto-chave para a construção de modelos empíricos para prever a ocorrência de deslizamentos de terra induzidos por precipitação é a definição da intensidade de precipitação. A intensidade de precipitação é a quantidade de chuva acumulada em um período, ou a taxa de precipitação, geralmente medido em milímetros por hora. Dependendo da duração deste período de observação, a intensidade de precipitação pode representar uma medida “instantânea” da taxa de precipitação ou um valor médio expresso por hora (intensidade horária), por dia (intensidade diária), ou períodos mais longos (ex: a cada 48 h ou 72 h). Para períodos longos, a intensidade de chuva representa um valor "médio" que subestima a taxa de precipitação máxima (pico) que ocorre durante o período de observação. Desta forma, a intensidade da precipitação medida ao longo de períodos curtos e longos têm significados físicos diferentes (GUZETTI et al. 2007). Isto complica a definição de modelos que se baseiam em um intervalo de duração da precipitação com base na intensidade da chuva, pois esta intensidade é variável durante um evento e é difícil de ser mensurada. Assim, a maioria dos valores de intensidade utilizados na literatura são taxas médias de precipitação ao longo de um período de tempo, e não intensidades de pico.

Os limiares empíricos podem ser definidos como limiares globais, regionais ou locais. Um limiar global tenta estabelecer um valor mínimo geral ("universal") abaixo do qual os deslizamentos não ocorrem independentemente das características morfológicas, das condições locais de uso do solo, da litologia e do padrão de precipitação local/regional e sua série histórica. Limiares globais foram propostos em diversos estudos conceituados, tais como Caine (1980), Innes (1983), Jibson (1989), Clarizia et al. (1996), e Crosta Frattini (2001), e Cannon e Gartner (2005).

Limiares regionais são definidos para as áreas que se estendem de alguns até vários milhares de quilômetros quadrados que abranjam um domínio climático-meteorológico e características fisiográficas semelhantes. São potencialmente adequados para sistemas de alerta baseados em dados quantitativos de previsão de chuva, estimativas ou dados observados.

Limiars locais consideraram, explícita ou implicitamente, o regime climático e configuração geomorfológica local, e são aplicáveis a deslizamentos individuais ou grupo de deslizamentos de terra em áreas que se estendem de poucos a algumas centenas de quilômetros quadrados. Limiars regionais e locais executam razoavelmente bem na área onde eles foram desenvolvidos, mas não podem ser facilmente exportados para áreas vizinhas (CRÓSTA, 1989). Por outro lado, limiars globais são relevantes onde limiars locais ou regionais não são conhecidos, mas podem resultar em numerosos eventos falsos positivos, ou seja, podem ser previstos deslizamentos de terra que, de fato, não ocorram.

3.3. Área De Estudo

A área de estudo corresponde ao município de Caraguatatuba-SP, localizado no litoral norte do estado de São Paulo. A cidade foi escolhida por apresentar características representativas da região da Serra Mar, tais como vegetação, relevo acidentado, presença de obras com importância econômica, aglomerados urbanos em áreas de risco, com histórico de ocorrências de desastres naturais deflagrados por extremos de precipitação (KANJL et al., 2008). Além destes fatores, os Capítulos 2 e 3 desta tese indicam a alta vulnerabilidade e suscetibilidade, respectivamente, do município no que se refere aos desastres relacionados aos deslizamentos de terra.

A região de Caraguatatuba é caracterizada pelo grande potencial turístico e por problemas socioambientais relacionados à especulação imobiliária e parcelamento irregular de solo (MARANDOLA JR. et al., 2013; SÃO PAULO, 2005). Segundo o IBGE (2013), a população de Caraguatatuba aumentou de 52.878 para 100.840 habitantes de 1991 a 2010, evidenciando o crescimento expressivo da região (RUIZ JUNIOR; OLIVEIRA, 2013). O dado mais atual do IBGE indica 108.898 habitantes para o ano de 2015, sendo que a população flutuante durante a estação do verão é equivalente ao dobro deste número

(INSTITUTO PÓLIS, 2012). Por muitas vezes a expansão urbana avança em direção as encostas íngremes da Serra do Mar, estabelecendo áreas de risco de deslizamentos de terra.

A cidade está localizada entre três compartimentos geomorfológicos: a borda do Planalto Atlântico, a Serra do Mar e a Planície Costeira (SOUZA, 2005). A Mata Atlântica constitui a cobertura vegetal predominante no Planalto Atlântico e também na Serra do Mar, principalmente nas encostas de alta declividade. Na região costeira, por sua vez, também são encontradas as coberturas vegetais de planície, entre elas, a restinga, o manguezal e a várzea (IF, 2008).

De acordo com a classificação climática de Köepen, a região possui um clima tropical chuvoso, com períodos mais secos durante o inverno e chuvas mais intensas durante o verão (SANT'ANNA NETO, 1993). As temperaturas mínima e máxima do ar variam entre 18,2°C e 31,6°C, com a média em 24,9°C (CEPAGRI, 2013).

3.4. Materiais e Métodos

3.4.1. Dados Observados

Foram utilizados dados da série histórica de 30 anos (1961-1990), previamente submetidos a controle de qualidade (dados consistidos), referentes à estação E2-046A, gerenciada pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE). A estação situa-se nas coordenadas 23°38'00"S e 45°26'00"W da vertente atlântica, localizada a 20m de altitude (Fonte: <http://www.sigrh.sp.gov.br/cgi-bin/bdhm.exe/plu>). Santos e Galvani (2012) verificaram que, na série estudada entre 1943 e 2004 da Estação E2-046, o ano mais chuvoso foi 1976, com 4080 mm, e o menos chuvoso foi o de 1984, com 1.066 mm.

Caraguatatuba conta também com outras estações pluviométricas, tais como a E2-042 e E2-043. O critério para a escolha da estação E2-046 deve-se ao fato

dela possuir a maior quantidade de dados pluviométricos disponíveis na série histórica consistida, com 24.603 valores diários entre os anos de 1943 e 2010. Além disto, as duas outras estações estão localizadas próximas ou sob as encostas naturais da Serra do Mar, ou seja, distantes da área urbana que é onde podem ocorrer os desastres de interesse deste trabalho. Por estarem nestas localidades, as duas outras estações sofrem maiores influências das chuvas orográficas, que correspondem a uma tipologia de chuva difícil de ser representada pelo modelo climático com a resolução de 40 km e, portanto, poderiam interferir na qualidade da análise que relaciona os dados históricos com as simulações climáticas.

3.4.2. Simulações numéricas

As simulações regionais foram resultado da aplicação da técnica de *downscaling* feito com o Eta-CPTEC 40km. Dentre as diversas variáveis fornecidas pelo modelo, a única variável de interesse utilizada neste Capítulo foi a precipitação, objetivando comparar a estatística dos valores observados com os de simulação, conforme está apresentado nos próximos itens.

As condições iniciais e de contorno foram dadas pelo modelo global HadCM3 utilizando o cenário A1B do SRES (IPCC, 2007) para as emissões de dióxido de carbono (MARENGO et al., 2012; CHOU et al., 2012). As condições iniciais e de contorno utilizadas foram obtidas do conjunto de membros do HadCM3, produzidos a partir de perturbações dos parâmetros da física do MGCA HadCM3, numa técnica conhecida como "PPE" (Perturbed Physics ensemble). Dentre os diferentes membros, foram escolhidos quatro, sendo que a sensibilidade climática dos membros varia entre máxima ("*High*"), mínima ("*Low*"), média ("*Mid*") e sem perturbação ("Controle"). Além destes quatro membros, calculou-se também o ensemble, que é a média dos valores de precipitação diária resultante dos quatro membros. As simulações

compreenderam o tempo presente (1961-1990) e para 3 períodos no futuro: 2011-2040; 2041-2070; e 2071-2098. O modelo global HadCM3.

As condições de contorno laterais usadas para forçar o modelo regional Eta-CPTEC são provenientes do aninhamento com o modelo global HadCM3, fornecido pelo UK Met Office Hadley Centre (GORDON et al., 2000; Collins et al., 2001). A atmosfera do modelo HadCM3 tem uma resolução de 2,5° x 3,75° (latitude-longitude), com 19 níveis verticais (POPE et al., 2000). O modelo HadCM3 foi escolhido pela equipe do CPTEC por apresentado desempenho razoável na simulação do clima na Amazônia, bem como na representação de teleconexões importantes com sistemas de larga escala da variabilidade climática no Pacífico tropical e Atlântico, quando comparado com outros modelos climáticos atuais (e.g., GEDNEY et al., 2000; LI et al. 2006; GOOD et al., 2008), embora sempre existam alguns vieses (HARRIS et al., 2008).

As incertezas presentes em qualquer modelo de simulação podem ser exploradas através de experimentos numéricos baseados em conjuntos de simulações, chamados de *ensemble*. Dentre os diferentes métodos possíveis para o *ensemble*, o HadCM3 utilizou a abordagem conhecida como “*ensemble* por perturbação física” (PPE, do inglês *perturbed physics ensemble*) (MURPHY et al., 2004; STAINFORTH et al., 2005; COLLINS et al. 2006b, 2010). Esta abordagem procura quantificar a incerteza da modelagem, tanto na simulação do clima presente quanto em projeções climáticas, e dependem da formulação matemática utilizada para representar os processos do sistema terrestre presentes no modelo.

Através da elicitación feita por diferentes especialistas, foram identificados parâmetros-chave para avaliar as incertezas, principalmente aqueles relacionados à atmosfera, mas também a processos de superfície continental, onde também foram definidos limites plausíveis para variação dos mesmos. Estes parâmetros foram modificados dentro destes limites para formar um grande conjunto com mais de 300 combinações, que foi executado

considerando um “*slab ocean*”¹ computacionalmente eficiente. Deste grande conjunto, um subconjunto de 16 variantes de modelo foi escolhido de acordo com o seu desempenho na simulação do clima atual, cada um com uma combinação diferente de parametrizações (MURPHY et al., 2007). Juntamente com o modelo HadCM3 “padrão”, os 16 variantes do modelo foram executados em modo transiente e totalmente acoplado, forçados com o cenário SRES A1B (NAKICENOVIC et al., 2000) de emissões e concentração de CO₂ para os períodos futuros até o fim do século 21. Embora cada membro do conjunto seja forçado com as mesmas concentrações de CO₂, o efeito das diferentes combinações de configurações das parametrizações altera a sensibilidade climática da simulação. A faixa de variação do aumento da temperatura média global até o final do século 21 resultante das variações de parametrizações deste modelo é de magnitude semelhante àquela encontrada pelo *ensemble* feito a partir de multi-modelos e não por variação de parametrizações apresentado por COLLINS et al. (2006b).

3.4.2.1. O modelo regional Eta-CPTEC

O modelo regional Eta (MESINGER et al., 1988; BLACK, 1994; JANJIC, 1994) é um modelo em ponto de grade baseado na coordenada η (MESINGER, 1984), que é definida por:

$$\eta = \left[\frac{(p - p_t)}{(p_s - p_t)} \right] \times \left[\frac{(p_{ref}(Z_s) - p_t)}{(p_{ref}(0) - p_t)} \right] \quad (4.1)$$

¹ “*Slab ocean*” é o termo utilizado para se referir a um modelo simples dos processos oceânicos que descreve o oceano como uma camada inerte de água com profundidade fixa, tipicamente entre 50 e 100 metros. Mais detalhes podem ser encontrados em Randall et al. (2007).

- onde p é a pressão atmosférica. Os índices S e T se referem à superfície e ao topo da atmosfera, respectivamente. O índice r se refere ao valor da pressão de uma atmosfera de referência; Z_s é a altitude da superfície. A topografia é resolvida na forma de degraus discretos. A coordenada se baseia em pressão, o que a torna aproximadamente horizontal. Esta característica da coordenada Eta reduz consideravelmente os problemas nos cálculos das derivadas horizontais próxima de região de montanha, comuns na coordenada sigma, e conseqüentemente os problemas relacionados com o termo importante da força do gradiente horizontal de pressão (MESINGER, 1984).

O topo do modelo está em 25 hPa. O esquema de integração é o particionamento explícito ('split-explicit'). Os termos de ajuste devido às ondas de gravidade são tratados pelo esquema 'forward-backward', e os termos de advecção pelo 'Euler-backward'. As variáveis prognósticas são: temperatura, umidade, vento horizontal, pressão à superfície, energia cinética turbulenta, umidade e temperatura do solo e hidrometeoros das nuvens.

As parametrizações incluídas no modelo são: troca vertical turbulenta pelo esquema de Mellor-Yamada 2.5 (1982); radiação de onda curta, segundo o esquema de Lacis e Hansen (1974), e a radiação de onda longa pelo esquema de Fels e Schwarzkopf (1975); as mudanças de temperatura na água no solo segue o esquema de Chen (1997); e as chuvas convectivas são produzidas pelo esquema Betts-Miller-Janjic (JANJIC, 1994). O modelo possui também esquema de microfísica de nuvens implementado (ZHAO et al., 1997). O domínio do modelo abrange toda América do Sul.

Para utilizar os dados das simulações do modelo climático global HadCM3 para fazer a regionalização ("downscaling") para o domínio específico com a ajuda do modelo Eta, há uma "interface" que adapta os dados do Hadley Center de maneira adequada. O modelo Eta utiliza dados de entrada de vento zonal e meridional, altura da superfície isobárica, pressão à superfície e umidade específica.

3.4.2.2. Configuração do modelo

O modelo Eta tem sido usado como o modelo operacional de previsão meteorológica, de tempo e clima e sazonal no INPE (CHOU et al. 2005) há alguns anos. A versão de clima sazonal do modelo Eta foi adaptada para executar integrações de prazos decenais, com o foco no estudo de cenários de mudanças climáticas relacionadas com diferentes níveis de concentração de CO₂ atmosférico.

Para os estudos do clima presente, a concentração de CO₂ foi ajustada para um valor constante de 330 ppm. O modelo Eta foi configurado com um calendário de 360 dias por ano, a fim de seguir o calendário do modelo HadCM3. As condições de contorno que alimentam o modelo Eta foram fornecidas por cada membro do modelo HadCM3. A cada passo de 6 h as condições de contorno são inseridas na rotina do Eta e, para cada intervalo de de 6 h, há uma atualização linear ao longo das bordas do modelo (CHOU et al., 2012).

Os valores de temperatura da superfície do mar (TSM) foram retirados das médias mensais do modelo oceano-atmosfera acoplado. Esta média mensal é inserida no 15º dia de cada mês. Porém, a TSM é atualizada diariamente utilizando uma interpolação linear que segue a diferença de um mês para o outro. Este mesmo esquema de interpolação dos valores diários a partir das médias mensais é feito para a variável fração de vegetação verde do modelo de superfície (CHOU et al., 202)

3.4.3. Climatologia dos eventos extremos observados no município de Caraguatatuba

O limiar escolhido para determinar um evento de precipitação como “extremo”, para esta tese, foi o de 110mm em 72h. O critério da escolha deste valor se baseou em Tatizana et al. (1987) e Tavares et al. (2004) que sugerem um

coeficiente crítico de precipitação de 120 mm/72 h como aquele que deflagra cerca de 70% dos movimentos de massa no Litoral Norte. Para este estudo, o limiar foi adaptado para 110 mm/72 h para que fosse obtido um número significativo de eventos que permitisse um estudo estatístico. Com o valor de 120mm/72h seriam encontrados poucos eventos na série histórica, diminuindo a representatividade do estudo e das análises relacionais com as simulações do modelo. Para avaliar a climatologia específica destes eventos extremos, realizaram-se os seguintes passos:

- Para todos os dias da série entre 1961-1990 criou-se uma nova variável que se refere ao total acumulado naquele dia mais os dois antecedentes, isto é, nas últimas 72 horas.
- Para estava variável (acumulado em 72h), organizou-se todos os dados para que se estruturasse uma distribuição de frequência;
- O total de eventos que ultrapassaram o limiar de 110 mm foi contabilizado de forma mensal, sazonal e para todos os períodos analisados.
- Conhecida a distribuição de frequência, calculou-se o percentil referente aos 110 mm.

O conhecimento da distribuição dos eventos extremos ao longo do período histórico de referência é considerado o ponto-chave deste capítulo, pois todas as análises consequentes são baseadas nesta distribuição.

A determinação do percentil referente aos 110 mm / 72 h também é de importância para ajustar a distribuição estatística proveniente das simulações numéricas. Tal ajuste é necessário devido à dificuldade do modelo em estimar acuradamente a intensidade da precipitação diária, pois há uma tendência do modelo Eta em subestimar os valores de precipitação em eventos extremos de chuva, sobretudo no período compreendido entre os meses de outubro a março (FADIGA Jr. et al., 2008). Este ajuste parte da hipótese que o modelo Eta acerte na probabilidade ou tempo de permanência da chuva média simulada, mas erre na intensidade de precipitação simulada. Desta forma, dada uma

intensidade de precipitação média, esta pode ser correlacionada com uma intensidade de precipitação “corrigida” através de sua probabilidade de ocorrência.

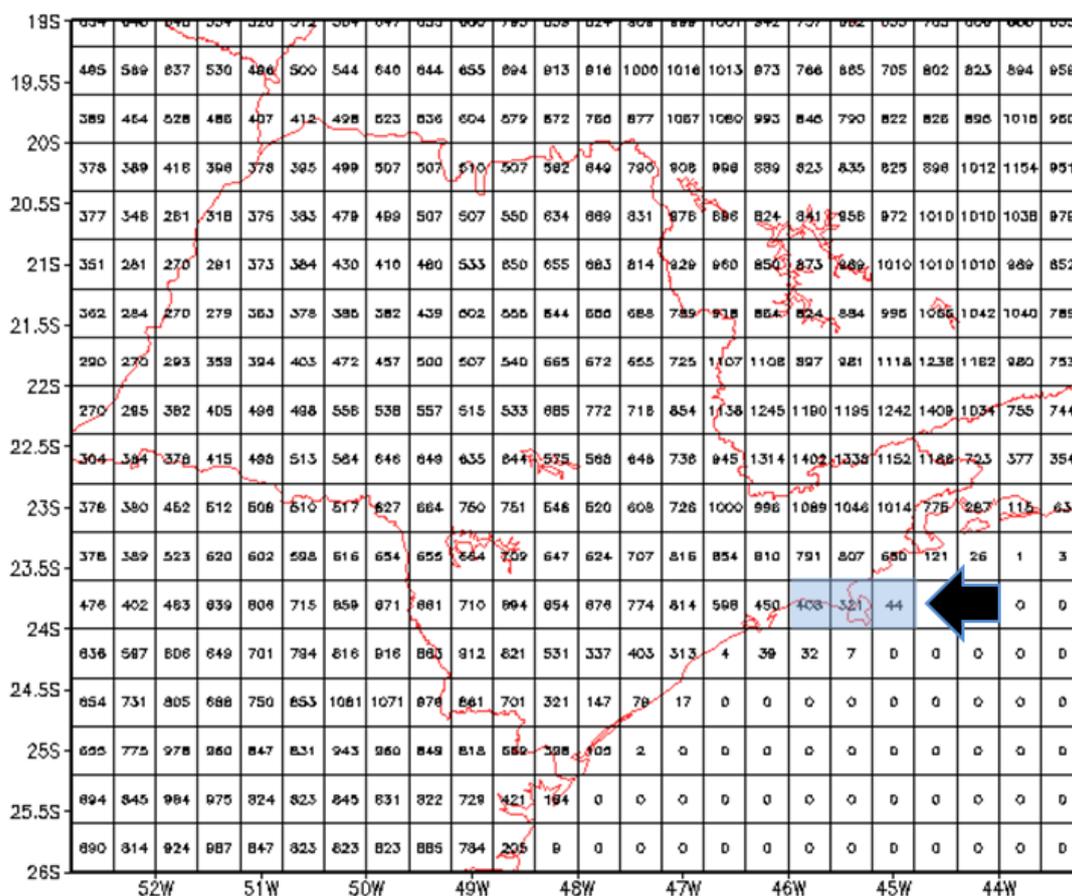
3.4.4. Determinação dos eventos de precipitação nas simulações do MRC Eta/HadCM3

Calculou-se o percentil referente ao limiar de 110 mm / 72 h para a série histórica do clima presente, proveniente da estação E2-046. Este mesmo percentil foi utilizado para determinar o valor crítico de precipitação acumulada em 72h nos diferentes membros e o *ensemble* das simulações do Eta/HadCM3 para o clima presente. Os respectivos limiares encontrados para o clima presente (1961-1990) foram os mesmos utilizados nas análises do clima futuro. Ressalta-se que neste trabalho serão denominados “eventos extremos” aqueles eventos de precipitação que: i) a partir dos dados observados, ultrapassem o limiar de 110mm/72h ou; ii) no caso das simulações e projeções climáticas, que ultrapassem a taxa (mm / 72 h) correspondente ao mesmo percentil encontrado na série histórica.

O valor da precipitação diária simulada foi obtido a partir da média de três pontos de grade do modelo Eta 40km, conforme indicado na Tabela 3.1, sendo o ponto central o mais próximo da localização da estação meteorológica E2-046. Este cálculo da média foi implementado para que os resultados das simulações se aproximassem o máximo possível do comportamento da série histórica e, conseqüentemente, pudesse melhor estimar as mudanças do clima futuro. A estação E2-046 está localizada em uma altitude de apenas 20m, sendo que o ponto de grade do Eta onde ela se localiza tem 321m, o que provavelmente pode gerar erros devido a maior influência das chuvas orográficas nesta altitude. Portanto, antes de realizar as análises do clima futuro, foram feitos testes com diferentes combinações dos pontos de grade (utilizando apenas 2 pontos, um bloco 3x3 e 2x2, pontos na diagonal, entre

outros), sendo que esta configuração dos três pontos longitudinais foi aquela que apresentou a melhor aderência com os dados observados. Como esta análise não faz parte do escopo do trabalho, estes resultados comparativos não serão apresentados nesta tese, sendo necessária apenas esta explicação para prosseguir às discussões.

Figura 3.1 - Pontos de grade do modelo Eta com resolução espacial de 40km no domínio do estado de São Paulo.



Os pontos utilizados para a média da precipitação estão assinalados em azul, entre 45W e 46W e entre 23.5S e 24S. O número ao centro de cada ponto de grade se refere à altitude na topografia do modelo.

Fonte: Autoria própria.

3.5. Resultados e Discussões

3.5.1. Simulações do clima atual (1961-1990)

Para a série histórica analisada, a intensidade de precipitação de 110mm acumulados em 72h correspondeu ao percentil 98,44%. Isto significa que para cada 100 eventos chuvosos², 98,44 estão abaixo deste limiar, sendo que apenas 1,56 eventos o ultrapassam. O passo seguinte correspondeu em encontrar a relação existente entre os dados observados e as simulações feitas pelo Eta/HadCM3, onde este mesmo percentil (98,44%)foi considerado como valor de referência para calcular a intensidade correspondente dos eventos extremos potencialmente deflagradores de deslizamentos de terra simulado pelo modelo.

Os limiares de precipitação para os eventos extremos (que correspondem o percentil 98,44%) estão apresentados na Tabela 3.1, para cada membro analisado mais o *ensemble*. Nesta tabela também consta a contabilização anual e sazonal (verão) da quantidade de eventos extremos.

Tabela 3.1 - Limiares de precipitação para os dados observados e simulações numéricas, número de eventos extremos para o período de 1961-1990.

1961-1990		Limiar crítico de precipitação (Percentil 98.44%)	Número de eventos (anual)	Número de eventos (DJF)	Percentual
Dados Observados		110.00 mm	54	29	53.70%
ETA40KM	HIGH	78.14 mm	65	40	61.54%
	LOW	84.10 mm	59	23	38.98%
	CONTROLE	74.54 mm	68	33	48.53%
	MID	73.51 mm	65	26	40.00%
	ENSEMBLE	42.41 mm	64	38	59.38%

A coluna “número de eventos (DJF)” refere-se aos eventos que aconteceram na estação do verão, sendo a coluna “Percentual” referente à porcentagem destes eventos em relação ao total observado em todo o período.

Fonte: autoria própria.

² Considerou-se um “evento chuvoso” qualquer ocorrência de precipitação superior a 1mm dentro de uma janela de 72h.

Nota-se que, para todos os casos das simulações do clima entre 1961-1990, o limiar definido pelo percentil 98.44% foi inferior aos 110mm. Isto é, o modelo Eta tende a subestimar os eventos extremos na região de estudo, necessitando utilizar estes novos valores encontrados como referência para as análises posteriores. No que se refere à quantidade de eventos chuvosos que ultrapassaram o limiar, todos os membros indicam um maior número de ocorrências que os dados observados (54 eventos), sendo o membro Controle aquele que mais se difere (com 68 eventos). No entanto, ao avaliar o percentual dos eventos extremos que ocorrem na estação chuvosa (valor de referência de 53,70%), o membro Controle é aquele que mais se aproxima do valor encontrado para série histórica, com 48,53%.

Independente das diferenças observadas nos resultados da Tabela 3.1, pode-se dizer que o comportamento do modelo está condizente com o esperado, pois é sabido que regiões costeiras próximas a regiões de serra apresentam alta incerteza associada nas estimativas de precipitação, sobretudo por estas regiões apresentarem eventos localizados devido a influência da orografia.

Ao avaliar os resultados do membro *ensemble*, nota-se que o valor da intensidade encontrada para o percentil 98,44% é extremamente inferior ao valor de referência, com apenas 42,41 mm / 72 h. Isto ocorre porque o cálculo da precipitação diária do *ensemble* é a média simples do volume precipitado em 72 h simulado pelos 4 membros. Avaliando minuciosamente os resultados gerados, nota-se que é comum um ou mais membros indicarem ausência de chuvas para um determinado dia, enquanto um ou outro resulta em precipitação. Conseqüentemente, os valores médios calculados são, no geral, inferiores àqueles estimados por cada membro, fazendo com que o valor do limiar que caracteriza os “eventos extremos” sejam bem inferiores. Este comportamento também está de acordo com o esperado. Além disso, tanto a quantidade de eventos extremos encontrada e a frequência observada na estação chuvosa estão dentro dos limites resultantes dos 4 membros do modelo.

A Tabela 3.2 apresenta uma análise mais detalhada a respeito da habilidade do modelo e seus membros em representar os eventos extremos de precipitação. Também foram incluídos nesta tabela a quantidade de dias chuvosos que compõem os eventos extremos, pois o limiar crítico de precipitação de 72 h pode ser ultrapassado devido a uma chuva acumulada em um, dois ou até três dias. Os resultados da correlação foram calculados tendo como referência as ocorrências dos dados observados da estação E2-046.

Tabela 3.2- Comparação dos resultados das simulações do modelo Eta/HadCM3 com os dados observados, período de 1961-1990.

Mês	OBSERVADO			ENSEMBLE			CONTROLE			LOW			HIGH			MID		
	Eventos	Dias	D/E															
JAN	10	30	3,00	14	30	2,14	11	21	1,91	6	18	3,00	12	20	1,67	11	24	2,18
FEV	12	29	2,42	11	27	2,45	10	14	1,40	7	14	2,00	14	22	1,57	11	16	1,45
MAR	9	22	2,44	9	23	2,56	5	16	3,20	7	17	2,43	4	8	2,00	8	19	2,38
ABR	4	7	1,75	1	1	1,00	3	6	2,00	9	19	2,11	7	16	2,29	1	2	2,00
MAI	2	5	2,50	1	2	2,00	5	9	1,80	6	11	1,83	2	4	2,00	5	9	1,80
JUN	2	5	2,50	0	0	0,00	3	6	0,00	1	3	3,00	1	4	4,00	4	7	1,75
JUL	3	5	1,67	0	0	0,00	0	0	0,00	1	1	1,00	1	3	3,00	2	3	1,50
AGO	0	0	0,00	0	0	0,00	3	5	0,00	1	1	0,00	1	4	0,00	1	1	0,00
SET	0	0	0,00	2	3	0,00	6	13	0,00	1	3	0,00	3	5	0,00	6	16	0,00
OUT	1	3	3,00	4	6	1,50	4	6	1,50	6	7	1,17	1	2	2,00	4	5	1,25
NOV	4	9	2,25	9	13	1,44	6	10	1,67	4	8	2,00	5	7	1,40	8	15	1,88
DEZ	7	12	1,71	13	23	1,77	12	22	1,83	10	19	1,90	14	25	1,79	4	9	2,25
Total	54	127	2,352	64	128	2,000	68	128	1,882	59	121	2,051	65	120	1,846	65	126	1,938
Correl.	1,000	1,000	-	0,828	0,914	0,658	0,674	0,667	0,579	0,595	0,679	0,807	0,817	0,699	0,644	0,732	0,736	0,783

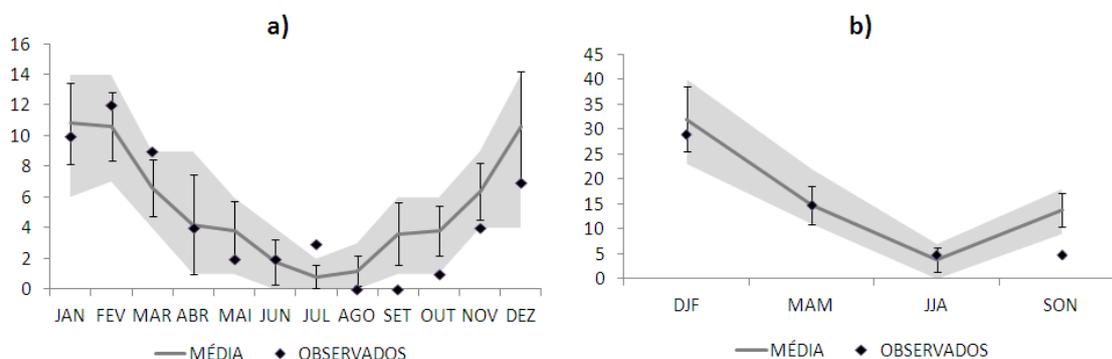
Coluna “Eventos” referente ao total de eventos chuvosos que ultrapassaram o limiar crítico de precipitação; coluna “Dias” referente ao total de dias chuvosos que caracterizaram os eventos extremos; coluna D/E referente à razão da coluna “Dias” pela “Eventos”, indicando a duração média dos eventos extremos. Células em verde apontam a correlação linear entre as simulações dos membros do Eta/HadCM3 e os dados observados.

Fonte: autoria própria.

Os resultados da Tabela 3.2 também indicam a boa representatividade do modelo Eta/HadCM3 na simulação dos eventos extremos para o período 1961-1990. Dentre todos os casos analisados destaca-se o *ensemble*, por possuir as maiores correlações, tanto para o número de eventos extremos (64 eventos e correlação de 0,828) quanto para a quantidade de dias chuvosos pelos quais os eventos são compostos (128 dias e correlação de 0,914). O membro *Low* foi aquele que apresentou melhor correlação com a média de dias que os eventos são compostos (2,051 dias/evento e correlação de 0,807), onde se destaca a ótima acurácia na representação dos eventos que ocorrem nos três meses de verão. No entanto, o membro *Low* também é aquele que simula a menor quantidade de eventos (59) e dias que compõem os eventos extremos (121), padrão este que pode ser reproduzido nas análises para o clima futuro.

A Figura 3.2 agrupa os resultados da Tabela 3.2 para avaliar a distribuição mensal dos eventos extremos simulados e observados.

Figura 3.2 - Pluma de dispersão das simulações numéricas x dados observados.



Simulações para os quatro membros com Eta40km (Área em cinza), média dos membros mais o ensemble (Linha em cinza escuro), desvio padrão (Barra de erros) e o número de eventos observados na estação pluviométrica de Caraguatatuba (losangos em preto). a) Dados mensais e b) Períodos sazonais.

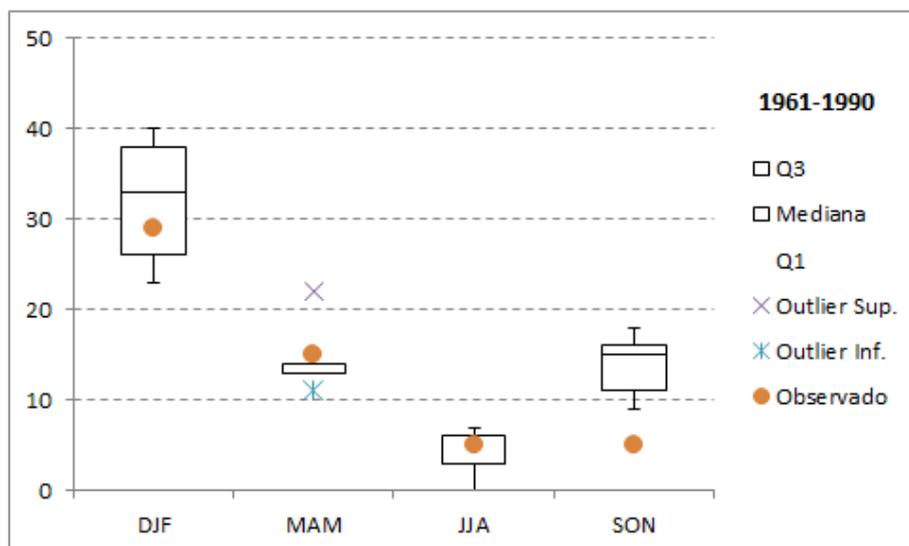
Fonte: autoria própria.

Pela Figura 3.2 é possível verificar com maior clareza que os membros e o ensemble foram capazes de simular a variação sazonal dos eventos extremos, concentrando os maiores números de eventos nos meses correspondentes à

estação chuvosa (dezembro, janeiro, fevereiro e março, Figura 3.2a). Por outro lado, para os meses de Julho, Agosto, Setembro e Outubro, os valores observados ficaram fora da pluma de dispersão, representando pouca habilidade do modelo em representar os eventos extremos durante esta época.

Analisando a variabilidade sazonal (Figura 3.2b), verificou-se que nos meses verão (DJF) e outono (MAM), quando ocorrem os maiores números de registro de eventos extremos, a habilidade do modelo em representar estes extremos é melhor. Além dos valores observados estarem dentro dos limites da pluma de dispersão dos resultados modelados, eles estão dentro da faixa do desvio padrão considerando os resultados dos membros mais o ensemble. A partir dos dados da Tabela 3.2 fez-se um boxplot, apresentado na Figura 3.3.

Figura 3.3- Gráfico boxplot das previsões sazonais (verão - DJF, outono - MAM, inverno - JJA e primavera- SON) do número de eventos extremos de precipitação para o período presente (1961-1990) previstas pelos membros do modelo Eta/HadCM3.



Fonte: autoria própria.

