

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

Rafael Jonas Righi Batista

Análise do risco de mortalidade por doenças cardiovasculares e respiratórias na população idosa da
RMSP e sua projeção considerando o cenário RCP8.5 de mudanças climáticas

São Paulo

2017

Rafael Jonas Righi Batista

Análise do risco de mortalidade por doenças cardiovasculares e respiratórias na população idosa da RMSP e sua projeção considerando o cenário RCP8.5 de mudanças climáticas

Tese apresentada ao Departamento
de Ciências Atmosféricas do
Instituto de Astronomia, Geofísica e
Ciências Atmosféricas da
Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Doutor em
Ciências

Área de concentração: Meteorologia

Orientador: Prof. Dr. Fábio LT Gonçalves

Versão corrigida. A versão original
se encontra arquivada no Serviço de
Pós-Graduação do IAG.

São Paulo

2017

Aos meus pais Ítalo Colaço e Loeci Righi, irmãos Rodrigo
e Ítalo Jr, à minha esposa Cristiane e filho Rafael,
com amor e gratidão, dedico.

AGRADECIMENTOS

- À CAPES e ao CNPq, sem o qual o trabalho não teria existido;
- Da mesma forma, à FAPESP processo 2010/10189-5;
- Ao meu orientador Prof. Dr. Fábio Luiz Teixeira Gonçalves;
- À Profa. Dra. Rosmeri Porfirio da Rocha e ao Grupo de Estudos Climáticos (GrEC-USP);
- Ao INCLINE e pesquisadores participantes;
- Aos colegas Gláuber Camponogara e Bruna Segalin;
- À Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAU-USP) e à Profa. Dra. Denise Duarte, bem como ao Prof. Dr. Leonardo Monteiro, que tão gentilmente me auxiliaram;
- À estação meteorológica do IAG-USP, pelos dados utilizados neste trabalho;
- Ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) e toda a sua equipe, que me acolheu de 2010 a 2016;

RESUMO

BATISTA, R. J. R. **Análise do risco de mortalidade por doenças cardiovasculares e respiratórias na população idosa da RMSP e sua projeção considerando o cenário RCP8.5 de mudanças climáticas.** 2017. 108 páginas. Tese de doutorado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo.

As mudanças climáticas são uma realidade e tendem a afetar partes da população caracterizadas como mais vulneráveis. Nesse sentido, existe grande preocupação em relação aos impactos provocados por alterações do clima na crescente população de idosos da RMSP, dado que esta naturalmente apresenta condições limitadas de adaptação aos diferentes cenários térmicos. Nesse contexto, a mortalidade pode ser compreendida como o resultado final do impacto de variáveis meteorológicas na população idosa, especialmente nos casos em que o óbito é decorrente de doenças do sistema respiratório e cardiovascular. Para determinadas condições atmosféricas tem-se que, implicitamente, o risco de mortalidade por essas doenças é maior ou menor. Assim, é possível caracterizar mortalidade em função do seu risco e associá-la ao padrão climático atual. Neste trabalho, o risco é obtido a partir do método do valor esperado/observado, dado a partir da distribuição tanto do excesso quanto déficit de mortes em intervalos de determinada variável. Visto que trabalhos anteriores demonstram uma tendência de aquecimento para a RMSP, esta tese busca responder se tais mudanças projetadas tem potencial para modificar o balanço atual existente entre os riscos de mortalidade de idosos por frio e calor. Para tal, além da variável risco, dados de mortalidade do DATASUS e meteorológicos das estações do IAG e INMET, foram utilizadas simulações do modelo climático regional RegCM4 forçadas pelos membros do CMIP5 Hadclm, Hadctrl, MPIclm e GFDLclm, considerando um cenário pessimista de emissões de gases de efeito estufa, RCP8.5, para os períodos de 1975-2005 e 2065-2099. Na análise do efeito conjunto das variáveis temperatura e umidade relativa foi utilizado o índice de conforto térmico TAP. Os resultados obtidos mostram que maior parte da mortalidade de idosos por doenças respiratórias e cardiovasculares, de 1996 a 2014, é registrada nos dias quentes e úmidos ou frios e secos. Isso se traduz no risco de mortalidade calculado, que é maior nos extremos dos intervalos de temperatura, umidade específica e TAP. A subdivisão do risco nas zonas quente, neutra e fria é dada pelos limiares de 19°C e 25°C do TAP médio diário. Para elucidar o significado prático do risco quente um estudo de caso da onda de calor ocorrida no começo de 2014 é feito, apontando que houve 25 dias em sequência pertencentes a essa zona. Nesse período, foram contabilizados aproximadamente 370 óbitos de idosos em excesso. A contabilidade dos dias pertencentes a cada uma das zonas de risco ao longo dos anos recentes dá um valor aproximado de 250 dias na zona neutra e os 115 restantes distribuídos de forma equilibrada nas zonas quente e fria. Todavia, as projeções do modelo climático indicam que no futuro o cenário será diferente, havendo um aumento dramático no número de dias enquadrados na zona de risco quente (aproximadamente 150), em detrimento da zona de risco frio, que praticamente deixa de ser verificada. Outro fator relevante dá conta da identificação de 42 eventos com característica térmica similar à onda de calor de 2014, nos dados de 2065-2099, indicando que no futuro, eventos desse tipo podem ocorrer com maior frequência na RMSP, aumentando de forma significativa a mortalidade de idosos locais. Com base nesses resultados, é respondida a questão posta inicialmente, indicando que caso as condições representadas pelo cenário RCP8.5 sejam concretizadas, haverá forte tendência para que o balanço existente entre as mortes de idosos provocadas pelo frio e calor, por doenças respiratórias e cardiovasculares, seja modificado. Por fim, sugere-se que tais resultados, inseridos no âmbito do Núcleo de Apoio à Pesquisa sobre Mudanças Climáticas da USP, sirvam à sociedade no sentido de auxiliar a tomada de decisões que objetivam mitigar os impactos negativos decorrentes das mudanças do clima, projetadas para a RMSP.

Palavras-chave: idosos; mudanças climáticas; mortalidade; risco; RegCM4.

ABSTRACT

BATISTA, R. J. R. **Analysis of mortality risk due to cardiovascular and respiratory diseases in the elderly population of the RMSP and its projection considering the scenario RCP8.5 of climatic changes.** 2017. 108 pages. PhD thesis. Institute of Astronomy, Geophysics and Atmospheric Sciences, University of São Paulo, São Paulo.

Climate change is a reality that tends to affect those parts of the population characterized as vulnerable. There is a great concern regarding those changes impact on the growing elderly population of metropolitan region of São Paulo (RMSP) given the fact that these people are less capable to adapt to different thermal scenarios. In that sense, mortality can be understood as the final result of the impact of meteorological variables on the elderly population, especially on the cases in which death is due to respiratory or cardiovascular diseases. Given a set of meteorological conditions is possible to assume a higher or lower risk of mortality by those diseases. It is possible then to characterize mortality in terms of its risk and connect it to the current climate standards. Here, risk is obtained from the expected/observed method, given by the distribution of both death excess and deficit into intervals of a variable. Since previous work shown a warming tendency for the RMSP, this thesis seeks to answer if such change has the potential to modify the existing balance between heat and cold elderly mortality risks. For that matter not only the risk variable was considered, but also mortality data from DATASUS, meteorological data from IAG and INMET weather stations, as well as simulations from the regional climate model RegCM4, forced by the members of CMIP5 Hadclm, Hadctrl, MPIclm and GFDLclm, for RCP8.5 scenario and two periods: 1975-2005 and 2065-2099. For the analysis of the simultaneous effect of temperature and relative humidity the TAP index was used. Results show that most part of the mortality registered by cardiovascular and respiratory diseases, from 1996 to 2014, is registered on hot-humid or cold-dry days. This fact is translated into the calculated risk, which is bigger on the extremes of temperature, specific humidity and TAP intervals distributions. The subdivision of the risk on hot, neutral and cold zones is delimited by the 19°C and 25°C thresholds of the daily mean TAP. For a practical view about the meaning of the hot risk a case study about the heat wave occurred in 2014 is presented, showing that there was 25 days in sequence belonging to this zone. During that period, approximately 370 excessive elderly deaths were recorded. The account of days belonging to each of these risk zones through the past years show that approximately 250 days was referring to the neutral zone, with the 115 remaining equally distributed between hot and cold risk zones. However, regional climate model projections indicate that in the future this picture can change, resulting in a dramatic increase on the number of hot risk zone days (around 150), in detriment of the cold risk zone days, that will almost disappear. Another important result is the identification of 42 events with similar thermal characteristics from the 2014 heat wave during the period of 2065-2099, indicating that in the future such events could be more frequent on the RMSP, significantly increasing the mortality of elderly people. Given these results, the original question can be answered, indicating a strong tendency of change on the existing balance between elderly death due to cardiovascular and respiratory diseases. Lastly, it is suggested that these results could be used by society and decision makers in order to mitigate the negative impacts due to the projected climate changes on the RMSP.

Keywords: elderly; climate change; mortality; risk; RegCM4.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Fatores determinantes relacionados à vulnerabilidade, adaptada de Gamble et al. (2016). ...	16
Figura 2 – Imagens do termovisor feitas durante os testes da câmara climática. Em (a) com temperatura ambiente de 24 °C e em (b) de 16 °C.....	19
Figura 3 – Em (a) a variação sazonal da temperatura máxima diária em °C na RMSP de 1996 a 2014 e em (b) da temperatura mínima diária, medidos pela estação meteorológica do IAG.....	24
Figura 4 – Em (a) a variação sazonal da umidade específica máxima diária em g/kg na RMSP de 1996 a 2014 e em (b) da umidade específica mínima diária, medidos pela estação meteorológica do IAG.	25
Figura 5 – Exemplo de um diagrama de Taylor. Em (a) instrução de como visualizar o desvio padrão dos dados em relação ao valor observado, em (b) o coeficiente de correlação e em (c) a raiz quadrada do erro médio quadrático centralizado. Retirado de Carslaw (2015).	40
Figura 6 – Diagrama resumindo as etapas do trabalho, com seus respectivos períodos. Em amarelo o processo de elaboração das zonas de risco, em verde o período dos dados simulados que representam o clima presente da RMSP e em vermelho os dados do modelo que refletem o clima futuro e que são utilizados para projeção das zonas de risco.	41
Figura 7 – Mortalidade total diária ano a ano para idosos na RMSP, ocasionada por problemas respiratórios ou do sistema cardiovascular. A linha vermelha representa a suavização através de regressão local.....	44
Figura 8 – Médias mensais da mortalidade de idosos e temperatura na RMSP, de 1996 a 2014, agrupadas sazonalmente, onde é possível notar uma relação oposta entre elas.....	45
Figura 9 – Diagrama de dispersão da mortalidade diária de idosos para o padrão médio diário das variáveis temperatura e umidade específica. A escala de cores indica a quantidade de óbitos para cada dia.....	46
Figura 10 – Diagrama de dispersão da mortalidade diária de idosos para o padrão quente e úmido das variáveis temperatura e umidade específica. A escala de cores indica a quantidade de óbitos para cada dia, enquanto que a linha tracejada ilustra a faixa de menor mortalidade.	47
Figura 11 – Diagrama de dispersão da mortalidade diária de idosos para o padrão quente e seco das variáveis temperatura e umidade específica. A escala de cores indica a quantidade de óbitos para cada dia, enquanto que a linha tracejada ilustra a faixa de menor mortalidade.	47
Figura 12 – Diagrama de dispersão da mortalidade diária de idosos para o padrão frio e úmido das variáveis temperatura e umidade específica. A escala de cores indica a quantidade de óbitos para cada dia, enquanto que a linha tracejada ilustra a faixa de menor mortalidade.	48

Figura 13 – Diagrama de dispersão da mortalidade diária de idosos para o padrão frio e seco das variáveis temperatura e umidade específica. A escala de cores indica a quantidade de óbitos para cada dia.....	48
Figura 14 – Distribuições em porcentagem das temperaturas média diária (a), máxima (b) e mínima (c) em intervalos de 1°C, de 1996 a 2014 para a RMSP.....	50
Figura 15 – Distribuições em porcentagem das umidades específica média diária (a), máxima (b) e mínima (c) em intervalos de 1g/kg, de 1996 a 2014 para a RMSP.....	51
Figura 16 – Excesso de mortalidade em idosos da RMSP por bins de temperatura média diária (°C), de 1996 a 2014.....	52
Figura 17 – Excesso de mortalidade em idosos da RMSP por bins de temperatura máxima diária (°C), de 1996 a 2014.....	53
Figura 18 – Excesso de mortalidade em idosos da RMSP por bins de temperatura mínima diária (°C), de 1996 a 2014.....	54
Figura 19 – Excesso de mortalidade em idosos da RMSP por bins de umidade específica média diária (g/kg), de 1996 a 2014.....	55
Figura 20 – Excesso de mortalidade em idosos da RMSP por bins de umidade específica máxima diária (g/kg), de 1996 a 2014.....	55
Figura 21 – Excesso de mortalidade em idosos da RMSP por bins de umidade específica mínima diária (g/kg), de 1996 a 2014.....	56
Figura 22 – Em (a) o risco de mortalidade de idosos (excesso de mortes médias por dia) para as temperaturas (°C) média, máxima e mínima e em (b) esse mesmo risco suavizado através de splines.....	57
Figura 23 – Em (a) o risco de mortalidade de idosos (excesso de mortes médias por dia) para as umidades específicas (g/kg) média, máxima e mínima e em (b) esse mesmo risco suavizado através de splines.....	58
Figura 24 – Em (a) o risco de mortalidade de idosos (excesso de mortes médias por dia) para os cenários média diária (linha preta), quente-úmido (vermelha) e quente-seco (laranja) de TAP (°C) e em (b) esse mesmo risco suavizado através de splines.....	60
Figura 25 – Em (a) o risco de mortalidade de idosos (excesso de mortes médias por dia) para os cenários média diária (linha preta), quente-úmido (vermelha) e quente-seco (laranja) de TAP (°C) e em (b) esse mesmo risco suavizado através de splines.....	61
Figura 26 – Zonas de risco de mortalidade de idosos na RMSP em relação aos bins de TAP média diária (°C). Linhas tracejadas representam o intervalo de confiança de 95%.....	62

Figura 27 – Exemplo da definição das zonas de risco baseado no risco relativo obtido por Pinheiro (2013), para a RMSP.	62
Figura 28 – Exemplo da definição das zonas de risco baseado no risco relativo obtido por Son et al. (2016), para a RMSP.	63
Figura 29 – Quantidade de dias por categorias (zonas) de risco, de 1996 a 2014.	64
Figura 30 – Quantidade de dias por categorias (zonas) de risco, de 1996 a 2014, baseados em Pinheiro (2013).	64
Figura 31 – Quantidade de dias por categorias (zonas) de risco, de 1996 a 2014, baseados em Son et al. (2016).	65
Figura 32 – Temperatura máxima (IAG) e TAP média diária durante a onda de calor registrada.	66
Figura 33 – Evolução do sistema de alta pressão atmosférica (acima de 1010 hPa) com centro no Oceano Atlântico que provocou o episódio de onda de calor no começo de 2014. Cada quadro representa o campo de pressão atmosférica ao nível médio do mar (hPa) de 3 em 3 dias, às 00Z.	67
Figura 34 – Excesso de óbitos registrados durante o período da onda de calor e dias enquadrados na zona de risco quente (marcação vermelha), totalizando 25 dias em sequência.	71
Figura 35 – Em (a) o diagrama de Taylor para temperatura média diária e em (b) umidade relativa média diária, resumindo graficamente o CRMSE, desvio padrão e coeficiente de correlação entre dados do IAG e membros utilizados nas simulações do RegCM4.	75
Figura 36 – Em (a) a variação média mensal da velocidade do vento entre as estações do IAG, INMET e conjunto de modelos (<i>ensemble</i>), enquanto que em (b) a variação para temperatura média diária e em (c) da umidade relativa média diária.	76
Figura 37 – (a) ilustra a média anual do TAP para os distintos membros do RegCM4 (MPIclm, GFDLclm, Hadclm e Hadctrl) na RMSP nos períodos de 1975-2005 e 2065-2099; (b) representa a tendência espacial da temperatura (diferença entre as temperaturas futura e presente), (c) o mesmo para umidade relativa e (d) para TAP; Já em (e) a diferença entre TAP e temperatura.	79
Figura 38 – TAPs médios mensais observados e simulados (°C) de 1975 a 2005, evidenciando um viés médio negativo de aproximadamente 1°C.	81
Figura 39 – TAPs médios mensais observados e simulados (°C) de 1975 a 2005, após somados os vieses mensais da tabela 7.	82
Figura 40 – Variação da quantidade de dias por ano pertencentes às zonas de risco, de 1975 a 2005, tanto para dados do RegCM4 quanto da estação do IAG. A quantidade de dias nas zonas de risco frio e quente estimadas com base no RegCM4 são menores do que o que de fato se observa. Já na zona de	

risco neutro, o oposto ocorre.....	83
Figura 41 – Variação da quantidade de dias por ano pertencentes às zonas de risco baseadas no trabalho de Son et al. (2016), de 1975 a 2005, tanto para dados do RegCM4 quanto da estação do IAG. A quantidade de dias nas zonas de risco frio e quente estimadas com base no RegCM4 são similares ao que de fato se observa.	84
Figura 42 – Variação da quantidade de dias por ano pertencentes às zonas de risco, de 2065 a 2099, apenas para dados do RegCM4. Devido ao aumento médio da temperatura, a variabilidade associada à zona de risco frio é bastante pequena.....	85
Figura 43 – Variação da quantidade de dias por ano pertencentes às zonas de risco baseadas em Son et al. (2016), de 2065 a 2099, apenas com dados do RegCM4. Devido ao aumento médio da temperatura, aproximadamente 80% dos dias estarão na zona de risco quente.....	85
Figura 44 – Quantidade de dias por zonas de risco na RMSP simuladas pelo RegCM4, para o presente (1975 a 2005) e futuro (2065 a 2099). No futuro os dias tendem a ser compreendidos pelas zonas de risco quente e neutro apenas.	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Algumas das alterações fisiológicas identificadas em idosos.	17
Tabela 2 – Porcentagem de aumento da população idosa na RMSP entre 2011 e 2030 para diferentes faixas etárias e sexo de acordo com dados da Fundação SEADE.	23
Tabela 3 - Municípios pertencentes à RMSP.	33
Tabela 4 – Porcentagem das principais doenças consideradas nessa tese em relação ao total de registros de doenças cardiovasculares e respiratórias.	43
Tabela 5 – Limiares de risco de mortalidade para temperatura (média diária, máxima e mínima), umidade específica (média diária, máxima e mínima) e TAP (médio diário, quente e úmido, quente e seco, frio e úmido, frio e seco).	59
Tabela 6 – Contabilidade dos episódios de onda de calor na RMSP baseado no método de Son et al. (2016).	69
Tabela 7 – Vieses médios mensais de TAP (°C) de 1975 a 2005.	81

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	5
RESUMO.....	6
ABSTRACT.....	7
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	12
SUMÁRIO	13
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	15
1.1 Caracterização do problema e justificativa	20
1.2 Objetivos	21
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1 A população idosa no Brasil e na RMSP.....	22
2.2 Idoso: foco do projeto temático Biometeorologia Humana	23
2.3 O clima da RMSP	24
2.4 Influência do clima na mortalidade de idosos.....	26
2.5 Doenças impactadas pelo tempo e clima	28
2.6 Poluição atmosférica	29
2.7 Índices de conforto térmico.....	31
CAPÍTULO 3 – DADOS E METODOLOGIA	31
3.1 Descrição dos dados.....	32
3.1.1 Dados de mortalidade.....	32
3.1.2 Dados observacionais.....	32
3.1.3 Simulações do modelo climático RegCM4.....	34
3.1.4 Dados do modelo acoplado CFSv2.....	35
3.2 Métodos adotados nas análises	36
3.2.1 Cálculo do índice TAP e interpretação.....	36
3.2.2 Análise do valor esperado/observado.....	37
3.2.3 Zonas de risco de mortalidade	38
3.2.4 Diagrama de Taylor.....	38
3.3 Estrutura organizacional.....	40
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS.....	42
4.1 Mortalidade de idosos na RMSP.....	42
4.2 Limiares de risco entre variáveis meteorológicas e mortalidade na RMSP.....	42
4.3 Variáveis integradas: Limiares de risco para o índice TAP e mortalidade na RMSP.....	58
4.4 Zonas de risco	61

4.5 Exemplo prático das zonas de risco: estudo de caso – Onda de calor 2014	65
4.6 Comparação: RegCM4 vs INMET/IAG	72
4.7 Mudanças climáticas projetadas para a RMSP	77
4.8 Ajuste das simulações através do viés mensal	80
4.9 Análise de risco para clima futuro.....	82
4.9.1 Quantificação das zonas de risco no presente (1975-2005).....	82
4.9.2 Quantificação das zonas de risco no futuro (2065-2099)	84
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES.....	89
Bibliografia	94
Anexos	100

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Logo antes da 21ª Conferência do Clima, ocorrida no final de 2015 em Paris, o G20 (grupo de representantes da União Europeia e das 19 maiores economias do mundo) declarou que as mudanças climáticas representam um dos maiores desafios do nosso tempo. Essa afirmação é fundamentada no fato de que nenhuma outra questão possui tantos desdobramentos nos diferentes setores que integram a sociedade, como alimentação, transporte, energia, ecossistemas e saúde.

O IPCC (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas) define mudança climática como uma “mudança de estado do clima passível de ser identificada por mudanças na média ou na variabilidade de suas propriedades, que persiste por um extenso período, tipicamente décadas ou mais.” (IPCC, 2007). Tais mudanças podem ser atribuídas tanto a fatores naturais quanto antropogênicos. Entendem-se por fatores naturais aqueles associados a processos dinâmicos que naturalmente interferem no clima, tanto de origem externa quanto interna, como a erupção de vulcões e alterações na atividade solar. Por outro lado, fatores antropogênicos compreendem as atividades humanas que de algum modo são capazes de provocar alterações no clima, como a emissão de gases de efeito estufa (em especial o dióxido de carbono – CO₂, metano – CH₄ e o óxido nitroso – N₂O) e o uso da terra.

É a partir deste contexto em que os impactos das mudanças climáticas são avaliados e o conceito de vulnerabilidade é introduzido. De acordo com Akerlof et al. (2015) e IPCC (2014), vulnerabilidade representa a propensão de determinado grupo em ser adversamente afetado pelas mudanças, subdividindo-se em três componentes: sensibilidade, exposição e capacidade de adaptação. Sensibilidade se traduz no quão suscetível determinado grupo é às mudanças, incluindo-se crianças, idosos, pessoas com doenças crônicas ou alguma debilidade/limitação. A exposição apresenta caráter geográfico e é relativa às áreas com possibilidade de alagamento, zonas costeiras e zonas afetadas pela ilha de calor urbano¹. Já a capacidade de adaptação vai ser determinada pelo conjunto dos fatores anteriormente citados, acrescido ainda da situação socioeconômica. Estes fatores determinantes encontram-se resumidos no diagrama da figura 1, adaptada de Gamble et al. (2016).