Analisando o ciclo anual, nota-se que o maior número de extremos (29) acontece no trimestre de verão (dezembro, janeiro e fevereiro - DJF). No trimestre de inverno (junho, julho e agosto - JJA) o oposto acontece e tem-se o menor número de extremos (5). Na comparação entre os trimestres de

transição tem-se 15 eventos no trimestre de outono (março, abril e maio - MAM) e apenas 5 no trimestre de primavera (setembro, outubro e novembro). Com relação à simulação do tempo presente pela modelagem numérica nota-se que a dispersão dos diferentes membros é tal que em quase todas as estações o valor observado está dentro do domínio limitado pelos membros que representam os limites superior (Q3) e inferior (Q1) em termos de número de eventos extremos. A única exceção acontece no trimestre de primavera (SON), quando o número de extremos observados (5) é menor do que todas as de simulação numéricas dos membros e do *ensemble*.

Com relação à dispersão dos membros, nota-se que no outono (MAM) apresenta dois membros como *outliers*. O membro *Low* (22 eventos) corresponde o limite superior e o *ensemble* o limite inferior (11 eventos). O verão e o inverno são as estações do ano que as simulações numéricas sugerem ter maior aderência com a observação. No entanto, o número de eventos extremos no verão (29 eventos) é quase 6 vezes maior do que no inverno (5 eventos), de tal forma que as análises comparativas para a tendência de eventos extremos no futuro se mostram mais indicadas para o verão devido a sua representatividade dentro da estatística que se tem como referência.

3.5.2. Projeções do clima futuro: 2011-2040

Para avaliar os prováveis cenários futuros em termos de número de extremos de precipitação no Litoral Norte de São Paulo, foram analisadas as simulações numéricas até o final deste século. O primeiro período do clima futuro para o qual foram feitas as simulações numéricas começa em 2011 e vai até 2040. Para facilitar a interpretação dos resultados, Na Tabela 3.3 estão apresentados apenas os resultados dos incrementos (aumento ou diminuição) dos eventos extremos e da média de dias chuvosos que compõem tais eventos, tendo como referência os valores simulados no período de 1961-1990 (Tabela 3.2).

Tabela 3.3 – Incrementos do número de eventos extremos a partir da projeção das mudanças climáticas no período 2011-2040

2011-2040		ENSEMBLE		CONTROLE		LOW		HIGH		MID	
	Mês	Δ Eventos	Δ (D/E)								
D	DEZ	▼ -3	▼ -0,10	▼ -1	▼ -0,11	▼ -3	▼ -0,33	▼ -8	▲ 0,21	▲ 3	▼ -0,54
J	JAN	▲ 2	— -0,02	▲ 3	▲ 0,31	— 0	▼ -1,00	▼ -3	▲ 0,11	▲ 1	▼ -0,18
F	FEV	▲ 2	▼ -0,30	▲ 1	▲ 0,05	▲ 6	▲ 0,54	▼ -2	▲ 1,26	▼ -6	▲ 0,55
M	MAR	▲ 1	▼ -0,06	▲ 6	▼ -1,47	▲ 2	▲ 0,57	▲ 3	— 0,00	▲ 1	▲ 0,51
A	ABR	▲ 5	▲ 0,33	▲ 3	▼ -0,17	▼ -4	▲ 0,09	▼ -6	▼ -0,29	▲ 5	▲ 0,67
M	MAI	▼ -1	▼ -2,00	▼ -2	▲ 0,20	▼ -1	▼ -0,03	▲ 1	— 0,00	▲ 2	▲ 0,06
J	JUN	▲ 1	▲ 1,00	▲ 1	▲ 1,25	— 0	— 0,00	▲ 3	▼ -2,00	▼ -1	▼ -0,75
J	JUL	— 0	— 0,00	▲ 3	▲ 2,00	— 0	▲ 2,00	▼ -1	▼ -3,00	— 0	▼ -0,50
A	AGO	▲ 1	▲ 1,00	▼ -3	— 0,00	▲ 3	▲ 3,00	▲ 6	▲ 1,71	▼ -1	— 0,00
S	SET	— 0	▲ 1,00	— 0	▲ 1,83	▲ 2	▲ 2,00	▼ -1	▲ 2,00	▼ -4	▲ 2,00
O	OUT	▲ 2	▲ 1,50	▲ 3	▲ 0,50	▼ -2	▲ 0,33	▲ 7	▲ 0,63	▲ 4	▲ 0,50
N	NOV	▲ 5	▲ 0,56	▲ 6	▲ 0,25	▲ 3	▼ -0,43	▲ 1	▲ 0,10	— 0	▲ 0,25
	Total	▲ 15	▲ 0,04	▲ 20	▼ -0,06	▲ 6	▲ 0,13	— 0	▲ 0,26	▲ 4	▲ 0,13

Quantificação mensal dos incrementos dos eventos extremos de precipitação potencialmente deflagradores de movimentos de massa considerando o acumulado em 72h (coluna “Δ Eventos”); e incrementos na média de dias chuvosos por evento extremo (coluna “ΔD/E”). Resultados separados para os quatro membros mais o ensemble do modelo Eta/HadCM3 usando o cenário A1B do IPCC AR-4, no período de 2011-2040. As setas em verde indicam o incremento positivo (aumento), as setas em vermelho indicam o incremento negativo (diminuição) e o traço em amarelo indica incremento insignificante. Os campos na cor verde destacam os incrementos positivos mais significativos e os campos em vermelho a situação contrária.

Fonte: Autoria própria.

Os resultados da Tabela 3.3 indicam um aumento sistemático dos eventos extremos nas simulações dos membros Controle, *Low*, *Mid* e o *ensemble* quando comparados com período de referência. Para estes casos, o membro Controle é o que indica o maior incremento (+20 eventos), sendo que a relação D/E é praticamente a mesma (1,83). Em seguida tem-se o membro *Ensemble* com aumento de 15 eventos e, posteriormente, o membro *Low* (+6 eventos); e o *Mid* (+ 4 eventos). Destaca-se o fato de que a maioria destes incrementos positivos não ocorre no verão (DJF), mas sim no inverno (JJA) e primavera (SON). Além disso, os resultados dos membros e *ensemble* são praticamente convergentes ao indicar uma diminuição de eventos extremos para o mês de Janeiro, juntamente com uma considerável redução da relação D/E. Ou seja, para este mês, os resultados sugerem que há diminuição de eventos que deflagrem movimentos de massa e, em contrapartida, os eventos serão mais severos, uma vez que tendem a se concentrar em um período de tempo menor.

O único membro que não indicou um aumento de eventos extremos foi o *High*, que se manteve com os mesmos 65 eventos simulados para o período de 1961-1990. No entanto, houve um aumento dos dias chuvosos que compõem os eventos extremos (incremento de 0,26), o que corresponde a relação D/E de 2,12 dias chuvosos por evento extremo. Embora o valor total de eventos tenha permanecido o mesmo que no período de 1961-1990, o membro *High* indicou a diminuição drástica durante os meses de verão (queda de 13 eventos, sendo 8 apenas em Janeiro) e o comportamento inverso para os meses de inverno (+ 8 eventos) e primavera (+7 eventos). Esta combinação de mudanças no clima sazonal caracteriza um padrão de comportamento com forte divergência dos outros membros, sugerindo alta incerteza associada a este membro para as simulações do clima futuro.

Ainda avaliando os resultados dos eventos extremos, destaca-se o fato de que os maiores incrementos positivos ocorrem entre os meses de Setembro, Outubro e Novembro, para praticamente todos os membros (com exceção do *Mid*). Conforme apresentado nas discussões sobre a acurácia do modelo em simular o clima pretérito, a primavera (SON) é o período em que o modelo

possui menor destreza, ou seja, onde há as maiores incertezas. Este comportamento também será avaliado nos outros períodos do clima futuro, pois há evidências que este seja um viés do modelo global aninhado ao Eta, o qual deve ser considerado nas conclusões a respeito dos possíveis impactos das mudanças climáticas.

3.5.3. Projeções do clima futuro: 2041-2070

As análises para o período de 2041-2070 seguem a mesma estrutura apresentada para 2011-2040, onde as discussões se baseiam diretamente nos resultados da Tabela 3.4.

De uma forma geral, os resultados indicam um aumento sistemático dos eventos extremos nas simulações feitas por todos os membros durante o período de 2041-2070. O maior aumento de eventos extremos ocorreu para a simulação do *ensemble* (+52), seguido pelo membro *Mid* (+39), Controle (+38), *High* (+26) e por último o *Low* (+16).

Em conformidade com a tendência observada no período anterior (2011-2040), este aumento ocorreu de forma mais acentuada em praticamente todos os meses de inverno (JJA) e da primavera (SON), seguido de um aumento mais brando durante o verão (DJF). Para o outono (MAM) não há consenso entre os membros e *ensemble*, mas prevalece a tendência de um pequeno aumento do número de eventos combinado com a diminuição da relação D/E, o que sugere o aumento da severidade das chuvas extremas nesta estação.

A respeito dos meses de verão (DJF), destaca-se o fato do membro *High* ser o único que aponta para uma diminuição dos eventos extremos (-10), sendo novamente o mês de Janeiro aquele com maior incremento negativo (-7). Esta constatação reforça o comportamento divergente do membro *High*, atribuindo alta incerteza aos resultados associados a este membro.

Tabela 3.4 - Incrementos do número de eventos extremos a partir da projeção das mudanças climáticas no período 2041-2070.

2041-2070		ENSEMBLE		CONTROLE		LOW		HIGH		MID	
	Mês	Δ Eventos	Δ (D/E)								
D	DEZ	▲ 1	▲ 0,30	▼ -2	▲ 0,17	▼ -1	▲ 0,43	▼ -7	▲ 0,50	▲ 14	▼ -0,64
J	JAN	▲ 12	▼ -0,26	▲ 8	▲ 0,30	▲ 7	▼ -0,85	▲ 2	▲ 0,76	▼ -3	▲ 0,44
F	FEV	▼ -1	▼ -0,15	▲ 2	▲ 0,85	▼ -1	— 0,00	▼ -5	▲ 1,10	▼ -3	▲ 1,30
M	MAR	▲ 2	▼ -0,56	▲ 4	▼ -0,98	▼ -2	▼ -0,63	▲ 2	— 0,00	▲ 6	— -0,02
A	ABR	▲ 7	▲ 0,25	▲ 7	▼ -0,60	▼ -3	▼ -0,28	▼ -1	▲ 0,21	▲ 5	▲ 0,33
M	MAI	▼ -1	▼ -2,00	▼ -2	▼ -0,47	▼ -2	▲ 0,42	▲ 1	— 0,00	— 0	▲ 0,40
J	JUN	▲ 1	▲ 5,00	▲ 1	▲ 1,75	▲ 2	▼ -2,00	▲ 7	▼ -2,00	▲ 1	▲ 0,45
J	JUL	▲ 1	▲ 2,00	▲ 4	▲ 2,25	▲ 1	▲ 1,00	▲ 4	▼ -0,80	▲ 1	▲ 0,50
A	AGO	▲ 2	▲ 2,00	▲ 1	▲ 2,50	▲ 3	▲ 1,25	▲ 4	▲ 2,00	▲ 1	▲ 1,00
S	SET	▲ 5	▲ 1,14	▼ -2	▲ 2,75	▲ 7	▲ 1,38	▲ 6	▲ 2,00	▼ -2	▲ 2,25
O	OUT	▲ 14	▲ 0,67	▲ 9	▲ 0,35	▲ 4	▲ 0,73	▲ 3	▼ -0,25	▲ 19	▲ 0,88
N	NOV	▲ 9	▲ 0,50	▲ 8	▲ 0,48	▲ 1	▲ 0,40	▲ 10	▲ 0,67	— 0	▼ -0,25
	Total	▲ 52	▼ -0,05	▲ 38	▲ 0,16	▲ 16	▼ -0,16	▲ 26	▲ 0,34	▲ 39	▲ 0,20

Quantificação mensal dos incrementos dos eventos extremos de precipitação potencialmente deflagradores de movimentos de massa considerando o acumulado em 72h (coluna “ Δ Eventos”); e dos incrementos na média de dias chuvosos por evento extremo (coluna “ Δ D/E”). Resultados separados para os quatro membros mais o ensemble do modelo Eta/HadCM3 usando o cenário A1B do IPCC AR-4, no período de 2041-2070. As setas em verde indicam o incremento positivo (aumento), as setas em vermelho indicam o incremento negativo (diminuição) e o traço em amarelo indica incremento insignificante. Os campos na cor verde destacam os incrementos positivos mais significativos e os campos em vermelho a situação contrária.

Fonte: Autoria própria.

O mês de outubro também se destaca por ter os maiores incrementos positivos dos eventos extremos, onde o membro *Mid* e o *ensemble* chegam a indicar um aumento de 19 e 14 eventos, respectivamente, quando comparados com o período de referência (1961-1990). Este aumento é acompanhado do incremento positivo da relação D/E, o que sugere mais dias chuvosos durante esta estação, mas não necessariamente mais severos.

3.5.4. Projeções do clima futuro: 2071-2100

As análises para o período de 2041-2070 seguem a mesma estrutura apresentada para 2011-2040 e 2041-2070. No entanto, a base de dados disponível para este período estava disponível apenas entre os anos 2071-2098, que corresponde a uma série de apenas 28 anos. Desta forma, para que estes resultados pudessem ser comparados com os demais períodos, fez-se uma interpolação linear simples para extrapolar os valores encontrados e corresponder a um período de 30 anos (dividiu-se os valores encontrados por 28 e multiplicou-se por 30), conforme apresentado na Tabela 3.5.

Os resultados indicam que este período teve um padrão bastante semelhante ao período compreendido entre 2041-2070. No geral observa-se um pouco mais de eventos extremos do que o período anterior, sendo que o membro *Mid* e o *ensemble* novamente indicam os maiores incrementos (+60,4 e +57,1 respectivamente), seguidos pela mesma sequência decrescente definida pelos membros Controle (+38,1), *High* (32,5) e *Low* (19,2).

A diferença mais notória com o período anterior é que em 2071-2100 há um incremento positivo ligeiramente maior para o verão (DJF) e outono (apenas para o mês de Maio), e um aumento ainda significativo durante a primavera (SON), onde o mês de Novembro se destaca igualmente ao mês de Outubro por possuir os maiores incrementos positivos.

Tabela 3.5 - Incrementos do número de eventos extremos a partir da projeção das mudanças climáticas no período 2071-2100.

2071-2100		ENSEMBLE		CONTROLE		LOW		HIGH		MID	
	Mês	Δ Eventos	Δ (D/E)								
D	DEZ	▲ 4,1	▬ -0,02	▼ -3,4	▲ 0,29	▼ -5,7	▲ 0,35	▼ -4,4	▲ 0,10	▲ 13,1	▲ 0,25
J	JAN	▲ 10,6	▼ -0,06	▼ -1,4	▼ -0,24	▲ 0,4	▼ -0,50	▲ 9,4	▲ 0,53	▲ 10,4	▲ 0,47
F	FEV	▼ -3,5	▼ -0,31	▲ 3,9	▲ 0,52	▲ 5,9	▼ -0,33	▼ -7,6	▲ 0,93	▼ -0,3	▲ 0,95
M	MAR	▼ -0,4	▼ -0,68	▲ 4,6	▼ -0,87	▲ 1,6	▼ -0,93	▲ 4,6	▲ 0,25	▲ 1,6	▼ -0,38
A	ABR	▲ 7,6	▲ 1,00	▲ 4,5	▲ 0,71	▼ -1,5	▲ 0,17	▼ -0,6	▼ -0,45	▲ 5,4	▼ -0,50
M	MAI	▲ 4,4	▬ 0,00	▲ 4,6	▼ -0,13	▲ 0,4	▼ -0,17	▲ 3,4	▬ 0,00	▲ 2,5	▲ 0,06
J	JUN	▲ 3,2	▲ 1,67	▲ 1,3	▲ 1,75	▲ 2,2	▼ -0,67	▲ 2,2	▼ -2,00	▲ 3,5	▲ 0,11
J	JUL	▬ 0,0	▬ 0,00	▲ 1,1	▲ 2,00	▲ 0,1	▲ 1,00	▲ 3,3	▼ -2,00	▲ 1,2	▼ -0,17
A	AGO	▬ 0,0	▬ 0,00	▲ 1,3	▲ 2,00	▲ 4,4	▲ 1,60	▲ 0,1	▲ 1,00	▲ 0,1	▲ 1,00
S	SET	▲ 5,5	▲ 1,71	▲ 1,5	▲ 2,00	▲ 9,7	▲ 1,60	▲ 1,3	▲ 2,25	▼ -0,6	▲ 1,80
O	OUT	▲ 17,4	▲ 0,55	▲ 9,9	▲ 0,58	▲ 0,4	▲ 1,83	▲ 8,6	▬ 0,00	▲ 8,9	▲ 1,42
N	NOV	▲ 8,1	▲ 0,74	▲ 10,1	▼ -0,13	▲ 1,4	▼ -0,60	▲ 12,1	▲ 0,66	▲ 14,5	▲ 0,17
	Total	▲ 57	▬ -0,01	▲ 38	▲ 0,06	▲ 19	▼ -0,16	▲ 33	▲ 0,18	▲ 60	▲ 0,30

Quantificação mensal dos incrementos dos eventos extremos de precipitação potencialmente deflagradores de movimentos de massa considerando o acumulado em 72h (coluna “ Δ Eventos”); e dos incrementos na média de dias chuvosos por evento extremo (coluna “ Δ D/E”). Resultados separados para os quatro membros mais o ensemble do modelo Eta/HadCM3 usando o cenário A1B do IPCC AR-4, no período de 2071-2100. As setas em verde indicam o incremento positivo (aumento), as setas em vermelho indicam o incremento negativo (diminuição) e o traço em amarelo indica incremento insignificante. Os campos na cor verde destacam os incrementos positivos mais significativos e os campos em vermelho a situação contrária.

Fonte: Autoria própria.

Ao avaliar as tendências para cada estação do ano, nota-se novamente que os quatro membros e o *ensemble* não estão em concordância para os meses do verão (DJF). Enquanto o *ensemble* e o *Mid* indicam um forte aumento de eventos extremos para esta estação, sobretudo nos meses de Dezembro e Janeiro, os membros Controle e *High* sugerem uma diminuição. Já membro *Low* indica que não há incremento, pois o forte decréscimo observado no mês de Dezembro (-5,7) é praticamente compensado pelo acréscimo inferido para Fevereiro (+5,9). A relação D/E também não apresenta um padrão comum entre os membros, de modo que eles convergem apenas para o mês de dezembro ao sinalizar um pequeno aumento (ou seja, seria um mês com mais dias chuvosos).

Para o outono (MAM) os membros e o *ensemble* estão em concordância ao indicar um aumento do número de eventos, com um incremento médio de 9 eventos, excetuando-se o membro *Low*, que indica um aumento menor. Para o inverno (JJA) também há concordância entre os membros, onde o incremento médio inferido pelos membros e *ensemble* é de 4 eventos.

A primavera (SON) é a estação que, novamente, mais se destaca por possuir os maiores incrementos positivos de eventos extremos. Todos os membros e o *ensemble* convergem ao indicarem uma forte tendência no aumento das ocorrências de eventos extremos, associado com o aumento da relação D/E, o sugerindo que esta será uma estação com mais dias chuvosos seguidos. Embora o comportamento seja semelhante ao período 2041-2070, em 2071-2100 há a diferença do mês Novembro se destacar como aquele com os maiores incrementos positivos (aproximadamente +10, com exceção do membro *Low*). Estes incrementos são tão altos que equiparam a primavera ao verão, no que diz respeito à quantidade de eventos extremos.

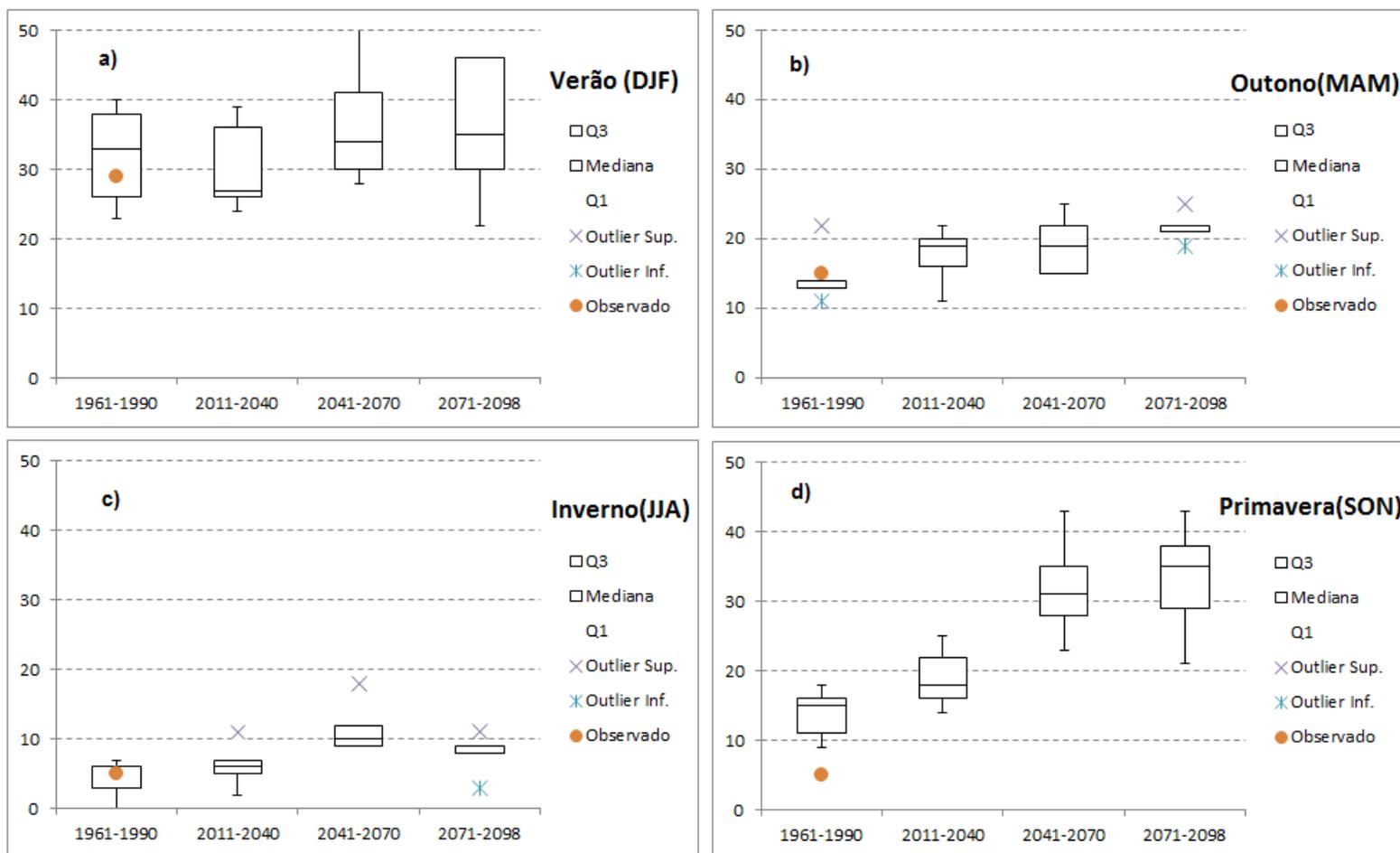
3.5.5. Discussões gerais sobre as simulações do clima futuro

Os resultados apresentados nos itens anteriores foram sintetizados e colocados na forma de *boxplot* (Figura 3.4), objetivando uma análise mais ampla das simulações do clima futuro e das incertezas associadas.

Para o verão (DJF), a Figura 3.4a indica que há o aumento de eventos extremos nos períodos futuros, quando comparado com o período de referência (1961-1990). A intensidade deste aumento varia entre os membros do modelo Eta/HadCM3, de modo que o quartil superior (Q3) decresce de 37 eventos em 1961-1990 para 36 em 2011-2040, aumentando nos períodos subsequentes até atingir o valor máximo no final do século, com 46 eventos. No entanto, a mediana calculada entre os membros e o ensemble não sugere um aumento significativo ao longo do século XXI, pois parte de 33 eventos e 1961-1990, cai consideravelmente em 2011-2040 (27 eventos), sobe novamente para 34 eventos e atinge apenas 35 no último período de análise. O limite inferior (Q1), apresenta comportamento semelhante. Tais constatações, juntas, sugerem que é provável que haja um pequeno aumento dos eventos extremos durante a estação chuvosa, aumento este que se intensifica ao longo do tempo até o final do século. A alta dispersão observada na segunda metade do século indica uma maior incerteza associada aos resultados para este período, não descartando a possibilidade dos eventos extremos ultrapassem 45 ocorrências em 2071-2100, o que corresponderia em um aumento de mais de 50% em comparação com a série histórica.

No outono (Figura 3.4b) e no inverno (Figura 3.4c) pode-se considerar um comportamento semelhante na comparação entre o presente e os períodos futuros, com tendência de aumento no número de extremos em 2041-2070 e 2071-2100, acompanhados também por aumentos na dispersão das previsões, indicando maior incerteza. Destaca-se o fato de que estes dois trimestres (MAM e JJA) são os únicos que apresentam *outliers*, o que indica uma acentuada divergência entre os membros e que dificulta fazer conclusões sobre os impactos das mudanças climáticas para estas estações do ano.

Figura 3.4 - Boxplot das previsões sazonais (verão - DJF, outono - MAM, inverno - JJA e primavera- SON) do número de eventos extremos simulados pelos membros do modelo ETA40-HadCM3, cenário A1B do IPCC AR-4, para os períodos futuros.



Fonte: autoria própria.

Quando o foco é colocado no trimestre de primavera (Figura 3.4d) nota-se uma evolução futura diferente do que foi observado para as outras estações do ano. No conjunto de previsões do primeiro período futuro (2011-2040) nota-se um aumento considerável no número de eventos extremos. Esse aumento é ainda mais acentuado no segundo período futuro (2041-2070), mas no período seguinte (2071-2100) não há mudanças tão significativas, destacando-se apenas um aumento na dispersão dos membros e um ligeiro aumento da mediana. Considerando o valor da mediana observado no período de referência (15 eventos), o conjunto de previsões indica um aumento de 140% para o final do século (36 eventos). Porém, esse comportamento extremamente anômalo na primavera precisa ser observado com cautela, pois na análise do clima presente as simulações numéricas superestimavam a quantidade de eventos em relação aos dados observados. Portanto, pode-se dizer que há uma forte tendência do aumento de eventos extremos durante a primavera, mas a intensidade deste aumento está sendo superestimada nas simulações devido ao erro sistemático do modelo na região de estudo.

3.6. Considerações Finais

As análises das simulações e projeções climáticas apresentadas neste Capítulo sugerem que o método empregado foi adequado para representar a influência das mudanças climáticas nos eventos extremos de precipitação.

As simulações do clima presente (1961-1990) apresentaram uma boa aderência com a série histórica da estação E2-046. Por ser uma região próxima ao contraforte da Serra do Mar, a estimativa da precipitação é bastante influenciada pela topografia do modelo de superfície acoplado ao Eta, o qual possui limitações em representar a mudança abrupta de altitude entre a faixa litorânea e a Serra do Mar com sua resolução de 40km. No entanto, a utilização da média de três pontos de grade longitudinais adjacentes pode ser considerada uma boa alternativa, pois resultou em uma boa correlação entre a

distribuição de frequência mensal e sazonal dos dados observados e as simulações numéricas, destacando o *ensemble*, pela melhor representatividade quando comparado com os quatro membros.

A análise de dispersão das simulações fornecidas pelos membros e o *ensemble*, conseguiu identificar em quais estações do ano o modelo Eta/HadCM3 possui maior destreza em representar os eventos extremos. Neste sentido, ficou claro que a estação chuvosa (verão e um prolongamento durante o outono) foi bem representada no período de referência (1961-1990). Ao simular o clima futuro, os resultados indicam que nestas duas estações (verão e outono) há concordância entre os membros e o *ensemble* ao inferir um aumento de eventos extremos.

Para o verão, a dispersão observada no gráfico de *boxplot* entre os membros e *ensemble* configura uma incerteza para estimar qual seria a intensidade deste aumento nos períodos futuros. Tendo como referência a *ensemble* (que foi aquele com maior aderência aos dados observados), os resultados sugerem um aumento significativo somente a partir de 2041-2070, com cerca de 30% (+13 eventos), o qual se mantém praticamente inalterado para o período de 2071-2100.

Nos meses de outono (MAM), as simulações feitas para o período de referência se apresentaram condizentes com a série histórica, embora o membro *Low* tenha superestimado demasiadamente o resultado (*outlier* superior). De uma forma geral, pode-se dizer que nas projeções do clima futuro a tendência observada é que o maior aumento durante o outono aconteça já em 2011-2040 e continua, em menor intensidade, até o final do século.

Para o inverno, a pouca quantidade de eventos durante o período de referência (1961-1990) não permitiu uma análise estatística representativa. Embora o modelo Eta/HadCM3 tenha se mostrado condizente em simular poucos eventos durante esta estação, os membros e o *ensemble* apresentaram comportamentos divergentes quanto a magnitude dos efeitos das mudanças climáticas futuras sob os eventos extremos. Em todos os períodos futuros

foram observados *outliers* que, associados aos fatores previamente citados, não permitem inferências conclusivas. Portanto, para o inverno pode-se dizer apenas que há uma tendência sutil do aumento dos extremos nos períodos futuros, a qual aconteceria de forma mais acentuada durante 2041-2070, resultado que deve ser analisado levando em consideração as incertezas associadas.

Para a primavera, o modelo apresentou um forte viés em superestimar os eventos extremos no clima presente (1961-1990), tanto para os quatro membros quanto para o *ensemble*. Este viés influenciou diretamente nos resultados das projeções do clima futuro, onde esta mesma estação se destacou pelos maiores aumentos de ocorrência de eventos extremos até 2100. Este incremento para os meses da primavera foi tão intenso que a estação se equiparou, em 2071-2100, ao verão em termos de ocorrência de eventos extremos. Embora este aumento de eventos seja considerado exagerado e proveniente de um erro sistemático do Eta/HadCM3, os resultados dos quatro membros e do *ensemble* convergem fortemente para os 3 períodos futuros analisados. Isto sugere que a tendência observada (aumento) seja válida, havendo alta possibilidade dos eventos extremos realmente se tornarem mais frequentes na primavera. Porém, este aumento não deve ser tão intenso quanto foi constatado, necessitando de estudos complementares para que seja possível tirar conclusões específicas a respeito.

Em todas as projeções do clima futuro o membro *High* apresentou um comportamento bastante divergente dos outros membros e do *ensemble*, para todas as estações do ano. Na maioria das vezes, este foi o membro que apresentou os maiores incrementos positivos e negativos, onde se destaca a queda drástica de eventos extremos durante o verão, sobretudo no mês de Janeiro. Este comportamento sugere que as perturbações feitas nas parametrizações deste membro são muito sensíveis para avaliar os eventos extremos de precipitação. Neste sentido, que em estudos futuros de mesma natureza é sugerido que este membro seja comparado com outros não

utilizados neste trabalho, objetivando sua substituição para obtenção de resultados mais representativos.

De uma forma geral, as simulações para o clima futuro se apresentaram em concordância com as expectativas propostas na literatura relacionada, que sugerem uma atmosfera mais úmida e dinâmica em um mundo em aquecimento, aumentando a frequência e intensidade de eventos extremos de precipitação em diversas partes do globo, incluindo o Sudeste brasileiro (MARENGO, 2009; IPCC, 2012; WENTZ, 2007).

O cenário de emissões utilizado para as projeções futuras (A1B) é considerado “moderado” dentro da gama de opções do IPCC-AR4. Isto significa que as tendências observadas de aumento dos eventos extremos nas próximas décadas são factíveis, pois os efeitos das mudanças climáticas futuras podem ser ainda maiores se considerarmos um cenário mais realista, como aquele que estamos indo em direção. Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se expandir a análise feita para outros cenários do IPCC e modelos, incluindo os mais recentes, publicados no AR5. Uma variedade de cenários e modelos pode fornecer diferentes possibilidades para os impactos das mudanças do clima, além de melhor explicitar as incertezas ao permitir a verificação de padrões de convergência e divergência entre os resultados.

Neste contexto, também se considera pertinente a utilização de modelos climáticos regionais de alta ou altíssima resolução (ex: com 5 km), que sejam capazes de representar melhor a topografia da região de estudo e, conseqüentemente, os processos físicos relacionados aos eventos extremos de precipitação. Normalmente esta não é uma tarefa simples quando se considera um grande domínio territorial, pois as simulações numéricas de alta resolução demandam muitos recursos computacionais e, conseqüentemente, de tempo. No entanto, para o tipo de estudo apresentado é possível limitar um pequeno domínio, composto por alguns pontos de grade do modelo, o que viabiliza a aplicação para estudos locais ou até mesmo regionais.

Para complementar as discussões feitas neste Capítulo, sugere-se que trabalhos futuros explorem também outros limiares críticos de precipitação relacionados aos movimentos de massa (ex: 50mm/24h; 80mm/48h; etc.). Neste aspecto, o método apresentado pode ser considerado de grande usabilidade, pois o mesmo pode ser adaptado não somente para outros limiares, mas também para outras regiões e fenômenos (como as inundações bruscas, por exemplo).

Vale ressaltar que o trabalho apresentado neste Capítulo foi um estudo pioneiro ao relacionar uma tipologia específica de precipitação relacionada aos movimentos de massa (110mm/72h) com as mudanças climáticas. Como um primeiro exercício, os resultados apresentados se mostraram de grande utilidade para o conhecimento do clima local e dos possíveis impactos das mudanças climáticas futuras. Tais resultados exaltam a importância do acompanhamento destes fenômenos ao longo do tempo, não somente para uma melhor compreensão das mudanças do clima local, mas também para colaborar na minimização dos impactos potenciais relacionados aos deslizamentos de terra que estes eventos podem deflagrar. Neste sentido, o possível aumento evidenciado dos eventos extremos e de sua intensidade no Litoral Norte de São Paulo sugere que as iniciativas de gestão de risco aos desastres, incluindo todas as suas dimensões (monitoramento e alerta, educação ambiental, obras de infraestrutura e contenção de encostas, diminuição das vulnerabilidades sociais, entre outras) são de grande importância para o desenvolvimento urbano e econômico de forma sustentável desta região, pois o clima é considerado como apenas um dos diversos fatores que compõem a situação de desastre.

4. ANÁLISE DE SUSCETIBILIDADE AOS DESLIZAMENTOS DE TERRA NO LITORAL NORTE PAULISTA. UMA PROPOSTA METODOLÓGICA BASEADA EM SOFTWARE E DADOS DE DOMÍNIO PÚBLICO

Um cenário propício para a ocorrência de desastres relacionados aos deslizamentos de terra é definido pela combinação de áreas densamente povoadas em regiões costeiras que, por muitas vezes, estão associadas a cadeias montanhosas e também por receberem eventos severos de precipitação. Este cenário pode se tornar ainda mais crítico quando se inclui o possível efeito das mudanças climáticas sobre a intensificação dos eventos extremos de precipitação, conforme foi exposto nos capítulos anteriores, onde a região da Serra do Mar se destacou como uma das mais vulneráveis tanto para o clima presente quanto futuro. Isto ressalta a importância de que estas localidades demandam estudos complementares a respeito da dinâmica e distribuição espacial dos deslizamentos de terra, com vistas a subsidiar o melhor planejamento urbano e as ações de gestão de risco aos desastres e diminuir os impactos relacionados.

Neste contexto, vários estudos têm focado a avaliação das causas e mecanismos de indução de movimentos de massa nas encostas, com o objetivo de identificar onde e como eles podem ocorrer, geralmente tomando como base um conjunto de características ambientais (VARNES et al., 1984; ALEOTTI; CHOWDHURY, 1999; Carrara et al., 1995; GUZZETTI et al., 2005; CHUNG; FABBRI, 2005). Sabe-se que quanto maior o conhecimento sobre os processos que levam à ocorrência de deslizamentos de terra, maior a chance de se definir áreas suscetíveis a estes processos e melhor será o preparo e prevenção contra futuros impactos. Estas áreas (suscetíveis) são definidas como aquelas que apresentam potencial de ocorrência de um fenômeno de destruição, num determinado período de tempo e numa determinada área. O zoneamento destas áreas está relacionado com a divisão de porções de terra, de características ou domínios homogêneos, que variam de acordo com o grau do risco (VARNES, 1984 citado por SIVAKUMAR BABU; MUKESH, 2002).

Os mapas de suscetibilidade a deslizamentos se referem à divisão da terra em zonas com variação do grau de estabilidade, baseando-se na significância dos fatores que induzem a instabilidade (FOUMELIS, 2004). Foumelis et al. (2004) citando vários autores, definiram que os mapas de suscetibilidade a deslizamentos também devem ser examinados como a probabilidade que um fenômeno de deslizamento ocorra sob determinadas condições de terreno, levando-se em consideração a escala de tempo (tempo de recorrência) e um tipo particular de deslizamento. A ideia principal é que a relação entre os deslizamentos que ocorreram no passado e as variáveis que condicionaram estes deslizamentos, possa ser usada para desenvolver mapas de suscetibilidade (REMONDO et al., 2005). Estes mapas procuram refletir o complexo conhecimento sobre os movimentos de massa e seus fatores condicionantes (AYALEW et al., 2005) a fim de poder propor alternativas estruturais e não estruturais para reduzir o risco. Segundo Guzzetti et al (1999), citado por Ayalew et al. (2005) o mapeamento de áreas que estão sujeitas a escorregamentos se baseia na suposição que futuros deslizamentos ocorrerão sob condições similares aos observados no passado. A distribuição espacial das variáveis que compõem o mapa de suscetibilidade de uma área determina a distribuição espacial da suscetibilidade a deslizamento da região (CARRARA et al., 1995 citado por FOUMELIS et al., 2004).

No entanto, o mapeamento da suscetibilidade ou do potencial de ocorrência de deslizamentos de terra não é uma tarefa simples, pois depende do conhecimento complexo dos movimentos de massa nas encostas, bem como de seus fatores condicionantes, que são completamente variáveis no tempo e espaço. A confiabilidade destes mapas depende principalmente da quantidade e qualidade dos dados disponíveis, a escala de trabalho e a seleção da metodologia apropriada de análise e modelagem (AYALEW; YAMAGISHI, 2005). Entre as diferentes abordagens metodológicas relacionadas ao assunto, é comum incluir fatores ambientais, fatores deflagradores e ocorrências de deslizamentos prévios (SASSA et al, 2004;. Van WESTEN et al., 2006). O grande problema é que os dados associados nem sempre estão disponíveis para muitos lugares ou cidades, como é o caso da maioria dos municípios

brasileiros. Nesse caso, a falta de dados está associada com a dificuldade de obtenção de informações para um país de dimensões continentais e com grande heterogeneidade espacial das componentes geológico-geotécnicas, o que requer várias equipes de peritos especializados e, conseqüentemente, recursos financeiros para viabilizá-los.

Além disso, antes de 2011 (quando ocorreu o mega desastre da Região Serrana do Rio de Janeiro) o Brasil não tinha tradição em elaborar este tipo de pesquisa de forma sistemática (mapeamento de suscetibilidade e de áreas de risco). Estas 'demandas só se tornaram mais evidentes para a sociedade como um problema social, político e econômico recentemente, sobretudo após o desastre da Região Serra do Rio de Janeiro (CAMARINHA et al., 2013). Desta forma, poucas cidades brasileiras contam com planejamento urbano adequado que levam em consideração este tipo de ameaça. No entanto, devido ao aumento do número de desastres relacionados a deslizamentos de terra nas últimas décadas, especialmente nas regiões Sudeste e Sul do país, recentemente a Companhia de Pesquisas em Recursos Minerais/Serviço Geológico do Brasil (CPRM) foi incumbida de realizar mapeamento de risco a escorregamentos de áreas urbanas em 821 municípios e o mapeamento de suscetibilidade para os 286 municípios considerados mais críticos. O propósito destes estudos que envolvem a previsão e avaliação dos deslizamentos de terra é apoiar e promover políticas públicas que usam estas informações para mitigação de desastres, essencialmente, expondo os principais fatores causais também em relação à possível interferência antropogênica na deflagração deste fenômeno.

Embora haja esta força-tarefa por parte da CPRM, nem todos os municípios que sofrem com os desastres de deslizamentos de terra estão incluídos nesta lista prioritária, o que caracteriza uma lacuna dentro do setor de gestão de risco aos desastres. Muitos outros municípios também são impactados por estes fenômenos, mesmo que em menor frequência e intensidade, e não contam com tais mapeamentos de suscetibilidade e risco. Tem-se também o fato de que o crescimento da população urbana de forma não planejada e uma

possível intensificação de eventos extremos nas próximas décadas podem favorecer o estabelecimento de novos cenários de risco. Todos estes fatores apontam para a necessidade de métodos de mapeamento alternativos e de fácil aplicabilidade, como forma de colaborar com esta demanda. Foi neste sentido que o presente estudo foi elaborado, onde é apresentada e validada uma metodologia de mapeamento de suscetibilidade aos deslizamentos de terra.

A escolha da área de estudo foi feita em consonância com os resultados do capítulo anterior, onde se destacou parte da planície costeira do estado de São Paulo, nos domínios da Serra do Mar. Esta é uma das regiões consideradas críticas pelo Governo Federal e que requer avaliações de risco de desastres envolvendo deslizamento de terras. Suas características físicas e ambientais, acompanhadas pelo grande crescimento da população, a falta de planejamento urbano e especulação imobiliária são alguns dos fatores determinantes da ocorrência de desastres nos municípios que ali estão.

4.1. Objetivo

O objetivo principal deste Capítulo foi avaliar a suscetibilidade aos deslizamentos de terra (especificamente para escorregamentos planares) e o risco de deslizamento de terra em quatro municípios costeiros do estado de São Paulo, situados sob os domínios da Serra do Mar. No entanto, considera-se também como parte do objetivo realizar esta avaliação através de uma nova proposta metodológica, que utiliza apenas Sistemas de Informação Geográficas (SIG) e banco de dados de domínio público para mapear a suscetibilidade e, assim, proporcionar uma ferramenta útil e confiável para a gestão de desastres naturais. Devido à alta demanda dos municípios brasileiros que precisam de mapeamento de susceptibilidade e risco aos movimentos de massa, objetiva-se também comparar os resultados obtidos com os dados oficiais da CPRM, com vistas a validar a metodologia proposta e

replicá-la para outras em cidades que não dispõem de mapeamento desta natureza.

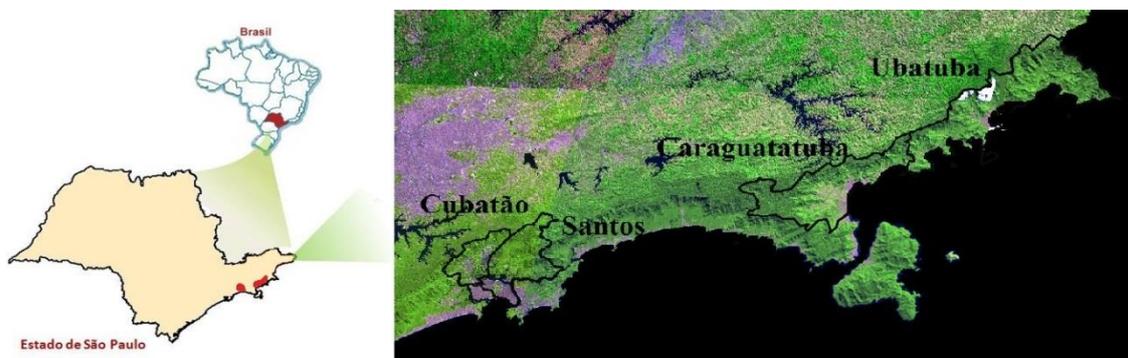
4.2. Área de Estudo

O estudo apresentado neste Capítulo contemplou a avaliação da porção paulista da Serra do Mar, a qual se caracteriza como uma típica borda de planalto, com topos em altitudes variando de 800m a 1.200m (ALMEIDA; CARNEIRO, 1998). Possui como particularidade escarpas festonadas, de modo que seu domínio se estende por mais de 1.000 quilômetros, indo Estado do Rio de Janeiro até Santa Catarina. Tais características associadas ao regime pluviométrico da região com aproximadamente 1200 mm anuais, concentrados principalmente no verão (dezembro a março), têm contribuído na deflagração de diversos eventos, com consequentes perdas de vidas e centenas de desabrigados. Os principais processos de movimento de massa que oferecem risco para a sociedade nesta região são os escorregamentos rasos naturais ou, mais frequentemente observados, os escorregamentos rasos induzidos em taludes de corte e aterro, ambos geralmente associados com solos rasos e depósitos coluvionares (WOLLE; CARVALHO, 1989; IPT, 1986; TATIZANA, 1987a).

Esta região tem uma importância estratégica para o desenvolvimento econômico do país, incluindo portos, estradas, oleodutos e centros turísticos relevantes. Além desses aspectos importantes, a região foi escolhida por ser frequentemente atingida por eventos extremos de precipitação que provocam deslizamentos de terra. Particularmente, o estudo focou em quatro municípios desta porção da Serra do Mar, em razão, além das características citadas previamente, deles terem as áreas de riscos mapeadas sido pela CPRM (2012), cujos mapeamentos foram essenciais para a validação da metodologia proposta. Desta forma, a parcela específica da Serra do Mar estudada nesta etapa do trabalho refere-se a uma parte do litoral de São Paulo, composta por quatro municípios, como sejam, Santos, Ubatuba, Cubatão e Caraguatatuba (

Figura 4.1). A Tabela 4.1 apresenta as principais características sociodemográficas dos quatro municípios avaliados neste Capítulo.

Figura 4.1 – Municípios escolhidos para compor a área de estudo deste capítulo.



Fonte: autoria própria.

Tabela 4.1 - Características demográficas e geográficas dos municípios avaliados.

Município	Área (Km ²)	População (Censo 2010)					Den. Demográfica (pop./Km ²)	IDHm
		Total	Urbana	%	Rural	%		
Santos	280,3	419400	419,086	99.93	314	0,07	1496,26	0.840
Cubatão	142,3	108309	107,661	99.40	648	0,60	761.23	0.772
Caraguatatuba	483,9	100899	97,449	96.58	3450	3,42	208.49	0.802
Ubatuba	723,8	78870	76,958	95.58	1912	2,42	108.96	0.751

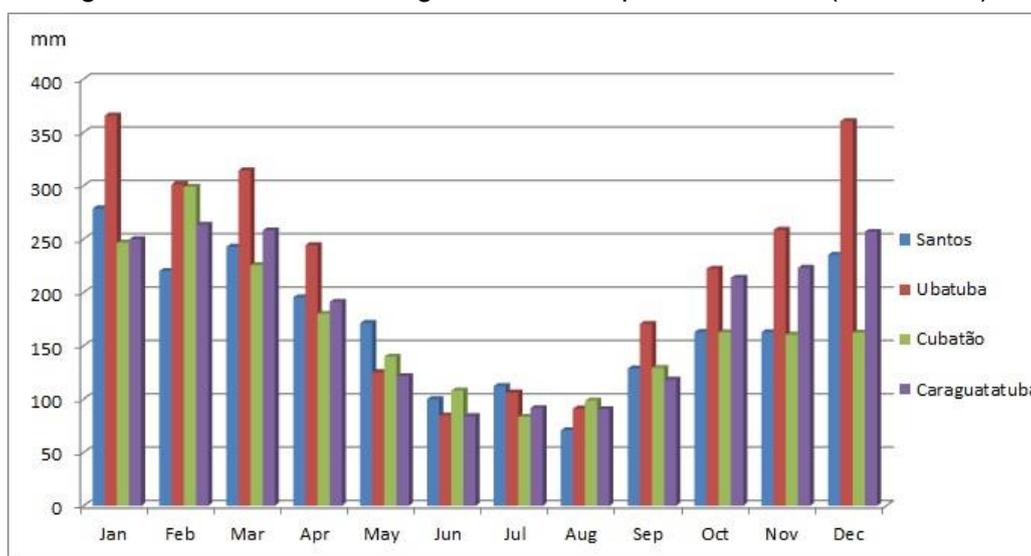
Fonte: autoria própria.

Juntos, os municípios apresentados na Tabela 4.1 ocupam uma área de aproximadamente 1.600 Km². Santos e Caraguatatuba se destacam pelos maiores IDHm (Índice de Desenvolvimento Humano Municipal), considerado "muito alto". Já Cubatão e Ubatuba foram classificados com IDHm "alto", reafirmando a importância e relevância desses municípios.

É comum observar ocorrências isoladas de escorregamentos translacionais (planares) ao longo de cada estação chuvosa (novembro-abril), sendo que os eventos meteorológicos mais extremos que desencadeiam deslizamentos com maior potencial de impacto e, algumas vezes, de forma generalizada ocorrem, normalmente, entre janeiro e meados de março. A Figura 4.2 apresenta a

distribuição mensal da precipitação para os quatro municípios da área de estudo. No entanto, ressalta-se que as ocorrências dos eventos mais extremos não aparecem, necessariamente, nas normais climatológicas.

Figura 4.2 Normal climatológica dos municípios estudados (1961-1990).



Fonte: INMET (www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas)

De acordo com IPMET (2013), esses quatro municípios tiveram 21 registros de desastres relacionados com deslizamentos de terra, com 2182 vítimas (desabrigados, desalojados e feridos) e 12 mortes durante o período de 1993-2013, conforme apresentado na Tabela 2. No entanto, há ainda registros de grandes desastres antes desse período, os quais merecem destaque. Por exemplo, no município de Santos, em 10/03/1928, houve deslizamentos de terra em grande parte nas encostas do Mont Serrat, que culminaram em soterramento de muitas casas e em várias dependências da Santa Casa da Misericórdia, resultando em 80 mortes (TOMINAGA et al., 2009); em 1946, com 56 mortes 24/03/1990 com 2 vítimas fatais e 174 desabrigados. Na cidade de Cubatão, em 06/02/1994 a Refinaria de Petróleo Presidente Bernardes foi parcialmente soterrada por uma corrida de detritos, sem vítimas, mas com prejuízo de 44 milhões de dólares (CRUZ et al., 2000; MASSAD et al., 2004). No município de Caraguatatuba, em 18/03/1967 a cidade foi impactada por

evento de chuva extrema (576 mm em 48 horas), que desencadeou centenas de deslizamentos de terra, com 120 pessoas mortas e cerca de 400 casas destruídas (KANJI et al., 2008). Eventos como estes, que geraram diversas cicatrizes nas encostas, seria de grande interesse para analisar os resultados da metodologia proposta neste estudo; porém, não há registros georreferenciados ou mapas em papel a respeito de tais eventos, tornando-se impossível identificá-los hoje.

Tabela 4.2 - Resumo dos desastres de deslizamento de terra para os quatro municípios estudados entre 1993-2013.

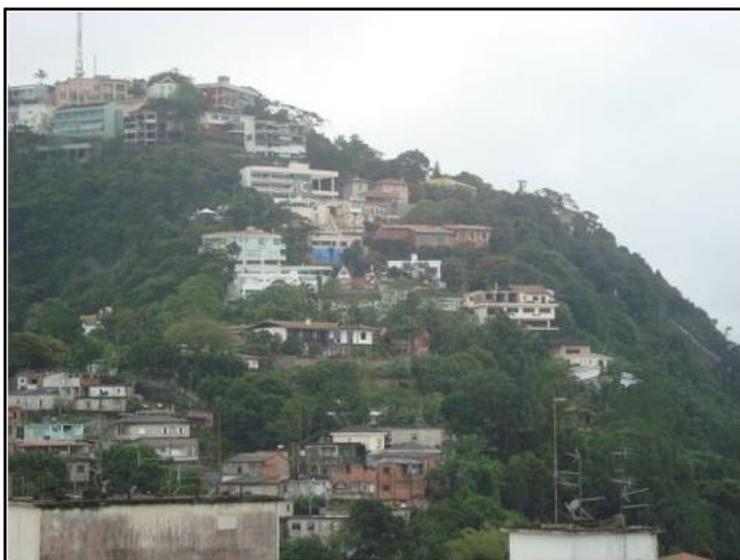
Município	Data	Pessoas afetadas	Óbitos
Santos	01/01/2000	20 desabrigados	-
	09/06/2009	20 desabrigados e 1 desalojado	-
	01/01/2011	8 desabrigados e 52 desalojados	-
	04/12/2011		2
Cubatão	12/11/2004	3 feridos	-
	02/24/2010	34 desabrigados	-
	10/25/2010	34 desabrigados e 160 desalojados	-
	12/31/2010	5 desalojados	-
	02/28/2011	9 desabrigados	-
	12/15/2011	8 desalojados	-
	01/10/2013	67 desalojados	-
	02/22/2013	500 desabrigados	-
Ubatuba	02/13/1996	226 desabrigados e 2 feridos	7
	11/29/2013	3 feridos	1
	11/17/2008	34 desabrigados	1
	02/04/2009	30 desabrigados e 137 desalojados	1
	04/20/2009	20 desabrigados e 27 desalojados	-
	12/31/2009	38 desabrigados e 500 desalojados	-
	01/15/2010	5 desalojados	-
	12/23/2011	180 desabrigados e 55 desalojados	-
Caraguatatuba	12/17/2009	4 desalojados	-

Fonte: IPMET (2013)

De forma geral, a expansão urbana nesta região aconteceu rapidamente sob as áreas mais planas, próximas ao litoral e das áreas portuárias, as quais apresentavam condições favoráveis para o desenvolvimento urbano. Principalmente durante a segunda metade do século passado, houve praticamente o esgotamento das áreas regulares com a infraestrutura local nestas porções, fazendo com que as encostas começassem a ser ocupadas. Com as restrições que existem quanto à verticalização em alguns dos municípios e com a especulação imobiliária devido à valorização turística das

áreas mais planas, a expansão urbana, que por muitas vezes ocorreu de forma desordenada, migrou para áreas de encostas e próximas às serras, estabelecendo novos cenários de risco a desastres relacionados com movimentos de massa (Figura 4.3). Por outro lado, as porções com terrenos mais acidentados em maiores altitudes encontram-se, em grande parte, preservada por vegetação natural (Mata Atlântica).

Figura 4.3 - Exemplo de ocupação em encostas suscetíveis, em Santos, SP.



Fonte: J. C. DE CARVALHO.

4.3. Materiais e Métodos

Em razão de prover uma completa compreensão da metodologia, alguns termos importantes usados ao longo deste Capítulo são definidos a seguir. "Tema" é uma nomenclatura adotada para os dados representados em cada mapa utilizado (ou seja, mapas topográficos, de solos, de geologia, de usos da terra). "Classe" é associada a cada divisão (categorias) dos temas (por exemplo, para o mapa de usos da terra, a "área urbana" é uma classe, tal como "floresta" ou "pastagem", e assim por diante). "Classe de Suscetibilidade" é a categoria hierárquica do mapa final de suscetibilidade, obtido a partir do uso de técnica Fuzzy Gamma. "Setores de risco" são os limites geográficos de

uma determinada área delimitada (representado por um polígono) onde há ameaças naturais que expõem população em risco. Esses setores foram analisados e identificados pela CPRM e são considerados como a base para o planejamento urbano e gestão de riscos a desastres, especialmente para a Defesa Civil. "Níveis de risco" são subdivisões dos "setores de risco", definidos pela CPRM como uma categorização hierárquica dos setores de risco em relação à probabilidade de ocorrência de deslizamentos de terra e de seu potencial de impacto. Basicamente, os níveis de risco estão relacionados com uma análise que avalia as condições geológicas e geotécnicas de predisposição e o nível de intervenção humana em cada encosta ocupada, que leva em consideração fatores como tipo de terreno, sinais de movimento do solo (degraus de abatimento), rachaduras em casas, postes ou árvores inclinadas, erosão no sopé de encostas, amplitude da encosta, entre outros. As classes variam de R1 (menos crítica, baixa probabilidade de ocorrência) para R4 (mais crítico, alta probabilidade de ocorrência).

A metodologia foi elaborada visando a elaboração de um mapa de suscetibilidade de escorregamentos, especificamente do tipo translacional (planar), utilizando apenas dados espaciais e software de domínio público. A escolha dos escorregamentos rasos é devido ao fato do mesmo ser o principal mecanismo de instabilidade de taludes na região de estudo (Serra do Mar), conforme já explicitado.

Escorregamentos translacionais (planares) têm superfície de ruptura plana e geralmente são acompanhados de descontinuidades mecânica e/ou hidrológicas existentes no interior do material (solo), com rápido deslocamento da massa de solo (HUTCHINSON, 1986a; HUTCHINSON, 1986b; FERNANDES; AMARAL, 1996). SELBY (1993) afirma que, geralmente, tais superfícies de ruptura são desenvolvidas através de uma fronteira entre diferentes materiais de densidade do solo ou de permeabilidade, que também pode ser dada através da interface solo-rocha. Guidicini e Nieble (1984) relataram que a superfície de deslizamento se dá em planos de fraqueza que correspondem às superfícies associadas com a estrutura geológica, tais como,

estratificação, xistosidade, gnaissificação, acamamento, falhas, juntas de alívio de tensões e outras. Wolle e Carvalho (1994) caracterizaram este tipo de movimento de massa para a Serra do Mar, na superfície do horizonte coluvionar e do saprolito (solo residual), com espessuras variando de menos de 1 metro a poucos metros, dependendo da litologia e do mecanismo de instabilidade associado às condições de fluxo de água, resistência do solo e perfil de permeabilidade.

Portanto, com base em todas essas citações e, conforme destacado por Atkinson e Massari (1998), pode-se destacar alguns fatores que influenciam na suscetibilidade aos deslizamentos planares rasos (favorecendo ou dificultando), tais como: presença e tipo da vegetação e/ou da cobertura do solo, curvaturas das encostas (vertical e horizontal), inclinação (declive), tipos de solo e geologia. Seguindo estes embasamentos, estas foram as variáveis utilizadas na presente metodologia de mapeamento de suscetibilidade, as quais são expressas por meio de mapas temáticos. Tanto o cruzamento dessas informações (mapas), como a forma que estas variáveis estão relacionadas com a deflagração dos escorregamentos planares, foram feitos através da técnica de inferência espacial da álgebra Mapas conhecida como *Fuzzy Gamma*. Antes de explicar o método propriamente dito, apresentam-se os argumentos básicos para a escolha de tais variáveis.

O ambiente geológico apresenta algumas características peculiares que favorecem a deflagração dos escorregamentos planares rasos. Estas características estão relacionadas com a litologia, estrutura (fraturas, estratificação, articulações etc.) propriedades internas (textura e mineralogia), coesão e ângulo de atrito, permeabilidade e o intemperismo do manto de solo. Quando as descontinuidades da rocha apresentam-se muito próximas e concentradas, podem favorecer a ação de intempéries, facilitando, assim, o aparecimento de zonas de instabilidade (RITTER et al., 1995; AUGUSTO FILHO; VIRGILI, 1998; BIGARELLA et al., 2007).

As características topográficas, tais como o ângulo do declive, a orientação das faces das encostas e as curvaturas (vertical e horizontal), apresentam-se como

fatores importantes na distribuição e concentração de água no solo. A topografia, de acordo com alguns autores, é um reflexo do seu ambiente litológico que varia de acordo com o regime climático ativo (SMALL, 1970; PIERSON, 1980; WILSON; DIETRICH, 1987; GAO, 1993; RITTER et al., 1995; FERNANDES et al., 2004; VIEIRA; FERNANDES, 2004; BIGARELLA et al., 2007). Entre os parâmetros topográficos, a curvatura, especificamente a forma côncava (*hollows*), tem recebido atenção especial. Tal importância é revelada pelo controle hidrológico das encostas, ou seja, no seu papel para determinar as áreas de fluxos d'água na superfície e subsuperfície. Devido ao fato destas concavidades (*hollows*) serem, às vezes, compostas pela deposição de materiais trazidos de lugares adjacentes (ex: cumeeiras, espigões) quando acumuladas podem gerar descontinuidades entre o material original desenvolvido *in situ* e material depositado, favorecendo, assim, a heterogeneidade da permeabilidade. Estas diferenças de permeabilidade podem favorecer a formação de zonas de saturação e induzir a deflagração dos escorregamentos rasos (SMALL, 1970; PIERSON, 1980; WILSON; DIETRICH, 1987; GUIMARÃES et al., 2003; BOGAART; TROCH de 2006.).

Os solos ou "mantos de alteração" são respostas às condições impostas pelos agentes de intemperismo (físico - químicas) na rocha. Eles podem ser classificados como eluvionares, que são solos formados pela decomposição de material de fonte própria e / ou coluvionares e talus que são solos movimentados no passado por agentes de transporte ou por movimento coletivo de materiais (MOUSINHO; BIGARELLA, 1965). De acordo com Augusto Filho e Virgili (1998), como resultado deste processo em ambientes tropicais e subtropicais, os mantos de alteração têm grandes áreas de cobertura e a sua geração proporciona diferentes perfis de resistência e de permeabilidade, entre outras características que são associados com os mecanismos de rupturas. As áreas com diferentes perfis de resistência promovem camadas e estratos com permeabilidades desiguais, o que influencia diretamente na concentração ou na percolação de água no interior do solo, o que reflete na condutividade hidráulica do material (PIERSON, 1980).

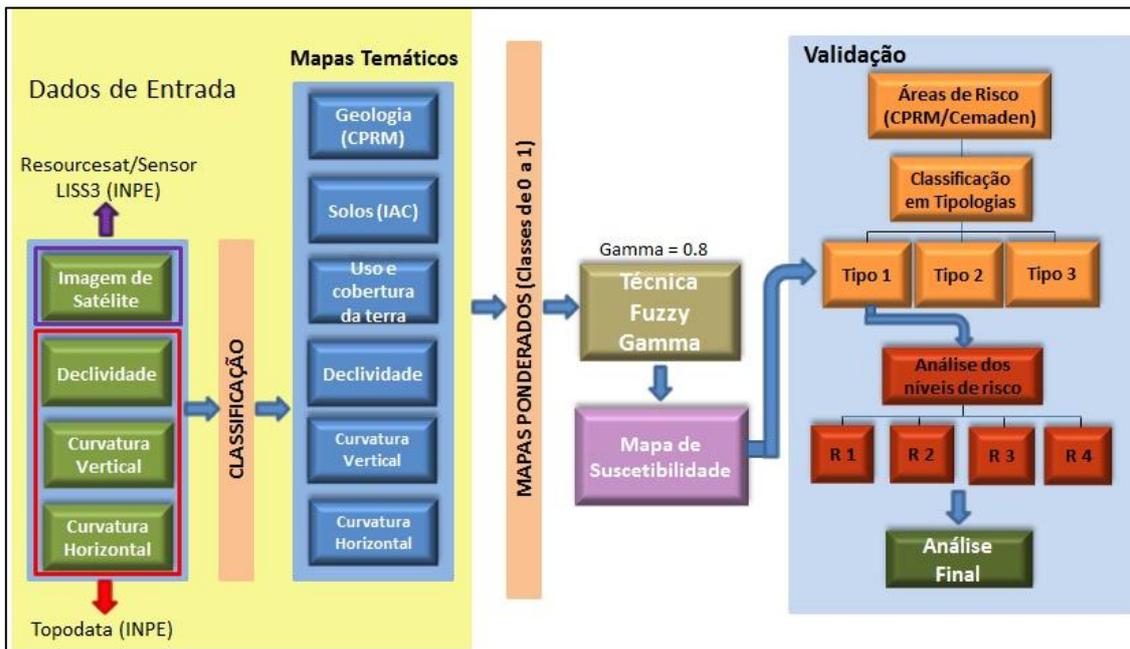
Em relação ao uso e cobertura da terra, a relação mais importante desta variável com a suscetibilidade aos deslizamentos planares rasos é dada por diferentes interações entre o solo e a cobertura vegetal (principalmente o ciclo de molhagem e secagem e o processo de infiltração) e agentes desestabilizadores devido a ações humanas. Greenway (1987) explica o papel da vegetação por dois fatores: a mecânica - que é a interação física do sistema da folha ou raiz com a encosta; e hidrológico, que estão relacionadas com fatores complexos do ciclo hidrológico. Tatizana et al. (1987a) e Kuriakose (2006) salientaram o papel fundamental da vegetação na dinâmica do ciclo da água nas encostas e, conseqüentemente, no interior do solo. Ambos os autores apontam para o papel de retenção de água do dossel, impedindo o impacto direto sobre o solo, bem como a retenção de uma porção de água precipitada que retorna para a atmosfera por evaporação ou ainda o favorecimento do gotejamento, que aumenta a infiltração no decorrer do tempo e reduz o escoamento superficial da água durante eventos de chuva. Outro aspecto importante da vegetação na hidrologia é evapotranspiração, que favorece para não ocorrer a saturação do solo, proporcionando uma melhor condição de estabilidade (GREENWAY, 1987).

Por outro lado, o uso e cobertura da terra também podem ser caracterizada por atividades humanas, as quais podem interferir na estabilidade das encostas, tanto para induzir mecanismos de falha como para contê-los. Isso vai depender do grau de intervenção de cada localização, da infraestrutura local, do histórico de ocupação e como esta informação pode ser representada por mapas. Na maioria dos casos, a definição de classe temática como "área urbana" em um mapa representa apenas um tipo de cobertura da terra, mas generaliza os fatores desestabilizadores de encostas que podem existir. Portanto, para avaliar os usos e cobertura da terra é importante ter um bom conhecimento local da área de estudo, para que se possa avaliar a relação entre as ações humanas e os fatores condicionantes que não aparecem claramente na forma de mapas. Particularmente para a área de estudo deste Capítulo, os escorregamentos planares rasos são induzidos principalmente em lugares onde há intensas atividades antrópicas, especialmente em taludes de corte e

aterro (por exemplo, próximo às margens de estradas e construções irregulares nas encostas). Por este motivo, o mapa de usos e cobertura da terra também foi implementado no mapeamento de suscetibilidade, com o objetivo de destacar o fator antrópico que existe como um condicionante em áreas urbanas em regiões de relevo acidentado.

No que se refere à metodologia como um todo, ressalta-se a premissa de ter-se optado por mapear a suscetibilidade aos deslizamentos de terra utilizando apenas dados espaciais e softwares de domínio público, o que permite que seja replicada para outros casos em que houver necessidade. Basicamente, a metodologia consiste em cruzar informações espaciais organizadas na forma de mapas temáticos, utilizando a técnica conhecida como “Álgebra de Mapas”, mais especificamente a técnica Fuzzy Gamma (descrita posteriormente). A base para a aplicação desta técnica é atribuir pesos específicos para cada classe temática, de forma que seja possível representar seu potencial/influência para deflagrar os deslizamentos de terra. Estes pesos são definidos a partir de critérios lógicos determinados por especialistas nas áreas relacionadas (geotecnia, geografia, geologia, etc.) e também encontrados na literatura. Uma vez mapeada a suscetibilidade, a etapa da validação foi feita comparando-se os resultados com a localização de áreas de risco previamente mapeadas pela CPRM. Simplificadamente, a metodologia pode ser dividida em quatro etapas, conforme ilustrado no esquema da Figura 4.4: i) pesquisa e pré-processamento do banco de dados espaciais necessários para a análise de suscetibilidade aos deslizamentos de terra; ii) preparação e formatação dos dados espaciais para inserção na Álgebra Mapa, técnica *Fuzzy Gamma* (ponderação das classes temáticas); iii) geração do mapa de suscetibilidade; iv) validação dos resultados.

Figura 4.4 - Fluxograma do método utilizado.



Fonte: Autoria própria.

4.3.1. Pesquisa e Pré-Processamento do Banco de Dados Espaciais

O software SPRING (CAMARA et al., 1996) foi utilizado em praticamente todas as etapas, desde a criação e organização do banco de dados espaciais, até a modelagem da suscetibilidade através da técnica Fuzzy Gamma. O mapa de usos e cobertura da terra foi gerado utilizando-se como base imagens de 2012 do sensor LISS III (Linear Imaging Auto Scanner), a bordo do satélite Resourcesat, as quais foram fornecidas gratuitamente pelo INPE. O mapa final contemplou as classes agricultura, área urbana, Eucalyptus, floresta, mangue, pastagem, restinga e solo exposto. Os dados topográficos foram obtidos do TOPODATA (VALERIANO, 2008), que possui resolução espacial interpolada de 30m e incluindo variáveis de declividade, curvatura vertical e horizontal. O mapa geológico (escala 1:750.000) foi obtido no site da CPRM (Serviço Geológico do Brasil: www.cprm.gov.br). O mapa de solos (Escala 1:500.000) foi adquirido do IAC - Instituto Agrônomo de Campinas (OLIVEIRA et al., 1999).

litológicas mais próximas à superfície. As principais unidades na área de estudo são os migmatitos / gnaiss e biotita (cerca de 30%, cada um).

4.3.1.2. Mapas Topográficos

A topografia foi considerada a partir do banco de dados das variáveis de declividade, curvatura horizontal e curvatura vertical das encostas, todas fornecidas pelo projeto TOPODATA (VALERIANO, 2005) e disponível em <http://www.dsr.inpe.br/topodata>. Estes dados possuem resolução espacial de 30m como sub-produto do tratamento e refinamento dos dados fornecidos pelo SRTM (Shuttle Radar Topography Mission).