Smith et al. (2014) esclarecem que os impactos previstos não serão distribuídos de modo uniforme em toda a sociedade, mas que estes tendem a ser maiores nos grupos mais vulneráveis. Idosos são mais vulneráveis pela possibilidade de serem fisiologicamente, financeiramente e emocionalmente menos capazes de lidar com os efeitos adversos das mudanças climáticas (Haq et al., 2008).

Considerando o aspecto fisiológico, algumas destas alterações podem impactar diretamente na

¹ De acordo com Heaviside et al. (2016), ilha de calor urbano é descrito como o fenômeno no qual a temperatura de determinado centro urbano (ou cidade) é maior do que a de seu entorno rural.

capacidade de responder aos efeitos negativos de, por exemplo, oscilações térmicas, temperaturas extremas (tanto baixas quanto altas), níveis elevados de poluentes no ar, doenças transmitidas por vetores e aumento da exposição à radiação solar. A tabela 1, adaptada de IOM (1997), lista algumas das alterações fisiológicas comumente verificadas em idosos e que podem contribuir, direta ou indiretamente, na soma de fatores que ajudam a caracterizar os idosos como grupo vulnerável.

Pessoas idosas também apresentam mudanças na termorregulação corporal. Blatteis (2012) faz uma revisão das principais alterações fisiológicas associadas à idade que podem interferir na capacidade de idosos em manter a temperatura corporal constante quando expostos a ambientes frios ou quentes. O autor esclarece que a resposta termorregulatória a uma determinada condição térmica é iniciada pelos sinais emitidos ao cérebro por termosensores presentes no corpo. A região cerebral responsável pelo controle térmico corporal é denominada hipotálamo. Com o passar dos anos verifica-se uma redução na percepção térmica, ocasionada especialmente pelo envelhecimento da pele e consequente redução na densidade dos termorreceptores e do fluxo sanguíneo.

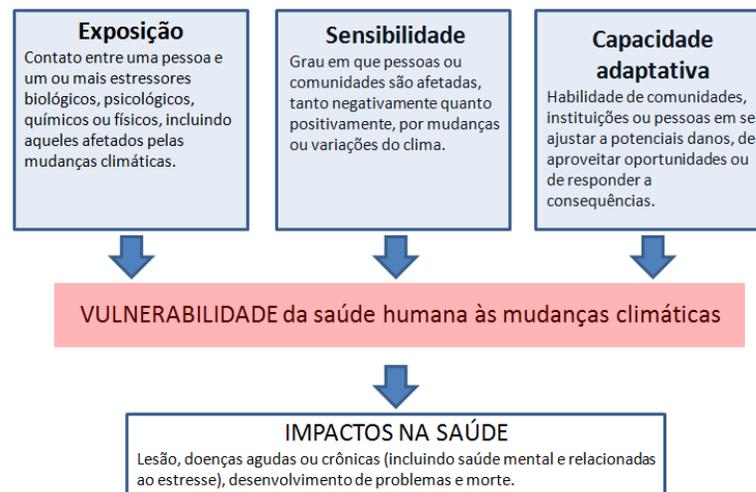


Figura 1– Fatores determinantes relacionados à vulnerabilidade, adaptada de Gamble et al. (2016).

Outro aspecto relevante em relação à redução da sensibilidade térmica de idosos é descrita no trabalho de Guergova e Dufour (2011), elaborado a partir de extensa revisão bibliográfica. Além da conclusão inicial de que idosos apresentam uma redução na sua sensibilidade térmica, os autores apontam que tal redução se dá de forma desigual, de modo que a capacidade de perceber o calor é mais afetada do que a capacidade de perceber o frio. Isto se torna possível pelo fato de que a percepção ao calor e ao frio correspondem à diferentes vias neurais e também pela existência de duas distintas

populações de termorreceptores com diferentes densidades e profundidades na pele. Receptores de frio² são aproximadamente três a dez vezes mais numerosos que os de calor³ (GUYTON, 1991 apud GUERGOVA e DUFOUR, 2011). Receptores de frio encontram-se a uma profundidade aproximada de 0,15 milímetros da derme, enquanto os de calor encontram-se a 0,6 milímetros (ZOTTERMAN, 1959 apud GUERGOVA e DUFOUR, 2011). Existe ainda uma diferença na velocidade de transmissão das sensações térmicas, pois elas utilizam diferentes fibras aferentes⁴. A sensação de frio é transmitida a uma velocidade de 14 m/s, enquanto que a de calor a 2,5 m/s (SUSSER et al., 1999 apud GUERGOVA e DUFOUR, 2011).

Tabela 1 – Algumas das alterações fisiológicas identificadas em idosos.

Sistema afetado	Alteração fisiológica
Composição corporal	<ul style="list-style-type: none"> • Redução da massa corporal magra • Redução da massa muscular • Redução do conteúdo de água no corpo • Aumento do tecido adiposo (até 60 anos, após isso redução)
Sistema endócrino	<ul style="list-style-type: none"> • Redução nos níveis de testosterona • Redução nos níveis de hormônio do crescimento • Redução nos níveis de estrogênio e progesterona
Articulações	<ul style="list-style-type: none"> • Degeneração dos tecidos cartilagosos
Pulmões	<ul style="list-style-type: none"> • Redução da capacidade pulmonar
Sistema Vascular	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento da resistência periférica
Visão	<ul style="list-style-type: none"> • Redução da acuidade visual • Aumento do tempo de reflexo pupilar

² Denominados bulbos de Krause (LENT, 2005).

³ Denominados corpúsculos de Ruffini (LENT, 2005).

⁴ Aferente e eferente fazem relação com o sentido de transmissão do impulso. Aferente: dos receptores para o sistema nervoso central; Eferente: do sistema nervoso central para os músculos e glândulas (KRUEGER-BECK et al., 2011).

A vulnerabilidade de idosos da RMSP traduzida no impacto negativo do estresse térmico na sua cognição foi abordado em Trezza (2014) e (2015). A autora avaliou o desempenho cognitivo de idosos saudáveis da RMSP em diferentes cenários térmicos, utilizando uma câmara climática, uma plataforma de equilíbrio e um software para testar o desempenho cognitivo. No total, 68 idosos realizaram uma bateria de testes em duas condições ambientais distintas: uma a 24°C e outra a 32°C, com umidade relativa variável. Os resultados mostraram que o desempenho dos idosos aos testes aplicados foi pior quando expostos ao calor úmido, enquanto que pouca diferença foi observada no calor seco. Além disso, resultados cognitivos piores foram associados aos indivíduos que praticavam exercícios com menor frequência.

De forma complementar ao estudo de Trezza (2014), o projeto temático (ver sessão 2.2) ao qual essa tese está vinculada participou da avaliação do desempenho cognitivo de idosos no frio, seguindo um protocolo parecido, ou seja, bateria de testes neuropsicológicos utilizando software específico (CANTAB – Bateria Neuropsicológica Automatizada de Testes de Cambridge) e plataforma de equilíbrio. Nesta ocasião foram utilizadas as temperaturas de 16°C e 24°C com a intenção de abordar o cenário oposto ao de Trezza (2014). Os testes foram conduzidos em uma câmara climática construída na Escola Politécnica da USP e contou com a participação de 68 idosos. Os testes incluíram a aplicação de questionários de conforto térmico e coleta de imagens feitas a partir de um termovisor, a fim de que se identificassem variações na temperatura da pele ao longo da exposição dos idosos ao frio (figura 2 (a) e (b)). Os resultados desta análise estão em andamento.

O impacto de variáveis ambientais em uma dada população pode ainda ser quantificado através de um cenário macro, pela relação destas com dados de morbidade/mortalidade. Essa metodologia é comumente aplicada em estudos epidemiológicos, de caráter analítico⁵ e ecológico⁶. Neste sentido, inicialmente filtram-se os dados de mortalidade de maneira a permanecerem apenas os casos nos quais a possível influência das variáveis de interesse possa existir.

No âmbito da relação entre variáveis meteorológicas e mortalidade é comum que se considerem apenas registros de óbitos ligados à doenças cardiovasculares ou do aparelho respiratório. Alberdi et al. (1998) esclarecem que o calor pode aumentar o estresse sobre o sistema termorregulatório e Kunst et al. (1993) mencionam que altas temperaturas tendem a aumentar a viscosidade do sangue, fator biológico que é relacionado ao incremento no risco de eventos cardiovasculares, como doença cardíaca

⁵ Examinam a existência de associação entre a exposição a um dado fator e uma determinada doença ou condição relacionada à saúde (LIMA-COSTA e BARRETO, 2003)

⁶ Verificação da existência de relação entre a ocorrência de uma doença ou condição relacionada à saúde e a exposição de um agregado de indivíduos, como populações, regiões, municípios, entre outros (LIMA-COSTA e BARRETO, 2003)

isquêmica e acidente vascular cerebral (LOWE et al., 1997). Já a exposição ao frio pode aumentar o estresse sobre o sistema cardiovascular por mudanças na pressão sanguínea e vasoconstrição (ALBERDI et al., 1998), além de aumentar a suscetibilidade a infecções pulmonares (SCHAANNING et al., 1986) e casos de gripe.

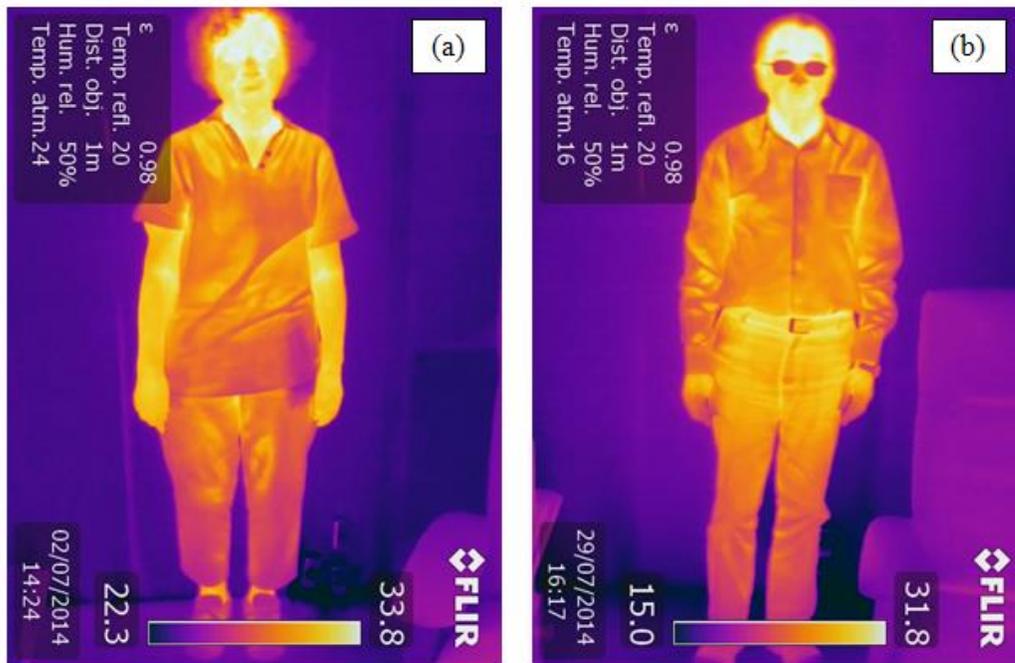


Figura 2 – Imagens do termovisor feitas durante os testes da câmara climática. Em (a) com temperatura ambiente de 24 °C e em (b) de 16 °C.

No contexto dos trabalhos que envolvem a modelagem estatística da mortalidade conjuntamente com dados ambientais, é comum encontrar resultados expressos em termos do seu risco relativo. Como em Pinheiro et al. (2014) e Son et al. (2016), o intuito é estabelecer uma relação quantitativa que possibilite evidenciar a associação entre a exposição às altas ou baixas temperaturas (além de fatores adicionais como poluição do ar, por exemplo) e o desfecho, neste caso, o óbito.

Entretanto, parece permanecer um *gap* entre estes estudos epidemiológico-descritivos e meteorológico-preditivos, especialmente no tocante às mudanças climáticas projetadas para a RMS. Não restam dúvidas de que as alterações do clima irão impactar de alguma forma nas partes vulneráveis da população. Isto tende a se refletir na alteração dos padrões médios do risco de mortalidade devido ao calor e ao frio, pronunciados atualmente de forma majoritária durante os verões e invernos, respectivamente. Nesse sentido, é importante fazer uma análise acerca dessa mudança, contemplando o acoplamento entre os riscos empiricamente obtidos para a região e simulações do clima futuro.

As etapas desta tese podem ser resumidas da seguinte forma: inicialmente é explicitada a relação entre temperatura (média diária, máxima e mínima), umidade (média diária, máxima e mínima) e mortalidade de idosos ocasionada por problemas respiratórios ou cardiovasculares. Em seguida são calculados limiares destas variáveis a partir do qual o risco de mortalidade aumenta e uma modelagem é feita com base nessa relação. A mesma análise é feita substituindo-se as variáveis individuais por um índice de conforto térmico desenvolvido para a RMSP, capaz de agregar em um único valor temperatura e umidade. A partir da modelagem do risco de mortalidade anterior, é proposta a sua subdivisão por zonas, a fim de simplificar a sua extrapolação para o clima projetado. Com a intenção de caracterizar o comportamento do modelo na representação do clima local, um capítulo é dedicado à comparação entre dados modelados e observados. Apenas após essa etapa é que é feita a projeção as zonas de risco para o clima futuro.

1.1 Caracterização do problema e justificativa

Batista et al. (2016) investigaram as possíveis mudanças do clima para a região metropolitana de São Paulo (RMSP) utilizando um índice de conforto térmico e simulações do modelo regional climático RegCM4. Os resultados, detalhados ao longo dessa tese, apontam para invernos mais amenos no futuro, comparando-se os períodos de 2065-2099 e 1975-2005. Em contrapartida, as mesmas projeções indicam que os verões tendem a ser termicamente mais agressivos, com temperaturas médias mais elevadas e manutenção da umidade nos patamares atuais.

Ao mesmo tempo, alguns trabalhos definem que a partir de determinado limiar de temperatura o risco de mortalidade aumenta, tanto em decorrência do frio quanto do calor. Diante desse cenário e desconsiderando eventuais processos adaptativos da população idosa, esta tese testa a hipótese de que no futuro o risco de mortalidade inerente ao calor aumentará de forma a contrabalancear o risco associado ao frio, que tende a diminuir pela ocorrência de invernos em média mais amenos.

1.2 Objetivos

O objetivo principal desta tese é avaliar o impacto de variáveis meteorológicas sobre o risco de mortalidade da população idosa da RMSP no contexto das mudanças climáticas. Especificamente, busca-se:

1. Estabelecer os limiares de temperatura (média diária, máxima e mínima), umidade específica (média diária, máxima e mínima) e do índice TAP (médio diário e perfis quente-seco, quente-úmido, frio-seco e frio-úmido) que delimitam as zonas de risco de mortalidade por frio, por calor e neutra (região intermediária com risco negativo);
2. Projetar esses riscos dadas simulações do modelo climático regional RegCM4 para o cenário RCP8.5, de alta concentração de gases de efeito estufa;
3. Identificar o quanto as mudanças estimadas para o clima da RMSP podem alterar o balanço existente entre os diferentes riscos de mortalidade.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica a seguir é composta pelos seguintes capítulos: 2.1, onde um resumo acerca da população idosa no Brasil e na RMSP é apresentado. 2.2, aborda o projeto temático ao qual essa tese se vincula. 2.3, onde o clima da RMSP é retratado. 2.4, diz respeito à influência do clima na mortalidade de idosos em diferentes partes do mundo e Brasil. 2.5, referente às doenças impactadas pelo clima. 2.6, trata da poluição atmosférica em estudos epidemiológicos. E 2.7, que oferece um resumo acerca de índices de conforto térmico.

2.1 A população idosa no Brasil e na RMSP

Sobreposto às mudanças climáticas encontra-se o fato de que a população idosa está aumentando em grande parte dos países, incluindo Brasil. Estimativas das Nações Unidas (UNITED NATIONS, 2015) dão uma ideia desse incremento: em 1950 o número estimado de pessoas com idade entre 60 e 79 anos, de ambos os sexos, era de aproximadamente 2,5 milhões. Em 2017 a mesma estimativa aponta para um número aproximado de quase 23 milhões de pessoas. Esse crescimento tende a continuar e se essa projeção for confirmada, em 2050 a população idosa brasileira deve ultrapassar os 50 milhões de pessoas. De acordo com Wong e Carvalho (2006), dois fatores influenciam a transição da estrutura etária no Brasil: declínio nos níveis de fecundidade e mortalidade. Os autores esclarecem que a fecundidade no Brasil experimentou uma drástica redução a partir dos anos 60, fato que desencadeia mudanças na distribuição etária da população. No que diz respeito à queda das taxas de mortalidade, os autores relatam que a estimativa na década de 50 era de que apenas metade das pessoas nascidas chegasse à idade de aposentadoria. Entretanto, isso vem mudando de forma que mais recentemente, Sawyer et al. (1999 apud WONG e CARVALHO, 2006), estimam que pelo menos 80% dos nascidos atinjam os 60 anos.

De acordo com a Fundação SEADE (2013), em 2015 aproximadamente 13% da população do Estado de São Paulo apresentava 60 anos ou mais. As projeções da mesma entidade para 2030 e 2050 estimam que a proporção de idosos estará em torno de 20% e 30%, respectivamente. Para Waldvogel et al. (2003), o envelhecimento da população estadual é também evidenciado comparando-se o grupo etário de maior volume: em 2000 era o de 15 a 19 anos, enquanto que em 2025 será o de 40 a 44 anos.

O aumento no número de idosos na RMSP também pode ser observado nas projeções da Fundação SEADE. A tabela 2 detalha a porcentagem do aumento da população residente na RMSP em

1º de julho de 2011 e 2030, para diferentes grupos etários em ambos os sexos. De modo geral, espera-se que até 2030 a população idosa da RMSP praticamente dobre de tamanho, ou de forma mais específica, registre um aumento de 94%. A faixa etária quinquenal de maior incremento fica entre 70 e 74 anos, cuja projeção aponta para um aumento de 123%, seguido da faixa de 65 a 69 anos (104%), acima de 75 anos (97%) e 60 a 64 anos (68%).

Tabela 2 – Porcentagem de aumento da população idosa na RMSP entre 2011 e 2030 para diferentes faixas etárias e sexo de acordo com dados da Fundação SEADE⁷.

Faixa etária - quinquenal	Homem	Mulher	Total
60 a 64 anos	+73%	+64%	+68%
65 a 69 anos	+106%	+102%	+104%
70 a 74 anos	+127%	+121%	+123%
75 anos ou mais	+105%	+92%	+97%
Total dos grupos etários	+98%	+91%	+94%
Total geral da população	+12%	+11%	+12%

2.2 Idoso: foco do projeto temático Biometeorologia Humana

A investigação acerca dos impactos dos diversos fatores ambientais, bem como do tempo e clima nos idosos se caracteriza como um desafio multidisciplinar, que requer uma estrutura formal capaz de organizar os agentes das diferentes áreas do conhecimento, para que estes trabalhem em conjunto. Nesse sentido foi criado o projeto temático de pesquisa “Biometeorologia Humana: Análise dos efeitos de variáveis ambientais (meteorológicas, conforto térmico e poluição atmosférica) e das mudanças climáticas na população geriátrica da cidade de São Paulo”, coordenado pelo professor Fábio Luiz Teixeira Gonçalves, do Departamento de Ciências Atmosféricas do IAG-USP (para um resumo do projeto, ver o anexo da tese). Como parte de seu caráter multidisciplinar, o projeto engloba pesquisadores de outras áreas/institutos da USP, a saber: Faculdade de Medicina (FM-USP), Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAU-USP), Escola Politécnica (POLI-USP), além da UNIVESP (Universidade Virtual do Estado de São Paulo).

Alguns dos resultados que já foram encontrados no âmbito do projeto temático estão citados ao

⁷ Fundação Seade. Sistema Seade de Projeções Populacionais. Disponível em: <<http://produtos.seade.gov.br/produtos/projpop/index.php>>. Acesso em: 17 de junho de 2017.

longo do texto, vide Trezza (2015) e Segalin et al. (2017). Outra parte ainda encontra-se em desenvolvimento, ou em estágio de conclusão, como o que é apresentado aqui nesta tese, cujo intuito é elucidar o impacto do clima futuro sobre a população idosa da RMSP.

2.3 O clima da RMSP

Tradicionalmente o clima na RMSP é descrito como tendo invernos secos, verões úmidos e temperaturas que em média são amenas. De acordo com o Boletim Climatológico Anual da Estação do IAG de 2015 a temperatura média anual histórica registrada entre 1933 a 2015 é de 18,6°C. A maior quantidade de precipitação ocorre durante os meses de dezembro, janeiro e fevereiro, com uma média anual de aproximadamente 1500 milímetros. De acordo com a classificação de Köppen-Geiger (PEEL et al., 2007), em termos médios o clima da região pode ser caracterizado como *Cfa*, ou temperado úmido com verão quente, muito embora quando da ocorrência de invernos anormalmente secos a classificação poderia ser *Cwa*, ou temperado úmido com inverno seco.

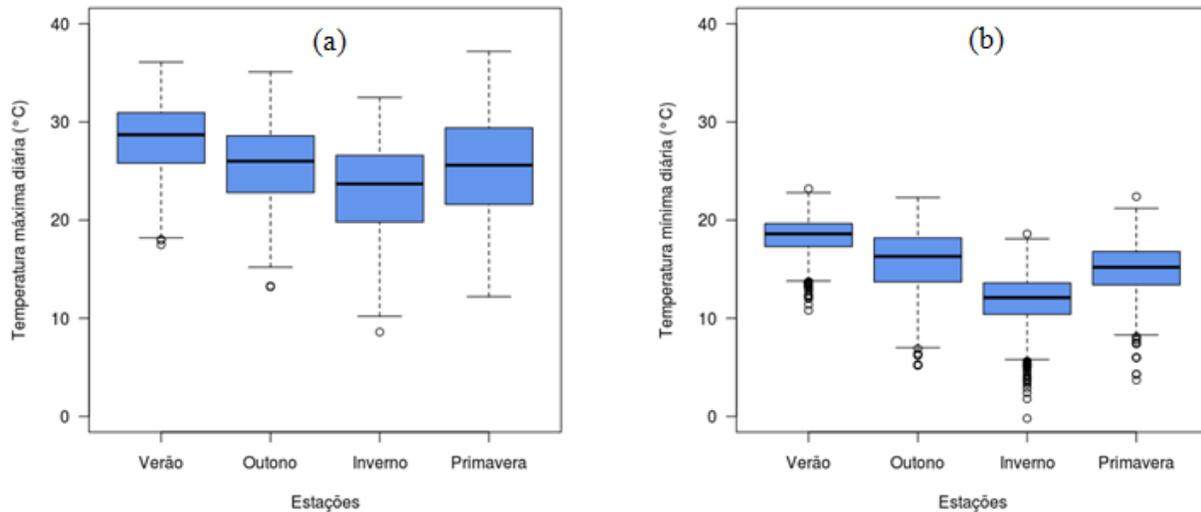


Figura 3 – Em (a) a variação sazonal da temperatura máxima diária em °C na RMSP de 1996 a 2014 e em (b) da temperatura mínima diária, medidos pela estação meteorológica do IAG.