A curvatura vertical corresponde à característica côncava / convexa das encostas, enquanto a curvatura horizontal representa os perfis convergentes ou divergentes das feições do relevo. Analisando a distribuição de frequência das classes de curvatura horizontal apresentada na Figura 4.5, nota-se que a distribuição é homogênea, ao contrário da curvatura vertical, em que as classes extremas (muito convexa e côncava muito) são aqueles que mais ocorrem, de modo que a classe “muito côncava” está presente em aproximadamente 50% da área de estudo.

Em relação à declividade, a região de estudo aparece com cerca de 70% das classes como fortemente onduladas e montanhosas. Esta característica também está diretamente associada à alta suscetibilidade de deslizamentos planares, principalmente devido à relação da declividade com a pedogênese dos solos rasos e o favorecimento do fluxo de água na subsuperfície.

4.3.1.3. Mapa Pedológico

O mapa do solo utilizado tem escala 1: 500.000 e foi obtido a partir do IAC (Instituto Agrônomo de Campinas), produzido por OLIVEIRA et al. (1999). Os solos ou mantos de alteração são respostas às condições impostas pelos agentes (físico-químicos) de intemperismo que atuam nas rochas,

proporcionando zonas de diferentes propriedades geotécnicas, resistências e permeabilidade. As classes do mapa de solo que estão presentes na área de estudo são: Cambissolo Háplico (CX); Espodossolo Ferrocárbico; Gleissolo Sílico (GZ); Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA). Pela escala do mapa utilizado, os Cambissolos compõem a classe predominante na região (cerca de 80% da área de estudo), que são solos residuais jovens geralmente caracterizados por ter a fração de areia em maior proporção do que a argila (pouco intemperismo), pouco espesso e boa permeabilidade interna. Como os Cambissolos normalmente estão localizados em encostas íngremes, o escoamento superficial da água é mais favorecido que a infiltração. Este fato reduz a quantidade de água que se infiltra para dentro do solo e da rocha matriz, diminuindo parte do intemperismo ocasionado pelas reações da água e os minerais de solo, o que faz suas características estarem fortemente relacionados com a litologia local. Importante ressaltar que a variabilidade de solos em regiões com terrenos acidentados é muito grande e, por isso, diferentes tipos podem ser encontrados em encostas que estão próximas entre si, ou até mesmo em diferentes camadas de solo para uma mesma encosta (topo, rampa e base). Devido à escala deste mapa, esta diversidade de solo não pode ser refletida desta maneira, de modo que as classes apresentadas se referem ao tipo predominante dentro de um determinado domínio geográfico.

Portanto, mapas pedológicos nesta escala de 1:500.000 nem sempre são os mais recomendados para estudos de mapeamento de suscetibilidade. Contudo, sabe-se que os solos apresentam fortes relações com as características topográficas e litológicas, pois estes fatores são essenciais para a desagregação física e química da rocha e do manto de alteração e, conseqüentemente, à sua pedogênese. Portanto, o uso de outras variáveis (curvatura horizontal e vertical, declividade e litologia) ajudam a minimizar potenciais incertezas derivadas do mapa de solo na escala 1:500.000. Esta é uma vantagem na utilização de técnicas de álgebra de mapas, que permitem que o resultado final reflita também as inter-relações entre as variáveis utilizadas.

4.3.1.4. Mapa de Uso e Cobertura da Terra

O mapa de uso e cobertura da terra foi gerado utilizando-se como base imagens de 2012 do sensor LISS III (Linear Imaging Auto Scanner), a bordo do satélite Resourcesat, as quais foram fornecidas gratuitamente pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>).

A classificação das classes foi feita de forma supervisionada e utilizou-se a edição gráfica para a correção dos erros e omissões. O mapa final contemplou as seguintes classes: agricultura, área urbana, Eucalyptus, floresta, mangue, pastagem, restinga e solo exposto. A análise da distribuição espacial destas classes (ver Figura 4.5), aponta uma predominância da classe de floresta, que representa as áreas preservadas pela vegetação natural (Mata Atlântica) quase sempre localizadas em regiões de relevo acidentado e topos de morro da Serra do Mar. Por outro lado, nas regiões planas, que estão mais próximas do litoral, são observados intensos processos de conversão de usos da terra, de modo que o processo de urbanização tornou-se amplamente distribuído e ocupa mais de 8% da área total de estudo. Quando há a sobreposição deste tipo de uso urbano em encostas íngremes, aumenta-se a probabilidade de se caracterizar áreas de risco aos movimentos de massa.

4.3.2. Preparação do Banco de Dados Espacial e Ponderação das Classes Temáticas

Cada classe dos seis mapas temáticos (usos e cobertura da terra, geologia, solo, declividade, curvatura horizontal e curvatura vertical) foi avaliada sob o ponto de vista da suscetibilidade aos deslizamentos, avaliando suas particularidades com relação à sua influência na deflagração dos deslizamentos planares rasos. As premissas para esta avaliação foram sinalizadas nos itens anteriores, levando-se em consideração todos os processos físicos envolvidos na desestabilização das encostas, no que diz respeito à deflagração dos deslizamentos de terra. Um estudo referenciado que

tratou deste tipo de análise de ponderação, no Brasil, foi desenvolvido por Crepani et al. (2001). Os autores avaliaram alguns mapas temáticos (solos, geologia, topografia, uso do solo), obtidos anteriormente para algumas partes do território brasileiro, e pesos foram estabelecidos para cada classe temática, a partir de avaliações feitas por vários especialistas de diferentes áreas científicas, os quais levaram em consideração as especificidades relacionadas com o intemperismo físico dos solos e o processo de desestabilização das encostas. Os mesmos critérios apresentados por estes autores foram utilizados no presente estudo, sendo que para as classes não avaliadas em CREPANI et al. (2001), os fatores de ponderação foram determinados após o consenso das diferentes análises feitas por especialistas engenheiro geotécnico, engenheiro florestal e um especialista em desastres naturais (CAMARINHA et al., 2013) - bem como outros estudos relacionados, tais como de Fernandes e Amaral, (1996); Kanungo et al. (2006); Binda e Bertotti (2007); Vieira et al. (2010); Veloso(2012).

Neste sentido, foi preciso ponderar todas as classes dos mapas temáticas em relação à suscetibilidade antes de se aplicar a técnica Fuzzy Gamma e gerar os mapas. Os pesos atribuídos variaram de 0 a 1, em que 0 indica classes sem relação com a deflagração dos deslizamentos planares rasos, e 1 indica as classes com características fortemente ligadas aos processos de desestabilização de encostas. Esta ponderação transforma os mapas temáticos em uma grade numérica que varia de 0 a 1, respeitando a mesma escala dos mapas originais, os quais serão relacionados através da Álgebra de Mapas.

4.3.2.1. Ponderação das Classes Geológicas

O mapa geológico, adquirido em formato *shapefile*, contempla diferentes tipos de informação, incluindo o tipo litológico na camada mais superficial de solo. Os pesos atribuídos foram baseados nos tipos de rochas presentes nesta camada e correlacionando-os com pesos atribuídos por Crepani et al. (2001), que avaliaram cada litologia sobre a sua probabilidade de provocar

deslizamentos de terra. Basicamente, as premissas utilizadas para a ponderação se baseiam nos argumentos de que rochas ígneas tinham menor probabilidade de escorregamentos superficiais, uma vez que elas são mais resistentes que os outros tipos (menos intemperismo); as rochas metamórficas foram consideradas intermediárias; e rochas as sedimentares foram consideradas as mais suscetíveis (ver Tabela 4.3). Para definir pesos diferentes para cada tipo de rocha ígnea, o critério utilizado referiu-se ao tipo de solo que pode ser desenvolvido por tais litologias e, também, levando-se em consideração a heterogeneidade do substrato pedológico que, por sua vez, pode gerar diferentes padrões de infiltração. As classes de solos aluvionares e coluvionares receberam o maior peso (1,0), devido à forte relação com os escorregamentos rasos que ocorrem na Serra do Mar, descritos anteriormente. Em especial, quando existem taludes de corte e aterro (para a construção de estradas, por exemplo) estes sedimentos tendem a mover-se facilmente quando existe um fluxo de água subterrânea. Este movimento de depósitos sedimentares é suficiente para quebrar as condições de atrito estático da massa de solo, deflagrando os deslizamentos planares rasos em condições menos críticas (ex: menor acumulado de precipitação) quando comparadas com outros tipos de solo.

4.3.2.2. Ponderação da Topografia: declividade, curvaturas horizontal e vertical

A topografia foi avaliada através das curvaturas da variável declividade e as variáveis curvaturas horizontal e vertical das encostas. A curvatura horizontal caracteriza o caráter divergente/convergente dos fluxos de matéria na superfície e subsuperfície do solo quando analisado em uma projeção horizontal. Esta curvatura está relacionada com os processos de migração e a acumulação de água, minerais e matéria orgânica no solo, que são causados pela gravidade e desempenham um papel importante no equilíbrio da água resultante no processo de pedogênese (CAETANO, 2002). Terrenos com perfis

convergentes apresenta uma maior probabilidade de ocorrência de deslizamentos quando comparados com perfis divergentes (FERNANDES; AMARAL, 2003), destacando-se principalmente o fator de favorecimento do acúmulo de água em bacias de contribuição das encostas durante um evento pluviométrico.

Vários estudos geomorfológicos têm chamado a atenção para o papel desempenhado pelas encostas côncavas do relevo (*hollows*) pois também favorecem na convergência do fluxo de água, tanto de superfície quanto na sub-superfície, favorecendo o desenvolvimento de condições de saturação do solo e, finalmente, a geração de escorregamentos rasos (TSUKAMOTO et al., 1982; RENEAU et al., 1984; CROZIER; VAUGHAN, 1990; DIETRICH; DUNNE, 1993; FERNANDES et al., 1994; FERNANDES et al., 2004). Assim, as formas de relevo convergentes (curvatura horizontal) e côncavas (curvatura vertical) receberam os maiores pesos na análise de suscetibilidade (NEUHAUSER; TERHORST, 2007; BRENNING, 2005; TALEBI et al., 2008).

O mapa declividade foi dividido em 5 classes, de acordo com as proposições sugeridas por Binda e Bertotti (2007) e Kanungo et al. (2006), com pesos atribuídos a cada classe de declive, ao invés de valores contínuos. As encostas mais íngremes são mais propensas aos deslizamentos de terra, sendo este um dos fatores-chave na indução de instabilidade de taludes. Com o aumento da declividade da encosta, a tensão de cisalhamento no solo, ou outro material não consolidado, também aumenta. Desta forma, encostas com relevos mais suaves e planos normalmente tem uma baixa frequência de deslizamentos de terra também por conta da tensão cisalhante ser geralmente mais baixa e associada com baixos gradientes (ANBALAGAN, 1992). Portanto, as classes com menores declividades receberam valores próximos a zero, enquanto as mais íngremes receberam valores mais próximos de 1.

4.3.2.3. Ponderação dos tipos de Solos

Para os diferentes tipos de solos, os pesos atribuídos também foram baseados no estudo de Crepani et al. (2001). Uma maior ou menor suscetibilidade aos deslizamentos de terra depende de muitos fatores do solo, tais como a sua estrutura, tipo e quantidade de argilas (relacionadas com a coesão e de baixo ângulo de atrito), a permeabilidade, a profundidade do solo e a presença de camadas impermeáveis (LEE; MIN, 2001).

Para unidades naturais da paisagem, associadas às encostas mais estáveis por não sofrerem interferências antrópicas, o peso atribuído aos solos deve ser baixo (inferior a 0,50), sendo que no presente estudo estas características se associaram à classe dos Latossolos. Analisando pelo ponto de vista geotécnico sobre os escorregamentos planares do tipo raso, este tipo de solo é desfavorável para promover uma ruptura translacional, pois são solos bem desenvolvidos, com grande profundidade e porosidade (microporosidade), coesão, além de serem mais homogêneos quando comparados a outros tipos de solos. Os latossolos são considerados solos com materiais com alto grau de intemperização e são frequentemente referenciados como solos antigos e maduros. Por todas estas características, os latossolos receberam o peso e 0,40.

Os Espodossolos Ferrocárbicos estão presentes em locais de baixa declividade. Este tipo de solo é caracterizado principalmente pela presença de um horizonte B espódico formado pela concentração de matéria orgânica, que é profunda e ainda pode ter um horizonte E desenvolvido. Os Gleissolos também estão presentes em áreas com menor declividade. Sua principal característica é a presença de um horizonte argiloso, normalmente mal drenado. Portanto, ambos os solos (Gleissolos e Espodossolos) receberam pesos intermediários para a suscetibilidade aos deslizamentos de terra (0,60 e 0,55, respectivamente).

Para encostas que são naturalmente suscetíveis aos deslizamentos translacionais rasos, os pesos atribuídos são iguais ou próximos a 1. Nestes

casos, os solos encontrados na Serra do Mar são, geralmente, jovens e que se caracterizam ainda na fase inicial de formação, pois ainda estão se desenvolvendo (sofrendo intemperismo) a partir de materiais de base recentemente depositados, ou porque eles estão localizados em encostas com declive acentuado onde a taxa de perda de solo é igual a ou maior do que a velocidade de transformação da rocha em solo (COELHO-NETO et al., 2009). Os Cambissolos estão neste grupo e podem ser encontrados nos relevos de escarpa, encostas íngremes e regiões montanhosas. Entre algumas características relacionadas com a deflagração dos deslizamentos translacionais rasos, é importante destacar a sua fina espessura de massa de solo e grandes proporções de areia, que promovem e facilitam o fluxo de água na sub-superfície.

A classe chamada "Solos Urbanos" refere-se à parcela da área de estudo que está atualmente impermeabilizada, devido à criação de espaços urbanos e sua infraestrutura relacionada. Portanto, essa classe não representa um tipo específico de solo, mas deve ser incluída como uma classe temática desde que sejam conhecidas as interferências do meio urbano na deflagração do processo, seja para promover o escoamento superficial, favorecer a infiltração ou deslocar a água precipitada para galerias. Isto dependerá das características locais e do histórico do desenvolvimento urbano. Para o caso específico dos municípios da região de estudo, o valor de 1 atribuído para esta classe refere-se ao fato de que as condições do processo de urbanização em locais próximos às encostas favorecem a ocorrência de escorregamentos superficiais. Isto se justifica pelo fato de comumente serem encontrados locais, principalmente nas encostas recém-ocupadas, onde as infraestruturas são precárias e, por muitas vezes, acabam criando caminhos preferenciais para o escoamento e acumulação da água, além de promover situações de sobrecarga em taludes de corte-e-aterro, o que pode desestabilizar as encostas.

4.3.2.4. Ponderação das classes de Uso e da Terra

Para o mapa de uso e cobertura da terra, os pesos atribuídos a cada classe dependem diretamente do tipo de vegetação ou de outro elemento que está sob a superfície do solo. O volume de material (partículas de solo) removido e transportado pela água da chuva está relacionado com a densidade da cobertura vegetal, com a declividade da encosta ou ainda a supressão/ausência de vegetação. De uma forma geral, este processo se torna mais intenso especialmente em áreas com declives acentuados, os quais promovem mais velocidade do fluxo de água superficial (VIEIRA et al., 2010).

A classe "floresta" é a que apresenta o menor peso (0,40) para as classes de usos da terra (ver Tabela 3). A cobertura florestal, junto com o sub-bosque, contribui para a interceptação da água proveniente das chuvas, diminuindo consideravelmente o escoamento superficial da água, os processos erosivos e a formação de ravinas e voçorocas. Considerando que estes processos erosivos estabelecem novas frentes de infiltração e, conseqüentemente, desencadeiam diferentes fluxos de água superficial, o ambiente florestado, portanto, torna a encosta menos suscetível sobre este ponto de visto. Além disso, as raízes, especialmente quando elas estão entrelaçadas, aumentam a estabilidade da massa do solo (TATIZANA et al., 1987b; KURIAKOSE, 2006). Outro fator importante é a manutenção da umidade no ambiente de floresta, dificultando a abertura de trincas de solo em períodos de estiagem e alta incidência de sol, o que poderia ser uma frente de deflagração dos movimentos de massa. Um último fator que contribui para que estas encostas sejam menos suscetíveis é que ambientes florestados são preservados e, portanto, não sofrem influência antrópicas.

Em áreas com plantações de eucalipto, o solo não está totalmente protegido se comparado com áreas de florestas naturais, uma vez que nem sempre há a presença do sub-bosque, o que torna o solo, sob este ponto de vista, um pouco mais suscetível a deslizamentos. Além disso, nos períodos pós-corte do eucalipto também deixam o solo fica exposto, embora algumas empresas

mantenham a camada de serapilheira para evitar os processos erosivos. Outros tipos de cobertura, como manguezais e restingas, receberam baixo peso (0,20) devido ao fato deles se desenvolverem em regiões planas e inundadas e, portanto, serem menos suscetíveis a deslizamentos de terra. A classe "solo exposto" recebeu um peso elevado (0,90) devido à remoção/ausência da cobertura vegetal natural. Com essa remoção, também são perdidos os fatores de estabilização das florestas, explicado anteriormente. Além disso, a exposição do solo sem nenhum tipo de cobertura aumenta a intensidade da radiação solar sobre a superfície, especialmente em regiões tropicais, e após períodos chuvosos as camadas superficiais se secam mais rapidamente do que as camadas profundas. Esta diferença de umidade ao longo do perfil promove diferentes fluxos de água no subsolo, que é um dos fatores que induzem a ativação de deslizamentos planares. As áreas agrícolas também receberam um peso elevado (0,80) porque algumas culturas geralmente apresentam um período em que o solo fica exposto durante o desenvolvimento da planta, aumentando a suscetibilidade devido aos fatores previamente citadas para a classe de "solo exposto".

As classes "estrada" e "área urbana" receberam os maiores pesos (0,90 e 1,00, respectivamente) por se tratarem de usos da terra com alta alteração/degradação da paisagem, o que pode acelerar/induzir processos de movimentos de massa, como explicado anteriormente. Note-se que o método proposto considera a área urbana como um forte fator que contribui para a desestabilização das encostas enquanto as florestas e áreas naturais favorecem a estabilidade. Essas relações são inerentes da área de estudo, porque as áreas urbanas nas encostas foram ocupadas rapidamente durante as últimas décadas e anos sem qualquer planejamento urbano, de modo que há muitos fatores que aumentam a suscetibilidade, tais como: sistema de drenagem urbana deficiente, as construções têm fundações apoiadas nas camadas superficiais do solo (não sobre as rochas); há lançamento de águas servidas, o que favorece a erosão no sopé das encostas, além de cortes irregulares de taludes, sobrecargas não planejadas, entre outros.

Os pesos atribuídos para todas as classes temáticas dos diferentes mapas utilizados estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Ponderação das classes temáticas em relação à suscetibilidade aos deslizamento de terras.

Tema		Peso	Tema	Peso
Geologia	Tipo de Rocha		Curvatura Vertical	
	<i>Ígnea</i>		Muito convexo	0,20
Granito		0,37	Convexo	0,30
Migmatito, gnaisse		0,43	Retilíneo	0,50
	<i>Metamórfica</i>		Côncavo	0,80
Biotita		0,47	Muito côncavo	1,00
Xisto		0,50		
Metagabro		0,70	Curvatura Horizontal	
Monzogranito		0,60	Muito divergente	0,20
Milonita		0,77	Divergente	0,30
Leucogranito			Plana	0,50
Ortognaisse			Convergente	0,80
	<i>Sedimentar</i>		Muito convergente	1,00
Sedimentos Inconsolidados: Alúvio, colúvio		1,00	Uso e Cobertura da terra	
			Agricultura	0,80
Classe de Solo	Sigla		Área urbana	1,00
Cambissolo Háplico	CX	0,80	<i>Eucalyptus</i>	0,70
Espodossolo Ferrocárbico	ES	0,75	Estradas	0,90
Gleissolo Sáfico	GZ	1,00	Pastagem	0,70
Latossolo Vermelho-Amarelo	LVA	0,40	Restinga	0,50
Urbano	URB	1,00	Mangue	0,40
			Solo exposto	0,90
			Floresta	0,40
Declividade	Classe			
maior que 45°	Montanhoso	1,00		
20 a 45°	Forte Ondulado	0,80		
8 a 20°	Ondulado	0,50		
3 a 8°	Suave Ondulado	0,30		
0 a 3°	Plano	0,20		

Fonte: Adaptado de Camarinha et al. (2013).

4.3.3. Construção do Mapa de Suscetibilidade e a Técnica Fuzzy Gama

A utilização da técnica Fuzzy Gama é considerada uma abordagem eficaz quando não se dispões de dados estatisticamente suficientes ou quando é difícil avaliar a suscetibilidade a partir de modelos matemáticos, especialmente para grandes áreas (MERCANOGLU; GOKCEOGLU, 2004). Neste sentido, as

incertezas decorrentes das informações e parâmetros utilizados nas avaliações de suscetibilidade aos deslizamentos de terra e o caráter não linear do fenômeno sugerem que a técnica Fuzzy Gamma pode ser uma boa alternativa para a avaliação específica deste tipo de fenômeno. Esta técnica também apresenta algumas vantagens quando comparada com os métodos de inferência espacial convencionais, como o booleano ou média simples, pois são utilizadas zonas de transição gradual para dividir as classes, ao invés de fronteiras rígidas que caracterizam mudanças bruscas (descontinuidades) nos valores do resultado final (BURROUGH; MCDONNELL, 1998).

Desta forma, os seis temas previamente apresentados foram combinados para gerar um mapa de suscetibilidade final usando o operador Fuzzy Gama. Este operador foi introduzido por Zadeh (1965) e permite um tratamento mais realista de dados imprecisos e subjetivos que sejam necessários para compor alguns tipos de análises em ambientes físicos. No caso do presente estudo, a proposta metodológica tem como premissa usar informações previamente existentes que foram geradas para outros objetivos, mas que podem ser utilizadas para o caso da suscetibilidade. Para tal, entretanto, é necessário que estas informações sejam avaliadas sob este ponto de vista em específico do processo/fenômeno de interesse. Neste contexto a etapa de ponderação é uma alternativa para transformar as classes temáticas em variáveis numéricas a partir de uma avaliação subjetiva, mas que seja representativa. Também por estes motivos a técnica Fuzzy Gama foi considerada uma boa alternativa para compor o estudo proposto.

A teoria Fuzzy emprega a ideia de funções de membro, na qual expressa o grau de pertinência de um dos membros (variáveis) e função de algum atributo de interesse que, neste caso em particular, seria a suscetibilidade aos deslizamentos de terra do tipo planar raso (translacional). A estrutura do operador Fuzzy Gama está apresentada na Equação 3.1.

$$\mu_{combinação} = \left(1 - \prod_{i=1}^n \mu_i (1 - \mu_i) \right)^{\gamma} \cdot \left(\prod_{i=1}^n \mu_i \right)^{1-\gamma} \quad (3.1)$$

em que γ (gamma) é um parâmetro escolhido no *range* 0 e 1. Quando $\gamma = 0$, a combinação fuzzy é igual ao produto algébrico, e quando $\gamma = 1$, é igual à soma. Segundo BONHAM-CARTER (1994), os valores do intervalo $0 < \gamma < 0,35$ apresentam um caráter “diminutivo”, ou seja, sempre menores ou iguais ao menor membro fuzzy de entrada; os valores do intervalo $0,80 < \gamma < 1,0$ têm um caráter “aumentativo”, em que o valor de saída será igual ou maior que o valor do maior membro fuzzy de entrada; e os valores do intervalo $0,35 < \gamma < 0,80$ não apresentam nem um caráter “aumentativo” nem “diminutivo”, e os valores de saída cairão sempre entre o menor e o maior valor daqueles de entrada. Alguns testes preliminares foram feitos para este estudo de modo que o γ utilizado foi de 0,80. Este valor de entrada não tem um caráter diminutivo ou aumentativo, e foram usados em trabalhos de Lee (2007), Pradhan et al. (2009) e Pradhan (2010) em mapeamentos de suscetibilidade. Outras razões para esta escolha estão apresentadas em estudos desenvolvidos para outras áreas, tais como por Canavesi et al., (2013) e Alvalá et al. (2013), que sugeriram que o gama neste valor fornece os melhores resultados para representar fenômenos de escorregamentos rasos para as mesmas regiões, quando comparados com outros valores.

O mapa resultante apresenta valores numéricos entre 0 e 1 e foi dividido em cinco classes de suscetibilidade equidistantes entre si, isto é, com intervalos iguais a 0,20 de uma classe para outra (0,00 – 0,20 – 0,40 – 0,60 – 0,80 – 1,00). Por fim, visando uma melhor visualização dos resultados, uma “máscara” foi criada para filtrar as áreas de mapeamento com declividades inferiores a 10%. Esta máscara serve para desconsiderar as encostas de relevos mais suaves que, por conta da combinação das demais variáveis utilizadas neste trabalho, poderiam ser caracterizadas com suscetibilidade média e alta. Esta etapa é baseada nos dados históricos regionais e consulta na literatura que indicaram que não há ocorrências de deslizamentos para locais com declividades inferiores a este valor e, com isso, otimiza-se a visualização do resultado final.

4.3.4. Validação dos Resultados

A aplicação de técnicas de mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos de terra requer uma etapa de validação, objetivando avaliar a qualidade e representatividade dos resultados. Geralmente esta etapa é feita através da comparação entre alguns dados reais de ocorrências anteriores, tais como imagens, relatórios de risco/perigo e, principalmente, a localização de cicatrizes de movimentos de massa que ocorreram no passado (BEGUERIA, 2006 ; XIANG et al., 2005). Porém, como a proposta metodológica deste estudo inclui apenas softwares e dados de domínio público, a validação dos resultados da técnica Fuzzy Gamma não foi feita por meio de mapas de cicatrizes de escorregamentos prévios, que é uma técnica de validação comumente utilizada em vários estudos relacionados (VIEIRA et al., 2010; DYMOND et al., 2006; MERCANOGLU; GOKCEOGLU, 2004; VAHIDNIA et al., 2010). Para o presente estudo, a alternativa foi utilizar os setores de risco mapeados pela CPRM como unidades de validação, uma vez que no Brasil não há dados gratuitos e de domínio público sobre cicatrizes de movimentos de massa.

Durante o desenvolvimento do presente trabalho, vislumbrou-se gerar mapas de cicatrizes para algumas localidades específicas; mas, considerando que o mapeamento detalhado desta natureza demanda tempo, tornou-se inviável incluí-lo, uma vez que a escala de estudo é regional ou municipal e objetiva-se replicar tal mapeamento no futuro. Conforme já ressaltado, o Brasil é um país com dimensões continentais, o que demandaria grande esforço para a obtenção de mapeamentos de risco, de forma rápida, inviabilizando o uso de mapas de cicatrizes no caso de ser desejável a replicação do método para outras regiões. Além disso, a presente metodologia é focada na identificação da alta suscetibilidade em regiões povoadas, sobretudo em centros urbanos, sendo que a maioria das cicatrizes prévias pode ser encontrada apenas em áreas florestadas ou em locais que não apresentem risco para a população. Portanto, se utilizadas como referência para validação ou ajustes, tais cicatrizes direcionariam para um modelo de suscetibilidade que fosse

representativo nas áreas naturais e florestadas, e não nas áreas urbanizadas, que são o foco deste estudo.

Desta forma, uma base de dados espaciais referente a setores de risco previamente mapeados foi utilizada para a etapa de validação. Este mapeamento foi desenvolvido pela CPRM e disponibilizado pelo Cemaden (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais), que, por sua vez, usa esses setores de risco como base para o monitoramento dos municípios considerado prioritários e na elaboração de alertas de deslizamento de terra, a partir do monitoramento de eventos extremos hidro-geometeorológicos (CAMARINHA et al.;2013).

4.3.4.1. Os setores de risco mapeados pela CPRM

Os setores de risco correspondem a polígonos espaciais delimitados por especialistas (geólogos, engenheiros civis, geotécnicos, entre outros), que incluem áreas urbanas sujeitas a deslizamentos de terra que podem oferecer risco à população. Os procedimentos adotados para a identificação de riscos em áreas urbanas foram realizados em escala de detalhe, variando de 1:2000 a 1:1000, utilizando também técnicas de sensoriamento remoto e bases cartográficas, bem como a literatura disponível para avaliações de pré-reconhecimento. Em cada município mapeado, técnicos e especialistas em defesa civil, juntamente com pesquisadores da CPRM (incluindo equipes de geólogos geógrafos, hidrólogos e engenheiros geotécnicos) fizeram o levantamento de campo, especialmente para delinear as áreas urbanas e peri-urbanas e identificar os setores com risco alto e muito alto aos movimentos de massa.

Teoricamente, a delimitação de áreas de risco é feita através de um polígono em torno da porção de uma encosta com potencial de sofrer algum tipo de processo natural ou induzido, que pode causar danos, e é limitado a partir de imagens e/ou fotografias daquela localidade em particular. Assim, este tipo de avaliação demanda trabalho detalhado, baseado tanto em estudos de larga

escala, quanto complementação por avaliações *in situ*. Ressalta-se que os setores de risco da CPRM correspondem aos locais visitados em campo que mostram evidências de possíveis movimentos de massa (rachaduras/sinais de subsidência do solo, cicatrizes, árvores e/ou postes de iluminação inclinados, etc.) e que ameaçam ocupações urbanas. Áreas de preservação natural, áreas agrícolas, pastagens, bem como áreas urbanas em condições que ainda não apresentaram qualquer evidência de movimentos de massa não foram incluídos nestes mapeamentos da CPRM.

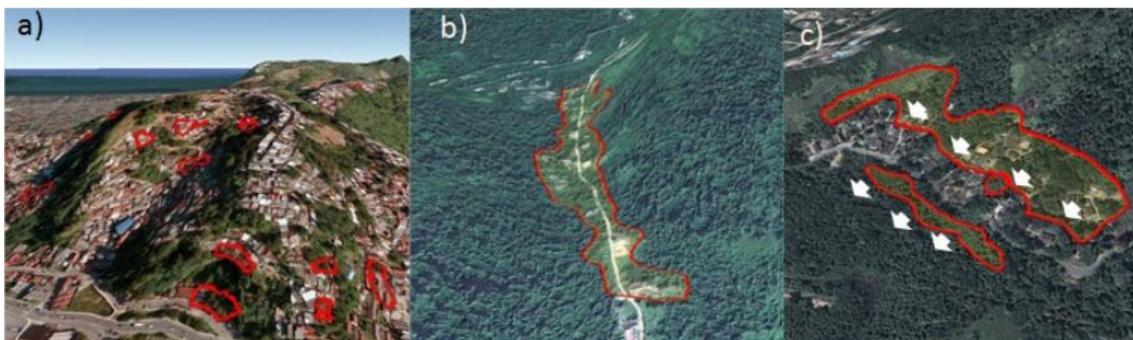
4.3.4.2. Tipologias dos setores de risco

Ao explorar o banco de dados da CPRM, foi possível identificar diferentes modelos e tipos de setores de risco que não apresentam, necessariamente, as mesmas características entre si. Estas diferenças se devem ao fato dos mapeamentos terem sido feitos em tempos distintos e, conseqüentemente, por equipes diferentes. Com isso, foi preciso classificar as principais tipologias de setores de risco observadas, com o intuito de usá-las corretamente durante a etapa de validação:

- Tipologia 1: os polígonos encontram-se em encostas íngremes, predominantemente com construções urbanas, que apresentam risco de deslizamento de terra onde a massa de solo levaria consigo as residências que se encontram sobre a encosta, ou regiões adjacentes;
- Tipologia 2: os polígonos se encontram em áreas com relevo plano / ondulado que têm atividades e / ou ocupações urbanas (estradas e habitações) em risco de deslizamentos de terra que podem ser deflagrados nas encostas que estão acima ou abaixo de onde eles estão;
- Tipologia 3: os polígonos representam encostas íngremes, predominantemente desabitadas e / ou conservadas, geralmente florestadas, que apresentem riscos de deslizamentos de terra sob estas

regiões e podem atingir habitações, ou atividades, que se encontram em localidades próximas (Figura 4.6).

Figura 4.6 - Três tipos de setores de risco encontrados no mapeamento CPRM.



Polígonos em vermelho representam os setores de risco. Exemplos de: (a) Tipologia 1, (b) Tipologia 2 e (c) Tipologia 3 dos setores. As imagens são do Google Earth® 2013. Fonte: autoria própria.

Esta classificação em tipologias é importante porque nem todos os setores de risco mapeados representam locais suscetíveis aos deslizamentos e, conseqüentemente, não corresponderão aos locais indicados pela Fuzzy Gamma com alta suscetibilidade. Isto porque a técnica aplicada tem como premissa apontar alta suscetibilidade apenas quando há sobreposição de vários fatores condicionantes (declividade, litologia, solos e etc.), sendo que o risco mapeado pela CPRM independe, algumas vezes, dessa sobreposição. No caso de tipologia 2, por exemplo, os setores de risco não representam áreas suscetíveis, mas indicam encostas estáveis ou locais de relevo mais suave que podem ser atingidos por deslizamentos de terra nas suas proximidades. Portanto, durante a etapa de validação foi necessário filtrar estas tipologias para que se usasse apenas os setores de risco representativos que tenham relação com locais de alta suscetibilidade, da Tipologia 1. Caso contrário, a comparação feita a partir de setores riscos com diferentes características poderia indicar resultados inconsistentes com a destreza do método.

4.3.4.3. Métricas de avaliação

Após a geração do mapa de suscetibilidade no formato Raster (matricial), o arquivo foi convertido em um shapefile de polígonos. Desta forma, cada conjunto de “pixels” de uma mesma classe estabelece um polígono até o limite fronteiro com outro conjunto, de outra classe. Estabelecidos estes polígonos, quantificou-se a área total (em m²) de cada classe suscetibilidade; calcularam-se os seus respectivos histogramas e, posteriormente, estes dados foram relacionados com os setores de risco da CPRM.

Para avaliar as relações espaciais entre o resultado obtido através da técnica Fuzzy Gamma e os setores de risco mapeados pela CPRM, utilizou-se funções simples de SIG (como o "Clip"). Esta função identifica as intersecções entre os setores de risco e o resultado da suscetibilidade, criando um novo shapefile com a mesma delimitação espacial dos setores de risco, mas agora com as informações de suscetibilidade agregadas a ele. Com esta função foi possível identificar e quantificar as classes de suscetibilidade que estão dentro dos setores de risco. Nesta etapa espera-se que os setores de risco sejam compostos principalmente pelas classes de suscetibilidade mais alta e, para avaliar esta distribuição, foi criado um índice específico.