Embora os valores médios das variáveis apontem para um clima ameno na RMSP, no decorrer de um ano podem ser verificados extremos de temperatura consideráveis. Por exemplo, em 17 de outubro de 2014 ocorreu o recorde de temperatura máxima, 37,2°C. Em três ocasiões diferentes, 6 e 12 de julho de 1942 e 2 de agosto de 1955, a estação do IAG registrou o recorde de temperatura mínima,

-1,2°C⁸.

A variabilidade térmica na RMSP é ilustrada nas figuras 3 (a) e (b), relativas às temperaturas máxima e mínima, respectivamente. Em ambas as figuras nota-se o mesmo padrão em forma de “u”, que bem caracteriza as estações do ano. Observa-se ainda que alguns dias podem ser de intenso frio ou calor. No diagrama de caixa da figura 3 (a), tanto no verão quanto na primavera a linha de máximo encontra-se próxima dos 37°C, enquanto isso na figura 3 (b) a linha de mínimo durante o outono e inverno posiciona-se abaixo dos 10°C. Os *outliers* da figura 3 (b) indicam que de forma menos frequente observam-se ainda temperaturas entre 0°C e 10°C durante o outono, inverno e primavera, relacionados à incursão de massas de ar polar sobre a região.

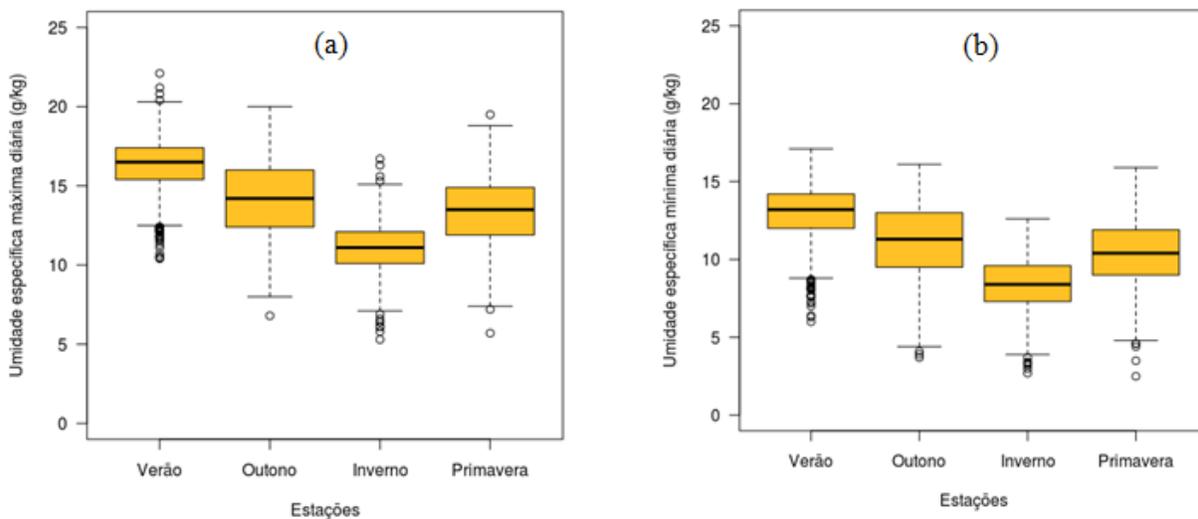


Figura 4 – Em (a) a variação sazonal da umidade específica máxima diária em g/kg na RMSP de 1996 a 2014 e em (b) da umidade específica mínima diária, medidos pela estação meteorológica do IAG.

As figuras 4 (a) e (b) refletem a variabilidade da umidade específica para as 4 estações na RMSP. Observa-se claramente o período seco caracterizado pelo inverno e úmido pelo verão, bem como estações de transição (outono e primavera) onde a variabilidade da umidade específica é maior. O acentuado aporte de umidade durante o verão é resultado de sistemas meteorológicos característicos dessa época, como a Zona de Convergência do Atlântico Sul, comumente abreviada de ZCAS (Kodama, 1992 e 1993). Por outro lado, durante o inverno, a Alta Subtropical do Atlântico Sul encontra-se posicionada mais próxima do continente, inibindo movimentos convectivos e

⁸ Boletim climatológico da Estação do IAG, 2016. Disponível em: <<http://www.estacao.iag.usp.br/Boletins/2016.pdf>> Acesso em: 17 de junho de 2017.

consequentemente a formação de nuvens, fato que auxilia na redução da umidade nesta época do ano. Ainda no inverno verifica-se de forma mais frequente a passagem de sistemas de alta pressão provenientes do Sul (massas de ar polar), que por vezes desenvolvem um padrão estacionário sobre o Sudeste do Brasil, resultando em sequências prolongadas de dias secos.

Mesmo considerado ameno, o clima da RMSP recém descrito exerce influência na mortalidade de idosos, conforme demonstrado por diversos autores. Alguns destes trabalhos são encontrados no capítulo que se segue.

2.4 Influência do clima na mortalidade de idosos

A bibliografia acerca do impacto de variáveis meteorológicas na mortalidade de idosos é bastante vasta. A seguir destacam-se alguns trabalhos importantes com enfoque em diversas partes do mundo, incluindo Brasil. Já o detalhamento acerca de doenças especificamente impactadas pelo clima é tema do próximo capítulo.

Larsen (1990) utilizou um modelo de defasagem distribuída para avaliar a influência das variações de temperatura na mortalidade, em seis Estados dos EUA de 1921 a 1985. O autor mostrou que temperaturas acima do normal no verão e abaixo do normal no inverno estavam associadas ao aumento da mortalidade. Consequentemente, o resultado aponta para a possibilidade de que alterações na mortalidade média de determinada população possam ser influenciadas por mudanças climáticas.

O vínculo entre variações climáticas e mortalidade ficou mais evidente quando Kalkstein e Greene (1997) utilizaram um sistema de classificação de massas de ar para avaliar essa relação, também nos EUA. De acordo com os autores, a principal vantagem de se considerar massas de ar para elucidar esse tipo de relação se deve ao fato de que automaticamente mais de uma variável é considerada ao mesmo tempo (por exemplo, a relação da mortalidade com uma massa de ar quente e úmida, fria e seca, etc). Ao todo 44 cidades foram incluídas no estudo. No verão, duas massas de ar em especial provocam aumento na mortalidade (total e de idosos): uma quente e úmida de origem oceânica e outra quente e seca, de ação mais continental. Os autores deixam claro que a influência de massas de ar na mortalidade durante o inverno não é tão evidente quanto no verão, muito embora em termos médios a mortalidade nessa época seja mais elevada. Por fim, os autores projetam com base em simulações de três modelos de circulação global da atmosfera que em 2020 e 2050 o incremento da mortalidade durante o verão tende a ser significativamente maior do que no inverno.

Similarmente para a Austrália, Guest et al. (1999) inicialmente quantificaram a relação entre

mortalidade e extremos climáticos de cinco cidades entre 1979 e 1990, para depois projetar o impacto das mudanças do clima nestas cidades em 2030. Os resultados obtidos apontam para uma redução de 10% na mortalidade quando consideradas todas as faixas etárias e o crescimento populacional, devido à diminuição da mortalidade no inverno.

Um passo importante na conexão entre modelagem empírico-estatística e simulações climáticas ocorreu quando da publicação de Dessai (2002). O autor elaborou um modelo empírico-estatístico associado ao estresse por calor na cidade de Lisboa, em Portugal, considerando os verões de 1980 a 1998. O modelo faz uso da relação dose-resposta entre a temperatura máxima e o excesso de mortes por calor. Posteriormente, em Dessai (2003), esse mesmo modelo empírico-estatístico foi utilizado em conjunto com simulações de dois modelos regionais climáticos para estimar o impacto das mudanças nos anos de 2020-2029 e 2050-2059. Os resultados mostraram que a taxa de mortalidade para 100.000 habitantes aumentou do intervalo de 5.4-6.0 (1980-1998) para 5.8-15.1 (2020s) e para 7.3-35.6 (2050s).

A influência do tempo na mortalidade de idosos foi evidenciada em Zanobetti et al. (2012), que propôs que a variabilidade da temperatura (desvio padrão) durante o verão poderia ter relação com a sobrevivência de idosos internados, em 135 cidades americanas. Através de dados do *Medicare* (um programa governamental de saúde americano que cobre a hospitalização de pessoas com idade maior ou igual a 65 anos) de 1985 a 2006, os autores construíram coortes de pessoas hospitalizadas com doença crônica pulmonar, diabetes, insuficiência cardíaca congestiva e infarto do miocárdio. Os resultados demonstram que, de modo geral, o aumento do desvio padrão da temperatura no verão está associado a um menor tempo de sobrevivência de idosos, especialmente nos com idade superior à 75 anos. Outra conclusão relevante é a de que a relação se mostrou mais fraca nos municípios com maior área verde. Além disso, foi também identificada uma variação geográfica nessa associação, de forma que ela é mais evidente nos municípios mais quentes.

Já no Brasil, uma importante contribuição foi dada por Gouveia et al. (2003), que utilizaram um modelo de regressão para investigar a relação entre mortalidade de 1991 a 1994 e três fatores distintos: causa, faixa etária e posição socioeconômica. Um limiar de 20°C na temperatura média foi identificado, sendo que acima ou abaixo desse valor a mortalidade aumenta. Não foram observadas diferenças relevantes entre grupos socioeconômicos. Em contrapartida identificou-se um risco maior de morte por causas cardiovasculares e respiratórias no frio do que no calor, com idosos e crianças sendo mais suscetíveis que adultos. Destacou-se ainda o caráter mais prolongado do efeito causado pelo frio em comparação ao calor.

Posteriormente, esse impacto prolongado na mortalidade da variação de temperatura ambiente

foi abordado por Hajat et al. (2005), considerando não apenas São paulo, mas também Deli e Londres. Os resultados mostram um risco somado ao longo de 28 dias de +0,8% para cada incremento de 1°C, colocando São Paulo em uma posição intermediária entre as outras duas cidades (sendo Deli a de maior risco).

Ainda no Brasil, os fatores que tornam as pessoas mais vulneráveis à mortalidade provocada pelo calor foram abordados em Bell et al. (2008). O estudo focado na Cidade do México, São Paulo e Santiago do Chile, considerou o período de 1998 a 2002. No que diz respeito à cidade de São Paulo, os resultados mostram que pessoas com menor escolaridade são mais suscetíveis, ressaltando a importância da análise espacial da relação mortalidade-temperatura. Além disso, em São Paulo foi identificado que o risco de mortalidade de idosos devido ao aumento da temperatura é maior que nas outras cidades estudadas, resultado que aponta para uma maior vulnerabilidade desse grupo populacional na região em questão.

O âmbito da variabilidade geográfico-espacial da mortalidade na RMSP foi abordado por Ikefuti (2016), que utilizou modelagem estatística para investigar a influência do contexto geográfico na mortalidade por doenças do aparelho circulatório, em especial o acidente cerebral vascular (AVC) e a embolia pulmonar (EP). Além de encontrar que tanto o calor quanto o frio caracterizam fatores de risco para todos os tipos de AVC e EP, a autora mostra que existem diferenças geográficas no risco relativo da mortalidade por essas doenças. No caso de AVC, o risco é maior nas regiões periféricas, coincidindo com locais de menor renda *per capita* e vegetação, enquanto que para a EP nas áreas centrais.

2.5 Doenças impactadas pelo tempo e clima

Quando se trata da relação de determinadas doenças com o clima existem dois grupos claramente distintos, um ligado às doenças que sofrem influência direta das variantes climáticas, típicas de latitudes médias e outro cujo efeito do tempo e clima se dá de forma indireta, através de vetores, denominadas doenças tropicais infecciosas. Nesse sentido, Camargo (2008) afirma que estas doenças se proliferam em regiões de clima quente e úmido (essencialmente nas latitudes tropicais), citando como exemplo a malária, dengue, doença de chagas entre outras.

No que concerne o primeiro grupo, de relação direta, a associação de variáveis meteorológicas com doenças do trato respiratório também tem sido alvo de estudos, como em Gonçalves e Coelho (2010), que estudaram a morbidade respiratória por afecção das vias aéreas superiores (AVAS), em

crianças com idade inferior a 13 anos. Os autores sugeriram que o aumento da diferença entre as temperaturas de maio e abril poderia estar relacionado ao aumento da morbidade respiratória. Nesse trabalho, foram consideradas como AVAS nasofaringite aguda, sinusite, faringite, amidalite, laringite, rinite, entre outras.

Para São Paulo, Sharovsky et al. (2004) investigaram a mortalidade por infarto do miocárdio (IM) e a influência de variáveis ambientais associadas de 1996 a 1998. Os resultados mostram existir uma associação estatisticamente significativa entre mortalidade por essa doença e temperatura média diária, sendo que a temperatura de menor risco é em torno de 22°C. No mesmo trabalho são mencionados diversos fatores associados ao pico de mortalidade por IM verificado no inverno, como a influência do frio no aumento da pressão sanguínea e atividade do sistema nervoso simpático. Por outro lado, também são mencionados estudos que relacionam altas temperaturas à alterações fisiológicas, como aumento na viscosidade sanguínea e débito cardíaco, que podem levar a desidratação, hipotensão, etc.

O já mencionado trabalho de Ikefuti (2016) aborda a mortalidade causada por acidente cerebral vascular (isquêmico e hemorrágico) e embolia pulmonar. De acordo com a autora, embora de forma não consensual, alguns trabalhos apontam para a influência de variáveis meteorológicas nas internações e óbitos por AVC, embora os mecanismos que levem a isso não sejam totalmente compreendidos. Já a variação sazonal dos casos de EP poderia estar associada às baixas temperaturas, que “induzem a vasoconstrição e redução da atividade física, o que diminuiria o fluxo sanguíneo e aumentaria a viscosidade do sangue, favorecendo a formação de trombos” (BOULAY et al., 2001 apud IKEFUTI, 2016).

2.6 Poluição atmosférica

Embora não seja este o foco do presente trabalho, é imperativo ressaltar a importância da poluição do ar em estudos epidemiológicos, uma vez que a exposição a ela ocorre simultaneamente à da temperatura. Tal relevância é evidenciada pelos trabalhos citados nos próximos parágrafos. A sinergia existente entre essas variáveis, caracterizadas como fatores confundidores na modelagem da relação exposição-desfecho, pode ser exemplificada quando um pico de mortalidade é associado a baixas temperaturas e alta concentração de poluentes. Esse cenário é comumente verificado quando da atuação de sistemas de alta pressão persistentes na região agregados à ocorrência de inversão térmica na atmosfera. Sob tais circunstâncias, é possível observar diversos dias em sequência com grande

estresse térmico e alta concentração de poluentes, como material particulado (MP₁₀ e MP_{2.5}), dióxido de nitrogênio (NO₂) e ozônio (O₃).

Na região metropolitana de São Paulo, a relação entre mortalidade infantil (crianças com idade inferior a 5 anos) provocada por problemas respiratórios, poluição do ar e variáveis ambientais foi abordada por Saldiva et al. (1994). Através de modelos de regressão e considerando tanto efeito da sazonalidade quanto da temperatura e umidade relativa, os autores evidenciaram a associação entre mortalidade e níveis de NO_x.

Posteriormente, a mortalidade de idosos ligada a doenças cardiovasculares de 1996 a 2000 foi associada à poluição atmosférica e variáveis meteorológicas, na cidade de São Paulo. Gonçalves et al. (2007) usaram análise de componentes principais e observaram um sinal forte e negativo na associação entre mortalidade e variáveis meteorológicas, ao mesmo tempo em que quase todos os poluentes apresentaram associação positiva, embora menos evidente.

Dando um passo adiante, Pinheiro et al. (2014) abordaram o efeito da poluição e temperatura na mortalidade ocasionada tanto por causas cardiovasculares (em pessoas com mais de 40 anos) quanto respiratórias (acima de 60 anos), de 1998 a 2008. Os resultados, obtidos a partir de 3 metodologias distintas (análise de séries temporais com regressão de Poisson, análise case-crossover com pareamento temporal bidirecional e análise case-crossover com pareamento pelo fator confundidor), apontam para risco maior de mortalidade cardiovascular em baixas temperaturas e respiratório em altas temperaturas, quando os níveis de MP₁₀ estão em torno de 60µg/m³.

A poluição do ar é ainda contemplada dentro do próprio INCLINE e do projeto temático, mais precisamente em Segalin et al. (2017), onde os autores mediram a quantidade de material particulado (MP₁₀ e MP_{2.5}) em 59 residências de idosos na RMSp. Os autores observaram que na maioria das residências há concentração significativa de MP_{2.5} indicando que, em algumas situações, os níveis são semelhantes aos encontrados em estradas com tráfego intenso de automóveis.

A característica complementar da poluição atmosférica, analisada no contexto das ondas de calor ocorridas em Los Angeles de 1975 a 2005 é foco de um estudo em andamento por parte de Gonçalves e colaboradores. Os resultados, até então preliminares, apontam que apesar de possuir um caráter secundário o ozônio age no sentido de elevar o risco de mortalidade por doenças respiratórias ocorridas durante um evento de onda de calor.

Os trabalhos citados acima reforçam o caráter de ação agregado e simultâneo existente entre distintas variáveis, como poluição e temperatura, por exemplo. A intenção de representar esse efeito conjunto em uma única variável motivou a criação de diversos índices, tratados a seguir.

2.7 Índices de conforto térmico

A fim de avaliar os efeitos do tempo nos seres humanos, o conceito de conforto térmico foi desenvolvido, caracterizado como a percepção mental de satisfação com o ambiente térmico (ISO 7730, 2005). Tais efeitos podem ser matematicamente representados através de índices de conforto térmico que sintetizam de modo simplificado a interação entre variáveis ambientais (como temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar), individuais (vestimentas, atividades físicas, etc), fisiológicas (metabolismo, temperatura interna, temperatura da pele, etc) e subjetivas (percepção ou preferência da sensação térmica).

Neste contexto, centenas de índices foram desenvolvidos desde o século passado, destacando-se o clássico índice de desconforto de Thom (1959); o Voto Previsto Médio (do inglês *Predicted Mean Vote* – PMV) de Fanger (1972); a Temperatura Efetiva de Giles et al (1990); o Índice Climático Térmico Universal (ou Universal Thermal Climate Index – UTCI) de Bröde et al. (2012) e o atual índice adaptativo de Humphreys e Nicol (1998), que considera a capacidade adaptativa de uma determinada população em relação às alterações do clima. Uma revisão bastante completa acerca desses e outros índices é dada em Monteiro (2008).

A Temperatura Equivalente Percebida ou Aparente (TAP), usada nesta tese, foi especificamente desenvolvida para a RMSP baseada na aplicação de 1750 questionários (MONTEIRO e ALUCCI, 2009). Este índice segue o princípio de temperatura equivalente, ou seja, é a temperatura de um ambiente de referência que produz o mesmo desconforto experimentado sob certas circunstâncias de temperatura, umidade do ar, temperatura radiante média e velocidade do vento. A equação usada para calcular o índice encontra-se na sessão 3.2.1 desta tese.

CAPÍTULO 3 – DADOS E METODOLOGIA

Esse capítulo é dividido em 3 partes: em 3.1 é apresentada uma descrição dos dados utilizados, relativos à mortalidade, estações meteorológicas e modelo RegCM4. Em 3.2 são feitas considerações sobre os métodos e análises usados. Já no item 3.3 um diagrama com a estrutura de organização da tese é apresentado para facilitar a compreensão. Maiores detalhes a respeito de cada uma dessas categorias são dados nos itens 3.1 e 3.2.

3.1 Descrição dos dados

Os dados estão subdivididos em três categorias: 3.1.1 Dados de mortalidade (utilizados na avaliação quantitativa do impacto das mudanças climáticas nos idosos da RMSP); 3.1.2 Dados observacionais (usados no estabelecimento da relação entre variáveis ambientais e mortalidade, bem como na comparação com simulações do modelo RegCM4); 3.1.3 Simulações do modelo climático RegCM4 (utilizadas para estimar o impacto de projeções do clima futuro da RMSP no risco de mortalidade dos idosos) e; 3.1.4 Dados do modelo CFSv2 (usado na análise da onda de calor registrada em 2014).

3.1.1 Dados de mortalidade

Os dados de mortalidade dos 39 municípios da RMSP foram obtidos diretamente da página do Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde (DATASUS)⁹, para o período de 1996 a 2014. A lista completa dos municípios que compõe a RMSP é dada na tabela 3.

Na base de dados final são mantidos apenas os registros de óbito cujas iniciais na Classificação Internacional de Doenças (CID-10) correspondem às letras I00-99 e J00-99, referentes a doenças do aparelho circulatório e respiratório, respectivamente, excluindo-se assim as causas de morte acidentais.

Além disso, para manter a mortalidade apenas de idosos, foram considerados óbitos de pessoas com 60 anos ou mais, idade esta referendada pelo Estatuto do Idoso brasileiro, de 2003¹⁰.

3.1.2 Dados observacionais

Os dados meteorológicos utilizados neste trabalho são oriundos da Estação Meteorológica do IAG – USP (a partir daqui referida apenas como IAG) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizadas em 23.6512°S/46.6224°O e 23.4962°S/46.6200°O, respectivamente. É possível explicitar o uso destes dados em dois grupos distintos: um relacionado à avaliação do impacto de variáveis ambientais na mortalidade de idosos e outro ligado à comparação com as séries temporais obtidas a partir das simulações do modelo climático.

⁹ Disponível em: < <http://tabnet.datasus.gov.br/cgi/defthtm.exe?sim/cnv/obt10uf.def>>. Acesso em: 15 de agosto de 2016.

¹⁰ “Art. 1 É instituído o Estatuto do Idoso, destinado a regular os direitos assegurados às pessoas com idade igual ou superior a 60 (sessenta) anos.” Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2003/L10.741.htm>. Acesso em: 10 de junho de 2017.

Tabela 3 - Municípios pertencentes à RMSP.

Arujá	Diadema
Biritiba-Mirim	Mauá
Ferraz de Vasconcelos	Ribeirão Pires
Guararema	Franco da Rocha
Guarulhos	Mairiporã
Itaquaquecetuba	Barueri
Mogi das Cruzes	Carapicuíba
Poá	Itapevi
Salesópolis	Jandira
Santa Isabel	Osasco
Suzano	Pirapora do Bom Jesus
Itapeçerica da Serra	Santana de Parnaíba
Juquitiba	Rio Grande da Serra
São Lourenço da Serra	Santo André
Taboão da Serra	São Bernardo do Campo
Vargem Grande Paulista	São Caetano do Sul
Caieiras	Cotia
Cajamar	Embu
Francisco Morato	Embu-Guaçu
São Paulo	

Para avaliação do impacto nos idosos, foi considerado o período de 1996 a 2014 (18 anos), das seguintes variáveis: temperatura do ar (média diária, máxima e mínima), umidade relativa (média diária, máxima e mínima) e umidade específica (média diária, máxima e mínima). Já na comparação com os dados simulados foram utilizados 30 anos de dados, de 1975 até 2005. Esse período coincide exatamente com o da simulação, que por sua vez foi escolhido para representar o clima passado recente da região. Neste caso foram consideradas as médias diárias da temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento em superfície.

Todas as informações acerca de como são medidas (ou calculadas) essas variáveis podem ser encontradas nos relatórios anuais da estação do IAG¹¹. A seguir, uma breve descrição é dada para cada uma das citadas anteriormente.

Temperaturas: a temperatura do ar (°C) que aqui é considerada em termos médios diários é medida durante o dia através do capilar de mercúrio de um psicrômetro (também referida como

¹¹ Disponível em: < <http://www.estacao.iag.usp.br/boletim.php> >. Acesso em: 20 de novembro de 2017.

temperatura de bulbo seco). Durante a madrugada (entre 1 e 6 horas), o registro é feito por um termógrafo de anel bimetálico. As temperaturas máxima e mínima são medidas por outros instrumentos. No caso da máxima, ela é obtida a partir do termômetro de máxima com capilar de mercúrio enquanto que a mínima é registrada pelo termômetro de mínima com capilar de álcool.

Umidade: duas umidades conceitualmente diferentes são consideradas nessa tese, a umidade específica e a umidade relativa, ambas obtidas de acordo com o procedimento descrito em WMO (1996). As umidades são calculadas a partir das leituras do bulbo seco e do bulbo úmido do psicrômetro, em conjunto com a pressão atmosférica registrada pelo barômetro de mercúrio e pelo microbarógrafo (durante a madrugada). A umidade relativa é dada em porcentagem (%) e é dependente da temperatura, representando o quão próximo o ar se encontra da saturação. Já a umidade específica (g/kg) denota a massa de vapor d'água contida na unidade de massa de ar.

Nesta tese, a umidade específica e a relativa são consideradas em momentos diferentes. A umidade específica é usada quando da relação dos dados de mortalidade com variáveis meteorológicas individuais, o que resulta na elaboração dos padrões de temperatura e umidade, bem como no estabelecimento de limiares de risco. Já a umidade relativa é considerada quando do cálculo do índice de conforto térmico TAP, para posterior aplicação na investigação do cenário futuro.

Durante a investigação da influência individual das variáveis ambientais na mortalidade, temperatura e umidade específica são analisadas em diferentes combinações a fim de caracterizar diferentes padrões térmicos hipotéticos, a saber: padrão médio diário (mortalidade avaliada em relação à temperatura e umidade específica médias diárias), quente e seco (temperatura máxima e umidade específica mínima), quente e úmido (temperatura máxima e umidade específica máxima), frio e seco (temperatura mínima e umidade específica mínima) e frio e úmido (temperatura mínima e umidade específica máxima).

3.1.3 Simulações do modelo climático RegCM4

As análises considerando o clima futuro serão baseadas nas simulações do modelo climático RegCM4 (PAL et al., 2007; GIORGI et al., 2012), que fazem parte do projeto CREMA (experimento CORDEX REgCM4 hyper-Matrix), descrito em Giorgi (2014). O CREMA foi um experimento colaborativo para fazer *downscaling* em diversas regiões do globo que integram o CORDEX, usando diferentes modelos de circulação geral da atmosfera do CMIP5¹² como condições iniciais e de

¹² Quinta fase do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados, que se traduz como um conjunto coordenado de

fronteira, além de distintos cenários de emissões.

Conforme descrito em Llopart et al. (2014), para a América do Sul, as simulações do CREMA tem um espaçamento de grade horizontal de aproximadamente 50km, enquanto que na vertical são 18 níveis na coordenada sigma-pressão. As simulações utilizadas nesse trabalho consideram o cenário de emissões de gases de efeito estufa RCP8.5 (RIAHI et al. 2011) aninhados¹³ nos seguintes modelos climáticos: HadGEM2-ES (MARTIN et al., 2011); MPI-ESM-MR (GIORGETTA et al., 2012) e; GFDL-ESM2M (DUNNE et al., 2012).

Como neste trabalho a intenção é avaliar a pior conjuntura possível, capaz de causar o maior impacto na população idosa, apenas o cenário RCP8.5 é considerado. RCP pode ser traduzido como “caminho de concentração representativo” e no caso do 8.5 considera alto crescimento populacional e poucos avanços tecnológicos, o que em tese levaria (à longo prazo) a uma maior demanda de energia e consequentemente maior emissão de gases de efeito estufa (mantendo-se as políticas atuais, pouco efetivas). Os detalhes sobre o RCP8.5 estão disponíveis em Riahi et al. (2011).

No total são utilizadas 4 simulações do RegCM4, que se diferenciam em termos das condições de fronteira e das parametrizações físicas adotadas. Três simulações fazem uso do *Community Land Model CLM3.5* (TAWFIK e STEINER, 2011) para o esquema de superfície e Emanuel (EMANUEL et al., 1999) para convecção. Estas simulações identificadas como Hadclm, MPIclm e GFDLclm, estão aninhadas respectivamente nos GCMs HadGEM-ES, MPI-ESM-MR e GFDL-ESM2M. Outra simulação, denominada Hadctrl e forçada pelo HadGEM2-ES, usa o esquema de superfície BATS (*Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme*, DICKINSON et al. 1993) e um misto para convecção, sendo Emanuel sobre regiões oceânicas e Grell (1993) sobre a terra. Embora as simulações do RegCM4 sejam contínuas de 1970 a 2100, nesta tese dois períodos são analisados: o clima presente (1975-2005) e o futuro distante (2065-2099).

3.1.4 Dados do modelo acoplado CFSv2

Na análise da onda de calor ocorrida em 2014 foram utilizados dados do modelo CFSv2, segunda versão do *Climate Forecast System*, do NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*). Esse sistema consiste do acoplamento entre modelos de oceano e atmosfera, fornecendo

simulações de modelos climáticos. Disponível em: <<http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>>. Acesso em: 10 de junho de 2017.

¹³ O aninhamento de modelos consiste em utilizar condições iniciais, bem como informações laterais de modelos que reproduzem a circulação geral da atmosfera (também conhecidos como modelos globais) como forçantes em simulações de maior resolução (menor distância entre os pontos de grade), por modelos regionais climáticos.

dados de previsão sazonais operacionais com saídas a cada 6 horas, diárias e mensais. Maiores detalhes acerca do CFS podem ser obtidos em Saha et al. (2006) e Saha et al. (2014). Nesta tese foram utilizados dados de pressão atmosférica reduzida ao nível médio do mar, com resolução de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$, documentados em Saha et al. (2011).

3.2 Métodos adotados nas análises

O detalhamento dos métodos adotados segue a ordem: em 3.2.1 é apresentada a equação para cálculo do índice TAP. Em 3.2.2 é explicado o método de análise do valor esperado/observado, utilizado no cômputo das zonas de risco. Já em 3.2.3 encontram-se detalhes acerca das zonas de risco de mortalidade. Por fim, em 3.2.4 é provida uma explicação a respeito dos diagramas de Taylor.

3.2.1 Cálculo do índice TAP e interpretação

O índice TAP (temperatura aparente) de Monteiro e Alucci (2009) é usado nessa tese como método de agregar em um único valor duas variáveis meteorológicas (temperatura do ar e umidade relativa), associadas ao estresse térmico sentido pela população da RMSP.

O TAP¹⁴ é dado pela equação 1,

$$TAP = -3,777 + 0,4828T_a + 0,5172t_{mr} + 0,0802ur - 2,322v \quad (\text{eq. 1})$$

onde T_a é a temperatura do ar ($^\circ\text{C}$), ur é a umidade relativa (%), t_{mr} é a temperatura média radiante ($^\circ\text{C}$) e v é a velocidade do vento próxima à superfície (m/s).

Nesta tese o ambiente de referência assume que $t_{mr} = T_a$ e $v = 0,1\text{m/s}$, ou seja, consideram-se apenas ambientes internos onde os efeitos do vento e da radiação solar podem ser negligenciados. A opção por essa simplificação do índice passa basicamente por dois fatores. O primeiro está relacionado à complexidade da variável temperatura média radiante¹⁵, que é comumente tratada no âmbito da arquitetura em estudos de conforto térmico, mas que praticamente não é abordada na meteorologia. O segundo fator diz respeito à grande incerteza na velocidade do vento, que, como pode ser verificado no

¹⁴ Apesar de TAP significar temperatura aparente, no feminino, ele será referido no masculino para designar “o índice” TAP.

¹⁵ A definição encontrada em Ruas (1999) é de que a t_{mr} é a “temperatura superficial de um ambiente imaginário constituído por superfícies negras com o qual uma pessoa, também admitida como uma superfície negra, troca a mesma quantidade de calor por radiação que aquela trocada com o ambiente real não uniforme.”

item 5.0 desta tese, é maior do que a da temperatura e da umidade relativa.

3.2.2 Análise do valor esperado/observado

A análise do valor esperado/observado foi também aplicada em Guest et al. (1999) e Dessai (2002). Nesta metodologia é inicialmente calculado um valor médio esperado de mortalidade para um dado período (dia, mês, estação do ano) para posteriormente compará-lo com o valor observado a fim de computar através da diferença entre eles se houve déficit ou excesso de mortes no referido dia. A maneira de se obter a média esperada de mortalidade pode variar através do uso de médias móveis, médias mensais, sazonais, ou até mesmo através de modelos estatísticos. Nesta tese, o valor médio esperado para um determinado dia é resultado da média móvel dos 30 dias anteriores. Quanto menor o número de dias considerado na média móvel, mais ela captura as oscilações diárias, o que de certo modo torna o cálculo do excesso de mortalidade mais conservador. Assim, a opção por 30 dias parece ser razoável a fim de permitir o cálculo do excesso/déficit sem ser ao mesmo tempo muito conservador ou grosseiro.

Na etapa seguinte é realizada a contabilidade do excesso/déficit de óbitos baseada no valor esperado. Então, por exemplo, suponha que em um determinado dia o valor esperado seja de 20 mortes, quando, no entanto, foram registradas 24. Contabiliza-se então um excesso de 4 óbitos nesse dia.

Uma vez calculado o excesso ou déficit de mortes é realizada a contabilidade destes baseados em bins da variável em questão (temperatura, umidade específica, temperatura efetiva, etc). O intervalo incluído em cada bin é determinado em decorrência do grau de detalhamento desejado. Bins de intervalo maior tendem a apresentar o resultado mais suavizado em relação à bins mais detalhados. Em contrapartida, a determinação dos pontos de inflexão (limiar ou *threshold*) a partir do qual se verifica uma mudança no comportamento da mortalidade é prejudicada. Nesta tese utilizam-se bins de 1°C para temperatura, TAP e 1g/kg para umidade específica.

Uma vez calculado o excesso/déficit ao longo da série temporal, identifica-se a qual bin ele pertence para que posteriormente a soma destes valores reflita o risco maior ou menor de mortalidade para cada intervalo. Neste trabalho, por exemplo, o excesso/déficit contabilizado no bin de 28°C corresponde aos dias no qual a temperatura média (caso seja esta a variável) estava entre 27,5°C e 28,5°C.

Paralelamente é contabilizada a quantidade de dias pertencentes a cada um dos bins para servir como parâmetro de incerteza na estimativa do risco de mortalidade, dado que bins de maior

amostragem possuem uma incerteza menor do que bins de pouca ocorrência. Além disso, ao se dividir o excesso/déficit de óbitos pelo número total de dias correspondentes a um determinado bin é obtido o seu valor médio diário de mortes esperadas. Nesta tese, esse valor é referido como risco de mortalidade.

3.2.3 Zonas de risco de mortalidade

Uma vez estabelecida a variável risco de mortalidade, é possível subdividi-la em três zonas distintas associadas a diferentes perfis térmicos: frio, neutro e quente. A estes grupos dão-se as denominações de risco frio, neutro e risco quente. A região neutra é caracterizada pelos bins de TAP no qual se identifica um déficit médio diário na mortalidade de idosos. À esquerda da região neutra encontra-se a área de risco frio, relativa aos bins no qual há excesso médio diário de mortes ligadas ao frio. Esse mesmo excesso, porém relacionado ao calor, é visualizado à direita da zona neutra (área de risco quente). Dependendo da análise final desejada, essa mesma divisão em três grupos principais de risco pode ser feita com base em outras variáveis, como temperatura ou umidade específica, por exemplo.

3.2.4 Diagrama de Taylor

Como nessa tese são consideradas simulações do RegCM4 condicionadas por 4 membros diferentes (Hadclm, MPIclm, GFDLclm e Hadctrl) e o conjunto destes (*ensemble*), um grande volume de informações é gerado. Assim, é recomendável que se utilize o diagrama de Taylor (TAYLOR, 2001) como ferramenta de análise dos resultados, dado que ele apresenta a característica de condensar 3 índices estatísticos simultaneamente, facilitando sua comparação. No diagrama estão contidos o coeficiente de correlação (R), a raiz quadrada do erro médio quadrático centralizado¹⁶ (CRMSE, sigla em inglês) e o desvio padrão (SD, sigla em inglês).

A interpretação de um diagrama de Taylor é obida a partir da figura 5, reproduzida de Carslaw (2015). Nela consideram-se 9 modelos hipotéticos associados à poluição do ar, representados da letra *a* até *i* (a unidade de ambos SD e CRMSE é μgm^{-3} , mas como se trata de um exemplo ilustrativo isso é irrelevante agora). A primeira medida de desempenho dos modelos é dada na figura 5 (a) pelo desvio padrão destes em relação ao observado, comparando-se assim as variabilidades das séries. Neste caso,

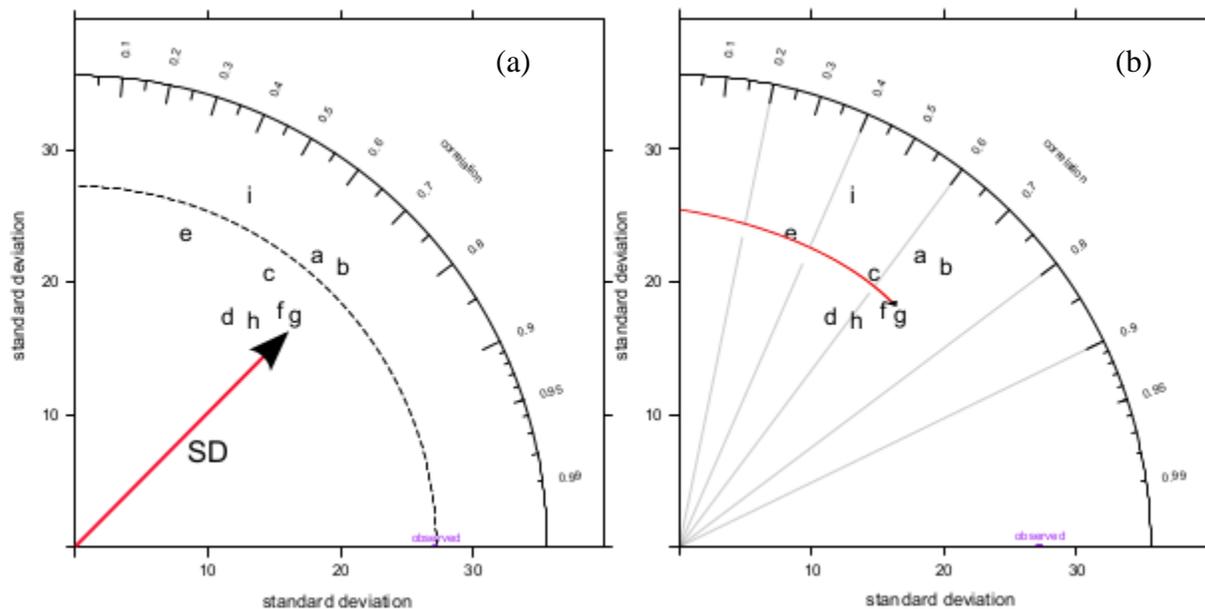
¹⁶ Centralizada, pois os valores médios dos dados são subtraídos inicialmente.

toma-se como base a linha tracejada curva de forma que quanto mais próximo dela o modelo estiver, melhor, ou seja, a variabilidade representada no modelo é similar à observada. Neste caso os modelos *a*, *b* e *c* demonstram melhores resultados.

Já na figura 5 (b) é avaliada a correlação entre os dados modelados e observado, de modo a determinar qual modelo representa melhor o padrão observado (como os “altos e baixos” das séries temporais, por exemplo). Nesta figura, o valor de R cresce no sentido do eixo x, ou seja, maiores correlações são plotadas mais próximas desse eixo. Nessa concepção, os modelos *g* e *b* demonstram melhor R.

Por fim, a figura 5 (c) reflete o CRMSE, indicando qual modelo apresenta um erro menor em relação à variável observada. O CRMSE aumenta quanto mais distante os modelos estiverem do ponto “observado” no eixo das abscissas. Logo, o modelo *g* aparenta ter o menor erro entre todos.

A conclusão final dessa análise é a de que o modelo *g* mostra maior habilidade em simular a variável observada, seguido pelo modelo *b*.



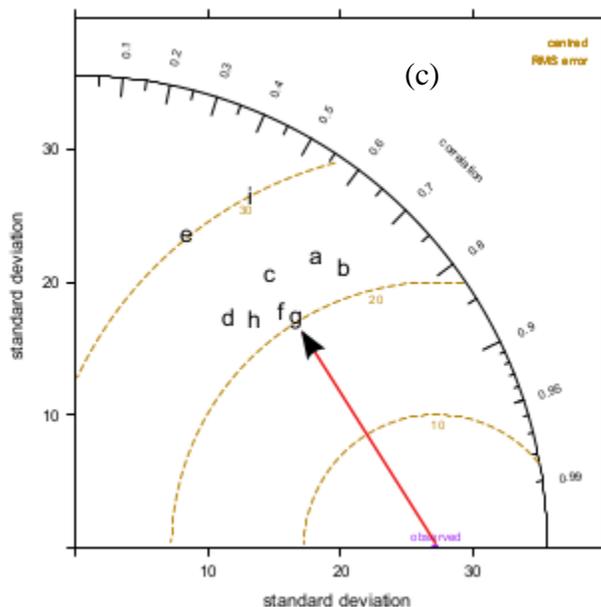


Figura 5 – Exemplo de um diagrama de Taylor. Em (a) instrução de como visualizar o desvio padrão dos dados em relação ao valor observado, em (b) o coeficiente de correlação e em (c) a raiz quadrada do erro médio quadrático centralizado. Retirado de Carslaw (2015).

Os diagramas de Taylor e demais gráficos dessa tese foram elaborados usando a linguagem R (R Development Core Team, 2008) através do software RStudio (RStudio Team, 2015).

3.3 Estrutura organizacional

Uma simplificação da estrutura da tese, bem como dos períodos correspondentes a cada uma das etapas pode ser vista na figura 6. As cores amarelo, verde e vermelho servem para caracterizar cada um dos períodos, sendo a primeira relativa à 1996-2014, a segunda à 1975-2005 e a terceira à 2065-2099. Tanto IAG quanto INMET se referem aos dados observados coletados destas estações meteorológicas e estão em azul para diferenciá-las.

Em suma se verifica a existência de três etapas. A primeira trata do estudo da relação entre variáveis meteorológicas e mortalidade de idosos, para culminar na definição das zonas de risco. Já a segunda etapa faz uma breve avaliação dos dados simulados pelo modelo RegCM4, comparando-os com dados observados por ambas as estações, a fim de caracterizar a confiabilidade dos mesmos. Por fim, o terceiro estágio trata da aplicação das zonas de risco anteriormente estabelecidas nas simulações do clima futuro.