Desta forma quantificaram-se as proporções das áreas ocupadas por cada classe de suscetibilidade que estivesse inserida dentro dos setores de risco, caracterizando o índice denominado "Concentração de Risco" (RC, do inglês *Risk Concentration*). Portanto, RC é definido como a frequência (percentagem) de cada classe de suscetibilidade considerando apenas o interior dos polígonos definidos pelos setores de risco.

Outro índice também foi usado na etapa de validação, este denominado de "Potencial de Risco" (RP, do inglês *Risk Potential*). O índice de RP é a proporção entre a área ocupada por cada classe de suscetibilidade dentro dos setores de risco (a mesma medida utilizada para calcular o índice RC) e a área total de cada classe considerando limites urbanos da área de estudo. O nome "Potencial de Risco" se refere ao potencial que o método utilizado possui para

determinar uma situação que caracteriza risco aos deslizamentos, considerando os mapeamentos prévios que já avaliaram o risco existente. Por exemplo, um RP de 10% significa que para cada 10 ha (ou m², km², etc.) estimado pelo modelo como sendo uma área altamente suscetível, pelo menos 1 ha (ou m², km², etc.) se encontra dentro de áreas de risco previamente mapeadas. Este índice indica o quão preciso é o método, pois esta métrica sintetiza a taxa de precisão entre todas as áreas indicadas pelo modelo e aquelas que realmente estão dentro das áreas de risco. Devido ao fato deste índice levar em consideração os mapeamentos prévios como uma informação de referência, é preciso ressaltar que estes mapeamentos prévios devem conter o maior número de setores de risco possível que seja condizente com a realidade, bem como estar atualizado. Caso contrário, o modelo pode inferir áreas altamente suscetíveis que realmente seriam áreas de risco, mas que, por estes setores não terem sido mapeados, o índice calculado será menor e, conseqüentemente, apontará uma menor qualidade de acurácia. Sabendo de tais motivos e reconhecendo que os mapeamentos de situações de risco ou de cicatrizes de deslizamentos prévios jamais conseguirão refletir toda a criticidade da área mapeada, os estudos encontrados na literatura consideram que o valor superior a 5% para o RP é um bom parâmetro para validar a qualidade dos modelos de predição de suscetibilidade ou do risco (CROSTA; FRATTINI, 2003; SALCIARINI et al., 2006; VIEIRA et al., 2010; PASCARELLI et al. 2011; LISTO; VIEIRA, 2012).

Em alguns estudos na literatura, índices semelhantes são usados e, geralmente são chamados de "*Landslides Concentration (LC)*" e "*Landslide Potential (LP)*", que são análogos aos índices previamente citados. A nomenclatura diferente deve-se à utilização do mapa de cicatrizes de deslizamentos ao invés dos setores de risco (ou áreas de risco). Nestes casos, as métricas consideram a área das classes que estão dentro dos limites das cicatrizes. Todavia, estes índices podem ser utilizados para comparação entre os diferentes estudos, pois indicam a acurácia e eficiência dos métodos em inferir áreas suscetíveis.

4.3.4.4. Avaliação considerando os Níveis de Risco

Além das análises previamente apresentadas, adotou-se outra abordagem complementar, baseada na terminologia de "níveis de risco" usado pela CPRM, considerada também por alguns estudos recentes (LISTO; VIEIRA, 2012; PASCARELLI et al., 2011.). A classificação de "níveis de risco" fornecida pela CPRM considera uma categorização hierárquica dos setores de risco em relação à probabilidade de ocorrência de escorregamentos e seus impactos potenciais. Esta classificação foi feita por especialistas da CPRM com base em critérios pré-definidos e evidências avaliadas *in loco*. Basicamente, esta é uma análise que avalia as condições geológicas e geotécnicas predisponentes e o nível de intervenção humana em cada encosta ocupada, levando em consideração fatores como o tipo de terreno, sinais de movimento do solo (degraus de abatimento), rachaduras em casas, postes ou árvores inclinadas, erosão nas bases dos taludes, comprimento/altura da encosta, entre outros.

As classes variam de R1 (menos crítica, baixa probabilidade de ocorrência) até R4 (mais crítico, alta probabilidade de ocorrência). Por estas razões, optou-se por analisar separadamente os setores de cada "nível de risco" e calcular a distribuição das classes de suscetibilidade obtidas pelo método Fuzzy Gamma. Embora a categorização da CPRM tenha sido feita a partir de evidências encontradas *in loco*, o objetivo desta comparação foi avaliar as contribuições e deficiências da metodologia proposta. A hipótese é que os setores menos críticos (R1 e R2) devem apresentar uma menor proporção de classes de suscetibilidade mais alta quando comparados com os setores mais críticos (R3 e R4). O objetivo da CPRM em usar a classificação do nível de risco é o de apoiar a defesa civil, gestores urbanos, bem como o Cemaden, que provê os alertas de deslizamentos durante a estação chuvosa. Portanto, esta classificação da CPRM não é um produto científico preparado para fins acadêmicos, mas pode ser incorporado perfeitamente na etapa de validação da presente metodologia proposta.

É importante ressaltar que a metodologia apresentada neste estudo não corresponde aos estágios adotados na definição e classificação dos setores de risco desenvolvidos pela pesquisa da CPRM. A descrição dos níveis de risco é apresentada a seguir (Tabela 4.4). Nesta análise, o objetivo foi encontrar correlações entre os níveis de risco e as classes de suscetibilidade, ou seja, espera-se que quanto maior o nível de risco, maior é a preponderância das classes de suscetibilidade mais alta.

Tabela 4.4 – Classificação utilizada pela CPRM para hierarquizar os setores de risco.

Graus de Risco	Descrição
R1 Baixo	Não há indícios de desenvolvimento de processos destrutivos em encostas e margens de drenagens. Mantidas as condições existentes, não se espera a ocorrência de eventos destrutivos.
R2 Médio	Observa-se a presença de alguma(s) evidência(s) de instabilidade (encostas e margens de drenagens), porém incipiente(s). Mantidas as condições existentes, é reduzida a possibilidade de ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas.
R3 Alto	Observa-se a presença de significativa(s) evidência(s) de instabilidade (trincas no solo, degraus de abatimento em taludes etc.) Mantidas as condições existentes, é perfeitamente possível a ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas.
R4 Muito Alto	As evidências de instabilidade (trincas no solo, degraus de abatimento em taludes, trincas em moradias ou em muros de contenção, árvores ou postes inclinados, cicatrizes de escorregamento, feições erosivas, proximidade da moradia em relação ao córrego etc.) são expressivas e estão presentes em grande número e/ou magnitude. Mantidas as condições existentes, é muito provável a ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas.

Fonte: Autoria própria, adaptado de MINISTÉRIO DAS CIDADES e IPT (2004).

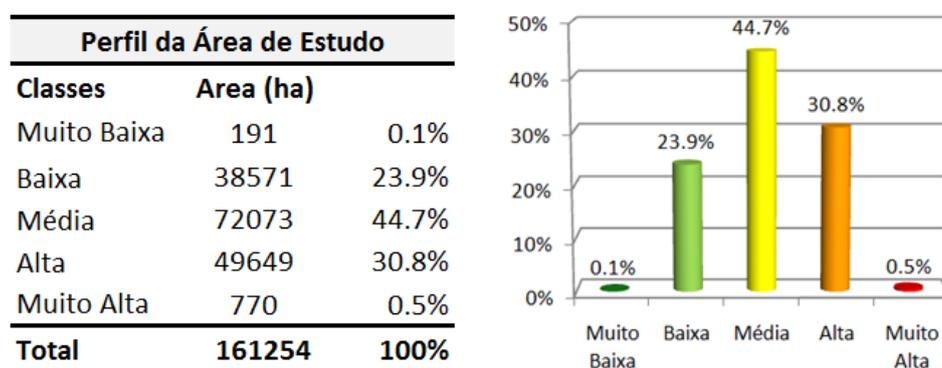
4.4. Resultados e Discussões

4.4.1. Discussões gerais sobre os mapas de suscetibilidade

Os mapas finais resultantes da técnica Fuzzy Gamma estão apresentados na Figura 4.8 para os quatro municípios analisados. Nota-se que os padrões espaciais de suscetibilidade aos deslizamentos de terra estão de acordo com o esperado: i) regiões de topo de morro, encostas florestadas e preservadas e os depósitos sedimentares (normalmente bem próximos ao litoral, onde se

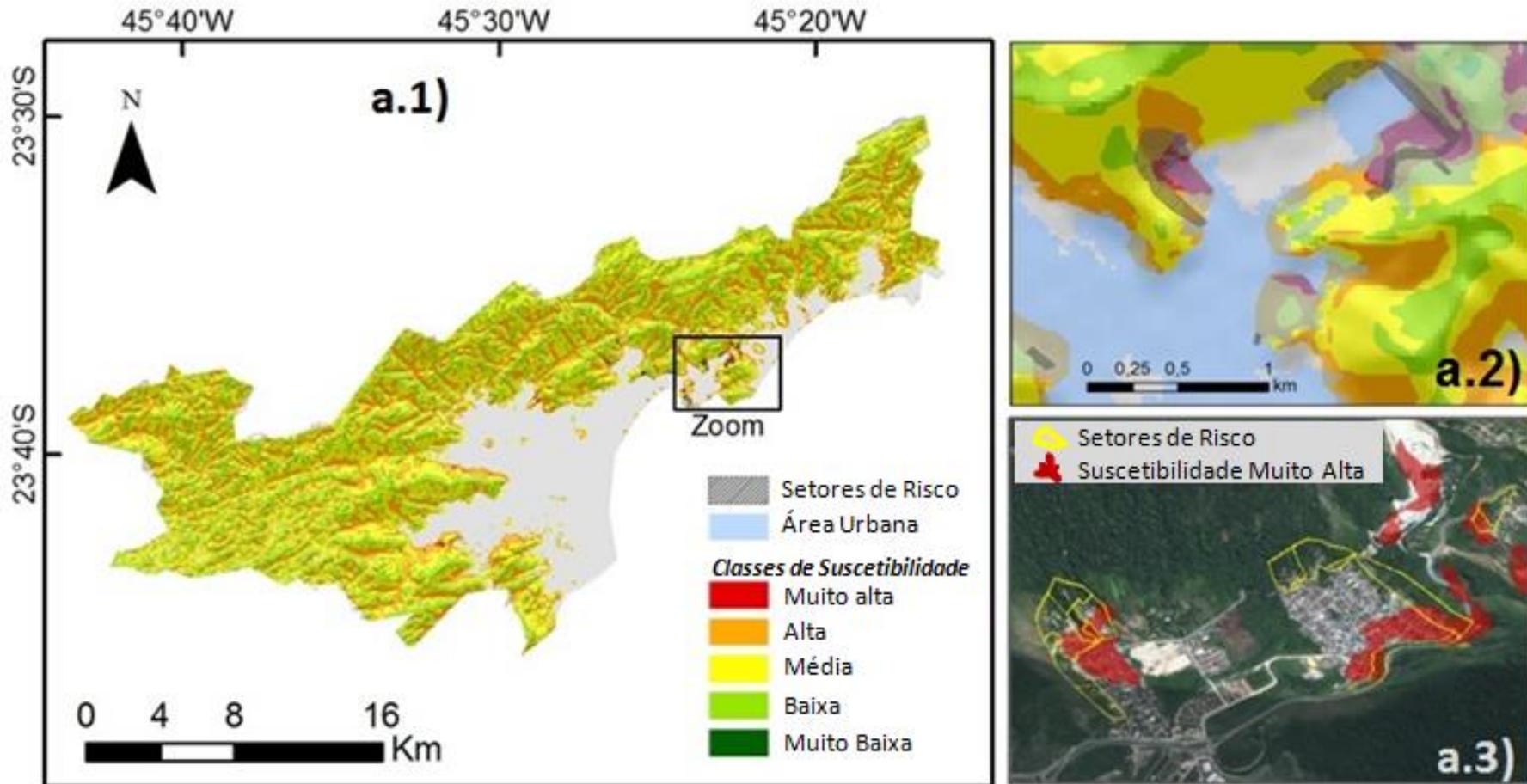
encontra 90% da área urbana) majoritariamente com suscetibilidade baixa e média e; ii) encostas com atividades humanas, normalmente delineadas por movimentos de massa que ocorreram no passado (ex: curvaturas muito convexas), com solos de rasa ou média profundidade apresentaram-se, majoritariamente, com suscetibilidade alta. Analisando visualmente os resultados e considerando a localização dos setores de risco da CPRM, há indicativos que a modelagem da suscetibilidade também é consistente com o esperado. Ou seja, estes setores estão localizados nas áreas em que o mapeamento inferiu uma maior suscetibilidade (classes "alta" e "muito alta"). Contudo, apenas este tipo de verificação (visual) não é suficiente para validar a metodologia e, portanto, seguiu-se para as próximas etapas de validação. A frequência de ocorrência para cada classe de suscetibilidade, considerando toda a área de estudo, foi calculada e está apresentada na Figura 4.7.

Figura 4.7 - Frequências de ocorrência para cada classe de suscetibilidade.

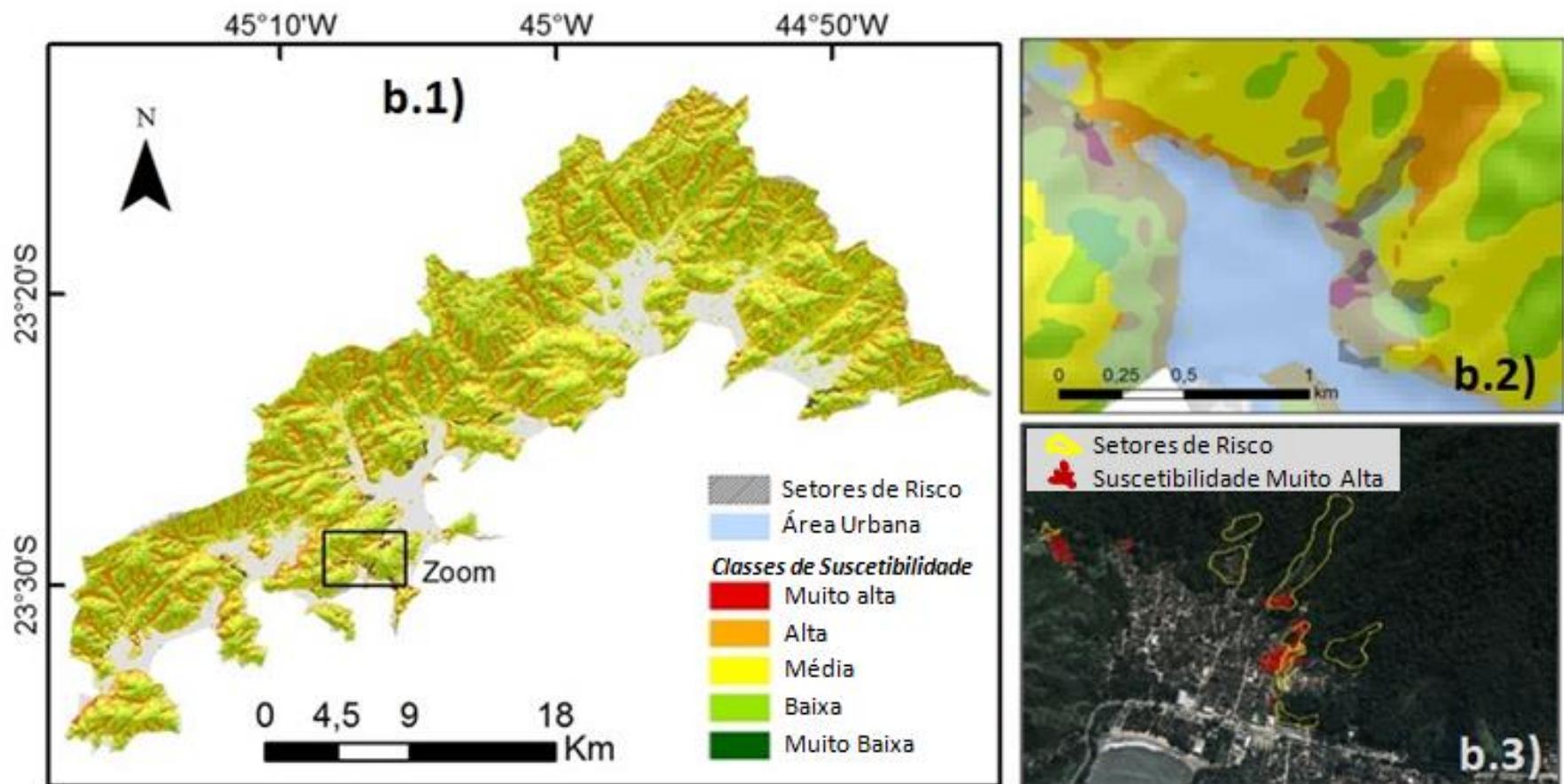


Fonte: autoria própria.

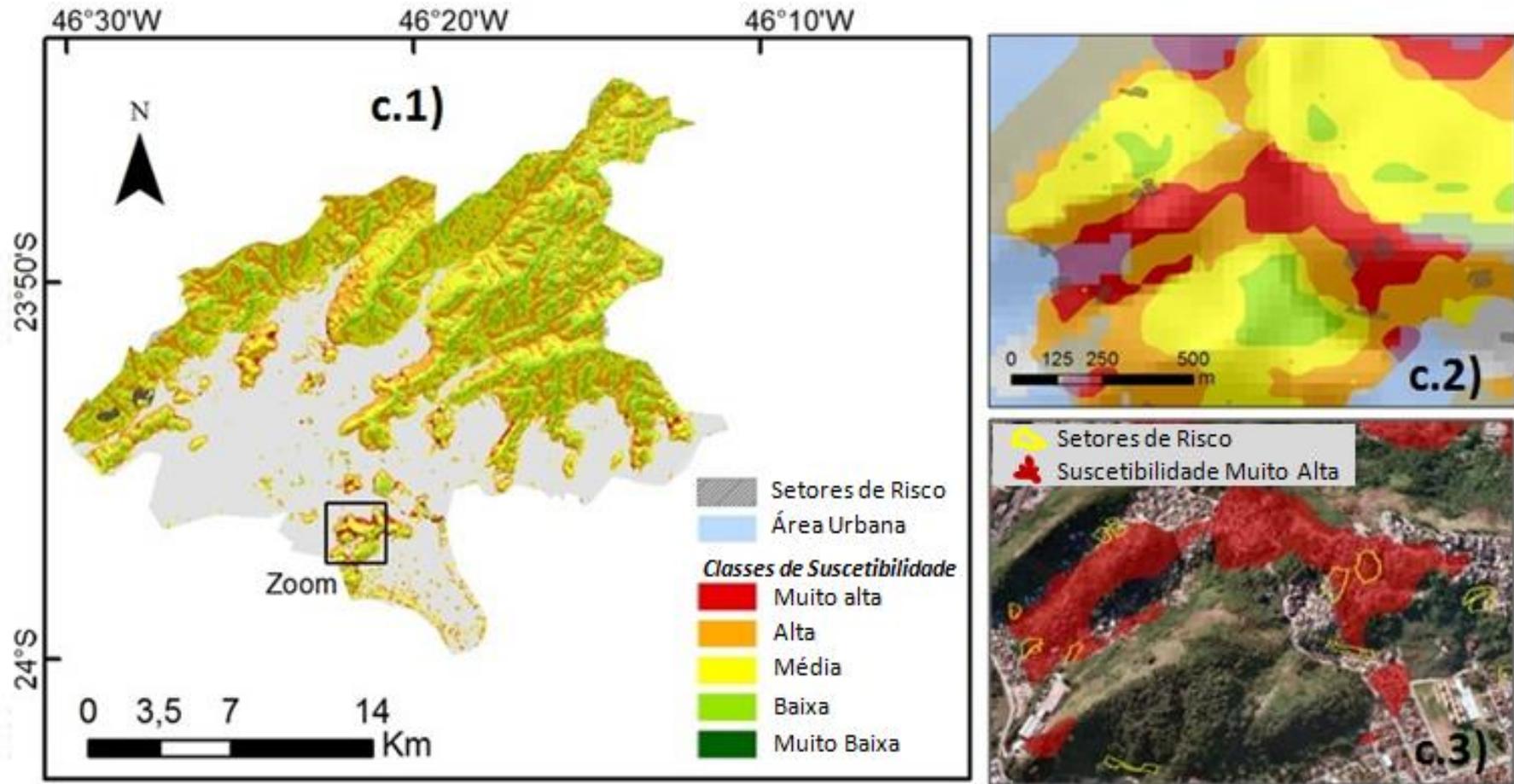
Figura 4.8 Mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos de terra



Técnica Fuzzy Gamma aplicada com $\gamma = 0,8$. Municípios de a.1) Caraguatatuba; b.1) e Ubatuba; c.1) Santos e Cubatão. Os mapas detalhados (a.2, b.2 e c.2) são exemplos de casos de sobreposição entre os setores de risco e as classes mais suscetíveis (alta e muito alta). As imagens do Google Earth® (a.3, b.3 e c.3) representam o mesmo local que os mapas a.2, b.2 e c.2, destacando-se apenas a classe de suscetibilidade "muito alta" (polígonos vermelhos), juntamente com os setores de risco (linhas amarelas). (Continua)



Técnica Fuzzy Gamma aplicada com $\gamma = 0,8$. Municípios de a.1) Caraguatatuba; b.1) e Ubatuba; c.1) Santos e Cubatão. Os mapas detalhados (a.2, b.2 e c.2) são exemplos de casos de sobreposição entre os setores de risco e as classes mais suscetíveis (alta e muito alta). As imagens do Google Earth® (a.3, b.3 e c.3) representam o mesmo local que os mapas a.2, b.2 e c.2, destacando-se apenas a classe de suscetibilidade "muito alta" (polígonos vermelhos), juntamente com os setores de risco (linhas amarelas). (Continua)



Técnica Fuzzy Gamma aplicada com $\gamma = 0,8$. Municípios de a.1) Caraguatatuba; b.1) e Ubatuba; c.1) Santos e Cubatão. Os mapas detalhados (a.2, b.2 e c.2) são exemplos de casos de sobreposição entre os setores de risco e as classes mais suscetíveis (alta e muito alta). As imagens do Google Earth® (a.3, b.3 e c.3) representam o mesmo local que os mapas a.2, b.2 e c.2, destacando-se apenas a classe de suscetibilidade "muito alta" (polígonos vermelhos), juntamente com os setores de risco (linhas amarelas).
 Fonte: autoria própria.

Os resultados indicam predominância da classe de susceptibilidade "média" (44,7%), seguida pelas classes com susceptibilidades "alta" (30,8%) e "baixa" (23,9%). A classe de susceptibilidade "muito baixa" representa apenas 0,1% da área de estudo, enquanto a classe "muito alta" ocupa uma proporção ligeiramente mais elevada (0,5%).

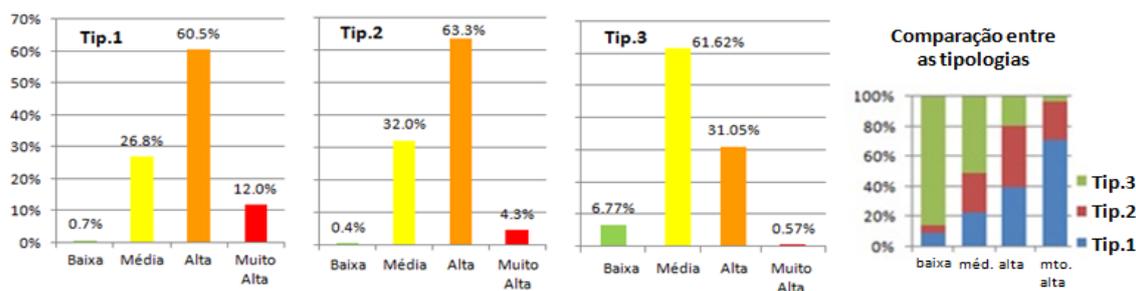
Esta tendência de predominância da susceptibilidade média-alta é consistente com o esperado para a Serra do Mar, que se caracteriza por terreno acidentado e escarpado, com a expansão das áreas urbanas migrando em direção às encostas, o que aumenta a susceptibilidade destes locais. A importância de conhecer estes dados refere-se a posterior comparação com os valores destas frequências considerando apenas os setores de risco, pois se espera que a proporção ocupada pelas classes mais suscetíveis (alta e muito alta) sejam maiores dentro dos setores de risco, quando comparados com toda a área de estudo.

Uma análise visual detalhada da localização dos setores de risco e do mapeamento da susceptibilidade também mostrou-se consistente com o esperado. Nota-se que em vários casos os setores de risco estão localizados em áreas mais suscetíveis a deslizamentos de terra (representados pelas classes "alta" e "muito alta", nas cores laranja e vermelho, respectivamente).

O índice de "Concentração de Risco" (RC) foi calculado para todos os 233 setores de risco (que totalizam uma área de 282,44 ha). Resumidamente, o RC corresponde à distribuição das frequências das classes de susceptibilidade ao considerar toda a área interna aos setores de risco. Esta etapa foi realizada separadamente para três tipologias de setores de risco, a fim de se obter uma análise diferenciada para cada caso (Figura 4.9).

Figura 4.9 - Frequência das classes de suscetibilidade relacionadas com as três tipologias dos setores de risco (RC - Índice de Concentração de Risco).

Setores de Risco	Tipologia 1		Tipologia 2		Tipologia 3		Total	
Quantidade	150	(64.38%)	37	(15.88%)	46	(19.74%)	233	(100.0%)
Area (ha)	181.93	(64.42%)	52.94	(18.74%)	47.57	(16.84%)	282.44	(100.0%)
Classes	Area (ha)	RC₂	Area (ha)	RC₂	Area (ha)	RC₃		RC
Muito Baixa	0.00	0.0%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	0.00	0.00%
Baixa	1.27	0.7%	0.21	0.4%	3.22	6.8%	4.70	1.67%
Média	48.84	26.8%	16.94	32.0%	29.31	61.6%	95.09	33.67%
Alta	110.06	60.5%	33.48	63.3%	14.77	31.0%	158.31	56.05%
Muito Alta	21.77	12.0%	2.30	4.3%	0.27	0.6%	24.33	8.62%



O gráfico do canto inferior direito representa a distribuição percentual das classes de suscetibilidade ao avaliar as três tipologias juntas, para toda a área de estudo.

Fonte: autoria própria.

Observa-se que ao considerar apenas os setores de risco (das três tipologias), as classes "alta" e "muito alta" ocupam 56,1% e 8,62% dos setores de risco, respectivamente (coluna "Total" da Figura 4.9). Estes valores são bem mais elevados do que a média da área de estudo (30,8% e 0,5%, respectivamente, apresentado na Figura 4.7), o que indica uma correlação positiva entre a localização dos setores e as classes de maior suscetibilidade. Este fato sugere a boa precisão da técnica utilizada, a qual se torna ainda mais representativa quando se considera apenas a Tipologia 1. Através desta, que se caracteriza por encostas íngremes habitadas e com risco de escorregar, as duas classes "alto" e "muito alto", juntas, representam um RC de 72,5% (60,5% e 12%, respectivamente).

No que diz respeito às classes de suscetibilidade "baixa" e "média", esperava-se uma correlação negativa com os setores de risco, que devem ser compostos em menor proporcionalidade por estas classes. Para toda a área de estudo analisada, 23,3% pertence à classe "baixa", e 44,7% para a classe "média" (Figura 4.7). Por outro lado, o índice de RC considerando as três tipologias é de 1,7% para a classe de "baixa", e 33,7% para a classe "média". Os valores

encontrados nos setores de risco são, portanto, bem menores do que a média encontrada para toda a área do estudo, especialmente o caso da classe "baixa". Este fato indica uma correlação negativa para essas classes e a localização dos setores de risco.

Os resultados também indicam que apenas uma pequena parte dos setores de risco (1,7%) é composta pela classe de suscetibilidade "baixa". Este valor residual provavelmente é devido aos diferentes designs/delineamentos dos setores. Além disso, este tipo de ocorrência é mais observado para a Tipologia 3, que é a tipologia com a maior parcela da classe "baixa", com um RC igual a 6,8%. Entre as três tipologias, esta é o tipo de setor onde o risco mapeado pela CPRM não foi definido a partir da localização da área urbana. Neste caso, o risco refere-se às encostas (geralmente florestadas) que podem escorregar e atingir residências próximas. Para esta tipologia (3), a classe de uso da terra que a compõe é, na maioria das vezes, "floresta", cujo peso associado é o mais baixo (0,40 – ver Tabela 4.3). Portanto, é comum encontrar menores valores de suscetibilidade para os setores desta tipologia, o que justifica o maior RC para a classe "baixa". Embora o valor de 6,8% seja o maior entre as tipologias, deve-se enfatizar que ainda está bem abaixo da média da área do estudo, que foi de 23,3%.

A análise do gráfico apresentado no canto inferior direito da Figura 4.9 também corrobora a importância da classificação dos setores de risco em diferentes tipologias, pois explicitam características diferentes do levantamento da CPRM e torna possível a avaliação de forma separada e diferenciada. Pelo gráfico nota-se que, enquanto os setores de risco da Tipologia 1 se destacam em ter o maior RC para a classe "muito alta", a Tipologia 3 destaca-se na classe "baixa" e a Tipologia 2 apresenta a situação intermediária. Esta distribuição está de acordo com as especificações consideradas para cada tipologia levando-se em conta suas características.

4.4.2. Avaliação a partir de estudos relacionados

O método de validação descrito anteriormente é comumente usado em outros estudos sobre mapeamento de susceptibilidade aos deslizamentos de terra. Embora haja diferenças entre as áreas de estudo avaliadas nesta tese e as dos outros estudos, a utilização dos índices RP/LP e RC/LC permite uma comparação das relações existentes entre diferentes regiões. O uso dos "setores de risco" como a unidade de validação, ao invés do mapa de cicatrizes de deslizamentos, não interfere na análise comparativa, uma vez que as premissas são as mesmas, tanto para LP e LC ou para RP e RC, ou seja, mensuram-se todas as unidades de validação (cicatrizes ou, no presente estudo, os setores de risco), com base no pressuposto de que estes locais são inseridos em áreas de alta suscetibilidade. É importante notar que, embora a metodologia proposta resulte em um "mapa de suscetibilidade", a inclusão do mapa de usos da terra (com maior peso para as áreas urbanas) transforma a avaliação da suscetibilidade em algo mais amplo que se aproxima de um mapa de *risco*. Por esta razão, as melhores unidades de validação que poderiam ser utilizados neste estudo realmente seriam os "setores de risco".

No presente estudo, espera-se encontrar alta suscetibilidade em encostas onde existem núcleos urbanos. Por outro lado, a maioria dos estudos tradicionais destina-se a avaliar a suscetibilidade natural (sem intervenção humana), para áreas em que tais fatores antropogênicos são desconsiderados. Assim, para que os métodos aplicados sejam consistentes, as encostas indicadas como críticas nestes estudos tradicionais precisam estar localizadas nos mesmos locais onde existem cicatrizes. Porém, este padrão não ocorre necessariamente nos municípios estudado, porque se uma área está urbanizada, não faz sentido avaliar o método considerando cicatrizes do tempo presente ou do passado, pois a preocupação reside nos fenômenos que podem ocorrer no futuro e, assim, atingir a população residente.

Outro ponto importante a ser ressaltado previamente às discussões propriamente ditas, é que vários estudos encontrados na literatura utilizam

modelos matemáticos para prever as áreas instáveis e/ou suscetíveis (por exemplo, SHALSTAB, TRIGRS, SINMAP, e outros) a partir de um modelo digital de elevação (MDE) ou de terreno (MDT) de alta resolução, os quais também utilizam mapas de cicatrizes na etapa de validação (DIETRICH; MONTGOMERY, 1998; GUIMARÃES et al., 2003; VIEIRA, 2007; LISTO; VIEIRA, 2012). Embora os métodos utilizados nestes estudos envolvam informações de alta resolução, parâmetros geotécnicos específicos e modelos baseados nos fenômenos físicos prévios, a taxa de precisão encontrada nestes trabalhos é semelhante aos encontrados no presente estudo, como será mostrado a seguir. Além disso, a maioria dos estudos na literatura só consideram áreas com baixa intervenção humana ou regiões naturais (cujas bacias hidrográficas são comumente usadas como uma área de estudo), sendo poucos os estudos com foco em áreas densamente urbanizadas ou que abordam diretamente a questão do risco.

Por exemplo, Vieira et al. (2010) avaliaram os riscos a deslizamentos de terra na região da Serra do Mar (estado de São Paulo, Brasil), considerando uma bacia não urbanizada, a partir do modelo TRIGRS e um Modelo Digital de Elevação de alta resolução (4m), além de parâmetros geotécnicos como dados de entrada do modelo. Neste estudo, os resultados indicaram uma concentração de áreas instáveis (definida para classes com um fator de segurança - FS - inferior ou igual a 1,00) superior a 50% dentro das cicatrizes (esta concentração é equivalente ao índice RC utilizado no presente estudo). Mais especificamente, a classe mais crítica considerada em Viera et al. (2010) (com FS entre 0,40 e 0,80) ocupou 20% das cicatrizes, enquanto a classe subsequente (SF entre 0,80 e 1,00) ocupou cerca de 30%. Para o presente estudo, cerca de 72% da área total dos setores de risco pertencem às classes mais suscetíveis (12% na classe "muito alta" e 60% na classe "alta"), conforme apresentado na Figura 4.9. Portanto, este resultado é consistente com estudos relacionados que utilizaram mapas de cicatrizes para validação, em que as classes mais críticas de suscetibilidade têm concentrações entre 50% (por exemplo, VIEIRA et al., 2010) e 75% (por exemplo, CROSTA; FRATTINI, 2003; SALCIARINI et al., 2006).

Um dos poucos estudos que apresenta uma análise semelhante à apresentada neste Capítulo, contemplando também áreas urbanizadas, foi feito para o município de Juiz de Fora, Minas Gerais, por Zaidan e Fernandes (2009) (ver também DIETRICH; MONTGOMERY, 1998; KEEFER, 2000; WANG; NIU de 2010; QI et al., 2010). Zaidan e Fernandes (2009) usaram um MDE de alta resolução e espacializaram a suscetibilidade das encostas utilizando o modelo físico-matemático SHALSTAB, em que parâmetros geotécnicos do solo são utilizados como dados de entrada, além dos dados topográficos provenientes do DEM. Os autores encontraram aproximadamente 19% da área total da região de estudo nas classes consideradas instáveis. Neste mesmo estudo os autores utilizaram um índice de “Concentração de Cicatrizes” (SC, do inglês *Scar Concentration* – análogo ao RC) correspondente a 70% para estas duas classes mais críticas. Comparando os resultados de Zaidan e Fernandes (2009) com o presente estudo, a Figura 4.7 indica que 0,50% da área total da região de estudo estão na classe mais suscetível ("muito alta") e 30,8% estão na classe "alta". O índice RC (que deve ser comparado com o SC de Zaidan e Fernandes, 2009) foi de 64,67% (somando 56,05% com 8,62%, estes apresentados na última coluna da Figura 4.9) quando se considerou todas as tipologias de setores de risco. Ao considerar apenas a Tipologia 1, que é a melhor unidade de validação para avaliar o método utilizado, o RC é ainda maior: chegando a 72,5% (somando 60,5% com 12%, das classes “alta” e “muito alta”).