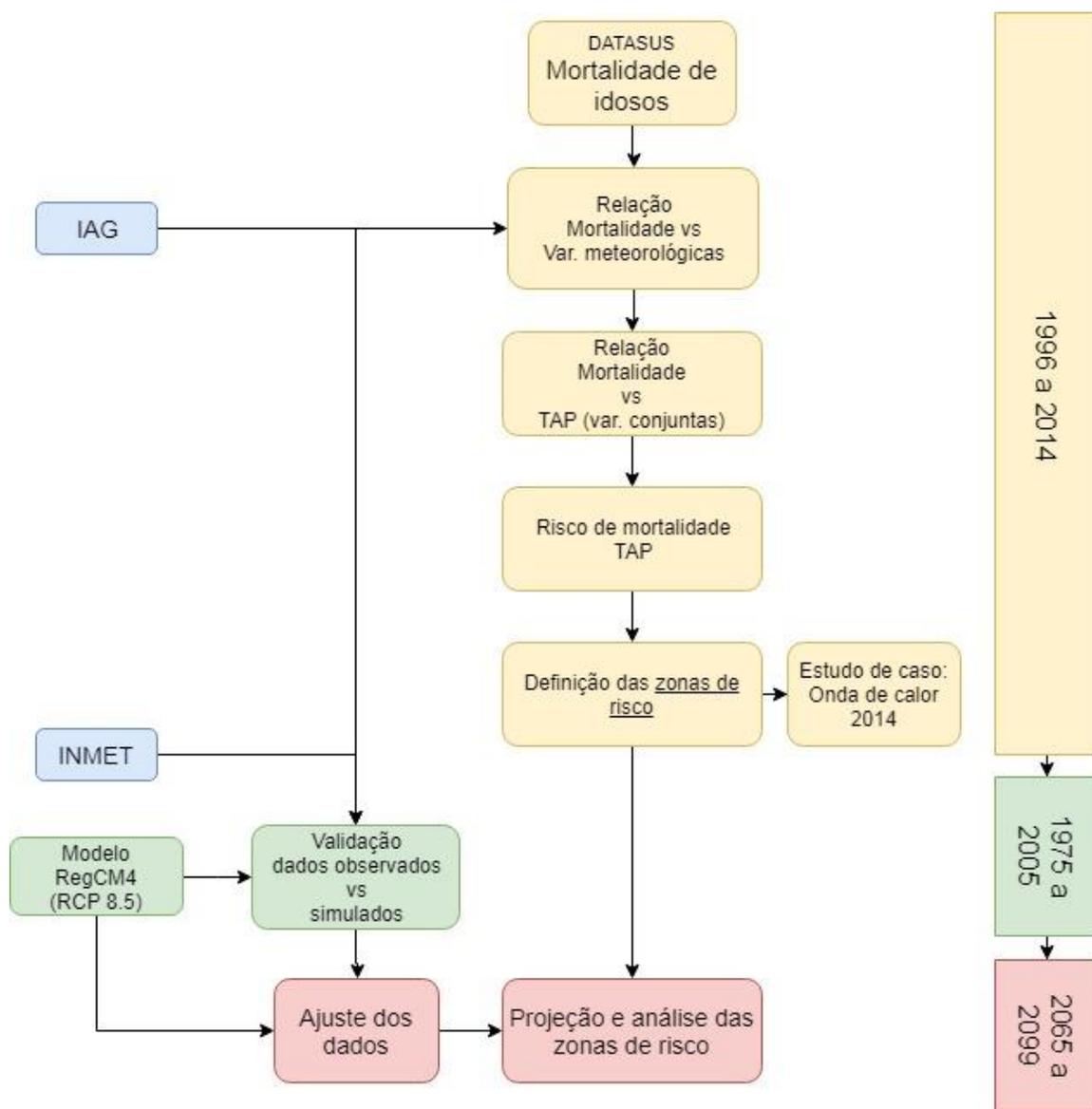


Figura 6 – Diagrama resumindo as etapas do trabalho, com seus respectivos períodos. Em amarelo o processo de elaboração das zonas de risco, em verde o período dos dados simulados que representam o clima presente da RMSP e em vermelho os dados do modelo que refletem o clima futuro e que são utilizados para projeção das zonas de risco.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos e encontra-se dividido em 9 itens. Em 4.1 é feita uma análise descritiva da mortalidade de idosos na RMSP. Já em 4.2 são estabelecidos os limiares de risco de mortalidade para temperatura e umidade específica. O mesmo procedimento é feito em 4.3, porém, relativo ao índice TAP, que fornece a visão conjunta entre estas variáveis. A partir do risco de mortalidade calculado, em 4.4, são definidas as zonas de risco (quente, fria e neutra). Em 4.5 é apresentado um estudo de caso acerca de um evento de onda de calor, ocorrido no começo de 2014, compreendendo a aplicação das zonas anteriormente definidas. A partir do item 4.6 são introduzidas as simulações do modelo RegCM4 na tese, de modo que inicialmente é feita uma comparação destas com dados observados nas estações meteorológicas do IAG e INMET. No passo seguinte, 4.7, as mudanças projetadas para o clima da RMSP são apresentadas. Em 4.8 um ajuste nos dados simulados é feito a partir da soma de vieses mensais, estabelecidos a partir de dados do IAG. Por último, o item 4.9 trata da análise do risco para o clima da RMSP, tanto presente (4.9.1) quanto futuro (4.9.2).

4.1 Mortalidade de idosos na RMSP

Na tabela 4 são apresentadas as porcentagens em relação ao total de óbitos utilizados nessa tese, após filtragem dos dados do DATASUS no qual se mantiveram os registros de óbitos relacionados às letras I e J do CID-10. Por limitação de espaço, apenas doenças com porcentagem superior a 1% são exibidas na tabela. Nota-se que a maior parte das ocorrências se refere ao infarto do miocárdio, caracterizando aproximadamente 20% das entradas, enquanto que em segundo lugar encontra-se a broncopneumonia, com aproximadamente 9%. A terceira maior quantidade de registros é relativa ao AVC.

A mortalidade de idosos ao longo do ano na RMSP apresenta um padrão característico documentado em forma de u ou v invertido, com máximos médios no inverno e mínimos médios no verão, corroborado por diversos autores como Gonçalves et al. (2007), Barnett (2007), Curriero et al. (2002), entre outros. Embora este seja o padrão médio, a magnitude da diferença entre o período de máximos e mínimos pode variar bastante de um ano para o outro. Isto pode ser observado na figura 7, comparando-se, por exemplo, os invernos dos anos de 1997 com 2005. No inverno de 1997 foi registrada uma mortalidade média de 149,2 idosos e temperatura média de 16,7°C. Em compensação, a temperatura média do inverno de 2005 foi de 17,4°C, quando a mortalidade média do período foi de

135,8 idosos. Na mesma figura observam-se picos proeminentes nos invernos dos anos de 1996, 1997, 2009, 2011 e 2013, nos quais foram registradas 214, 226, 208, 229 e 220 mortes no mesmo dia, respectivamente. Nota-se ainda a ocorrência de alguns destes picos em outras estações que não o inverno, como no caso de 2014, durante o verão, quando um episódio de onda de calor foi registrado na RMSP (maiores detalhes no capítulo 4.5 desta tese).

Tabela 4 – Porcentagem das principais doenças consideradas nessa tese em relação ao total de registros de doenças cardiovasculares e respiratórias.

Porcentagem (%)	Código CID-10	Causa
20,3	I219	Infarto agudo do miocárdio não especificado
8,9	J180	Broncopneumonia não especificada
6,3	I64	AVC (não especificado se hemorrágico ou isquêmico)
4,5	J449	Doença pulmonar obstrutiva crônica não especificada
3,9	I619	Hemorragia intracerebral não especificada
3,3	J189	Pneumonia não especificada
3,2	I251	Doença aterosclerótica do curacao
2,9	I500	Insuficiência cardíaca congestive
2,9	I420	Cardiomiopatia dilatada
2,6	I694	Seqüelas de acidente vascular cerebral não especificado como hemorrágico ou isquêmico
2,0	I639	Infarto cerebral não especificado
1,9	I269	Embolia pulmonar sem menção de cor pulmonale agudo
1,9	J440	Doença pulmonar obstrutiva crônica com infecção respiratória aguda do trato respiratório inferior
1,9	I110	Doença cardíaca hipertensiva com insuficiência cardíaca (congestiva)
1,8	I678	Outras doenças cerebrovasculares especificadas
1,7	I255	Miocardiopatia isquêmica
1,7	I10	Hipertensão essencial
1,7	I119	Doença cardíaca hipertensiva sem insuficiência cardíaca (congestiva)
1,6	I248	Outras formas de doença isquêmica aguda do coração
1,2	I509	Insuficiência cardíaca não especificada
1,1	I609	Hemorragia subaracnóide não especificada

A componente climática associada aos óbitos de idosos na RMSP é observada na figura 8,

relativa às médias mensais de temperatura e mortalidade (de 1996 a 2014), agrupadas sazonalmente. Nela se identifica uma relação oposta entre as variáveis, no sentido em que quanto maior uma, menor a outra. Matematicamente isso se reflete no coeficiente de correlação calculado no valor de $-0,7$. Os mecanismos físicos ou ambientais que explicam essa variação interanual, no entanto, devem ser analisados em futuros estudos.

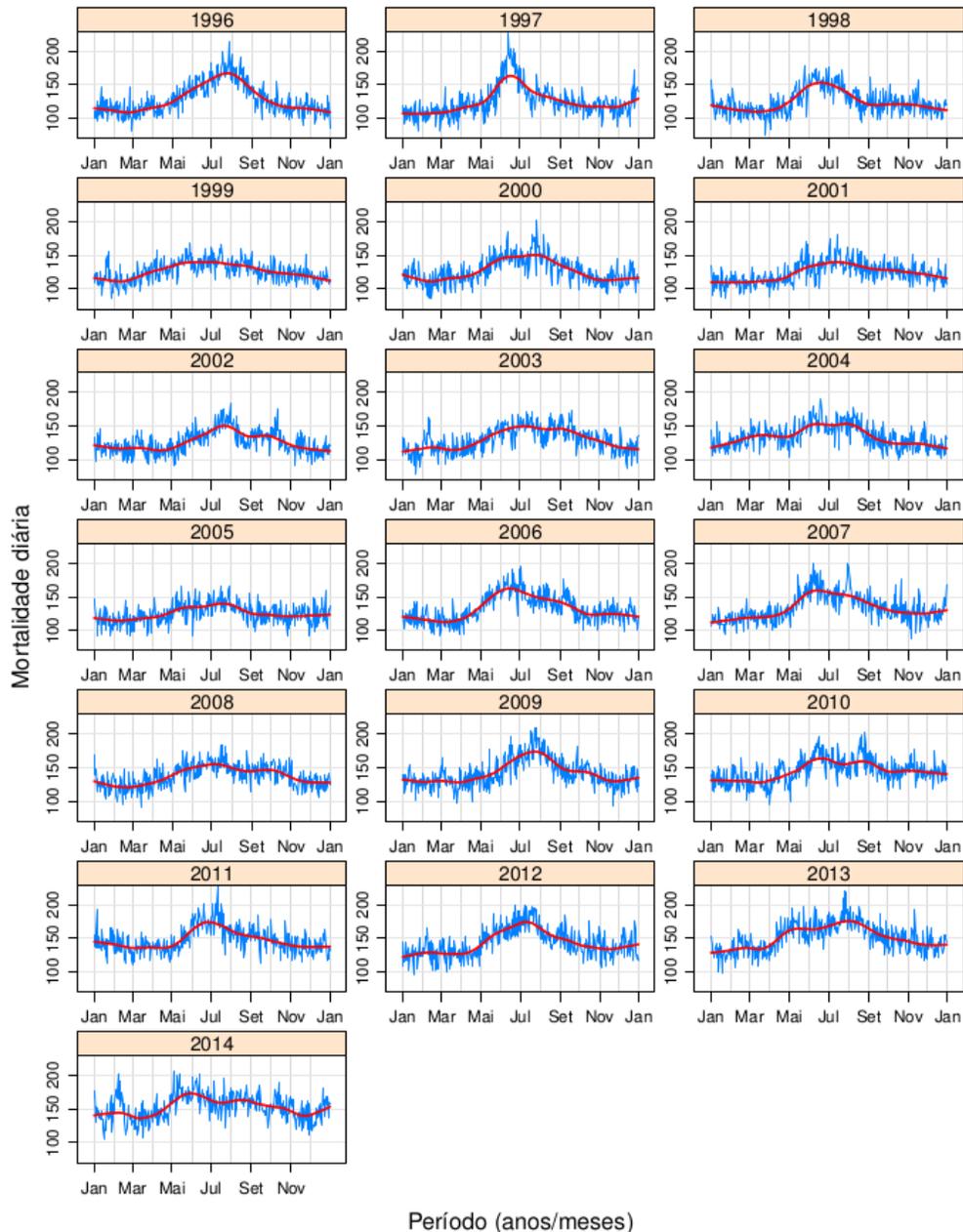


Figura 7 – Ciclo anual da mortalidade total diária ano a ano para idosos na RMSP, ocasionada por problemas respiratórios ou do sistema cardiovascular. A linha vermelha representa a suavização através de regressão local¹⁷.

¹⁷ Através do comando *loess()* da linguagem R.

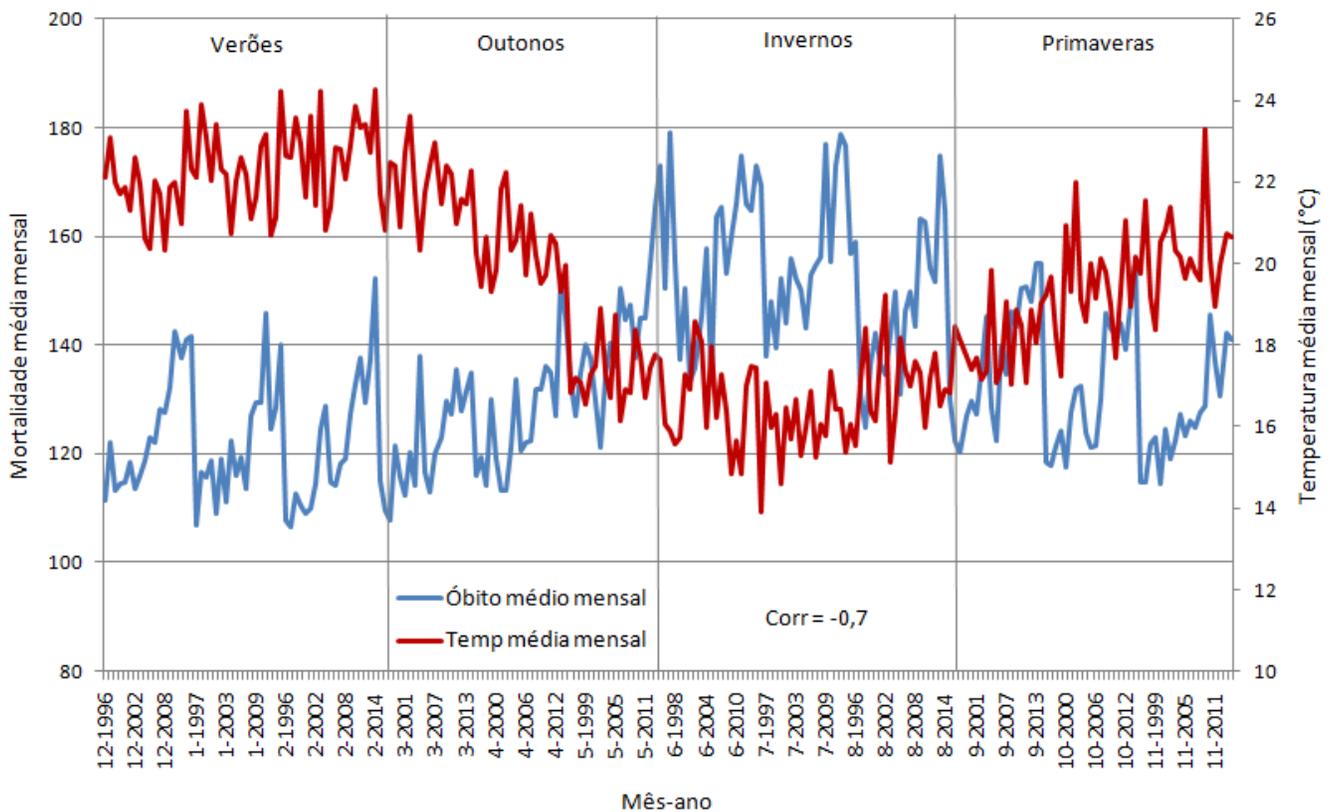


Figura 8 – Médias mensais da mortalidade de idosos e temperatura na RMSP, de 1996 a 2014, agrupadas sazonalmente, onde é possível notar uma relação oposta entre elas.

A relação entre mortalidade diária e variáveis meteorológicas é evidenciada nos diagramas de dispersão das figuras 9 a 13, que englobam 5 possíveis combinações: padrão médio diário, quente e úmido, quente e seco, frio e úmido e frio e seco, respectivamente. Em todos os diagramas é possível notar que os maiores valores de mortalidade estão concentrados no canto inferior esquerdo (pontos amarelo-avermelhados), correspondentes às menores temperaturas e umidade, enquanto que no centro e canto superior direito encontram-se os menores valores (pontos azulados). Embora este seja o padrão médio, observam-se alguns pontos amarelo-avermelhados no canto superior direito, indicando dias de mortalidade elevada em altas temperaturas e umidade do ar. Na figura 9 é possível observar ainda que a região de menor mortalidade (assinalada pela seta) está compreendida aproximadamente nos dias com umidade específica média diária em torno dos 15g/kg e a temperatura média diária por volta de 20°C, bem como quando a umidade está próxima dos 10g/kg e a temperatura 25°C.

Comparando as figuras 10 a 13, referentes aos diagramas para os padrões de dias quentes, frios, secos e úmidos, notam-se que os diagramas relacionados aos dias quentes tendem a ser mais dispersos que aqueles do padrão frio. Isso se deve ao fato de que a temperatura máxima tende a variar mais do

que a temperatura mínima, conforme visto nas figuras 3 (a) e (b).

Relativo ao padrão frio a região de menor mortalidade fica melhor caracterizada no cenário úmido, ilustrado na figura 12, localizada entre as temperaturas mínimas de 15°C e 20°C e entre a umidade específica mínima de 15g/kg e 20g/kg. Já em relação ao padrão quente, pelo fato dos pontos estarem mais dispersos é possível notar que a faixa de baixa mortalidade tem inclinação negativa, representada pelas linhas tracejadas nas figuras 10 e 11. Esta faixa se inicia com temperatura máxima entre 15°C e 25°C e alta umidade específica (tanto máxima quanto mínima), deslocando-se no sentido da diagonal inferior direita, para as regiões de maiores temperaturas e menores umidades (temperatura máxima entre 30°C a 35°C).

De modo geral, esses diagramas de dispersão apontam que a mortalidade é maior para as combinações de baixas temperaturas e baixa umidade específica, bem como para as altas temperaturas e alta umidade específica. A maior quantidade de óbitos é observada obviamente nas baixas temperaturas, que em grande maioria são registradas durante o inverno.

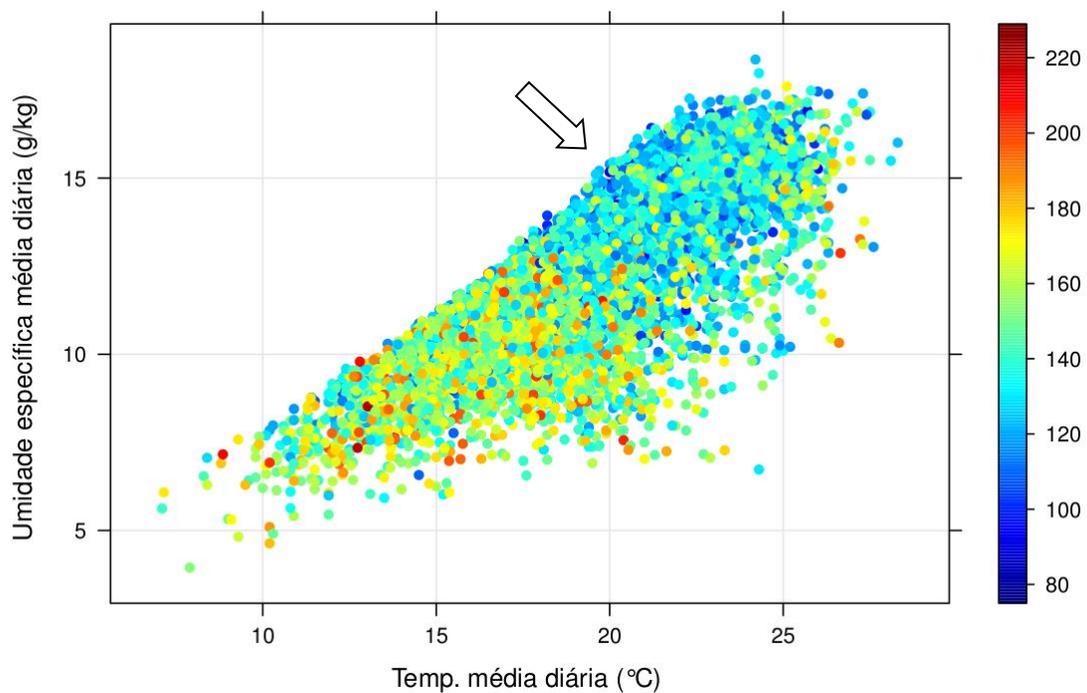


Figura 9 – Diagrama de dispersão da mortalidade diária de idosos para o padrão médio diário das variáveis temperatura e umidade específica. A escala de cores indica a quantidade de óbitos para cada dia.

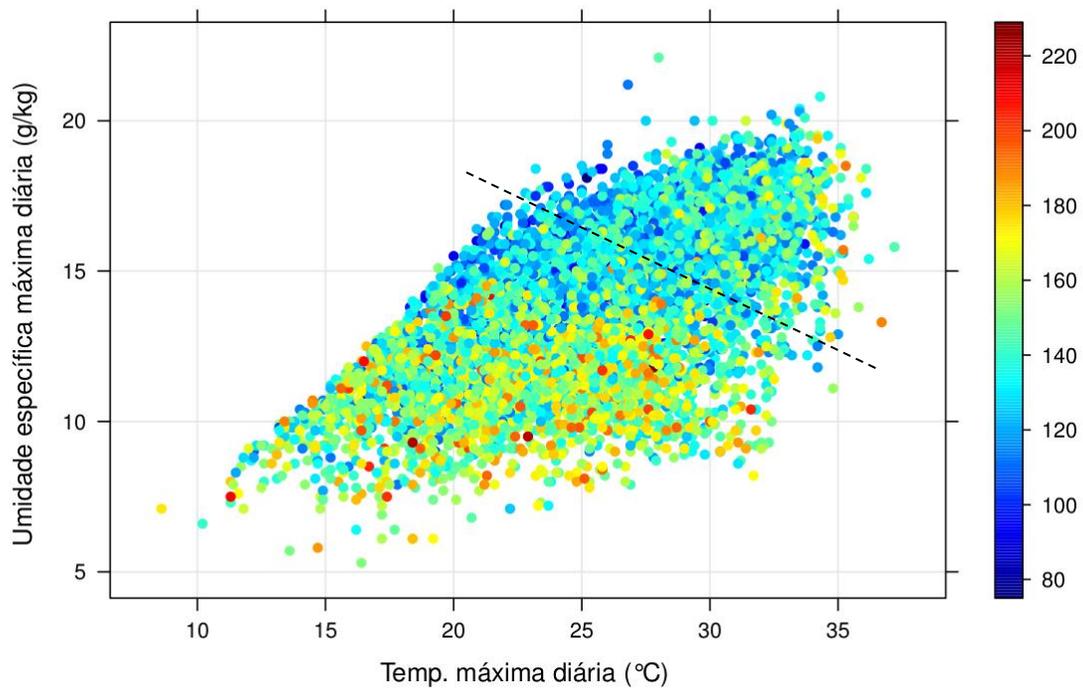


Figura 10 – Diagrama de dispersão da mortalidade diária de idosos para o padrão quente e úmido das variáveis temperatura e umidade específica. A escala de cores indica a quantidade de óbitos para cada dia, enquanto que a linha tracejada ilustra a faixa de menor mortalidade.

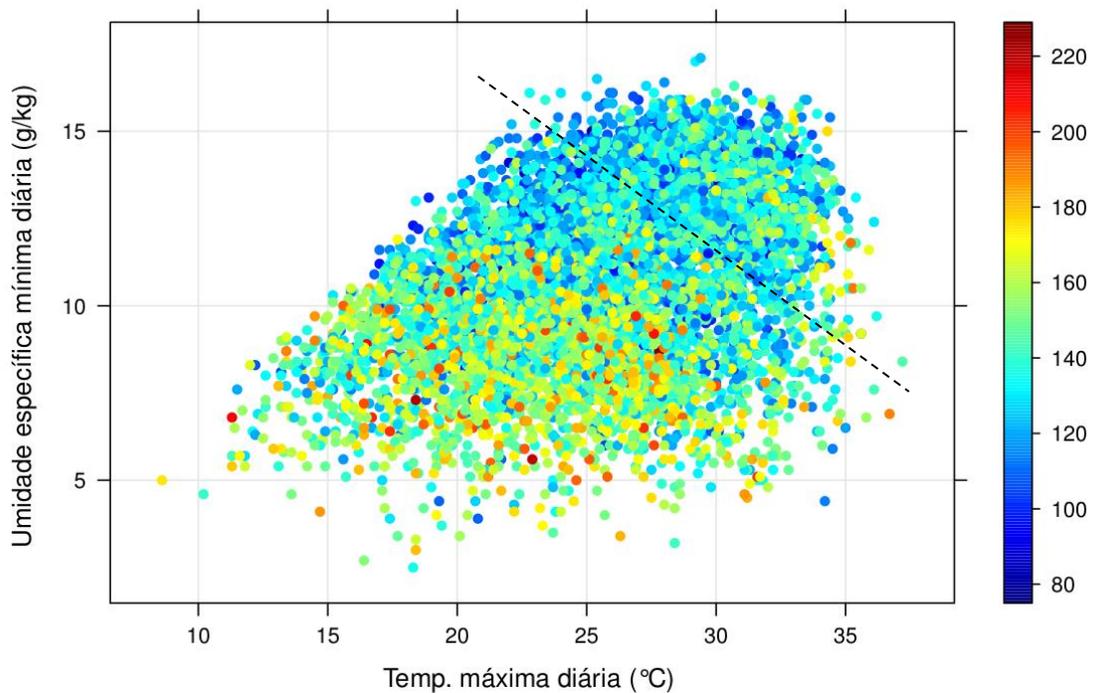


Figura 11 – Diagrama de dispersão da mortalidade diária de idosos para o padrão quente e seco das variáveis temperatura e umidade específica. A escala de cores indica a quantidade de óbitos para cada dia, enquanto que a linha tracejada ilustra a faixa de menor mortalidade.

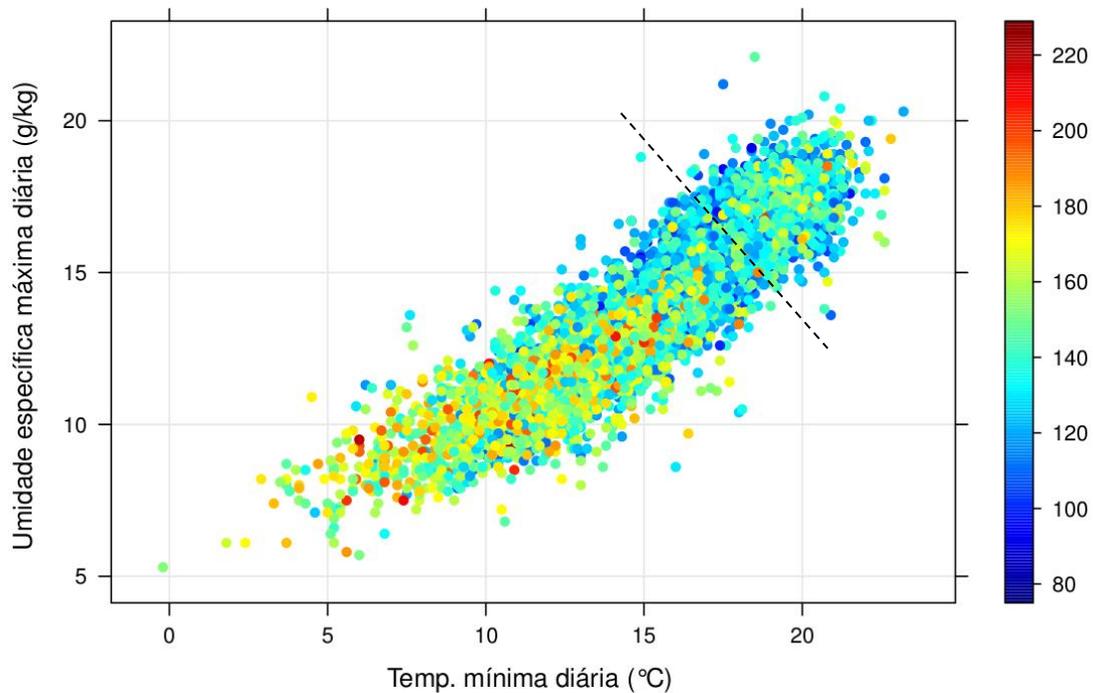


Figura 12 – Diagrama de dispersão da mortalidade diária de idosos para o padrão frio e úmido das variáveis temperatura e umidade específica. A escala de cores indica a quantidade de óbitos para cada dia, enquanto que a linha tracejada ilustra a faixa de menor mortalidade.

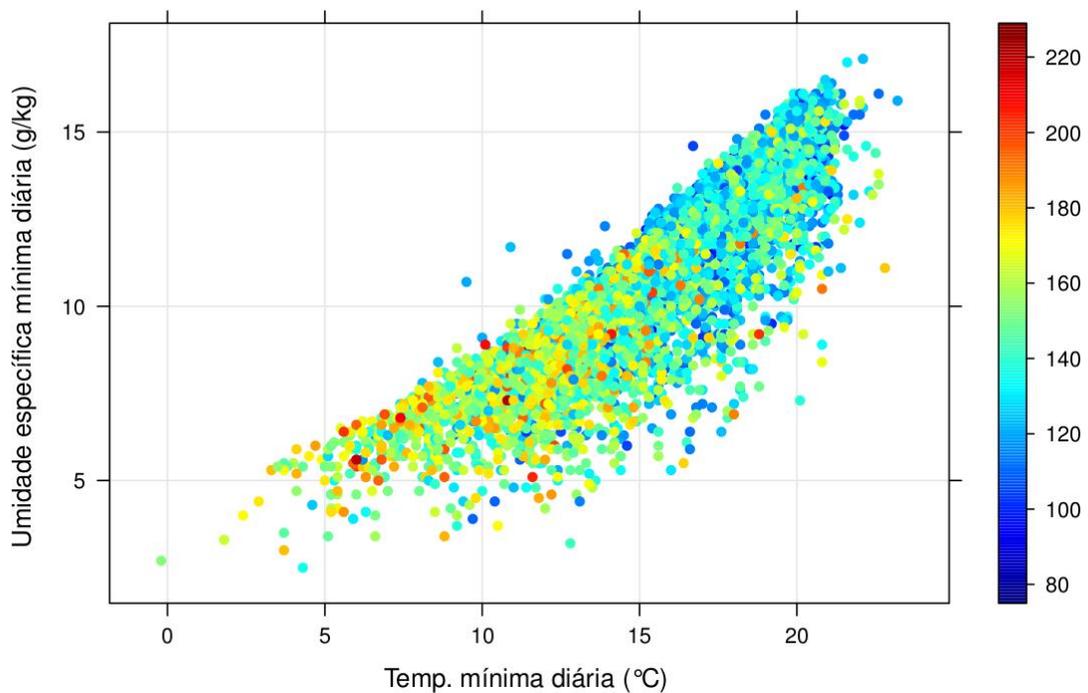


Figura 13 – Diagrama de dispersão da mortalidade diária de idosos para o padrão frio e seco das variáveis temperatura e umidade específica. A escala de cores indica a quantidade de óbitos para cada dia.

4.2 Limiares de risco entre variáveis meteorológicas e mortalidade na RMSP

A primeira etapa na definição dos limiares de risco de maior mortalidade associado a variáveis meteorológicas envolve a distribuição destas em bins, ou intervalos fixos. Nas figuras 14 (a), (b) e (c) encontram-se as distribuições em intervalos de 1°C das temperaturas média, máxima e mínima da estação do IAG, de 1996 a 2014. Observa-se que os intervalos estão distribuídos entre os bins de 7°C e 28°C na figura 14 (a), entre 9°C e 37°C na figura 14 (b) e entre 2°C e 24°C na figura 14 (c), correspondentes às temperaturas média, máxima e mínima, respectivamente.

De forma análoga à temperatura, as figuras 15 (a), (b) e (c) apresentam as distribuições para as umidades específicas média, máxima e mínima em intervalos de 1g/kg . Na figura 15 (a), referente à umidade específica média diária, a distribuição ocorre entre os bins de 4g/kg e 18g/kg . Já na figura 15 (b), que contabiliza a umidade específica máxima diária, a distribuição ocorre entre 5g/kg e 22g/kg . Por fim, a distribuição da umidade específica mínima diária se dá entre os bins de 2g/kg e 17g/kg .

É possível notar pelas distribuições de temperatura que o intervalo no qual a temperatura máxima varia é maior do que o da temperatura mínima. Fisicamente esse fato está associado aos mecanismos que determinam o quão baixo será a temperatura mínima e o quão alto será a máxima. No caso da temperatura mínima, a magnitude é influenciada por fatores como o resfriamento noturno radiativo da superfície, advecção de ar frio, cobertura de nuvens, etc. No tocante à temperatura máxima, o resfriamento é substituído pelo aquecimento radiativo da atmosfera e da superfície, além de também receber influência dos fatores citados anteriormente (nuvens, advecção, etc).

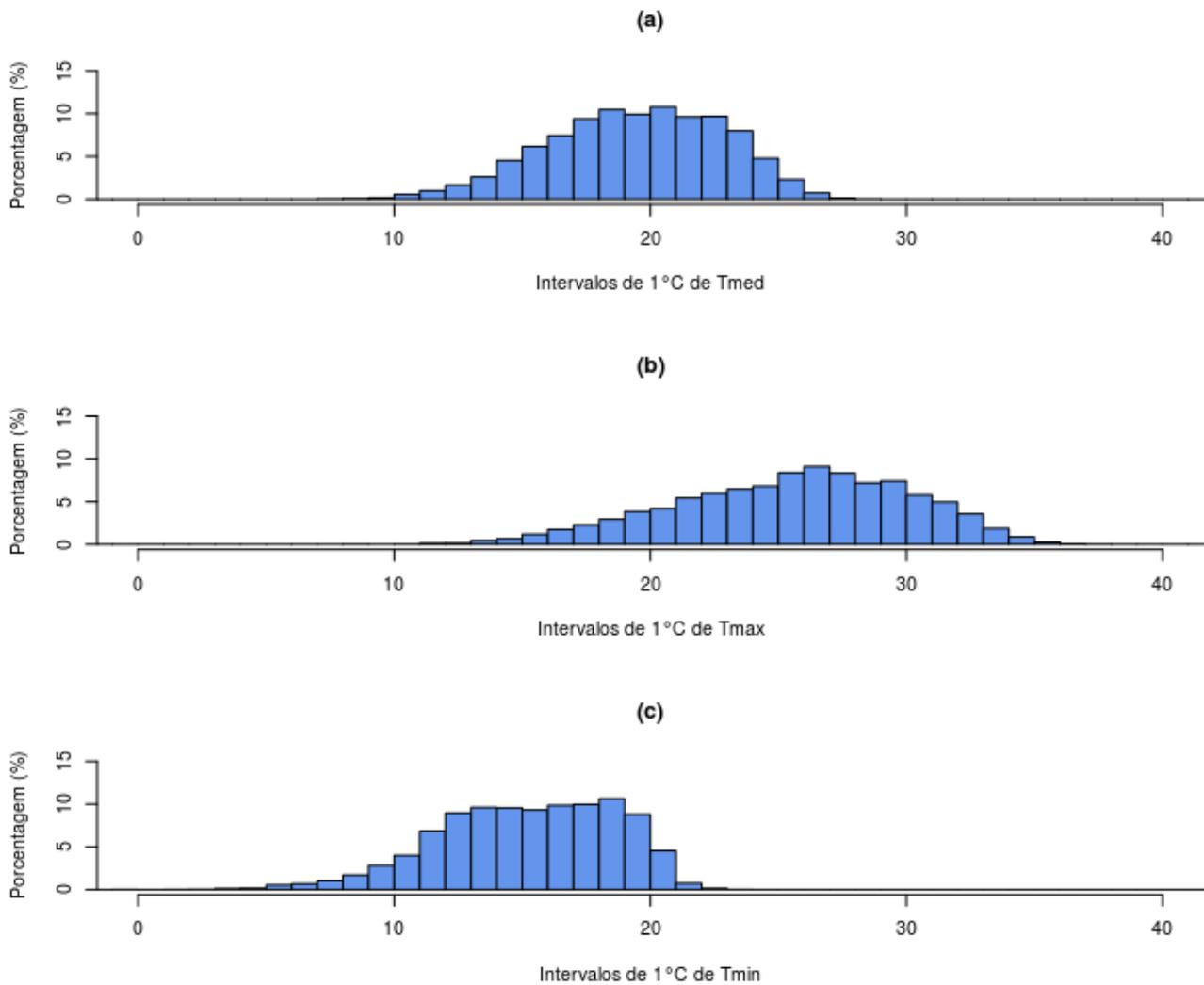


Figura 14 – Distribuições em porcentagem das temperaturas média diária (a), máxima (b) e mínima (c) em intervalos de 1°C, de 1996 a 2014 para a RMSP.

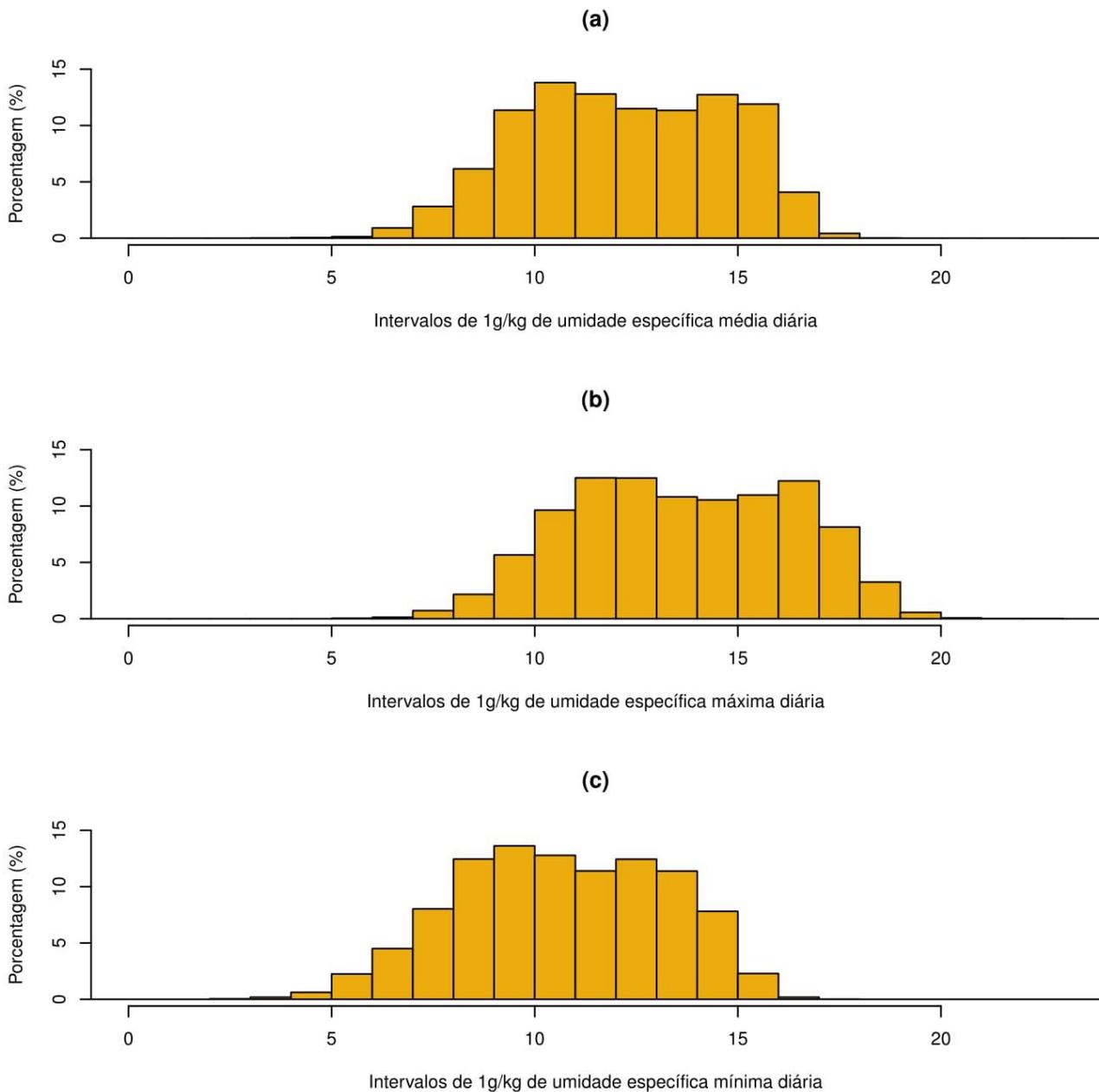


Figura 15 – Distribuições em porcentagem das umidades específica média diária (a), máxima (b) e mínima (c) em intervalos de 1g/kg, de 1996 a 2014 para a RMSP.

O passo seguinte na elaboração dos limiares de risco é a contabilização do excesso de óbitos por intervalo das variáveis, sendo as figuras 16, 17 e 18 respectivamente relativas às temperaturas média, máxima e mínima, enquanto as figuras 19, 20 e 21 representam nesta ordem a distribuição para as umidades específicas média, máxima e mínima.

Tem-se então na figura 16, referente aos bins de temperatura média, duas áreas com excesso de

mortalidade nas laterais, associadas aos dias frios e aos dias quentes. O excesso de mortalidade em relação ao frio compreende os bins de 7°C a 16°C, com pico em 14°C, enquanto que o excesso associado ao calor se concentra entre os bins de 24°C a 28°C, com pico em 25°C. Os bins centrais, de 17°C a 23°C, representam uma região de déficit de mortalidade, ou seja, a soma do número de óbitos nestes bins ficou abaixo do valor esperado dado pela média móvel. É importante ressaltar que os picos de 14°C e 25°C anteriormente mencionados não necessariamente representam o bin com maior risco de mortalidade e sim os bins no qual o valor acumulado do déficit ou excesso é maior dada a quantidade de ocorrências desse bin. Ou seja, o total dos excessos é influenciado pela quantidade em que cada um dos bins aparece (por esse motivo a etapa seguinte se faz necessária na caracterização do risco).

Outra interpretação possível para esses gráficos é a de que eles dão a noção qualitativa a respeito dos bins no qual se registra o excesso ou déficit de mortalidade. A avaliação quantitativa é determinada posteriormente pelo risco calculado em cada um destes bins.

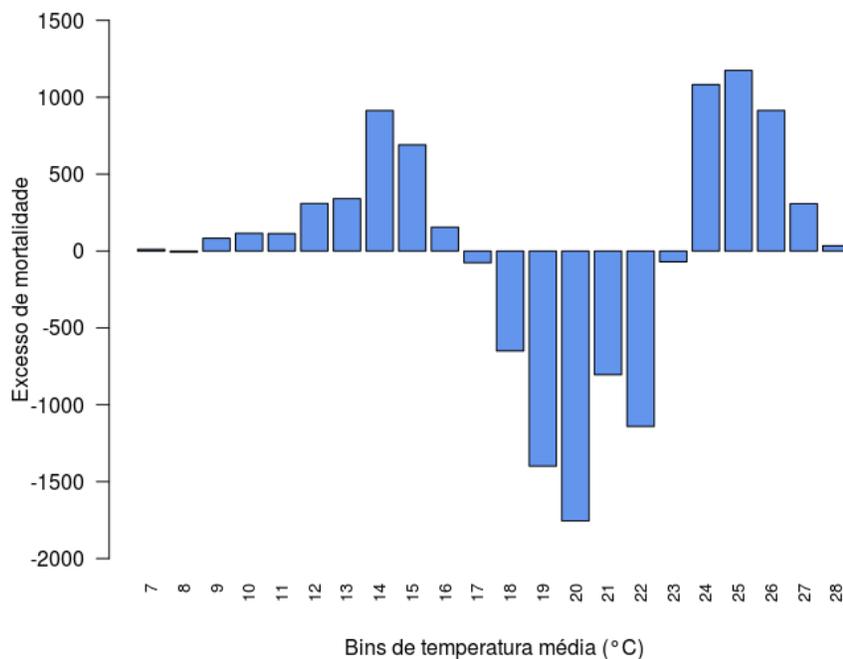


Figura 16 – Excesso de mortalidade em idosos da RMSP por bins de temperatura média diária (°C), de 1996 a 2014.

É interessante notar que a contabilidade dos excessos relativa à temperatura máxima, figura 17, não apresenta o padrão claro de excessos nos dois extremos e déficit no centro. De fato, apenas nos bins mais altos, entre 31°C e 37°C, é que o excesso é mais evidente. Por outro lado, também é possível

observar um déficit relevante nos bins de 22°C, 25°C, 26°C e 28°C, associado a essa região central negativa, embora de forma menos clara.

De modo semelhante à figura 16, a figura 18 relativa aos bins temperatura mínima apresenta um padrão bastante evidente de excesso nos bins extremos e déficit nos centrais. Os excessos são registrados nos bins menores ou iguais a 16°C e maiores ou iguais a 24°C, sendo que entre eles encontra-se a região negativa de mortalidade.

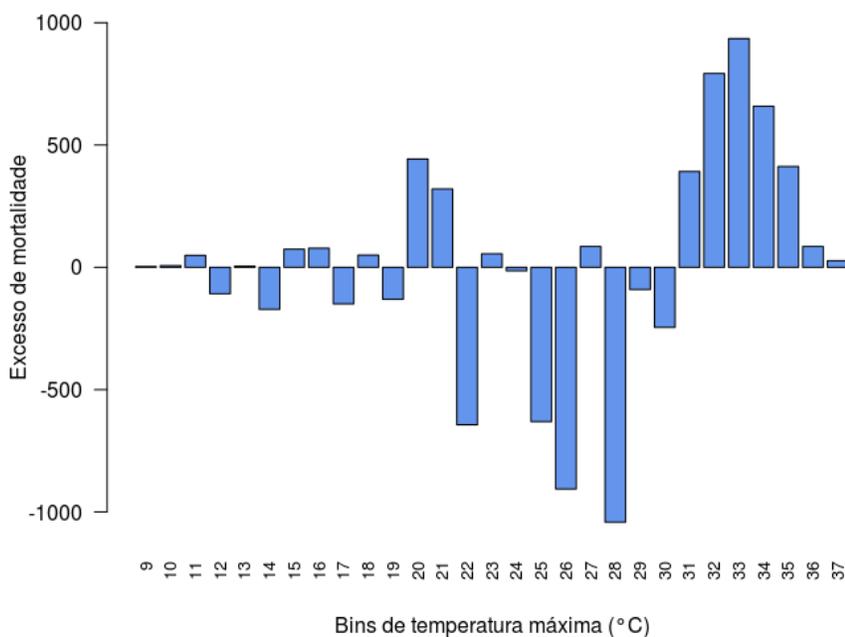


Figura 17 – Excesso de mortalidade em idosos da RMSP por bins de temperatura máxima diária (°C), de 1996 a 2014.