Para avaliar complementarmente os resultados apresentados, outra abordagem foi feita usando o índice de *Potencial de Risco* (RP, ver item 4.3.4.3), para as três tipologias de setores de risco. Os resultados são apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Índice de Risco Potencial para as Tipologias 1 (RP₁); 2 (RP₂) e 3 (RP₃).

Classes	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Toda área de estudo (ha)	Apenas área urb. (ha)	% (2÷1)	Tip.1	Tip.2	Tip.3	RP ₁ (4÷2)	RP ₂ (5÷2)	RP ₃ (6÷2)
Muito Baixa	191	0,7	0,4%	0,0	0,0	0,0	0,0%	0,0%	0,0%
Baixa	38,571	174	0,5%	1,3	0,2	3,2	0,7%	0,1%	1,8%
Media	72,073	4,837	6,7%	48,8	16,9	29,3	1,0%	0,4%	0,6%
Alta	49,649	7,449	15,0%	110,1	33,5	14,8	1,5%	0,4%	0,2%
Muito Alta	770	364	47,3%	21,8	2,3	0,3	6,0%	0,6%	0,1%
<i>Total</i>	<i>161,254</i>	<i>12,825</i>	<i>8,0%</i>	<i>181,9</i>	<i>52,9</i>	<i>47,6</i>			

Fonte: Autoria própria.

O resultado do *Potencial de Risco* para a Tipologia 1 (RP₁) igual ao valor de 6,0% é muito satisfatório. Este valor indica que dentre todos os locais em que o modelo proposto nesta tese aponta susceptibilidade “muito alta”, 6,0% sempre correspondem a setores de risco já mapeados previamente pela CPRM. Levando em consideração que podem existir outras áreas expostas ao risco que não entraram no levantamento da CPRM, e que nem sempre o desenho/forma de um setor de risco corresponde a locais suscetíveis (estes fatos aumentariam a parcela da coluna 4 e, conseqüentemente, o RP), o valor encontrado é de alta representatividade.

Para fins de comparação dos resultados apresentados na Tabela 4.5, alguns estudos que utilizaram índices relacionados ao RP foram listados e discutidos a seguir. O índice *Landslide Potencial* (LP - semelhante ao RP) apresentado no estudo desenvolvido por Vieira et al. (2010) foi de aproximadamente 5,7% para a classe mais instável (FS entre 0,4 e 0,8), e diminuiu para 1% para as classes estáveis (FS entre 1,5 e 7,0). Desta forma, o LP indica que 5,7% de todos os locais identificados pelo modelo como instáveis são inseridos nas cicatrizes de deslizamento mapeados, sendo que na literatura correlata considera-se que LP superiores a 5% são satisfatórios para modelos que avaliam a suscetibilidade.

Em outro estudo, Listo e Vieira (2010) utilizaram o modelo SHALSTAB para mapear a suscetibilidade a deslizamentos de terra em uma pequena bacia (área de 9 km²), com um modelo digital de terreno (MDT) de alta resolução

(4m) e parâmetros geotécnicos do solo, tendo sido analisados apenas 13 setores de risco. Neste estudo, Listo e Vieira (2010) encontraram um índice RC perto de 70% para as duas classes mais instáveis (41% para o mais crítico) e um índice RP igual a 12% para as classes mais críticas, atingindo valores abaixo de 1% para classes menos críticas. Este valor de 12% caracteriza o modelo de Listo e Vieira (2010) com uma ótima acurácia, por estar bem acima dos 5% recomendados na literatura.

Conforme apresentado na Tabela 4.5, para o presente estudo o índice de RP para a tipologia 1 (RP_1) foi de 6%, enquanto o índice de RC para as duas classes mais suscetíveis – apresentado na Figura 4.9 - foi de 72,5% (12% de "muito alto", 60% para "alto"). Deste modo, os índices usados para a validação indicam uma qualidade satisfatória dos resultados obtidos com a metodologia proposta, aproximando-se dos valores encontrados na literatura recente (superior a 5%), mesmo sem utilizando apenas dados e softwares de domínio público.

4.4.3. Análise considerando Níveis de Risco

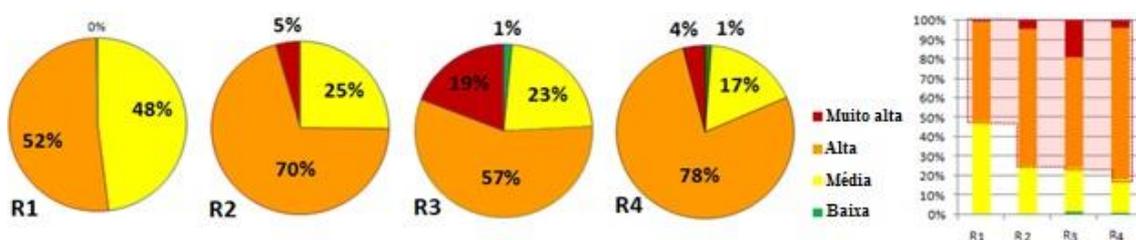
Outra abordagem também foi adotada para analisar os resultados do mapeamento de suscetibilidade. Nesta etapa, avaliaram-se os resultados a partir da categorização dos setores em “níveis de risco” usado pela CPRM e considerada por alguns estudos recentes (LISTO; VIEIRA, 2012; PASCARELLI et al., 2011). Cada setor apresenta uma classificação de risco baseada em fatores naturais e antropogênicos, sendo representada por meio de quatro níveis de probabilidade de ocorrência de deslizamentos de terra e seus impactos. Esta categorização é definida por meio de análise in situ, feita por especialistas da CPRM e que se baseia nas evidências encontradas, conforme exposto com mais detalhes no item 4.3.4.4.

Nesta análise, o objetivo foi encontrar correlações entre os níveis de risco e as classes de suscetibilidade, em que é esperado que as categorias mais críticas

(R3 e R4) apresentam uma maior proporcionalidade das áreas com suscetibilidade alta e muito alta.

A análise comparativa entre os níveis de risco definidos pela CPRM (R1, R2, R3 e R4) e as classes de suscetibilidade estão ilustrados na Figura 4.10. Esta análise foi realizada considerando apenas os setores de risco da tipologia 1.

Figura 4.10 - Distribuição das classes de suscetibilidade para os quatro níveis de risco usado pela CPRM (R1, R2, R3 e R4).



Análise para todos os 150 setores de riscos da tipologia 1. Níveis mais elevados de risco estão associados às áreas ocupadas pelas classes mais.

Fonte: autoria própria.

Basicamente, a Figura 4.10 indica que quanto maior a categoria de risco, menor é a proporção de áreas com baixa suscetibilidade (classes “baixa” e “média”). Por outro lado, as classes mais suscetíveis (“alta” e “muito alta”), juntas, ocupam maiores proporções dos setores do risco ao passo que a categoria de risco aumenta (de R1 até R4), conforme apresentado a seguir:

- 52% para R1: 21 setores (12.62 ha) - RC = 52% para a classe “alta”, RC = 0% para “muito alta”;
- 75% para R2: 51 setores (42.31 ha), RC = 70% para classe “alta”, RC = 5% para “muito alta”;
- 76% para R3: 56 setores (64.07 ha), RC = 57% para classe “alta”, RC = 19% para “muito alta”;

- 82% para R4: 24 setores (22.63 ha), RC = 78% para classe “alta”, RC = 4% para “muito alta”.

Os setores de risco das categorias R1 e R2 apresentam uma maior porção ocupada pela classe de suscetibilidade “média”, enquanto as classes “alta” e “muito alta”, juntas, estão presentes em menor proporção. Esta ocorrência é consistente com as expectativas, pois, embora as categorias R1 e R2 também caracterizem setores de risco, a descrição dessas categorias (apresentada na Tabela 4.4) considera que, se as condições existentes forem mantidas, ocorrências de eventos de deslizamentos durante o período de chuva não são esperadas.

Por outro lado, a descrição das categorias R3 e R4 considera a ocorrência de eventos de deslizamento é muito provável durante chuvas fortes e episódios prolongados durante estações chuvosas. Observando a Figura 4.10, é possível notar que estes setores de risco têm uma maior proporção nas classes de suscetibilidade “alta” e “muito alta”, conforme esperado. No entanto, é importante notar que a delimitação (delineamento) dos setores de risco, feita pela CPRM, também leva em consideração o alcance dos deslizamentos, e não apenas o local onde o processo poderia acontecer. Por esta razão, nem sempre a localização dos setores se sobrepõe a lugares em que o método indica ter suscetibilidade “muito alta”. Deste modo, há sempre uma parte dos setores de risco R3 e R4 que estão localizados em classes menos suscetíveis (tais como “alta” ou mesmo a “média”), o que diminui os valores das métricas utilizadas. Portanto, para cidades que não têm mapeamento de risco, a aplicação deste método em casos que resultam em locais com suscetibilidade “muito alta” devem ser entendidos como um forte indicativo de risco, mas que devem ser avaliados e confirmados por evidências encontradas em campo.

Um fato que chama a atenção é que a categoria de risco R3 - e não a categoria R4 - foi a que apresentou o maior índice RC para a classe de suscetibilidade “muito alta”, com 19%. Analisando a base de dados, foi possível observar que

isso ocorreu devido ao maior setor de risco encontrado em toda área de estudo (que tem aproximadamente 14,2 ha - 142.000 m² - em Ubatuba) está quase inteiramente inserido em uma área com suscetibilidade "muito alta". Partindo do princípio que a classificação dos setores de risco é definida por critérios que podem ser considerados de forma diferente por cada especialista (subjetividade), há a possibilidade de que este setor pudesse pertencer a outra categoria de risco. Por exemplo, supondo que apenas este setor de risco (que é 1 entre 59 setores) tivesse sido classificado na classe R4, a análise apresentada na Figura 9 seria exatamente conforme o esperado. Portanto, fica demonstrado que as evidências encontraram *in situ* foram mais importantes do que a previsão da suscetibilidade para categorizar os níveis de risco, no entanto, também sugere que ambas as etapas são necessárias e complementares.

4.5. Considerações Finais

Levando em consideração a situação do Brasil e de outros países que exigem, com urgência, o mapeamento dos riscos relacionados aos processos severos, dois aspectos gerais devem ser destacados em relação a este estudo. No primeiro, destaca-se a qualidade dos resultados obtidos para uma análise de risco dentro de áreas urbanas densamente povoadas, que é um caso relativamente inexplorado em modelagens de suscetibilidade aos deslizamentos de terra rasos. Em segundo lugar, a usabilidade e a fácil replicabilidade do método para outras áreas de estudo, devido ao fato de que as variáveis utilizadas - tais como mapas temáticos - podem ser adquiridas por qualquer usuário, de modo gratuito, além da etapa de ponderação das classes temáticas, que pode ser flexível e ajustada para outras localidades ou fenômenos de interesse (por exemplo, inundações), desde que haja o conhecimento prévio das características locais e as suas especificidades.

A sugestão de utilizar os dados de domínio público resultou na aquisição de mapas com diferentes escalas, alguns deles deficientes em detalhes para este tipo de análise. No entanto, a inclusão de dados topográficos com resolução de 30 m (que representam 3 das 6 variáveis utilizadas neste estudo: inclinação e curvatura horizontal e vertical) foi essencial para a boa qualidade dos resultados, pois, embora uma ou outra variável não esteja com a qualidade recomendada, sabe-se que as variáveis utilizadas são inter-relacionadas umas com as outras. Isso significa que, embora as características geológicas e pedológicas estivessem representadas em escala regional, a qualidade dos dados topográficos e dos usos da terra foi capaz de permitir direcionar o modelo para inferir diferentes níveis de suscetibilidade em encostas que estão próximas entre si, fato este que é essencial para análises feitas em escala municipal. Outrossim, seria possível melhorar ainda mais o resultado se os dados geológicos e pedológicos estivessem numa escala mais refinada, bem como através da aplicação de outras variáveis que se tivesse acesso e conhecimento dos dados (por exemplo, espacialização de propriedade geotécnicas). Assim, a vantagem da metodologia proposta é que a atualização da base de dados pode ser feita de forma prática e rapidamente, desde que haja disponibilidade de novos dados. Além disso, a qualidade dos resultados pode ser otimizada proporcionalmente à riqueza e disponibilidade dos dados para uma região em particular.

A metodologia proposta depende substancialmente da etapa de ponderação, que envolve grande subjetividade em sua análise, mas que pôde ser avaliada cuidadosamente para que as incertezas não estivessem envolvidas no resultado final. O critério de definição dos pesos só foi possível devido à participação de diferentes profissionais que trabalham em áreas afins e às suas experiências no assunto, bem como a utilização de estudos conceituados como referências. Desta forma, verificou-se que com a metodologia adotada obteve-se resultados satisfatórios, mesmo quando comparado com estudos que se baseiam em métodos não heurísticos. Esta é uma vantagem do método proposto neste Capítulo perante outros encontrados na literatura, que geralmente requerem uma grande quantidade de dados específicos da área de

estudo em alta resolução, o que resulta num custo mais elevado que, por conseguinte, faz com que seja difícil de ser replicado. Notou-se que é muito importante ter conhecimento e experiência prévia da técnica Fuzzy Gamma para concluir com êxito a etapa de ponderações e também a definição do parâmetro gamma. Normalmente, é necessário que alguns testes sejam feitos anteriormente considerando diferentes pesos para as classes temáticas, bem como para o parâmetro gamma, para avaliar qual modelo proporciona uma melhor aderência. Porém, não foi necessário descrever e desenvolver estas etapas devido ao fato destas informações terem sido fornecidas pelas conclusões de outros estudos desenvolvidos sobre o mesmo tema para a Serra do Mar, (CANAVESI et al., 2013, ALVALÁ et al., 2013). De qualquer forma, estas duas etapas correspondem à parte mais importante deste tipo estudo e devem ser avaliadas de acordo com as especificidades do fenômeno que se deseja estudar e mapear, levando em consideração as características específicas de sua ocorrência, para cada área de estudo em particular.

A validação dos resultados por meio de índices reconhecidos na literatura (RC e RP) demonstrou que a metodologia possibilitou obter resultados satisfatórios, especialmente considerando a escala do trabalho e a resolução dos dados. Além disso, uma nova opção para a validação de mapeamentos de suscetibilidade á deslizamentos de terra foi proposta usando os setores de risco no lugar dos tradicionais mapas de cicatrizes de deslizamentos. Neste caso, a utilização desta unidade de validação envolveu novas considerações e premissas, mas que possibilitou alcançar bons índices de validação e demonstrou a eficácia e robustez da avaliação desses índices em outros estudos. Neste sentido, a metodologia foi eficaz na determinação do risco em áreas urbanas, e não apenas a indicação de áreas suscetíveis aos deslizamentos em áreas preservadas/naturais, como é comumente feito em outros estudos.

O uso dos índices RC / RP, análogo aos índices LC / LP amplamente utilizados na literatura, permitiu a comparação dos resultados e de sua qualidade. Neste contexto, a metodologia apresentada foi capaz de atingir uma qualidade

equivalente (RP ou LP > 5%), semelhante à apresentada em outros estudos que se baseiam em dados de alta resolução. O índice de Potencial de Risco (RP) encontrado em 6% está dentro da média encontrada na literatura para estudos com alta resolução, e significa que um em cada 16 ha resultante da metodologia como pertencente à classe de suscetibilidade "muito alta" refere-se a uma área de risco já mapeada pela CPRM. E, considerando que existe a possibilidade de alguns municípios não terem sido mapeados pela CPRM, o índice poderia ser ainda maior, sendo, portanto, um indicativo da qualidade satisfatória dos resultados. Tais fatos sugerem que a metodologia apresentada pode subsidiar a gestão de risco aos desastres, bem como prover uma base que subsidie as tomadas de decisão para o envio de alertas de desastres. Além disso, o método pode servir de base para as pesquisas de campo que busquem evidências da existência do risco aos deslizamentos e, portanto, facilita o mapeamento de áreas de risco em municípios que ainda não contam com este mapeamento.

O índice de Concentração de Risco (RC) para a tipologia 1 apresentou um valor de 72% juntando as duas classes mais suscetíveis (alta e muito alta). Embora este valor de 72% também seja satisfatório se comparado com os da literatura citada, isso significa que os restantes 28% da área total indicada a partir do modelo tem áreas de suscetibilidade mais brandas que pertencem aos setores de risco. Neste caso, observou-se que este "ruído" vem principalmente da subjetividade da etapa de delineamento/delimitação dos setores em risco, feita pelos órgãos responsáveis (CPRM). Por outro lado, quando se analisa o mesmo índice RC para as diferentes categorias de risco (R1, R2, R3 e R4), verificou-se que o modelo apresenta melhor aderência para os setores mais críticos: R3 (RC = 76%) e R4 (RC = 84%). Portanto, esse fato reflete uma tendência na metodologia em ser mais adequado para indicar áreas de risco nas situações mais críticas.

Quanto os municípios mapeados, verificou-se que todos eles possuem vários núcleos urbanos em áreas altamente suscetíveis, sugerindo a exposição ao risco da parcela da população residente nestes locais. Por muitas vezes, estas

localizações não correspondem aos setores de risco previamente mapeados pela CPRM, indicando a possibilidade destas serem novas áreas de risco que necessitam de atenção especial tanto quanto os demais locais previamente identificados. A caracterização do risco propriamente dito dependerá de análises complementares feitas em campo para serem comprovadas e medidas sejam tomadas. Porém, o conjunto de variáveis utilizadas neste trabalho fornece informações suficientes para que o poder público possa, desde então, visualizar e melhor compreender como e onde estão estabelecidos os núcleos mais expostos dentro do espaço municipal e, assim, promover as devidas políticas públicas para evitar a criação de novas áreas de risco e também promover a diminuição das vulnerabilidades existentes.

Santos, em particular, se apresentou como o município com maior quantidade de áreas com suscetibilidade “muito alta” dentro de todo o seu território (urbanizado ou não), sendo também aquele onde a CPRM mapeou a maior quantidade de setores de risco. Caraguatatuba destacou-se por ser o município que possui a maior concentração de áreas altamente suscetíveis quando se considera apenas o espaço urbano, indo muito além das áreas previamente mapeadas. Tanto nestes dois casos quanto no outros dois municípios avaliados, constatou-se que a o uso do solo de forma não planejada é tido com o principal fator que caracteriza o risco, seja pela expansão da área urbana em direção às encostas, como o desmatamento em áreas suscetíveis e cortes irregulares (construção de rodovias, empreendimentos ou habitações) em taludes com depósitos coluvionares. Tais constatações fortalecem a importância de que as políticas de desenvolvimento urbano considerem cada vez mais a questão do risco aos desastres dando a devida importância e fiscalização para a preservação e manutenção de áreas ambientalmente relevantes, sobretudo àquelas já previstas em lei, como as áreas de preservação ambiental (APP's).

Em relação às demandas emergenciais do Brasil relacionadas à mitigação de impactos causados por deslizamentos de terra a cada ano, esta metodologia se mostrou robusta e com alta usabilidade, não só para a análise do risco inerente

nos dias de hoje, mas também para fornecer subsídios para analisar áreas de risco futuras que podem resultar do crescimento populacional em direção às encostas.

5. INTEGRAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES FINAIS

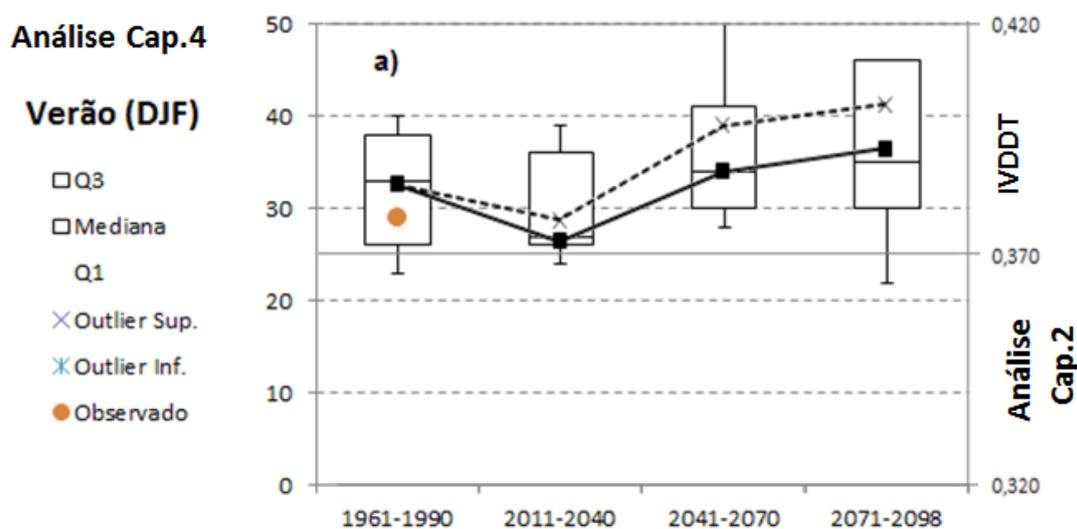
Os Capítulos 2, 3 e 4 desta tese foram voltados para análises, direta ou indiretamente, da vulnerabilidade aos desastres naturais decorrentes de deslizamentos de terra. Diretamente no caso do Capítulo 2, que contemplou uma análise mais ampla da vulnerabilidade em todas as suas dimensões. Indiretamente no Capítulo 3 e 4, que avaliaram especificamente as componentes de Exposição (eventos extremos) e de Sensibilidade (suscetibilidade), respectivamente. Estas análises foram realizadas em diferentes escalas, contextos e objetivos específicos, onde o foco principal foi apresentar uma sequência metodológica que permitisse explorar o conceito de vulnerabilidade e suas nuances indo da escala regional até local.

Embora os Capítulos possam ser compreendidos de forma independente, a maior contribuição deste trabalho é quando os estudos se relacionam e explicitam a vulnerabilidade da região de estudo, mais especificamente a Serra do Mar na porção do Litoral Norte paulista. Para esta região, o Capítulo 2 indica a alta vulnerabilidade, no seu sentido mais amplo, tanto para o tempo presente quanto para os períodos futuros. O Capítulo 4, embora apresente uma proposta metodológica de mapeamento de suscetibilidade, evidencia a grande quantidade de áreas de risco existente nos quatro municípios analisados. Neste aspecto, além das áreas previamente mapeadas, foi possível observar outras localidades com alta suscetibilidade, onde núcleos urbanos estão inseridos e avançando em direção as encostas suscetíveis.

Dentre os municípios da Serra do Mar, Caraguatatuba foi um dos que se destacou, tanto no Cap.2 quanto no Cap.4. No Cap.2, Caraguatatuba foi o único município do Litoral Norte em que o IVDNS aumentou nos períodos futuros (ver Figura 2.26), ou seja, se tornaria mais vulnerável aos desastres devido à intensificação dos eventos extremos. No Capítulo 4, o mesmo município apresentou muitos núcleos urbanos em de áreas suscetíveis, característica esta que já tinha sido evidenciada no cálculo do sub-índice de Sensibilidade do capítulo anterior. Conseqüentemente, este foi o município escolhido para as análises do Cap. 3. Desta vez, diferentemente do Cap.2

onde foram utilizados índices de extremos propostos pelo IPCC (Rx1day, Rx5day, R95p e CWD) para avaliar a componente Exposição, utilizou-se uma tipologia de precipitação específica que tem relação com a deflagração de movimentos de massa: 110mm/72h. Novamente os resultados apontaram para o mesmo padrão observado no Cap.2: uma pequena diminuição dos eventos extremos no período de 2011-2040 seguido de um aumento significativo até o final do século. Para facilitar a visualização da relação entre os resultados do Cap.2 e do Cap.3, elaborou-se a Figura 5.1. Esta sobreposição dos resultados foi feita tomando como referência o período de 1961-1990, isto é, o primeiro ponto do IVDDT foi alocado em cima da mediana do *boxplot* para este mesmo período. Escolheu-se apenas o *boxplot* da estação do verão porque ela é a que possui maior representatividade estatística dentro do contexto dos eventos extremos. Além disso, a metodologia aplicada no Cap.2 estabelece que o aumento da exposição climática é dado pelo incremento dos índices Rx1day, Rx5day, R95p e CWD, que são índices de extremos decorrentes de eventos de máxima magnitude dentro do calendário anual das simulações, sendo que tais máximas acontecem, quase sempre, durante os meses de verão.

Figura 5.1 – Sobreposição dos resultados encontrados no Cap.3 (a esquerda) e Cap.2 (a direita).



Fonte: autoria própria.

É válido lembrar que, embora o resultado do IVDDT (Cap.2) contemple outras variáveis não climáticas, apenas o vetor Exposição é variável nos períodos futuros, sendo que todas as outras dimensões são mantidas constantes. Isto é, o comportamento observado na Figura 5.1 deve-se exclusivamente ao incremento das variáveis climáticas que foram utilizadas para compor o sub-índice de Exposição no Cap.2, a saber: Rx1day, Rx5day, R959 e CWD. Ou seja, embora o IVDDT represente a vulnerabilidade em seu sentido mais amplo, as variações que ocorrem ao longo do tempo expressam unicamente os efeitos das mudanças do clima perante os eventos extremos de precipitação, permitindo a comparação entre os resultados dos dois capítulos.

Desta forma, pode-se dizer que a Figura 5.1 indica a forte correlação entre os dois resultados encontrados, embora tenham sido aplicados métodos e modelos climáticos diferentes. Este é um ponto importante a ser ressaltado, pois a análise do Cap.2 foi feita a partir do modelo Eta/HadGEM2-ES com resolução de 20km, o qual utilizou os cenários de emissões do IPCC AR-5 (RCP4.5 e 8.5), enquanto a análise do Cap. 3 foi feita com o Eta/HadCM3, com 40km de resolução e cenários do IPCC AR-4 (A1B). Neste contexto, é preciso ressaltar que a alternativa mais adequada seria o uso dos mesmos modelos climáticos e cenários de emissões para as simulações numéricas feitas nos dois capítulos. No entanto, esclarece-se que o tipo de dados necessários para a realização do Cap.3 (formato .xml do Microsoft Excel[®] com dados sequenciais diários) não estava disponível para o modelo Eta/HadGEM2-ES, impossibilitando seguir com as análises que foram propostas para a construção da presente tese. Como alternativa, tinha-se em mãos os dados do Eta/HadCM3, os quais foram submetidos a diversos testes comparativos com os dados observados antes de ser utilizado. A análise somente prosseguiu quando se verificou que o resultado a partir da média de três pontos de grade longitudinais do Eta/HadCM3 (ver item 3.4.4) possuía boa aderência com os dados observados.

Ao observar a Figura 5.1, pode-se dizer que o cenário do RCP4.5 do IPCC AR-5 (linha preta contínua) apresenta os resultados bem próximos da mediana e

do quartil inferior do *boxplot* elaborado com os resultados do cenário A1B do Eta/HadCM3, enquanto o cenário RCP8.5 (linha tracejada), está mais próximo dos limites superiores em todos os períodos futuros. Este comportamento é interessante porque o cenário RCP4.5 é considerado, de certa forma, “otimista”, assim como o cenário A1B, o que sugere que há concordância tanto na resposta dos dois modelos quanto nas metodologias empregadas.

Outra característica importante evidenciada pela Figura 5.1 é que os resultados dos cenários RCP4.5 e 8.5 (Eta/HadGEM2-ES) estão mais próximos entre si no período de 2011-2040 e vão se distanciando até o final do século. Este comportamento se assemelha ao padrão observado para a dispersão dos resultados dos Eta/HadCM3, que é menor para o período de 2011-2040 e aumenta consideravelmente em 2041-2070 e 2071-2100. Isto sugere que a sutil diminuição dos eventos extremos observada até 2040 é factível, ao ponto que o aumento até o final do século também tem grande probabilidade de acontecer. Porém, a magnitude deste aumento ainda possui incertezas associadas e dependerá diretamente das estratégias relacionadas à emissão dos gases de efeito estufa.

Com isso, ao término desta tese pode-se dizer que os objetivos propostos foram alcançados. A vulnerabilidade da Serra do Mar paulista aos desastres naturais relacionados aos deslizamentos de terra foi evidenciada de diversas formas e contextos. Como contribuição adicional, o Cap.2 ainda pode avaliar a vulnerabilidade de outras regiões do estado de São Paulo, as quais merecem estudos mais aprofundados e detalhados objetivando colaborar nas estratégias futuras de redução de risco aos desastres. Neste sentido, é possível destacar alguns municípios com vulnerabilidade muito alta, tais como aqueles que contemplam a RMSP, do Litoral Centro-Sul e o Vale do Paraíba, onde São José dos Campos aparece com um dos maiores incrementos de vulnerabilidade para as próximas décadas. Muitos destes municípios não possuem mapeamento oficial de suscetibilidade, o que também caracteriza um tipo de vulnerabilidade relacionada ao sistema de gestão de risco. No entanto, a metodologia proposta no Cap.4 pode ser facilmente replicada e adaptada

para prover tais mapeamentos e, assim, subsidiar as políticas públicas que tangem esta temática. Adicionalmente, há também o fato de que em muitos destes municípios vulneráveis existem estações pluviométricas como aquela utilizada no Cap.3, permitindo que possam ser feitos estudos detalhados a respeito da evolução dos eventos extremos ao longo do tempo, além da análise do clima futuro a partir das simulações numéricas.

Portanto, após estas discussões cabe dizer que esta tese se caracteriza como mais um estudo que coloca em evidência os impactos potenciais das mudanças climáticas futuras e, ao propor os métodos apresentados e validados, colabora diretamente para as diretrizes atuais de redução de risco aos desastres e adaptação às mudanças climáticas. De modo geral, é sabido que nas sociedades do conhecimento do século XXI tem sido proposto que as políticas de adaptação contemplem igualmente a capacidade de geração de novos conhecimentos científicos sobre todas as dimensões de desastres naturais, onde as discussões aqui feitas se encaixam perfeitamente. O novo marco pós-2015 da ONU (UNISDR, 2015) para a redução de desastres naturais colocou como um dos focos prioritários o entendimento dos riscos de desastres, abordagem esta contemplada principalmente pelos Cap.2 e Cap.4. Por outro lado, o Protocolo de Hyogo (UNISDR, 2005) colocava grande ênfase em sistema de alertas precoce como elemento essencial na redução do risco de desastres, ênfase que também foi mantida no novo marco conceitual. Neste sentido, o Cap.3 forneceu importantes discussões a respeito do aumento dos eventos extremos de precipitação, baseando-se em limiares que são utilizados atualmente na dinâmica de monitoramento e alerta, o que fortalece ainda mais a importância destes elementos associados a técnicas robustas e precisas de previsão meteorológica.

Mesmo que somente explorado no Cap.4, é preciso frisar que o devido uso da terra e o planejamento territorial são fatores fundamentais para a redução do risco aos desastres. Em alguns casos, considera-se que a exposição a determinados eventos é impossível de ser evitada, devido à impossibilidade de frear as mudanças do clima no curto e médio prazo. Para estes casos, que

contemplam alguns dos municípios da Serra do Mar estudados nesta tese, o ordenamento territorial e decisões quanto à localização de assentamentos ou atividades econômicas devem ser acompanhados por outros métodos estruturais ou não estruturais para prevenir ou atenuar riscos (UNISDR, 2009; ICSU-LAC, 2010a, b). Ações desta natureza têm sido implementadas no Brasil durante os últimos anos (por exemplo, o PAC Encostas alinhado aos Planos Municipais de Redução de Risco – PMRR – e a elaboração de cartas geotécnicas de aptidão à urbanização frente aos desastres naturais) e são consideradas essenciais para o gerenciamento e redução de risco a desastres. No entanto, os resultados apresentados sobre a alta vulnerabilidade de muitos municípios paulistas deixam claro que estes tipos ações devem ser considerados prioritários, sob o risco de serem estabelecidos novos cenários de risco que acarretariam em desastres com proporções e frequência até então não observadas, devido à conjunção de fatores socioambientais e climáticos.

Apesar das políticas e intenções inovadoras na luta contra as mudanças climáticas e seus impactos (WWF, 2010), recentes deliberações e modificações ambientais e territoriais brasileiras como o caso da alteração do Código Florestal de 1965 (SPAROVEK et al., 2011), e a inaplicabilidade ou baixa implementação dos planos diretores nos municípios (LACERDA et al., 2011), denotam gargalos políticos e falta de capilaridade empírica no que toca a aplicação de políticas públicas de prevenção, e de adaptação aos cenários climáticos futuros. Tal omissão, no que concerne a ocupação ordenada do solo das cidades e o uso insustentável da terra, tenderá a agravar a vulnerabilidade das populações aos eventos extremos e conseqüentemente aos desastres.

Soma-se a todos estes fatores o fenômeno da flutuação da população durante os meses de verão, quando os municípios litorâneos que contemplam a região de estudo comumente tem sua população duplicada neste período (INSTITUTO PÓLIS, 2012). Esta aglomeração de pessoas estabelece novos cenários de risco justamente no auge da estação chuvosa, onde os eventos extremos são mais severos e frequentes. Tais cenários merecem ser estudados com maior detalhe e merecem atenção especial das Defesas Civis,

pois a população flutuante ainda conta com uma menor percepção do risco existente quando comparado com as pessoas que vivem nestas cidades, uma vez que não estão tão acostumadas a lidar com tais fenômenos e situações de alerta.

5.1. Conclusões

Este trabalho evidenciou, de diferentes formas, a alta vulnerabilidade dos municípios paulistas que contemplam a região Serra do Mar, tanto para o clima presente (1961-1990) quanto para os períodos futuros (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100). O comportamento climático desta região se mostrou determinante na ocorrência dos deslizamentos de terra, sobretudo pelo favorecimento de eventos severos de precipitação que ocorrem na faixa litorânea do estado de São Paulo.

Embora os deslizamentos de terra sejam fenômenos intrínsecos da Serra do Mar, isto é, que fazem parte da dinâmica natural que molda o relevo regional, a interferência antrópica na paisagem local, principalmente no que diz respeito ao avanço da urbanização em direção às encostas, tem acelerado e induzido processos erosivos e de desestabilização. Constatou-se que estas alterações têm criando cenários propícios para desastres naturais decorrentes de deslizamentos de terra que tem ocorrido frequentemente nos últimos anos e décadas. Sob este ponto de vista, destaca-se que as mudanças climáticas se inserem como um fator adicional na dinâmica dos desastres, pois tendem a alterar os padrões de precipitação que regem sobre os municípios estudados.