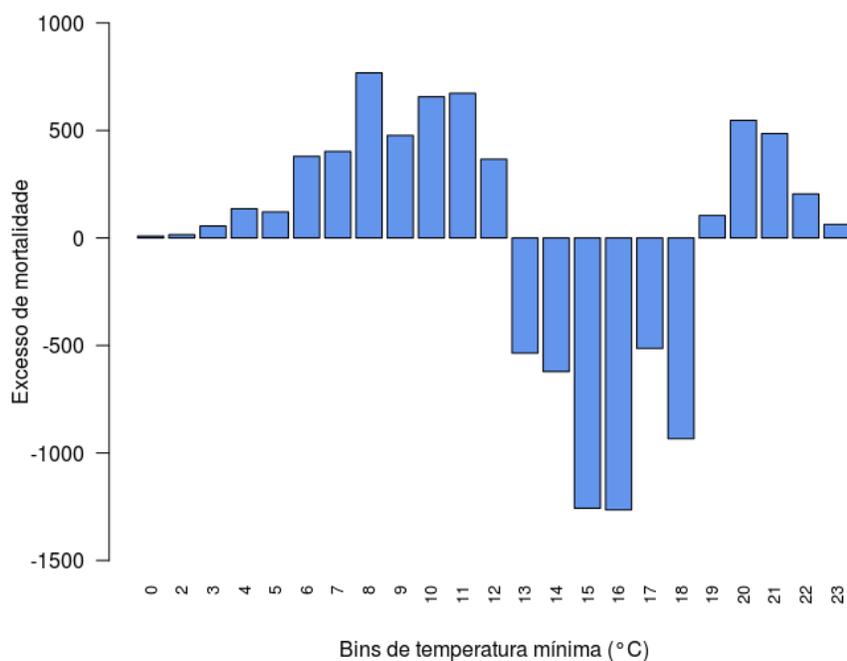


Figura 18 – Excesso de mortalidade em idosos da RMSP por bins de temperatura mínima diária (°C), de 1996 a 2014.

A mesma contabilização do excesso de mortalidade em bins é feita em consideração às umidades específicas média, máxima e mínima diárias, nas figuras 19, 20 e 21, respectivamente. As três figuras são bastante similares de forma a ser possível observar em todas o padrão dos excessos nas laterais e déficit no centro.

Na figura 19 o excesso de mortalidade associado aos intervalos de umidade específica média diária é verificado nos bins inferiores a 10g/kg ou superiores que 15g/kg, sendo que entre esses valores encontram-se bins de déficit. Já na figura 20, referente à umidade específica máxima diária o excesso é registrado nos bins menores que 11g/kg e maiores que 17g/kg. No que diz respeito à umidade específica mínima diária, o excesso retratado na figura 21 é observado nos intervalos inferiores à 10g/kg e superiores à 14g/kg.

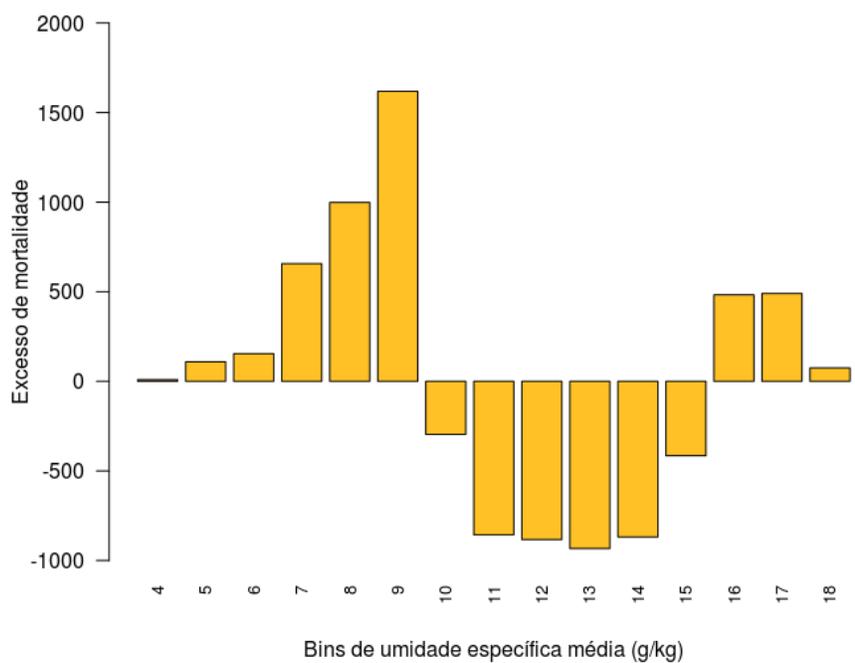


Figura 19 – Excesso de mortalidade em idosos da RMSP por bins de umidade específica média diária (g/kg), de 1996 a 2014.

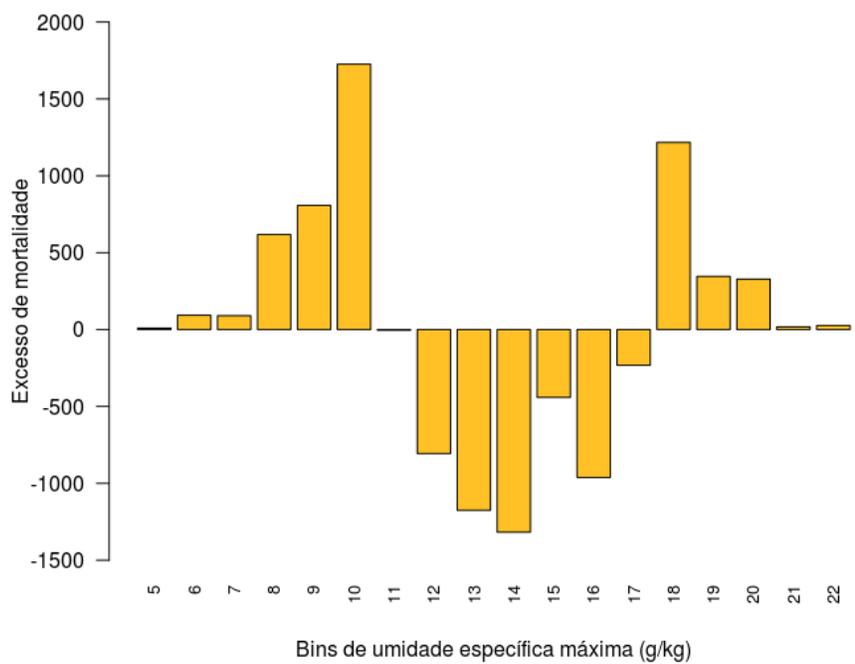


Figura 20 – Excesso de mortalidade em idosos da RMSP por bins de umidade específica máxima diária (g/kg), de 1996 a 2014.

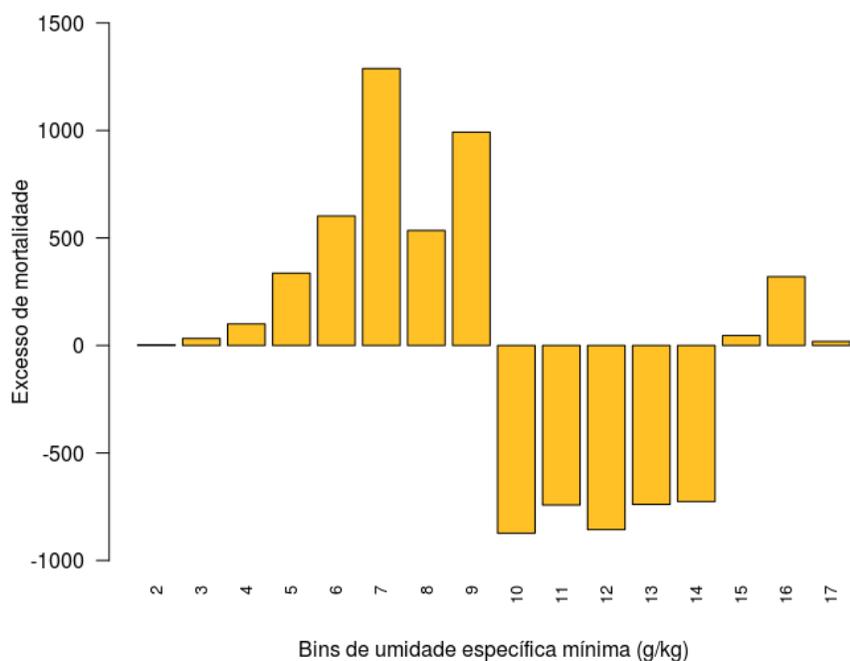


Figura 21 – Excesso de mortalidade em idosos da RMSP por bins de umidade específica mínima diária (g/kg), de 1996 a 2014.

Todo o pré-processamento dos dados meteorológicos e de mortalidade, expresso nas figuras anteriores tem como intuito a geração do risco de mortalidade (excesso de mortes por dia) das figuras 22 (a) e (b), relacionadas à temperatura em suas três categorias: média, máxima e mínima diária (preto, vermelho e azul, respectivamente). Na figura 22 (a) é apresentada a linha de risco (sem tratamento), caracterizada por oscilações que estão relacionadas ao tamanho da amostra de alguns bins, bem como decorrem da não consideração de fatores que podem interferir na mortalidade de idosos, como poluição atmosférica, por exemplo. Em outras palavras, intervalos de pouca ocorrência podem apresentar um valor de excesso ou déficit diferente do que se esperaria em relação à tendência dos dados. Já na figura 22 (b) tem-se o mesmo risco, porém suavizado por *splines*, elaborado para facilitar as análises. Para tornar a visualização mais fácil, o intervalo de confiança da curva de risco é apresentado somente na figura 26. Além disso, os limiares descritos ao longo do texto encontram-se resumidos na tabela 5.

Na figura 22 (b) é possível observar que o risco é similar para as três temperaturas, com um deslocamento (*shift*) entre as curvas, sendo a mais à esquerda relativa à temperatura mínima, central à média e direita à máxima. Em relação às altas temperaturas, observa-se que o risco aumenta a partir dos bins de 31°C, 24°C e 19°C, respectivamente para temperaturas máxima, média e mínima. Do lado

oposto, no que diz respeito ao frio, esse incremento ocorre nos bins inferiores à 13°C, 17°C e 12°C, para as mesmas temperaturas. Nota-se que a curva de risco da temperatura máxima apresenta um “alargamento” da região de risco negativo, justamente pela existência dos bins negativos de 13°C e 14°C, que ajudam a moldar e curva suavizada por *splines*.

É interessante notar ainda na figura 22 (bem como na 23) que o padrão do risco é diferente para frio e calor, de forma que o incremento é mais abrupto no calor e mais gradual no frio. Esse resultado corrobora o comportamento do risco relativo encontrado no trabalho de Pinheiro et al. (2014), muito embora tratem-se de metodologias completamente diferentes. Mais detalhes acerca dessa similaridade são dados no item 4.4.

Os riscos demonstrados na figura 23 (a) e (b) estão relacionados às umidades específicas. De modo semelhante à temperatura, o risco é maior nos extremos. O aumento do risco é mais abrupto nas altas umidades do que nas baixas. No que diz respeito aos bins, o risco aumenta nos casos em que a umidade específica máxima, média e mínima é menor que 11g/kg e 10g/kg (mesmo valor umidade específica média e mínima) ou maior que 17g/kg, 15g/kg e 14g/kg, respectivamente.

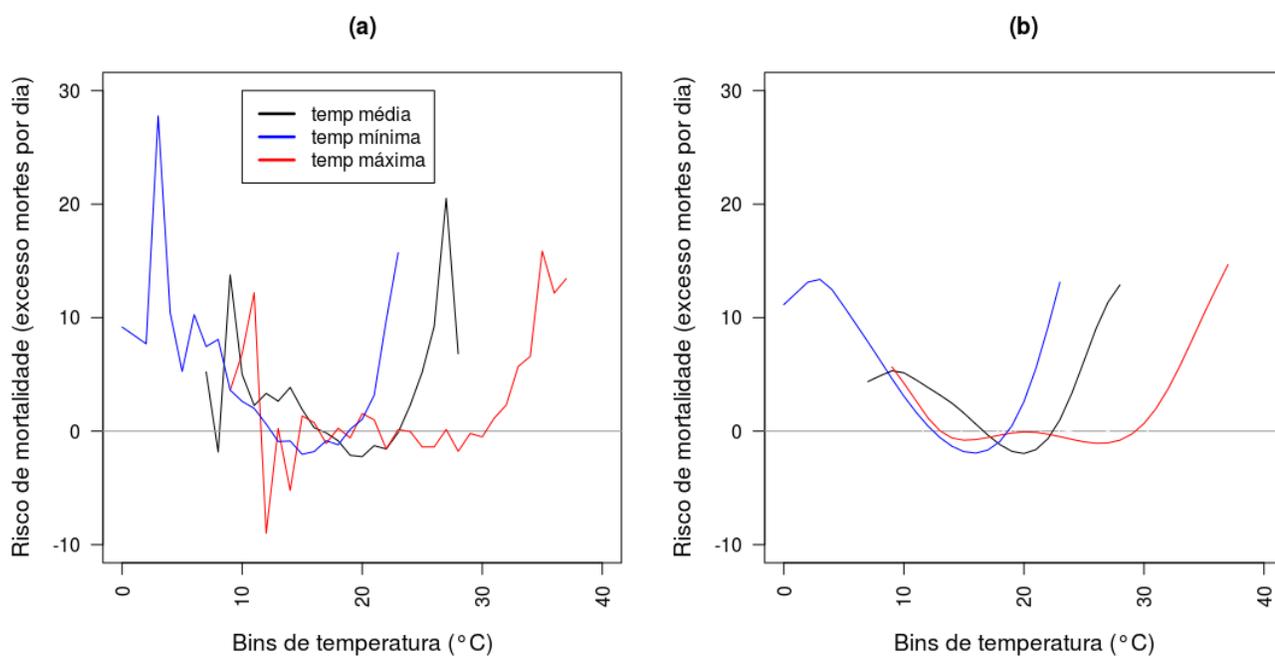


Figura 22 – Em (a) o risco de mortalidade de idosos (excesso de mortes médias por dia) para as temperaturas (°C) média, máxima e mínima e em (b) esse mesmo risco suavizado através de *splines*.

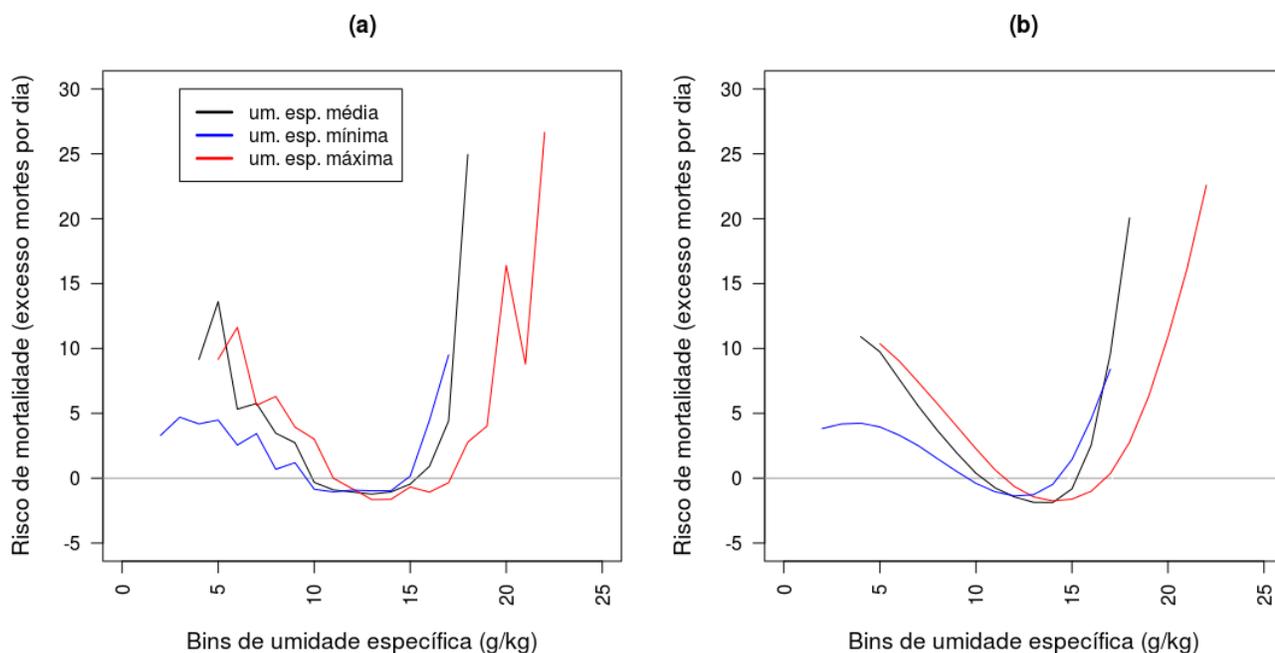


Figura 23 – Em (a) o risco de mortalidade de idosos (excesso de mortes médias por dia) para as umidades específicas (g/kg) média, máxima e mínima e em (b) esse mesmo risco suavizado através de *splines*.

Para facilitar a leitura, na tabela 5 são compilados os limiares de risco descritos anteriormente, bem como os que se seguem, referentes ao TAP para os cenários médio diário, quente e úmido, quente e seco, frio e úmido e frio e seco.

4.3 Variáveis integradas: Limiares de risco para o índice TAP e mortalidade na RMSP

A estimativa do risco integrada entre temperatura e umidade é abordada a partir deste ponto através do índice de conforto térmico TAP. O uso do índice permite ainda que se criem diferentes cenários para análise, sendo eles: quente-úmido (TAP-QU), quente-seco (TAP-QS), frio-úmido (TAP-FU) e frio-seco (TAP-FS), além do cenário médio diário. É importante salientar que na construção desses cenários é utilizada a umidade relativa ao invés da específica, pois esta faz parte da própria definição matemática do TAP.

A elaboração do risco reproduzido na figura 24 (a) e (b) seguiu a mesma metodologia usada no cálculo do risco para as variáveis individuais. Assim sendo, também foram geradas figuras para a porcentagem de ocorrência de cada bin, bem como do excesso/déficit total de mortes ao longo do

período. Essas figuras são encontradas nos anexos 1A ao 6A, no final da tese.

Tabela 5 – Limiares de risco de mortalidade para temperatura (média diária, máxima e mínima), umidade específica (média diária, máxima e mínima) e TAP (médio diário, quente e úmido, quente e seco, frio e úmido, frio e seco).

Variável/índice	Limiar inferior	Neutro (déficit de mortalidade)	Limiar superior
Temp média diária (°C)	← 17	18 ↔ 23	24 →
Temp máxima (°C)	← 13	14 ↔ 30	31 →
Temp mínima (°C)	← 12	13 ↔ 18	19 →
Umidade esp. média diária (g/kg)	← 09	10 ↔ 15	16 →
Umidade esp. máxima (g/kg)	← 10	11 ↔ 17	18 →
Umidade esp. mínima (g/kg)	← 09	10 ↔ 14	15 →
TAP médio diário (°C)	← 18	19 ↔ 25	26 →
TAP quente e úmido (°C)	← 15	16 ↔ 34	35 →
TAP quente e seco (°C)	← 15	16 ↔ 30	31 →
TAP frio e úmido (°C)	← 14	15 ↔ 22	23 →
TAP frio e seco (°C)	← 12	13 ↔ 22	23 →

A figura 24 (a) e (b) mostra o risco de mortalidade de idosos na RMSP para os diferentes cenários de TAP associados às altas temperaturas. Nota-se que em relação aos valores mínimos (lado esquerdo) tanto o TAP-QU quanto o TAP-QS apresentam risco parecido, positivo a partir de 16°C. Todavia, nos bins maiores (lado direito do gráfico) nota-se uma distinção entre os cenários úmido e seco, sendo que o risco associado ao primeiro ocorre em bins mais elevados do que no segundo. Isto significa que, em um cenário hipotético de mesma temperatura máxima, quanto maior a umidade, maior o bin a partir do qual o risco de mortalidade aumenta. Neste caso específico, o risco é positivo a partir do bin de 34°C e 30°C para os cenários úmido e seco, respectivamente, ou seja, apresentam uma diferença de 4°C entre eles.

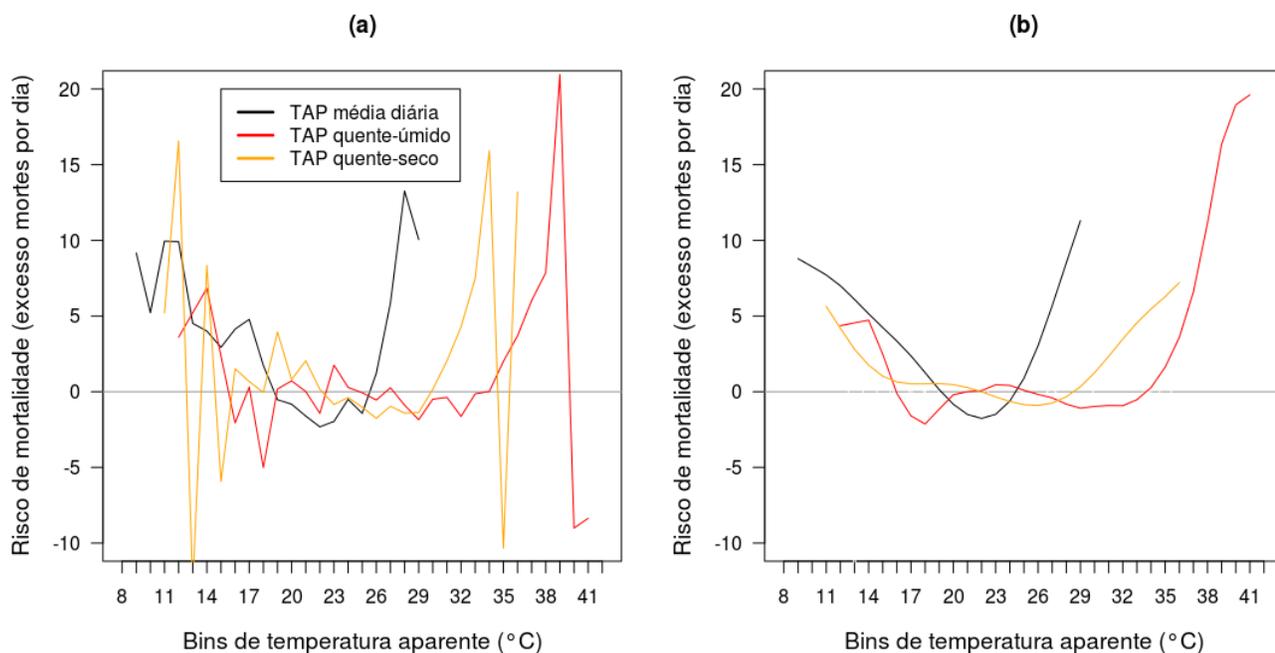


Figura 24 – Em (a) o risco de mortalidade de idosos (excesso de mortes médias por dia) para os cenários média diária (linha preta), quente-úmido (vermelha) e quente-seco (laranja) de TAP ($^{\circ}\text{C}$) e em (b) esse mesmo risco suavizado através de *splines*.