Observou-se que os efeitos das mudanças climáticas não são homogêneos dentro do estado de São Paulo, mesmo considerando apenas os domínios da Serra do Mar. Os resultados de modelagem climática indicam um comportamento divergente entre o Litoral Norte e as demais regiões da Serra do Mar (porção Centro-Sul do litoral). Para primeiro caso, há evidências que chamam atenção pelo fato da intensificação dos eventos extremos (em

magnitude e frequência) já ocorrer nas próximas décadas. Como fator agravante, os resultados indicam um cenário preocupante ao final do século XXI, onde há o maior aumento da exposição climática e, conseqüentemente, da vulnerabilidade aos desastres. Para os demais municípios, os resultados não apontam aspectos conclusivos, havendo a possibilidade de um abrandamento dos eventos extremos para grande parte do litoral Centro-Sul de São Paulo, mas que ainda assim não descaracteriza a alta vulnerabilidade dos municípios que ali estão.

Neste sentido, ressalta-se que as mudanças climáticas; evidenciadas nesta tese, ou não; devem ser consideradas apenas como um dos diversos fatores de *stress (drivers)* que caracterizam os desastres naturais, sendo que seus efeitos são variáveis, no tempo e espaço, e abrangem também outras tipologias de desastres além daqueles relacionados com os deslizamentos de terra. Esta reflexão se faz necessária para que haja contínua pesquisa sobre o entendimento das ameaças climáticas, de ações de mitigação e adaptação, mas que não sejam deixadas de lado as discussões que tangem toda estrutura social, econômica, ambiental, política e institucional que faz parte da devida gestão de risco aos desastres.

Para Caraguatatuba, os resultados apresentados foram convergentes e indicam um aumento sistemático dos eventos extremos potencialmente deflagradores de deslizamentos de terra, sobretudo, a partir de 2040. Há ainda hipótese de que a primavera será a estação com o maior incremento de eventos extremos, indicando que a estação chuvosa pode começar meses mais cedo. Estes resultados precisam ser complementados por estudos adicionais de modelagem climática e observação para que as incertezas envolvidas sejam diminuídas e, assim, permita a criação de políticas públicas eficazes para a redução de risco aos desastres e de adaptação às mudanças do clima. Como subsídio para nortear estas ações, os resultados do mapeamento de suscetibilidade permitiram identificar, com boa precisão, diversos núcleos urbanos expostos ao risco de deslizamentos, os quais devem ser considerados pelo poder público como ponto de partida para a redução da

vulnerabilidade e aumento da capacidade adaptativa. Caso contrário, é provável que sejam estabelecidos novos cenários de risco a deslizamentos de terra, possibilitando a ocorrência de desastres de proporções nunca antes observadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADGER, W. N. Vulnerability. **Global Environmental Change**, v. 16, n. 3, p. 268-281, 2006.
- ADGER, W. N.; BROOKS N.; BENTHAM G.; AGNEW M.; ERIKSEN S. **New indicators of vulnerability and adaptive capacity**. Norwich, UK: Tyndall Centre for Climate Change Research, 2004.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA) - Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica (SGH). **Dados pluviométricos de 1991 a 2010**. Brasília: ANA, 2010. Disponível em: < <http://www2.ana.gov.br/>> Acesso em 10 jun. 2015.
- ALCÁNTARA-AYALA, I. Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. **Geomorphology**, v. 47, p. 107–124, 2002.
- ALEOTTI, P.; CHOWDHURY, R. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. **Bull. Eng. Geol. Environ.**, v. 58, p. 21–44, 1999.
- ALEXANDER, D. **Natural disasters**. New York: Chapman & Hall, 1993. 633p.
- ALLAN R. P.; SODEN, B. J. Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes. **Science**, v. 321, p. 1481-1484, 2008.
- ALMEIDA, F. F. M.; CARNEIRO, C. D. R. Origem e evolução da Serra do Mar, **Rev. Bras. Geocienc.**, v. 28, p. 135–150, 1998.
- ALVALÁ, R. C. S.; CAMARINHA, P. I. M.; CANAVESI, V. Landslide susceptibility mapping in the coastal region in the State of São Paulo, Brazil, in: **AGU Meeting of the Americas**, 2013, Cancun. E-poster. Disponível em: <<http://moa.agu.org/2013/files/2013/05/Poster-AGU-Vertical-v1.pdf>>. Acesso em: 04 fev. 2015.
- ALVES, L. M.; CHOU, S. C.; MARENGO, J. A. Avaliação das previsões de chuvas sazonais do modelo ETA climático sobre o Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13., 2004, Fortaleza-CE. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMET, 2004.
- AMBRIZZI, T.; ROCHA, R.; MARENGO, J.; PISNITCHENKO, A. I.; ALVES, L. **Cenários regionalizados e clima no Brasil para o Século XXI: projeções de clima usando três modelos regionais**. Relatório 3. Ministério do Meio Ambiente (MMA), Secretaria de Biodiversidade e Florestas (SBF), Diretoria de Conservação da Biodiversidade (DCBio). Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade - Subprojeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. Brasília, 2007.

ANBALAGAN, R. Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain. **Eng. Geol.**, v. 32, p. 269–277, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MECÂNICA DO SOLO (AMBS). **Região Serrana do Rio de Janeiro: lições de nossa maior tragédia.** [S.l.] 2011. Disponível em: www.abms.com.br. Acessado em: 15 jun. de 2013

ATKINSON; P. M., MASSARI, R. Generalised linear modelling of susceptibility to landsliding in the Central Apennines, Italy, **Comput. Geosci.**, v. 24, p.373–385, 1998.

AUGUSTO FILHO, O. **Escorregamentos em encostas naturais e ocupadas: análise e controle.** São Paulo: IPT, p. 96-115. (Apostila do curso de geologia de engenharia aplicada a problemas ambientais), 1992.

AUGUSTO FILHO, O.; VIRGILI, J. C. Estabilidade De Taludes. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Ed.). **Geologia de engenharia.** São Paulo, ABGE, 1998. p. 243–269.

AYALEW, L.; YAMAGISHI, H. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the KakudaYahiko Mountains, Central Japan, **Geomorphology**, v. 65, p. 15–31, 2005.

AYSAN, Y.F. Keynote paper: vulnerability assessment, In: MERRIMAN, P.; BROWITT, C. (ed.) **Natural disasters: protecting vulnerable communities,** 1993. p.1-14.

BARNETT, J.; LAMBERT, S.; FRY, I. The hazards of indicators: Insights from the Environmental Vulnerability Index. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 98, n. 1, p. 102-119, 2008.

BEGUERIA, S. Validation and evaluation of predictive models in hazard assessment and risk management, **Nat. Hazards**, v. 37, p. 315– 329, 2006.

BIGARELLA, J. J.; PASSOS, E.; HERRMANN, M. L. P.; SANTOS, G. F.; MENDONÇA, M.; SALAMUNI, E.; SUGUIO, K. **Estruturas e Origem das paisagens tropicais e subtropicais: processos erosivos, vertentes, movimentos de massa, atividade endógena, superfícies de erosão, compartimentação do relevo, depósitos correlativos e ambientes fluviais.** Florianópolis: UFSC, 2007. v. 3, 556 p.

BINDA, A. L.; BERTOTTI, L. G. Geoprocessamento aplicado à análise da bacia hidrográfica do Rio Cachoeirinha, Guarapuava-PR. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 12., 2007, Natal. **Anais...** Natal, SBGFA, 2007.

BIRKMANN, J. **Measuring vulnerability to natural hazards: towards disaster resilient societies.** New York: United Nations Publications, 2006. 524 p. ISBN 92-808-1135-5.

BIRKMANN, J. Risk and vulnerability indicators at different scales: Applicability, usefulness and policy implications. **Environmental Hazards**, v. 7, n.1, p. 20-31, 2007.

BLACK, T. L. The new NMC mesoscale Eta model: description and forecast examples. **Weather Forecast**. v. 9, p. 256–278, 1994.

BLAIKIE, P.; CANNON, T.; DAVIS, I.; WISNER, B. **At risk: natural hazards, peoples vulnerability, and disasters**. London: Routledge, 1994. 124p.

BOGAART, P. W.; TROCH, P. A. Curvature distribution within hillslopes and catchments and its effect on the hydrological response, **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 10, p. 925–936, 2006. doi:10.5194/hess- 10-925-2006.

BOGARDI, J.; BIRKMANN, J. Vulnerability assessment: the first step towards sustainable risk reduction. In: MALZAHN, D.; PLAPP, T. (Ed.): **Disaster and Society—**from hazard assessment to risk reduction. Berlin: Logos Verlag, p. 75–82, 2004.

BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS**. Oxford, UK: Pergamon, 1994. 398p.

BORSATO, V. A.; SOUZA FILHO, E. E. A Dinâmica Atmosférica na vertente oriental da bacia do alto rio Paraná e a gênese das chuvas. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 30, p. 221-229, 2008.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Defesa Civil. Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres. **Anuário brasileiro de desastres naturais: 2012**. Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres. - Brasília: CENAD, 84 p., 2012.

BRENKERT, A. L.; MALONE, L. Modeling vulnerability and resilience to climate change: A case study of India and Indian states. **Climatic Change** v. 72, p. 57-102, 2005.

BRENNING, A. Spatial prediction models for landslide hazards: review, comparison and evaluation. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, v. 5, p. 853–862, 2005. doi:10.5194/nhess-5-853-2005

BROLLO, M.A.J.; FERREIRA, C.J.; GUEDES, A.C.M. Solo - desastres naturais. In: FIGUEIREDO, F. E. L. (Eds.) **Meio Ambiente Paulista: relatório de qualidade ambiental 2011**. São Paulo : Secretaria do Meio Ambiente / Coordenadoria de Planejamento Ambiental. 256p. ISBN – 978-85-86624-91-9. 2012.

BROLLO, M.A.J.; FERREIRA, C.J.; TOMINAGA, L.K.; VEDOVELLO, R.; FERNANDES DA SILVA, P.C.; ANDRADE, E.; GUEDES, A.C.M. Situação dos desastres e riscos no estado de São Paulo e instrumentos de gerenciamento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 13., 2012. São Paulo-PR. **Anais...** São Paulo: ABGE, 2012. CD-ROM.

BROLLO, M.J.; TOMINAGA, L. K. Desastres naturais e riscos geológicos no Estado de São Paulo: cenário de referência – 2012. **Boletim Nº 1** - Grupo DE Articulação de Ações Executivas (GAAE). 1. ed. São Paulo: Coordenadoria Estadual de Defesa Civil, 2012. 100p.

BROOKS, N. **Vulnerability, risk and adaptation: a conceptual framework**. Norwich, UK: Tyndall Centre for Climate Change Research, University of East Anglia. 2003. (Tyndall Centre Working Paper, n. 38).

BROOKS, N.; ADGER, W.N.; KELLY, P.M. The determinants of vulnerability and adaptive capacity at the national level and the implications for adaptation. **Global Environmental Change**, v. 15, p. 151-163. 2005.

BUSTAMANTE, J.F.; GOMES, J.L.; CHOU, S.C. 5-year Eta Model seasonal forecast climatology over South America. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOUTHERN HEMISPHERE METEOROLOGY AND OCEANOGRAPHY, 8., Foz do Iguaçu (PR). **Proceedings...** São José dos Campos: INPE, 2006. p. 503-506.

CAINE, N. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. **Geogr Ann A**, v. 62, p. 23–27, 1980.

CAMARINHA, P. I. M., CANAVESI, V., ALVALÁ, R. C. S. Shallow landslide prediction and analysis with risk assessment using a spatial model in the coastal region in the state of São Paulo, Brazil. **Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions**. , v.1, p.5199 - 5236, 2013

CAMARINHA, P. I. M.; DEBORTOLI, N. S. A Brazilian vulnerability index to natural disasters of drought . In: AMERICAN GEOSCIENCE UNION – FALL MEETING 2015, 2015, San Francisco, CA. **Proceedings...** San Francisco: AGU, 2015. Disponível em:<agu.confex.com/agu/fm15/meetingapp.cgi/Paper/65673> Acessado em Janeiro de 2016.

CANAVESI, V.; CAMARINHA, P. I. M.; ALGARVE, V. R.; CARNEIRO, R. L. C.; ALVALÁ, R. C. S.: Análise da suscetibilidade a deslizamentos de terra: estudo de caso de Paraibuna, SP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu – PR. **Anais...**São José dos Campos: INPE, 2013. p. 5251–5258.

CANNON, S. H.; GARTNER, J. E. Wildfire-related debris flow from a hazards perspective. In: JAKOB, M.; HUNGR, O., (eds)). **Debris flow Hazards and related phenomena** Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005. p.363–385.

CARAGUATATUBA. **Decreto Nº 01, de 03 de Janeiro de 2012**. Aprova o Plano Municipal Plurianual de Desenvolvimento Sustentável Rural e da Pesca. 2012.

CARRARA, A.; CARDINALI, M.; GUZZETTI, F.; REICHENBACH, P.: GIS based techniques for mapping landslide hazard. In: Carrara, A.;d Guzzetti, F. (eds.). **Geographical Information Systems in assessing natural hazards**, Dordrecht: Kluwer Academic Publishing, , 1995. p. 135–176.

CARREGÃ, D. L.; BALZAN, G. Aspectos do comportamento de encostas argilosas no “Creep”. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS (COBRAE), 2., 1997, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABMS/ABGE, 1997. v. 1, p. 233-242.

CARVALHO, C.; MACEDO, E.; OGURA, A. **Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios**. Brasília: Ministério das Cidades (1st ed., p. 176). Brasília, DF: Instituto de Pesquisas Tecnológicas. 2007.

CARVALHO; L. M. V; JONES; C; LIEBMANN, B. Extreme precipitation events in southeast south America and large-scale convective patterns in the south Atlantic convergence zone. **J. Climate**, v.15, p. 2377–2394, 2002.

CARVALHO; L. M. V; JONES; C; LIEBMANN, B. The south Atlantic convergence zone: intensity, form, persistence, relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **J. Climate**, v.17, np. 88–108, 2004,

CASTRO, A. L. C. DE; CALHEIROS, L. B.; CUNHA, M. I. R.; BRINGEL, M. L. N. C. **Manual de desastres - desastres naturais** Brasília, DF: Ministério da Integração Nacional - Secretaria Nacional de Defesa Civil. 2003. Vol. I, p. 174.

CASTRO, A.; CALHEIROS, L. B.; MOURA, A. Z. B. **Manual de desastres Mistos**. Brasília, DF: Ministério da Integração Nacional -Secretaria Nacional de Defesa Civil. 2002. Vol. III..

CAVALCANTI, I. F.; MARENGO, J.; SATYMURTY, et al. Global Climatological Feature in a simulation using CPTEC/COLA AGCM. **J. of Climate**, v.15, p. 2965-2988, 2002.

CENTRO DE ESTUDOS E PESQUISAS SOBRE DESASTRES (CEPED/UFSC). **Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2010**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre desastres. 2012.

CENTRO DE ESTUDOS E PESQUISAS SOBRE DESASTRES (CEPED/UFSC). **Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2012**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre desastres. 2013.

CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS À AGRICULTURA - CEPAGRI. **Clima dos municípios paulistas**. Disponível em: <http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipios-paulistas.html> Acesso em: 12 de setembro de 2014.

CHEN, F.; JANJIC', Z. I.; MITCHELL, K. Impact of atmospheric surfacelayer parameterization in the new land-surface scheme of the NCEP mesoscale Eta model. **Bound-Layer Meteor**, v. 85, p.391–421, 1997.

CHOU, S. C.; BUSTAMANTE, J. F.; GOMES, J. L. Evaluation of Eta model seasonal precipitation forecasts over South America. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v. 12, p. 537-555, 2005.

CHOU, S. C.; LYRA, A.; PESQUERO, F.; ALVES, L. M.; SUEIRO, G.; CHAGAS D. J.; MARENGO, J. A.; DJURDJEVIC, V. Improvement of Long-term integrations by increasing RCM domain size. In: CHALLENGES IN REGIONAL-SCALE CLIMATE MODELLING, 21ST CENTURY., 2009, Lund. **Proceedings...** 2009. p. 8-8. Papel. ISBN 16816471. 2009. ISBN 16816471

CHOU, S. C.; MARENGO, J. A.; LYRA, A.; SUEIRO, G.; PESQUERO, J. F.; ALVES, L. M.; KAY, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D. J.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. **Climate Dynamics**, v. 38, n. 3-4, p. 635–653, 2012.

CHOU, S. C.; NUNES, A. M. B.; CAVALCANTI, I. F. A.: Extended range forecasts over South America using the regional Eta Model. **J. Geophys. Res.**, v.105, n. D8, p. 10 147–10 160, 2000.

CHOU, S.C.; LYRA, A.; MOURÃO, C. et al. Evaluation of the Eta simulations nested in three global climate models. **American Journal of Climate Change**. v.3, n. 5, p. 438-454, 2014.

CHOU, S.C.; MARENGO, J.A.; KAY, GILLIAN, K.; ALVES, M.A.; PESQUERO, J.F, SOARES, W.R.; SANTOS, D. C. S.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D. J.; GOMES, J.L.; BUSTAMANTE, J.F.; TAVARES, P. 2012: Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs, **Clim.Dym**, 2011, DOI 10.1007/s00382-011-1002-8

CHUNG, C. J. F.; FABBRI, A. G.: Systematic procedures of landslide hazard mapping for risk assessment using spatial prediction models. In: GLADE, T.; ANDERSON, M.; CROZIER, M. J.,(eds.).**Landslide hazard and risk**.Chichester: Wiley, 2005. p.139–177.

CLARIZIA, M.; GULLÀ, G.; SORBINO, G. Sui meccanismi di innesco dei soil slip. In: INTERNATIONAL CONFERENCE PREVENTION OF HYDROGEOLOGICAL HAZARDS: THE ROLE OF SCIENTIFIC RESEARCH, 1996, Alba. **Proceedings...** L'Artistica Savigliano, 1996. pub, 1, p. 585–597.

COBRADE. **Classificação e codificação brasileira de desastres**. 2012). Disponível em: <http://www.integracao.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=2a09db34-e59a-4138-b568-e1f00df81ead&groupId=185960>. Acesso em: 4 agosto 2014

COELHO C.A.S.; UVO, C.B; AMBRIZZI, T. Exploring the impacts of the tropical Pacific SST on the precipitation patterns over south America during ENSO periods. **Theor. Appl. Climatol.** v.71, p. 185–197, 2002.

COELHO-NETTO, A. L.; AVELAR, A. D. S.; LACERDA, W. A.: Landslides and disasters in southeastern and southern Brazil, Develop. **Earth Surf. Proc.**, v.13, p. 223-243, 2009.

COLLINS, M.; BOOTH, B. B. B.; BHASKARAN, B.; HARRIS, G. R.; MURPHY, J. M.; SEXTON, D. M. H.; WEBB, M. J. Climate model errors, feedbacks and forcings: a comparison of perturbed physics and multi-model ensembles. **Clim Dyn.** doi:10.1007/s00382-010-0808-0. 2010.

COLLINS, M.; BOOTH, B. B. B.; HARRIS, G. R.; MURPHY, J. M.; SEXTON, D. M. H.; WEBB, M. J. Towards quantifying uncertainty in transient climate change. **Clim Dyn.** doi:10.1007/s00382-006-0121-0. 2006a.

COLLINS, M.; TETT, S. F. B.; COOPER, C. The internal climate variability of a HadCM3, a version of the Hadley centre coupled model without flux adjustments. **Clim Dyn**, v. 1, p. 61–81, 2001. doi:10.1007/s003820000094.

COLLINS, W. J; BELLOUIN, N; DOUTRIAUX-BOUCHER, M; GEDNEY, N; HALLORAN, P; HINTON, T; HUGHES, J; JONES, C. D; JOSHI, M; LIDDICOAT, S; MARTIN, G; O'CONNOR, F; RAE, J; SENIOR, C; SITCH, S; TOTTERDELL, I; WILTSHIRE, A.; WOODWARD, S.: Development and evaluation of an Earth-system model HadGEM2. **Geosci. Model Dev. Discuss**, v. 4, p. 997–1062, 2011. doi:10.5194/gmdd-4- 997-2011.

COLLINS, W. V. Et al Radiative forcing by well-mixed greenhouse gases: estimates from climate models in the IPCC AR4. **J Geophys Res**, v.111, n. D14317, 2006b. doi:10.1029/2005JD006713.

COORDENADORIA ESTADUAL DE DEFESA CIVIL (CEDEC). **Banco de dados de atendimentos emergenciais da Operação Verão – 2000 a 2011**. São Paulo, Coordenadoria Estadual de Defesa Civil da Casa Militar. Não Publicado. 2011

COROMINAS J.; AYALA, F.J.; CENDRERO, A.; CHACÓN, J.; DÍAZ de TERÁN JR, GONZÁLES, A.; MOJA, J.; VILAPLANA, J. M. Impacts on natural hazard of climatic origin. In: **ECCE Final Report: a preliminary assessment of the impacts in Spain due to the effects of climate change**. Ministerio de Medio Ambiente. 2005. Disponível em:

http://www.mma.es/secciones/cambio_climatico/documentacion_cc/historicos_cc/pdf/preliminary_assessment_impacts_full_2.pdf

COX, P.; BETTS, R.; BUNTON, C.; ESSERY, R.; ROWNTREE, P.R.; SMITH, J. The impact of new land surface physics on the GCM simulation of climate and climate sensitivity. **Climate Dynamics**, v.15, p.183-203, 1999.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial**. São José dos Campos: INPE, 2001. 101 p. (INPE. 8454-RPQ/722).

CREPANI, E.; MEDEIROS, J.S. de. Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento aplicados ao estudo da vulnerabilidade a movimentos de massa no Município de São Sebastião - SP. - In: SIMPÓSIO LATINOAMERICANO DE PERCEPCIÓN REMOTA (SELPER), 9., 2000, Misiones. **Anales...** Misiones, Argentina: SELPER – Capítulo Argentina, 2000.

CROSTA, G. B.; FRATTINI, P. Distributed modelling of shallow landslides triggered by intense rainfall, **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, v. 3, p. 81–93, 2003. doi:10.5194/nhess-3-81-2003.

CROSTA, G. B.; FRATTINI, P. Rainfall thresholds for triggering soil slips and debris flow. In: EGS PLINIUS CONFERENCE ON MEDITERRANEAN STORMS, 2., 2001, Siena. **Proceedings...** Siena, 2001. p. 463-487. (Mugnai A, Guzzetti F, Roth G, eds).

CROZIER, M. J.; VAUGHAN, E. E.: Relative instability of colluvium- filled bedrock depressions. **Earth Surf. Proc. Land.**, v.15, p. 329–339, 1990.

CRUZ, P. T.; MASSAD, F.; KANJI, M. A.; ARAUJO FILHO, H. A. Debris flows in Serra do Mar, Cubatão, Brazil: control works and design parameters., In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON THE DEBRIS FLOW DISASTER OF DECEMBER 1999, 2000, Caracas. **Proceedings...** Caracas, 2000. p. 8. CD-ROM.

CUTTER, S. L.; BARNES L.; BERRY M.; BURTON C.; EVANS E.; TATE E, WEBB J. A place-based model for understanding community resilience to natural disasters. **Global Environmental Change**, v. 18, n. 4, p. 598-606, 2008.

CUTTER, S.L.; BORUFF, B.J.; SHIRLEY, W.L. Social Vulnerability to Environmental Hazards. **Social Science Quarterly**, v. 84, n. 2, 242-260, 2003.

CUTTER, S.L.; EMRICH, C.T.; WEB, J.J.; MORATH, D. **Social vulnerability to climate variability hazards: a review of the literature**. Columbia, CS, USA: Hazards Vulnerability Research Institute, University South Carolina, 2009. 44 p. Final Report to Oxfam America.

DEBORTOLI, N. S.; CAMARINHA, P. I. M.; MARENGO, J.; RODRIGUES, R. A Brazilian Vulnerability Index Towards Natural Disasters and Climatic Change - Flashfloods and Landslides. **American Geoscience Union** – fall meeting 2015. San Francisco, CA. 2015. Acessado em Janeiro de 2016.

DEERE, D.V.; PATTON, F.D. Slope stability in residual soils. In: PAN AMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 4., 1971, Puerto Rico. **Proceedings...** New York: AMS, 1971. v. 1, p. 87-170.

DERESSA, T; HASSAN, R. M.; RINGLER, C. **Measuring Ethiopian farmers' vulnerability to climate change across regional states**. International Food Policy Research Institute. 2008. Disponível em: <http://www.ppa.gov.et/PPAA/PriceList_Catalog/Harari-Vulnerability.pdf> Acessado em: Março de 2014.

DIETRICH, W. E.; DUNNE, T.: The channel head In: Beven, K.; Kirkby, M., Wiley, J. (eds.). **Channel Network Hydrology**. Chichester, 1993. p.175–219.

DIETRICH, W. E; MONTGOMERY, D. R. **SHALSTAB**: a digital terrain model for mapping shallow landslide potential. North Carolina EUA: National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement, , 1998. Technical Report, NCASI.

DOSWELL, C. A.; BROOKS, H. E., MADDOX, R. Flash food forecasting; an ingredients-based methodology. **Weather and Forecasting**. v. 11, p. 560-580. 1996.

DUFEK, A. S., AMBRIZZI, T. Precipitation variability in São Paulo State, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 93, p. 167-178, 2008.

DUNNING, M.C. **Social vulnerability analysis methods for corps planning**. 2009. Draft report 10/29/09.

DUNNO, C. H. **measuring social vulnerability to natural hazards: an examination of The United States Virgin Islands**. 2011. 207p. Dissertation Submitted to obtain Degree Doctor of Philosophy, The University of North Carolina, Greensboro, 2011.. Directed by Dr. Rick Bunch.

DYMOND, J. R.; AUSSEIL, A. G.; SHEPHERD, J. D.; BUETTNER, L. Validation of a region-wide model of landslide susceptibility in the Manawatu-Wanganui region of New Zealand. **Geomorphology**, v.74, p. 70–79, 2006.

EM-DAT: **The OFDA/CRED international disaster database**. 2013. Disponível em: www.em-dat.net.

ERCANOGLU, M.; GOKCEOGLU, C. Use of fuzzy relations to produce landslide susceptibility map of a landslide prone area (West Black Sea Region, Turkey), **Eng. Geol.**, v. 75, p. 229–250, 2004.

FADIGA JR. F. M.; LOPES, J. E. G.; MARTINS, J. R. S. Modelos de Previsão de Vazões para a bacia incremental à UHE Itaipu. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** , v. 13, n. 2, p. 65 - 75. 2008.

FELS, S. B.; SCHWARZKOPF, M. D. The simplified exchange approximation: a new method for radiative transfer calculations. **J Atmos Sci.** v. 32, p.1475–1488, 1975.

FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B., B. **Geomorfologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: Beltrand Brasil, 1996. p.123–194.

FERNANDES, N. F.; COELHO NETTO; A. L.; LACERDA, W. A Subsurface hydrology of layered colluvium mantles in unchannelled valleys – southeastern Brazil. **Earth Surf. Proc. Land.**, v.19, p. 609– 626, 1994.

FERNANDES, N. F.; COELHO NETTO; A. L.; LACERDA, W. A Subsurface hydrology of layered colluvium mantles in unchannelled valleys – southeastern Brazil, **Earth Surf. Proc. Land.**, v. 19, p. 609– 626, 1994.

FERNANDES, N. F.; GUIMARAES, R. F.; GOMES, R. A. T.; VIEIRA, B. C.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. Topographic Controls of Landslides in Rio de Janeiro: Field Evidences and Modeling, **Catena**, v. 55, p. 163–181, 2004.

FOLKE, C. Resilience: the emergence of a perspective for social-ecological systems analyses. **Global Environmental Change**, v. 16, p. 253-267. 2006.

FRANKE B.; SEVEGNANI L. **Desastre de 2008 no Vale do Itajaí: água, gente e política**. Blumenau: Agência de Água do Vale do Itajaí, 2009. 1321p.

FRICH, P.; ALEXANDER, L.V.; DELLA-MARTA, P.; GLEASON, B.; HAYLOCK, M.; KLEIN-TANK, A.M.G.; PETERSON, T. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century, **Climate Research**, v. 19, p. 193–212. 2002.

FURTADO J.; DE OLIVEIRA M.; DANTAS M. C.; SOUZA P. P.; PANCERI R. Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Universitário de Pesquisa e Estudos sobre desastres. **Capacitação básica em Defesa Civil**. 3. ed. Florianópolis: CAD UFSC, 2013. 122 p. ISBN 978-85-64695-31-3

GALL, M. **Indices of social vulnerability to natural hazards: a comparative evaluation.** 2007, 231p. Tese de Doutorado - University of South Carolina, Department of Geography, Columbia, 2007.

GAO, J. Identification of topographic settings conducive to landsliding from dem in Nelson County, Virginia, U.S.A., **Earth Surf. Proc. Land.**, v. 18, p. 579–591, 1993.

GEDNEY, N.; COX, P.; DOUVILLE, H.; POLCHER, J.; VALDES, P. Characterizing land surface schemes to understand their responses to climate change. **J Climate**, v. 13, p. 3066–3079. 2000. doi:10.1175/1520-0442(2000)013\3066:CGLSST[2.0.CO;2

GIANNECCHINI, R. Rainfall triggering soil slips in the southern Apuane Alps (Tuscany, Italy). **Adv Geosci.**, v. 2, p. 21–24. 2005.

GOOD, P.; LOWE J.; COLLINS, M.; MOUFOUMA-OKIA, W. An objective tropical Atlantic sea surface temperature gradient index for studies of South Amazon dry-season climate variability and change. **Philos Trans R Soc Ser B**, v. 363, p.1761–1766. 2008.

GORDON, C.; COOPER, C.; SENIOR, C.; BANKS, H.; GREGORY, J.; JOHNS, T.; MITCHELL, J.; WOOD, R. 2000: The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a coupled model without flux adjustments. **Climate Dynamics**, v. 16, p.147-168, 2000.

GREENWAY, D. R. Vegetation and slope stability. In: ANDERSON, M. G.; RICHARDS, K. S. (eds.). **Vegetation and slope stability.** John Wiley & Sons, Chichester, 1987. p. 187–229.

GROISMAN. P. Y.; KNIGHT. R. W.; EASTERLING. D. R.; KARL, T. R.; HEGERL, G. C.; RAZUVAEV, V. N. Trends in intense precipitation in the climate record. **Journal of Climate**, v. 18, p. 1326– 1350. 2005.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação.** São Paulo: Editora da USP, 1984. p. 216.

GUIMARÃES, R. F.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. M.; FERNANDES, N. F.; GOMES, R. A. T.; CARVALHO JUNIOR, O. A. Parameterization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: application to Rio de Janeiro. **Eng. Geol.**, v. 69, p. 99–108, 2003.

GUTOWSKI, W. J; WILLIS, S. S; PATTON, J. C; SCHWEDLER, B. R. J; ARRITT, R. W; TAKLE, E. S. Changes in extreme, cold-season synoptic precipitation events under global warming. **Geophysical Research Letters.** v. 35. 2008. doi:10.1029/2008GL035516

- GUZZETTI, F.; PERUCCACCI, S.; ROSSI, M.; STARK, C.P.: Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe.- **Meteorol. Atmos. Phys.** v. 98, p. 239-267. 2007.
- GUZZETTI, F.; REICHENBACH, P.; CARDINALI, M.; GALLI, M.; ARDIZZONE, F. Landslide hazard assessment in the Staffora basin, northern Italian Apennines, **Geomorphology**, v. 72, p. 272–299, 2005.
- HAHN, M. B.; RIEDERER, A. M.; FOSTER, S.O. The livelihood vulnerability index: a pragmatic approach to assessing risks from climate variability and change—a case study in Mozambique. **Global Environmental Change** v. 19, n.1, p. 74-88. 2009.
- HANSEN, J.; RUEDY, R.; SATO, M.; LO, K. Global surface temperature change. **Reviews of Geophysics**, v. 48, n. 4, 2010. ISSN 8755-1209. 2010.
- HARRIS, P.; HUNTINGFORD, C.; COX, P. M. Amazon basin climate under global warming: the role of the sea surface temperature. **Philos Trans R Soc Ser B**, v. 363, p.1753–1759. 2008.
- HAYLOCK, M. R. ; PETERSON, T. C. ; ALVES, L. M. ; AMBRIZZI, T. ; ANUNCIAÇÃO, M. T. ; BAEZ, J. ; BARROS, V. R. ; BERLATO, M. A. ; BIDEGAIN, M. ; CORONEL, G. ; CORRADI, V. ; GARCIA, V. J. ; GRIMM, A M. ; KAROLY, D. ; MARENGO, J. A. ; MARINO, M. B. ; MONCUNILL, D. F. ; NECHET, D. ; QUINTANA, J. ; REBELLO, E. ; RUSTICUCCI, M. ; SANTOS, J. L. ; TREBEJO, I. ; VINCENT, L. Trends in total and extreme South American rainfall 1960-2000 and links with sea surface temperature. **Journal of Climate**, Estados Unidos, v. 19, n. 8, p. 1490-1512. 2006.
- HELD, I.M.; SODEN, B.J. Robust responses of the hydrological cycle to global warming. **Journal of Climate**, v. 19, n. 21, p. 5686-5699. 2006.
- HUABIN, W.; GANGJUN, L.; WEIYA, X.; GONGHUI, W. GIS-based landslide hazard assessment: an overview. **Prog. Phys. Geogr.**, v. 29, p. 548–567, 2005.
- HUTCHINSON, J. N. General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology, In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LANDSLIDES, 5., 1986, Balkena, Rotterdam, the Netherlands. **Proceedings...** Rotterdam, 1986b. p.3–35.
- HUTCHINSON, J. N. Mass movement. In: FAIRBRIDGE, R. W.(ed.). **Encyclopedia of geomorphology**. New York: Reinhold, 1986a. p. 688– 695.
- ICSU-LAC Entendimiento y gestión del riesgo asociado a las amenazas naturales: un enfoque científico integral para América Latina y el Caribe. Ciencia para una vida mejor, v.2. In: CARDONA, O.D.; J.C. BERTONI, J. C.; GIBBS, A.; HERMELIN, M.; LAVELL, A. (EdS.). **Desarrollando programas científicos regionales en áreas prioritarias para América Latina y el**

Caribe. Rio de Janeiro: ICSU Regional Office for Latin America and the Caribbean, 2010b.

ICSU-LAC Science for a better life: developing regional scientific programs in priority areas for Latin America and the Caribbean, v.2. In: CARDONA, O.D.; BERTONI, J.C.; GIBBS, A.; HERMELIN, M.; LAVELL, A. (Eds.).

Understanding and managing risk associated with natural hazards: an integrated scientific approach in Latin America and the Caribbean. Rio de Janeiro: CSU Regional Office for Latin America and the Caribbean, 2010a.

INNES, J.L. Debris flows. **Prog Phys Geog.**, v. 7, p. 469–501. 1983.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE.

Comunicação social - sala de imprensa: contas regionais: de 2010 a 2013, PIB do Mato Grosso acumula a maior alta (21,9%) entre todos os estados. 2015b. Disponível em:

<<http://saladeimprensa.ibge.gov.br/noticias?view=noticia&id=1&busca=1&idnoticia=3038>> Acesso 22 ago. de 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE.

Estimativas da população residente no Brasil e Unidades da federação com data de referência em 1º de julho de 2015. 2015. Disponibilizado em:

ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2015/estimativa_dou_2015_20150915.pdf> Acesso em 22 ago. de 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE -) **SIDRA – Sistema de Recuperação Automática do IBGE.** 2014. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/> Acesso em: 20 mar. 2014.

INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). **Instabilidade das encostas da Serra do Mar voltadas ao parque industrial de Cubatão (SP):** diagnose, soluções e ações de emergência. São Paulo, 1986.

INSTITUTO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS (IPMet). **Banco de Dados de Desastres Naturais,** 2013. Disponível em:

<http://www.ipmet.unesp.br/index2.php?abre=ipmet_html/defesacivil/index.php> Acesso em 4 mar. 2013.

INSTITUTO FLORESTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - IF. **Parque Estadual da Serra do Mar:** plano de manejo. São Paulo, 2008.

INSTITUTO PÓLIS **Litoral sustentável –** desenvolvimento com inclusão social. resumo executivo de caraguatatuba. 44p. 2013. Disponível em:

<<http://litoralsustentavel.org.br/wp-content/uploads/2013/12/Resumo-executivo-Caraguatatuba-Litoral-Sustentavel.pdf>> Acesso em 18 jan. de 2016.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**: Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor; H. L. Miller Eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp. 2007a.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. In: Parry, M. L. ; Canziani, O. F.; Palutikof, J. P.; van der Linden, P. J.; Hanson, C. E. (Ed.) Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976 pp. 2007b.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC: managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. In: FIELD, C.B.; BARROS, V.; STOCKER, T. F.; QIN, D.; DOKKEN, D. J.; EBI, K. L.; MASTRANDREA, M. D.; MACH, K. J.; PLATTNER, G. –K.; ALLEN, S. K.; TIGNOR, M.; MIDGLEY, P.M. (Eds.) **A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp. 2012.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) **Climate change 2001**: IPCC third assessment report. Geneva: IPCC Secretariat, 2001.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE, C. IPCC. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. IPCC, 2013. 1535p. Disponível em: <<http://www.climatechange2013.org/><<http://www.ipcc.ch>> Acesso em 12 mar. 2012.

JANJIC´, Z.I. Forward-backward scheme modified to prevent two grid-interval noise and its application in sigma coordinate models. **Contrib Atmos Phys** v. 52, p. 69–84. 1979.

JANJIC´, Z.I. The step-mountain Eta coordinate model: further developments of the convection, Viscous sub layer and turbulence closure schemes. **Mon Wea Rev**, v. 122, p.927–945. 1994.

JIBSON, R.W. Debris flow in southern Porto Rico. **Geological Society of America, Special Paper**, v. 236, p. 29–55. 1989.

KANJI, M. A.; CRUZ, P. T.; MASSAD, F. Debris flow affecting the Cubatão Oil Refinery, Brazil, **Landslides**, v. 5, p. 71–82, 2008.

KANUNGO, D. P.; ARORA, M. K.; SARKAR, S., GUPTA, R. P. A comparative study of conventional, ANN black box, fuzzy and combined neural and fuzzy

weighting procedures for landslide susceptibility zonation in Darjeeling Himalayas, **Eng. Geol.**, v. 85, p. 347–366, 2006.

KARL, T. R.; TRENBERTH, K. E. The human impact on climate. **Scientific American**. v. 281, p. 100-105. 1999.

KARL, T. **Weather and climate extremes in a changing climate regions of focus**: North America, Hawaii, Caribbean, and U.S. Pacific Islands. Washington, DC, U.S. Climate Change Science Program. 2008. 164p. Disponível em: <<http://purl.access.gpo.gov/GPO/LPS110676>> Acesso em 30 out 2014.

KEEFER, D. K. Statistical analysis of an earthquake-induced landslide distribution – the 1989 Loma Prieta, California event. **Eng. Geol.**, v. 58, p. 231–249, 2000.

KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D. A.; MARCELINO, I. P. V. O.; MARCELINO, E. V.; GONÇALVES, E. F.; BRAZETTI, L. L. P.; GOERL, R. F.; MOLLERI, G. S. F.; RUDORFF, F. M.: **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos**, Curitiba: Ed. Organic Trading, 2005. 109p.

KOSATSKY, T. The 2003 European heatwaves. **Euro Surveillance**, v. 10, n. 7, p. 148-149. 2005.

KURIAKOSE, S. L. **Effect of vegetation on debris flow initiation**: conceptualization and parameterization of a dynamic model for debris flow initiation in Tikovil River Basin, Kerala, India, using PCRaster. 2006. 143p. Tese de Mestrado - International Institute 150 for Geo-information Science and Earth Observation and the Indian Institute of Remote Sensing (NRSA), India, 2006.

LACERDA, N.; MARINHO, G.; BAHIA, C.; QUEIROZ, P.; PECCHIO, R. Planos diretores municipais: aspectos legais e conceituais. **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais**. 2011. Disponível em: <<http://anpur.org.br/revista/rbeur/index.php/rbeur/article/view/135>>.

LACIS, A. A.; HANSEN, J. E. A parameterization of the absorption of solar radiation in earth's atmosphere. **J Atmos Sci.**, v. 31, p.118–133, 1974.

LEE, S. Application and verification of fuzzy algebraic operators to landslide susceptibility mapping, **Environ. Geol.**, v. 52, p. 615–623, 2007.

LEE, S.; MIN, K. Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea, **Environ. Geol.**, v. 40, p. 1095–1113, 2001.

LEICHENKO, R. M.; O'BRIEN, K. L. The dynamics of rural vulnerability to global change: The case of Southern Africa. **Mitigation & Adaptation Strategies for Global Change** v. 7, n.1, p. 1-18, 2002.

LI, W.; FU, R.; DICKINSON, R. E. Rainfall and its seasonality over the Amazon in the twenty-first century as assessed by the coupled models for the IPCC AR4. **J Geophys Res.**, v. 111, D02111, 2006. doi: 10.1029/2005JD006355

LIEBMANN, B.; JONES, C.; CARVALHO, L. M. V. Interannual variability of daily extreme precipitation events in the state of Sao Paulo, Brazil. **Journal of Climate**, v. 14, p. 208–218, 2001.

LIMA, M. C. **Manutenção da circulação atmosférica sobre a América do Sul**. 1996. 222 p. (INPE-6646-TDI/623). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São Jose dos Campos, 1996.

LISTO, F. L. R.; VIEIRA, B. C.. Mapping of risk and susceptibility of shallow-landslide in the city of São Paulo, Brazil, **Geomorphology**, v. 169–170, 30–44, 2012.

LISTO, F. L. R.; VIEIRA, B. C.: Análise de condicionantes topográficos como subsídio para avaliação de áreas de risco a escorregamentos rasos. **Revista de Geografia**, v. esp., p. 174–187, 2010.

LUMB, P. Slope failure in Hong Kong. **Q J Eng Geol.**, v. 8, p. 31–65, 1975.

MARANDOLA JR. E.; MARQUES, C.; PAULA, L. T.; CASSANELI, L. B. Crescimento urbano e áreas de risco no litoral norte de São Paulo. **Revista Brasileira de Estudos Populacionais**. v. 30, n.1, p. 35-56, 2013.

MESINGER, F. Forward-backward scheme, and its use in a limited area model. **Contrib Atmos Phys.**, v. 50, p. 200–210, 1977.

MARCELINO, E. V.; NUNES, L. H.; KOBAYAMA, M.: Banco de dados de desastres naturais: análise de dados globais e regionais, **Caminhos de Geogr.**, v. 6, p. 130–149, 2006.

MARCHI, L.; ARATTANO, M.; DEGANUTTI, A. M. Ten years of debris-flow monitoring in the Moscardo Torrent (Italian Alps). **Geomorphology**, v. 46, p. 1–17, 2002.

MARENGO, J. A. **Mudanças climáticas globais e efeitos sobre a biodiversidade** - caracterização do clima no Século XX e Cenários Climáticos no Brasil e na América do sul para o Século XXI derivados dos modelos Globais de Clima IPCC. CPTEC/INPE. São Paulo, 2007, 185p.

MARENGO, J. A.; JONES, R.; ALVES, L. M.; VALVERDE, M. C. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. **International Journal of Climatology**, v. 29, p. 2241-2255, 2009b. DOI: 10.1002/joc.1863

MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; ALVES, L. M.; SOARES, W. R.; RODRIGUEZ, D. A. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 12, 2011. ISSN 0094-8276.

MARENGO, J.; CAVALCANTI, IRFA.; NUNES, LF.; CAMARINHA, PI. et al. **Avaliação dos impactos e vulnerabilidades às mudanças climáticas no Brasil e estratégias para a implementação de opções de adaptação**. São Paulo: FAPESP PFFMCG 2008/58161-1. 2015. ISBN 978-85-17-00070-6.

MARENGO, J.A. et.al. Assesment of regional seasonal rainfall predicatbility using the CPTEC/COLA atmospheric GCM. **Climate Dynamics**, v. 21, p. 459-475, 2003.

MARENGO, J.A.; SCHAEFFER, R.; PINTO, H.S.; ZEE, D.M.W. **Mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil**. Rio de Janeiro: FBDS, 2009a.

MARTINELLI, M. **Relevo do estado de São Paulo**. Confins [Online], v. 7. 2009. DOI : 10.4000/confins.6168

MASSAD, F.; CRUZ, P.T.; KANJI, M.A.; ARAUJO FILHO, H. A.: Concepção e função das obras de controle de debris flows, construí- das em Cubatão, S. Paulo, Brasil, In: CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA, 9., 2004, v. 3, Aveiro, Portugal, **Actas...** Aveiro: Universidade de Aveiro, 2004, p. 155–164.

MESINGER, F. A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. **Rivista di Meteorologia Aeronautica** v. 44, n.1–4, p.195–202, 1984.

MESINGER, F.; JANJIC´, Z. I.; NICKOVIC, S.; GAVRILOV, D.; DEAVEN, D. G. The step-mountain coordinate: model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of Appalachian redevelopment. **Mon Wea Ver.**, v. 116, p. 1493–1518, 1988.

MINISTÉRIO DAS CIDADES/CITIES ALLIANCE. **Prevenção de riscos de deslizamentos em encostas: guia para elaboração de políticas municipais**. Brasília: Ministério das Cidades, Cities Alliance, 2006.

MINISTÉRIO DAS CIDADES; IPT. **Manual de treinamento de técnicos municipais para o mapeamento e gerenciamento de áreas urbanas com risco de escorregamentos, enchentes e inundações**. Rio de Janeiro: CPRM/SGB, 2004. 90p.

MOSS, R. H.; MALONE, E. L.; BRENKERT, A.L. **Vulnerability to climate change: A quantitative approach**. Joint Global Change Research Institute. 2002. Disponível em: <http://www.globalchange.umd.edu/data/publications/Vulnerability_to_Climate_Change.PDF> Acesso em> 03 fev. 2016.

MOUSINHO, M. R.; BIGARELLA, J. J. Movimentos de massa no transporte dos detritos de meteorização das rochas. In: **Boletim Paranaense de Geografia**, n. 16/17, Curitiba: Centro de Documentação e Informação do Instituto de Geologia da Universidade Federal do Paraná, 1965, p. 43–84.

MURPHY, J. M. B.; BOOTH, B. B. B.; COLLINS, M.; HARRIS, G. R.; SEXTON, D. M. H.; WEBB, M. J. A methodology for probabilistic predictions of regional climate change from perturbed physics ensembles. **Philos Trans Soc R Ser A** 365:1993–2028. 2007.

MURPHY, J. M.; SEXTON, D. M. H.; BARNETT, D. N.; JONES, G. S.; WEBB, M. J.; COLLINS, M.; STAINFORTH, D. A. Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations. **Nature** v. 430, p.768–772, 2004.

NAKICENOVIC, N.; ALCAMO, J.; DAVIS, G.; DE VRIES, B.; FENHANN, J.; GAFFIN, S.; GREGORY, K.; GRUBLER, A.; JUNG, T. Y.; KRAM, T. L. A.; ROVERE, E. L.; MICHAELIS, L.; MORI, S.; MORITA, T.; PEPPER, W.; PITCHER, H.; PRICE, L.; RIAHI, K.; ROEHL, A.; ROGNER, H.-H.; SANKOVSKI, A.; SCHLESINGER, M.; SHUKLA, P.; SMITH, S.; SWART, R.; VAN ROOIJEN, S.; VICTOR, N.; DADI, Z. **Emission scenarios**. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL FACING HAZARDS AND DISASTERS (NRC) Understanding Human Dimensions. **Committee on Disaster Reduction in the Social Sciences**: future challenges and opportunities. Washington D.C.: National Academy Press, 2006.

NEUHÄUSER, B.; TERHORST, B.: Landslide Susceptibility Assessment Using Weights-of-Evidence Applied on a Study Site at the Jurassic Escarpment of the Swabian Alb (SW Germany). **Geomorphology**, v. 86, p. 12–24, 2007.

NOBRE, C A.; YOUNG, A F.; SALDIVA, P; MARENGO, J A; NOBRE, A D.; ALVES JR; S; DA SILVA, G C M; LOMBARDO, M. **Vulnerabilidades das megacidades brasileiras às mudanças climáticas**: Região Metropolitana de São Paulo. São Paulo, 2010. 32 p.

OBREGÓN,G.O.; MARENGO, J.A.; NOBRE, C.A. Rainfall and climate variability: long-term trends in the Metropolitan Area of São Paulo in the 20th century. **Climate Research** v. 61, p. 93-107, 2014.

O'BRIEN, K.; LEICHENKO, R.; KELKAR, U.; VENEMA, H.; AANDAHL, G.; TOMPKINS, H.; JAVED, A.; BHADWAL, S.; BARG, S.; NYGAARD, L.; WEST, J. Mapping vulnerability to multiple stressors: Climate change and globalization in India." **Global Environmental Change** v. 14, n. 4, p. 303-313, 2004.

- OLIVEIRA, J. B.; CAMARGO, M. N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. **Mapa pedológico do estado de São Paulo: legenda expandida.** Campinas, Brazil: Instituto Agrônômico/EMBRAPA Solos, 1999.
- ONODERA, T.; YOSHINAKA, R.; KAZAMA, H. Slope failures caused by heavy rainfall in Japan. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INT. ASS. ENG. GEOL., 2., 1974, São Paulo, 1974. : **Proceedings...** São Paulo, 1974. v. 11, p. 1–10.
- PASCARELLI, L.; LANÇONE, L.; COSTA, R.; PIRES, L.; MACEDO, E.; MIRANDOLA, F.; CHECCHINATO, F.; CANIL, K. Mapping Geological at-Risk Areas in the City of Sao Paulo: Issues and Results from the Largest Risk Survey in Brazil. In: MARGOTTINI, C.; CANUTI, P.; SASSA, K. (Eds.). **Landslide science and practice: risk assessment, management and mitigation.** 1. ed. Berlin: Springer, 2013. v. 6, p. 349-355.
- PEDROZZI, G. Triggering of landslides in Canton Ticino (Switzerland) and prediction by the rainfall intensità and duration method. **Bull Eng Geol Environ** v. 63, n. 4, p. 281–291, 2004.
- PEIXOTO, A.B. (Org). **Geodiversidade do estado de São Paulo.** São Paulo: CPRM. 136 p. 2010.
- PESQUERO, J. F. **Balanço de umidade na região do sistema de monção da América do Sul em cenários climáticos futuros (2071-2100) utilizando o modelo Eta:** um estudo de modelagem. 2009. 204p. Tese Doutorado em Meteorologia) Inpe, São José dos Campos, 2009. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/35T9LEL>>. Acesso em: 22 jul. 2016.
- PESQUERO, J.F; CHOU, S.C; NOBRE, C.A; MARENGO, J.A. Climate downscaling over South America for 1961-1970 using the Eta Model. **Theoretical and Applied Climatology.** v. 99, n. 1-2, p.75-93, 2009. DOI: 10.1007/s00704-009-0123-z.
- PIERSON, T. H. Piezometric response to rainstorms in forested hillslope drainage depressions, **J. Hydrol.**, v. 19, p. 1–9, 1980.
- POPE, V.; GALLANI, M.; ROWTREE, P.; STRATTON, R. The impact of new physical parameterizations in the Hadley centre climate model. **Clim Dyn** v. 16, p. 123–146, 2000.
- PRADHAN, B. Landslide susceptibility mapping of a catchment area using frequency ratio, fuzzy logic and multivariate logistic regression approaches, **J. Indian Soc. Remote Sens.**, v. 38, p. 301–320, 2010.
- PRADHAN, B.; LEE, S.; BUCHOITHNER, M. F. Use of geospatial data and fuzzy algebraic operators to landslide-hazard mapping. **Appl. Geomat.**, v. 1, p. 3–15, 2009.

PRADO, L.F.; PEREIRA FILHO, A.J.; LOBO, G.A.; HALLAK, R. Climatologia da precipitação no Estado de São Paulo no período de 1947 a 1997. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14., 2006, Florianópolis, 2006. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMet, 2006.

QI, S. W.; XU, Q.; LAN, H. X.; ZHANG, B.; LIU, J. Y. Spatial distribution analysis of landslides triggered by 2008.5.12 Wenchuan earthquake, China, **Eng. Geol.**, v. 116, p. 95–108, 2010.

RANDALL, D.A.; WOOD R.A.; BONY, S.; COLMAN, R.; FICHEFET, T.; FYFE, J.; KATTSOV, V.; PITMAN, A.; SHUKLA, J.; SRINIVASAN, J.; STOUFFER, R.J.; SUMI, A.; TAYLOR, K.E. Climate Models and Their Evaluation. In: Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Chen, Z.; Marquis, M.; Averyt, K. B.; Tignor, M.; Miller, H. L. (Eds.). **Climate change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.

RENEAU, S. L.; DIETRICH, W. E.; WILSON, C. J.; ROGER, J. D. Colluvial deposits and associated landslide in the northern San Francisco Bay area, California, USA. In: INTERNATINAL SYMPOSIUM ON LANDSLIDES, 4.; 1984, Toronto. **Proceedings...** Toronto, 1984. p. 425–430.

RIAHI, K; RAO, S; KREY, V; CHO, C; CHIRKOV, V; FISCHER, G; RAFAJ, P. RCP8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. **Climatic Change**, v. 109, n. 1-2, p. 33–57, 2011. doi:10.1007/s10584-011-0149-y.

RITTER, D. F.; KOCHER, R. C.; MILLER, J. R. **Process Geomorphology.** Dubuque: William C. Brown Pub, 1995. 539p.

ROGNER H-H.; SANKOVSKI, A.; SCHLESINGER, M.; SHUKLA, P.; SMITH, S.; SWART, R.; VAN ROOIJEN, S.; VICTOR, N.; DADI, Z. **Special report on emissions scenarios.** Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2000. 599p.

RUIZ JUNIOR, L. D.; OLIVEIRA, R. C. Áreas protegidas e expansão do uso da terra no litoral norte do estado de São Paulo. **Caminhos da Geografia**, v. 14. n. 48, p. 48-59, 2013.

SALCIARINI, D.; GODT, J. W.; SAVAGE, W. Z.; CONVERSINI, P.; BAUM, R. L.; MICHAEL, J. A. Modeling regional initiation of rainfall induced shallow landslides in the eastern Umbria Regional of Central Italy. **Landslides**, v. 3, p. 181–194, 2006.

SANT'ANNA NETO, J. L. Tipologia dos sistemas naturais costeiros do estado de São Paulo. **Revista de Geografia** (UNESP), v. 12, p. 47-86, 1993.

SANT'ANNA NETO, J.L. **Ritmo climático e a gênese das chuvas na zona costeira paulista**. Dissertação de Mestrado. São Paulo: Departamento de Geografia/FFLCH/USP. 1990. 156p.

SANTOS, A. R. **A grande barreira da Serra do Mar**: da trilha dos Tupiniquins à rodovia dos Imigrantes. São Paulo: O Nome da Rosa Editora Ltda, 2004, 122p.

SANTOS, D. D. S.; GALVANI, E. Caracterização sazonal das precipitações no Município de Caraguatatuba-SP, entre os anos de 1943 a 2004, **Geonorte**, v.1, n.5, p. 1196-1203, 2012.

SANTOS, D. D.; GALVANI, E. Distribuição sazonal e horária das precipitações em Caraguatatuba-SP e a ocorrência de eventos extremos nos anos de 2007 a 2014. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 36, n. 2 mai-ago, p. 214–229, 2014.

SANTOS, M. J. **Análise e modelagem dos eventos extremos de precipitação sobre o estado de São Paulo**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

SÃO PAULO – GOVERNO DO ESTADO – SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE – INSTITUTO FLORESTAL. **Plano de manejo**: Parque Estadual da Serra do Mar. Resumo executivo. Projeto de Preservação da Mata Atlântica. São Paulo, 2006. 26p.

SÃO PAULO. Secretaria do Meio Ambiente. Coordenadoria de Planejamento Ambiental Estratégico e Educação Ambiental. **Zoneamento ecológico-econômico** - Litoral Norte São Paulo. São Paulo,, 2005.

SASSA, K.; WANG, G.; FUKUOKA, H.; WANG, F.; OCHIAI, T.; SUGIYAMA, M.; SEKIGUCHI, T. Landslide risk evaluation and hazard zoning for rapid and long-travel landslides in urban development areas, **Landslides**, v. 1, p. 221–235, 2004.

SATYAMURTY, P.; NOBRE, C. A.; DIAS, P. L. S. South America. In: Karoly, D. J.; Vincent, D. G. Meteorology of the Southern Hemisphere. Boston: **American Meteorology Society**. v.1, cap. 3, p. 243-282. 1998.

SCHWARZE, R.; WAGNER, G. G: The political economy of natural disaster insurance: lessons from the failure of a proposed compulsory insurance scheme in Germany. **European Environment**, v.17, n. 6, p. 403-415, 2007.

SELBY, M. J. **Hillslope: materials and process**. Oxford University Press, Oxford, England, 1993. 451p.

SENDAI FRAMEWORK FOR DISASTER RISK REDUCTION (SFDRR). **The Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030**. 2015.

Disponível em:

<http://www.wcdrr.org/uploads/Sendai_Framework_for_Disaster_Risk_Reduction_2015-2030.pdf> Acesso em 15 dez. 2015.

SIVAKUMAR, G. L.; MUKESH, M. D. Landslides analysis in geographic information systems. In: **Gisdevelopment The Geographic Information Systems (GIS) PORTAL**. 2002.

SMALL, R. J. **The study of landforms: a textbook of geomorphology**. Cambridge University Press, 1970. 486p.

SMIT, B.; WANDEL, J. Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. **Global Environmental Change**, v. 16, n.3, p. 282–292, 2006.

SOUZA, C.R. G. Suscetibilidade morfométrica de bacias de drenagem ao desenvolvimento de inundações em áreas costeiras. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.6, n.1, p. 45-62, 2005.

SPAROVEK, Gerd et al . **A revisão do Código Florestal brasileiro**. Novos estudos - CEBRAP, São Paulo , n. 89, p. 111-135, 2011. doi:10.1590/S0101-33002011000100007

STAINFORTH, D. A.; AINA, T.; CHRISTENSEN, C.; COLLINS, M.; FAULL, N.; FRAME, D. J.; KETTLEBOROUGH, J. A.; KNIGHT, S.; MARTIN, A.; MURPHY, J. M.; PIANI, C.; SEXTON, D.; SMITH, L. A.; SPICER, R. A.; THORPE, A. J.; ALLEN, M. R. Uncertainty in predictions of the climate response to rising levels of greenhouse gases. **Nature**, v. 433, p. 403–406, 2005.

SULLIVAN, C.A.; HUNTINGFORD, C. Water resources, Climate Change and Human Vulnerability. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON MODELLING AND SIMULATION, 18., 2009, Cairns, Australia **Proceedings...** 2009, p. 2377-2383. ISBN: 978-0-9758400-7-8.

TALEBI, A.; TROCH, P. A.; UIJLENHOET, R. A steady-state analytical slope stability model for complex hillslopes, **Hydrol. Process.**, v. 22, p. 546–553, 2008.

TATIZANA, C.; OGURA, A.T.; CERRI, L.E.S.; ROCHA, M.C.M. Análise da correlação entre chuvas e escorregamentos na Serra do Mar, município de Cubatão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 5., 1987, São Paulo, 1987. **Anais...** São Paulo, 1987a, v.2, p. 225-236.

TATIZANA, C.; OGURA, A.T.; CERRI, L.E.S.; ROCHA, M.C.M. Modelamento numérico da análise de correlação entre chuvas e escorregamentos aplicado às encostas da Serra do Mar no município de Cubatão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 5., 1987, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 1987b. v. 2, p. 237-248.

TAVARES, R.; SANT'ANNA NETO, J.L.; TOMMASELLI, J.T.G.; PRESSINOTTI, M.M.N.; SANTORO, J. Análise da variabilidade temporal e espacial das chuvas associada aos movimentos de massa no litoral norte paulista. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS, Florianópolis, 1., 2004, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: GEDN/UFSC, 2004. p. 680-696.

TEBALDI, C; HAYHOE, K; ARBLASTER, J; MEEHL, G: Going to the extremes An intercomparison of model-simulated historical and future changes in extreme events. **Climatic Change**, v. 79, n. 3-4, p. 185-211, 2006.

TERZAGHI, K. **Mecanismos de escorregamentos de terra**. Tradução de Ernesto Pichler. São Paulo: Grêmio Politécnico, 1952. 41p.

THOMSON, A. M; CALVIN, K. V; SMITH, S. J; KYLE, G. P; VOLKE, A; PATEL, P.; EDMONDS, J. A. RCP4.5: a *pathway* for stabilization of radiative forcing by 2100. **Climatic Change**, v. 109, n.1-2, p. 77–94, 2011. doi:10.1007/s10584-011-0151-4

TOBIN, G. A.; MONTZ, B. E. **Natural hazards**: explanation and integration. New York: Guilford Press, 1997.

TOMINAGA L. K. **Avaliação de metodologia de análise de risco a escorregamento**: aplicação de um ensaio em Ubatuba, SP. 220 p. Tese (Doutorado). Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

TOMINAGA, K. L.; SANTORO, J.; AMARAL. R. (orgs.). **Desastres naturais**: conhecer para prevenir. São Paulo: Instituto Geológico, São Paulo, 2009.

TRENBERTH, K.E.; SHEA, D.J. Atlantic hurricanes and natural variability in 2005. **Geophysical Research**, v. 33, n. 11, L12704, 2006. DOI:10.1029/2006GL026894.

TSUKAMOTO, Y.; OHTA, T.; NOGUCHI, H. Hydrological and geomorphological studies of debris slides on forested hillslopes in Japan, **Int. Assoc. Hydrol. Sci. Publ.**, v. 137, p. 89–98, 1982.

UNITED NATIONS INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION (UNISDR). **Global assessment report on disaster risk reduction - risk and poverty in a changing climate: invest today for a safer tomorrow**. Geneva, Switzerland: United Nations International Strategy for Disaster Reduction, 2009. 207p.

UNITED NATIONS INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION (UNISDR). **Hyogo framework for action 2005–2015**: building the resilience of nations and communities to disasters. 2005, 22p. Disponível em: <http://www.unisdr.org/files/1037_hyogoframeworkforactionenglish.pdf> Acessado dez. 2015.

- UNITED NATIONS INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION (UNISDR). **Sendai framework for disaster risk reduction 2015–2030**. 2015. Disponível em: <http://www.wcdrr.org/uploads/Sendai_Framework_for_Disaster_Risk_Reduction_2015-2030.pdf> Acessado dez. 2015.
- VAHIDNIA, M. H.; ALESHEIKH, A. A.; ALIMOHAMMADI, A.; HOSSEINALI, F. A GIS-based neuro-Fuzzy procedure for integrating knowledge and data in landslide susceptibility mapping, **Comput. Geosci.**, v. 36, p. 1101–1114, 2010.
- VALERIANO, M. M. Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPODATA. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia, 2005. **Anais...** São José dos Campos: Inpe, 2005. p1-18.
- VAN DER VEEN, A; DOPHEIDE, E; PARKER, D; TAPSELL, S; HANDMER, J; GREGG, C; BONADONNA, C; FERRARA, F. **State-of-art on vulnerability of socio-economic systems**. Del. 1.1.3 of the ENSURE EC FP7 Project: Methodologies to assess vulnerability of structural, territorial and economic systems. EC, Brussels. 2009.
- Van WESTEN, C. J.; van ASCH, T. W. J.; SOETERS, R. Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult?. **Bull. Eng. Geol. Env.**, v. 65, p. 167–184, 2006.
- VARNES, D. J. **Landslide hazard zonation: a review of principles and practice**. Paris: UNESCO, 1984.
- VARNES, D. J. Slope movement types and processes. In: SCHUSTER; KRIZEK (Eds.). Landslides: analysis and control. **Transportation Research Board Special Report**, Washington, n. 176, p. 11-33, 1978.
- VELOSO, A. J. G. Importância do estudo das vertentes. **GEOgraphia**, v. 4, p. 79–83, 2002.
- VIEIRA, B. C. **Previsão de escorregamentos translacionais rasos na serra do mar (sp) a partir de modelos matemáticos em bases físicas**. 2007. 193p. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 2007.
- VIEIRA, B. C.; FERNANDES, N. F. Landslides in Rio de Janeiro: the role played by variations in soil hydraulic conductivity, **Hydrol. Process.**, v. 18, p. 791–805, 2004.
- VIEIRA, B. C.; FERNANDES, N. F.; FILHO, O. A. Shallow landslide prediction in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, v. 10, p. 1829–183, 2010. doi:10.5194/nhess-10-1829-2010

VIEIRA, B.C.; FERNANDES, N.F.; DE MELLO, R.L.C. Variação espacial da condutividade hidráulica saturada dos solos e suas relações com os escorregamentos da Bacia do Rio Papagaio (RJ). In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS (COBRAE), 2001, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABMS, p. 25- 32, 2001.

VINCENT, K. **Creating an index of social vulnerability to climate change in Africa**. Norwich, UK: Tyndall Centre for Climate Change Research. 2004

VINCENT, L.A.; PETERSON, T.C.; BARROS, V. R.; MARINO, M. B.; RUSTICUCCI, M; CARRASCO, G.; RAMIREZ, E.; ALVES, L. M.; AMBRIZZI, T.; BERLATO, M. A.; GRIMM, A. M.; MARENGO, J. M.; MOLION, L.; MONCUNILL, D. F.; REBELLO, E.; ANUNCIÇÃO, Y. M. T.; QUINTANA, J.; SANTOS, J. L./ BAEZ, J.; CORONEL, G.; GARCIA, J.; TREBEJO, I.; BIDEGAIN, M.; HAYLOCK, M. R.; KAROLY, D. Observed trends in indices of daily temperature extremes in South America 1960-2000. **Journal of Climate**, v. 18, p. 5011-5023, 2005.

WANG, X.; NIU, R. Landslide intelligent prediction using objectoriented method, **Soil Dynam. Earthq. Eng.**, v. 30, p. 1478–1486, 2010.

WHITE, P; PELLING, M.; SEN, K.; SEDDON, D.; RUSSELL, S.; FEW, R. **Disaster risk reduction: a development concern. a scoping study on links between disaster risk reduction, poverty and development**. London: Department for International Development, 2004.

WIECZOREK, G. F.; GLADE, T. Climatic factors influencing occurrence of debris flows. In: JAKOB, M.; HUNGR, O. (Eds.) **Debris flow Hazards and Related Phenomena**. Heidelberg : Springer Berlin, p. 325–362, 2005.

WILSON, C. J.; DIETRICH, W. E.: The contribution of bedrock groundwater to storm runoff and high pore pressure development in hollows. **Erosion and Sedimentation in the Pacific Rim (Proceedings of Corvallis Symp., August, 1987)**. IAHS Publ., p.165, 49–59, 1987.

WINCHESTER, L.; SZALACHMAN, R.: The urban poor's vulnerability to the impacts of climate change in Latin America and the Caribbean. A policy agenda. In: URBAN RESEARCH SYMPOSIUM, 5., 2009, Marseille, 2009. **Proceedings...** Marseille, 2009.

WISNER, B., BLAIKIE, P.; CANNON, T.; DAVIS, I. **At risk, natural hazards, people's vulnerability and disasters**. London: Routledge, 2004.

WOLLE, C. M.; CARVALHO, C. S. Deslizamentos em encostas na Serra do Mar – Brasil. **Revista Solos e Rochas**, v. 12, p. 27-36, 1989.

WOLLE, C. M.; CARVALHO, C. S. Deslizamentos em encostas na Serra do Mar – Brasil. **Solos e Rochas**, v. 12, p. 27–36, 1989.

WOLLE, C. M.; CARVALHO, C. S. Taludes Naturais. In: FALCONI, F. F.; JUNIOR, A. N. (eds.). **Solos do Litoral de São Paulo**: São Paulo: ABMS, 1984. p.180–203.

WORLD WIDE FUND FOR NATURE (WWF). **Planeta vivo relatório 2010**: biodiversidade, biocapacidade e desenvolvimento. WWF. 2010.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Inf. Control**, v. 8, p. 338–353, 1965.

ZAIDAN, R. T.; FERNANDES, N. F. Zoneamento de suscetibilidade a escorregamentos em encostas aplicado à bacia de drenagem urbana do Córrego da Independência – Juiz de Fora (MG), **Rev. Bras. Geomorfol.**, v. 10, p. 57–76, 2009.

ZÊZERE, J.L.; RODRIGUES, M. L. Rainfall thresholds for landsliding in Lisbon rea (Portugal). In: RYBAR, J.; STEMBERK, J.; WAGNER, P. (eds.). **Landslides**. Lisse: A.A. Balkema, 2002. p. 333–338.

ZHAO, Q.; BLACK, T.;L.; BALDWIN, M.;E. Implementation of the cloud prediction scheme in the Eta model at NCEP. **Weather Forecast**, v.12, p. 697–712, 1997.