A mesma análise é feita na figura 25 (a) e (b), referente ao TAP associado ao frio, também para os cenários úmido e seco. Nota-se que a diferença entre os riscos é mais acentuada nos bins menores, do que nos maiores. Na figura 25 (b) é possível notar que em situações de baixa temperatura o menor conteúdo de umidade (cenário seco) faz com que o risco seja positivo em bins menores, ocorrendo a partir do intervalo de 13°C . Já para o cenário úmido, esse risco passa a ser verificado a partir de 15°C , existindo uma diferença portanto de 2°C . No lado oposto, em situações de temperaturas elevadas o risco é positivo a partir do bin de 22°C , em ambos os cenários, úmido e seco.

Observa-se também a caracterização mais abrupta do risco para os valores mais altos de TAP (incremento quase exponencial) e mais gradual (aproximadamente linear) nos bins mais baixos, comportamento este mencionado em Son et al. (2016), que aponta o efeito indireto do frio (i.e., aumento dos casos de gripe, doenças respiratórias, etc) como fator determinante de diferenciação.

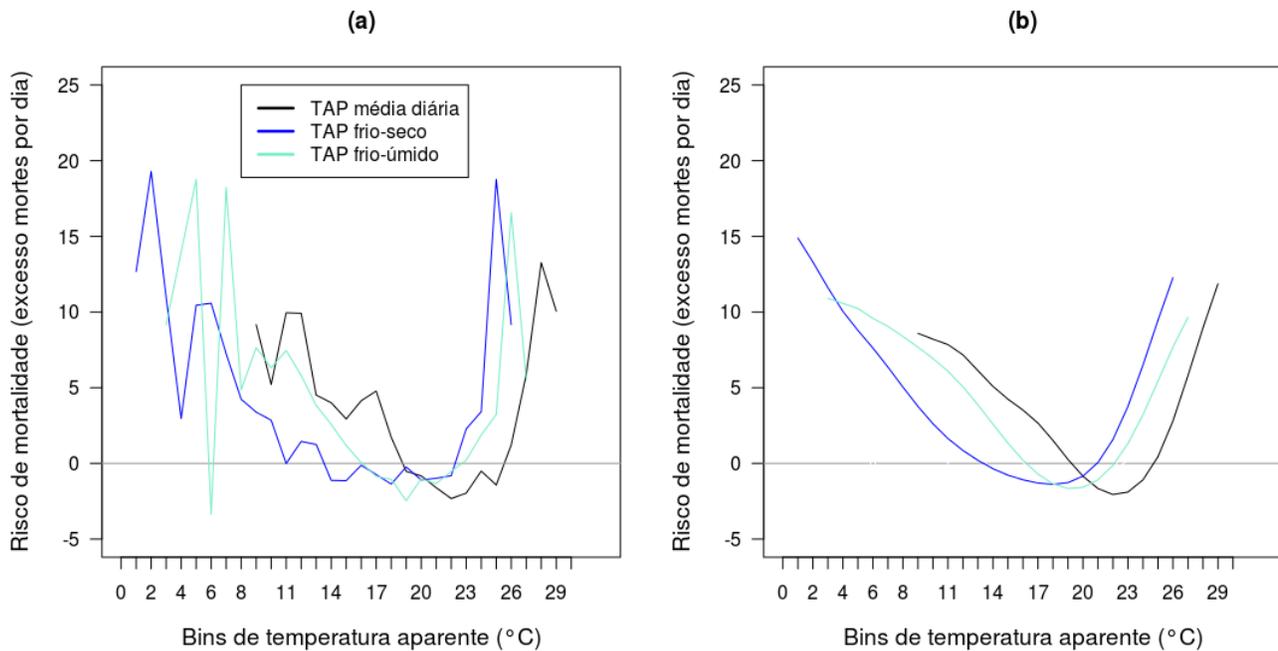


Figura 25 – Em (a) o risco de mortalidade de idosos (excesso de mortes médias por dia) para os cenários média diária (linha preta), quente-úmido (vermelha) e quente-seco (laranja) de TAP ($^{\circ}\text{C}$) e em (b) esse mesmo risco suavizado através de *splines*.

4.4 Zonas de risco

Uma vez obtido o risco para cada bin é proposto o agrupamento em três zonas relacionadas à diferentes perfis térmicos: frio, neutro e quente. A figura 26, que é baseada no risco suavizado do TAP médio diário, mostra que a região considerada neutra está compreendida entre os bins de 19°C e 25°C , já a região de risco frio é relativa aos bins inferiores à 19°C . Do lado oposto, a zona de risco quente é caracterizada pelos bins superiores à 25°C .

Embora as definições de risco possam ser diferentes, a metodologia de agrupamento por zonas é passível de ser aplicada em outros trabalhos, com o benefício de possibilitar uma análise mais robusta desta variável. Exemplos desse agrupamento são dados nas figuras 27 de Pinheiro (2013) e 28 de Son et al. (2016). Uma vez respeitadas diferenças conceituais existentes entre as definições de risco adotadas por diferentes autores, é possível que no âmbito das mudanças climáticas as mesmas análises apresentadas nesta tese sejam realizadas.

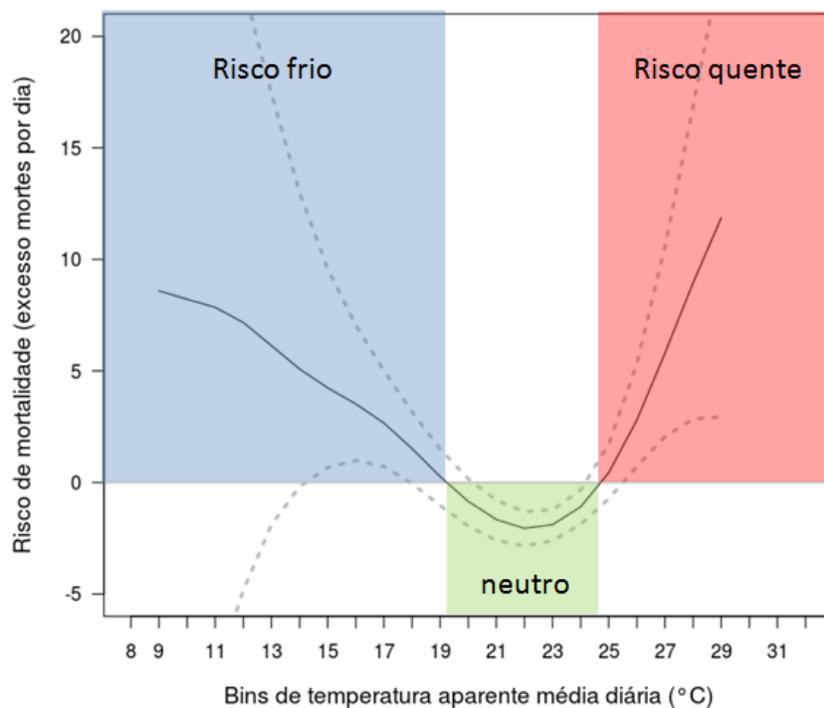


Figura 26 – Zonas de risco de mortalidade de idosos na RMSP em relação aos bins de TAP média diária (°C). Linhas tracejadas representam o intervalo de confiança de 95%.

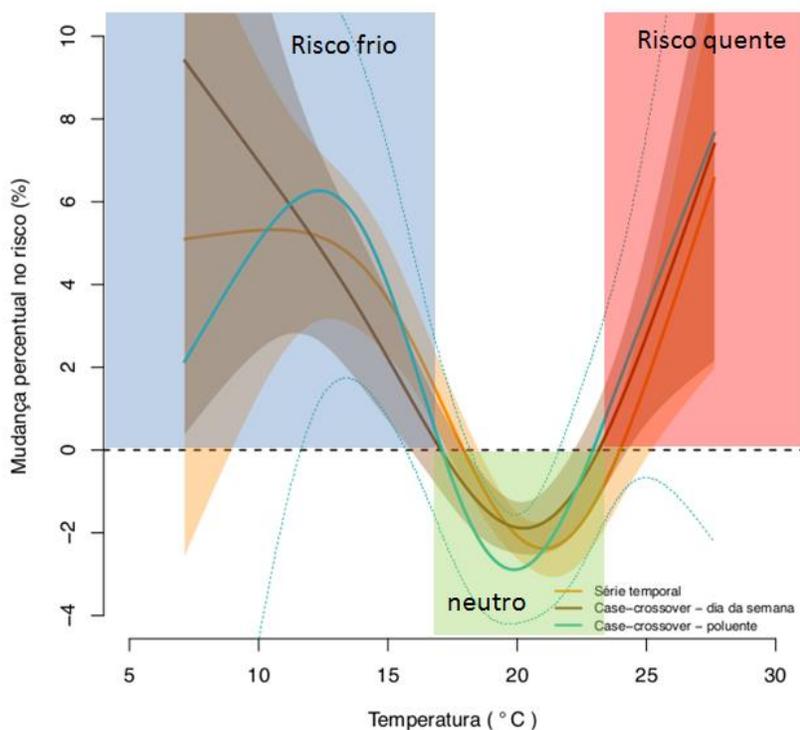


Figura 27 – Exemplo da definição das zonas de risco baseado no risco relativo obtido por Pinheiro (2013), para a RMSP.

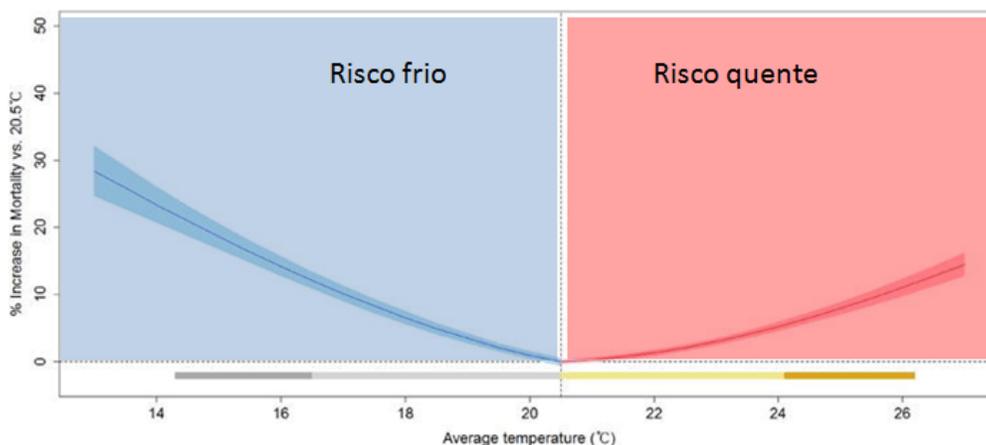


Figura 28 – Exemplo da definição das zonas de risco baseado no risco relativo obtido por Son et al. (2016), para a RMSP.

A separação por categorias de risco possibilita a contabilidade para cada uma das zonas ao longo do ano, a partir da identificação dia-a-dia das mesmas. Na figura 29 é possível ver essa contabilidade para a RMSP, baseada nas zonas definidas na figura 26. De imediato nota-se que a maior parte dos dias estão contidos no intervalo neutro, oscilando aproximadamente em torno de 256 dias por ano. Por outro lado, as quantidades de dias pertencentes às zonas de risco frio e quente são equiparáveis e variam ao redor de 55 e 53 dias por ano, respectivamente.

A mesma contabilidade feita para as zonas de Pinheiro (2013) é ilustrada na figura 30 e apresenta resultados muito similares aos observados na figura 29, pelo fato dos limiares que definem as zonas serem bastante próximos. Enquanto que nesta tese a região neutra é delimitada por TAP entre 19°C e 25°C, em Pinheiro (2013) ela se localiza entre 16°C e 23°C. De forma análoga na figura 31, a análise é repetida para Son et al. (2016), tendo como principal diferença a inexistência da zona neutra. Assim sendo, o que se observa é o comportamento em forma de “espelho” entre a quantidade de dias pertencentes à zona de risco frio e quente, ou seja, quanto maior uma, menor a outra.

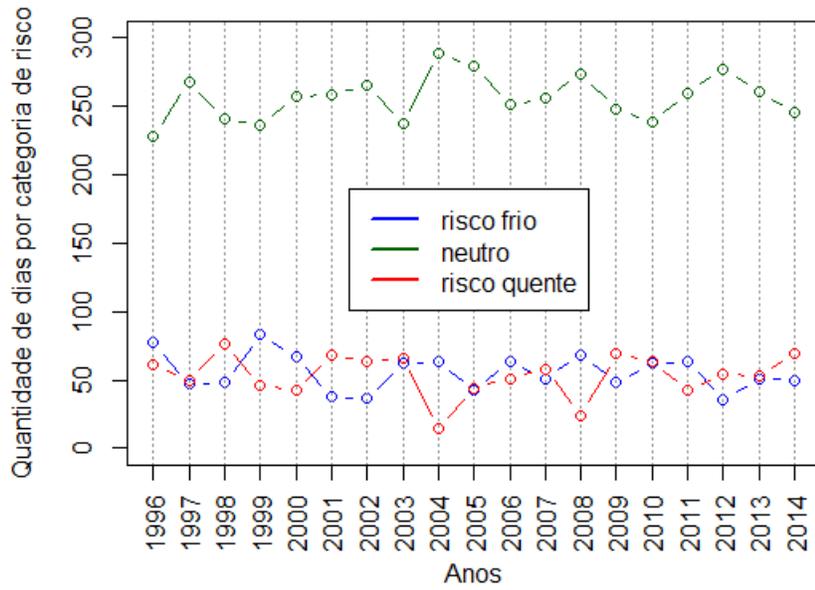


Figura 29 – Quantidade de dias por categorias (zonas) de risco, de 1996 a 2014.

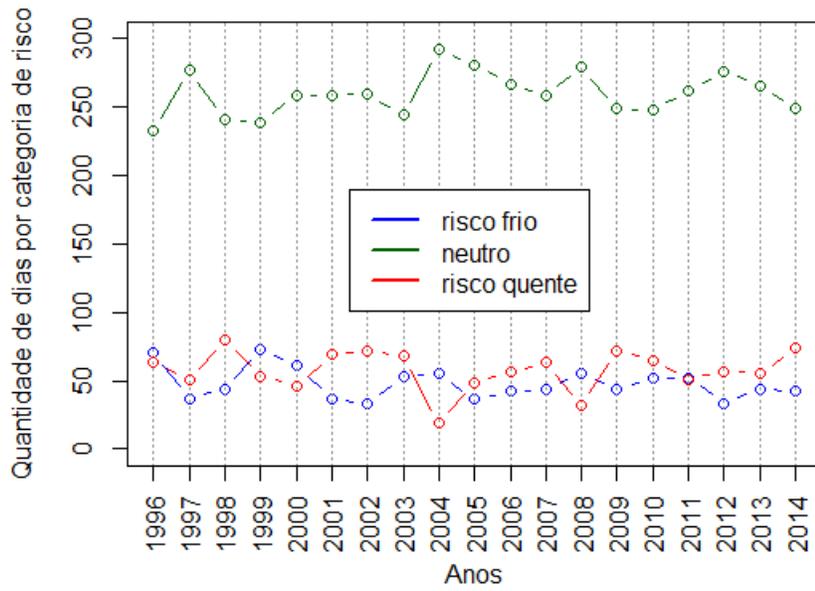


Figura 30 – Quantidade de dias por categorias (zonas) de risco, de 1996 a 2014, baseados em Pinheiro (2013).

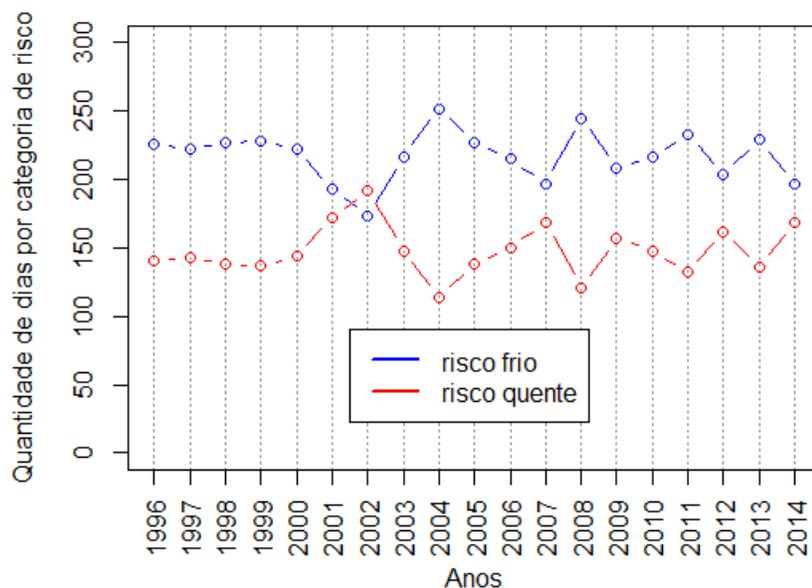


Figura 31 – Quantidade de dias por categorias (zonas) de risco, de 1996 a 2014, baseados em Son et al. (2016).

4.5 Exemplo prático das zonas de risco: estudo de caso – Onda de calor 2014

É importante avaliar o significado prático de usar métodos para identificar zonas de risco, do ponto de vista do excesso de óbitos de idosos na RMS. O episódio escolhido para tal análise ocorreu no começo de 2014, mais precisamente em fevereiro deste ano. Nesta ocasião foram registradas altas temperaturas em dias consecutivos, no que pode ser caracterizado como onda de calor. Robinson (2001) define este fenômeno como um extenso período de estresse térmico elevado, incomum e relacionado à atmosfera, que causa modificações temporárias no estilo de vida e que pode trazer consequências adversas à saúde da população. Diversos autores mostram que na ocorrência de tais eventos um grande número de pessoas é afetado, não raramente verificando-se um aumento expressivo no número de óbitos de pessoas idosas durante os dias de altas temperatura (Fouillet et al. 2006; Robine et al. 2008).

A figura 32 mostra a temperatura máxima e o TAP médio diário para esse período. Nota-se que entre 20 de janeiro e 14 de fevereiro a temperatura máxima registrada ficou acima dos 30°C, ou seja, em 26 dias consecutivos. O pico ocorreu no primeiro dia de fevereiro, quando a estação do IAG

registrou uma temperatura máxima de 36,1°C. Nos mesmos dias nota-se que o TAP médio diário esteve acima de 26°C, enquadrando-se na zona de risco quente.

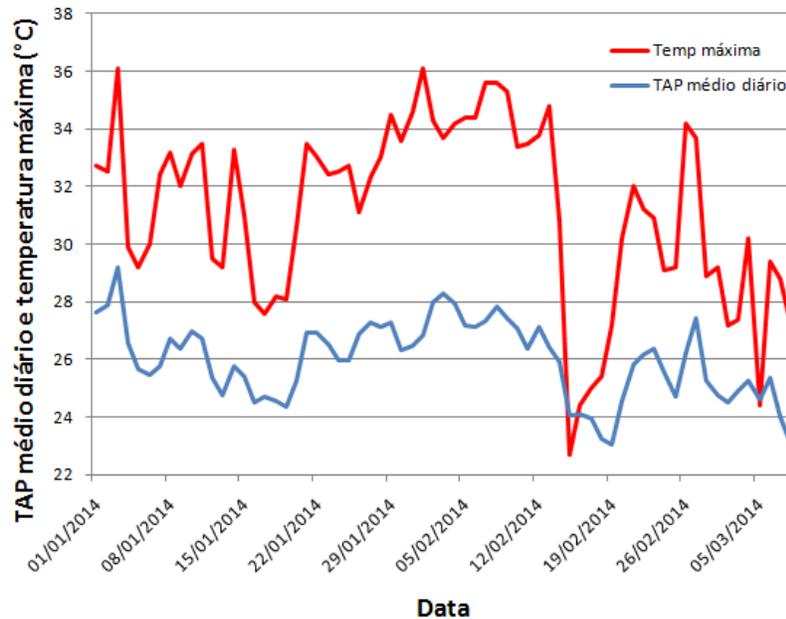


Figura 32 – Temperatura máxima (IAG) e TAP média diária durante a onda de calor registrada.

Do ponto de vista da meteorologia sinótica¹⁸, um sistema de alta pressão com centro localizado ao sul do Oceano Atlântico, explica a onda de calor registrada. Como pode ser observado através da figura 33, boa parte do Brasil está inserida na borda Oeste da circulação antihorária desse sistema, fazendo com que por diversos dias a RMSP registrasse ventos predominantemente da direção Norte. Ventos dessa direção, provenientes de latitudes mais baixas (mais próximas da região equatorial), são responsáveis pelo transporte de temperatura entre regiões distintas de forma a caracterizar o que em meteorologia é denominado advecção de ar quente. A figura 33 foi elaborada a partir de dados de análise¹⁹ do modelo CFSv2 (sigla em inglês para *Climate Forecast System version 2*, do NCEP), em que cada quadro ilustra a pressão atmosférica ao nível médio do mar às 00Z (às 21 horas do horário local), de 3 em 3 dias, de 19 de janeiro a 21 de fevereiro. Detalhes acerca desse modelo são encontrados em Saha et al (2011).

A queda na temperatura ocorrida no dia 18 de fevereiro e observada na figura 26 é explicada pela aproximação de outro sistema de alta pressão no dia 15 de fevereiro, que encontra o sistema

¹⁸ Associada ao estudo de fenômenos atmosféricos de grande escala, tanto espacial (milhares de quilômetros) quanto temporal (dias a semanas).

¹⁹ Diferença entre análise e reanálise pode ser encontrada em Dee et al. (2011).

anterior e muda a direção predominante do vento, de Norte para Leste/Sudeste.

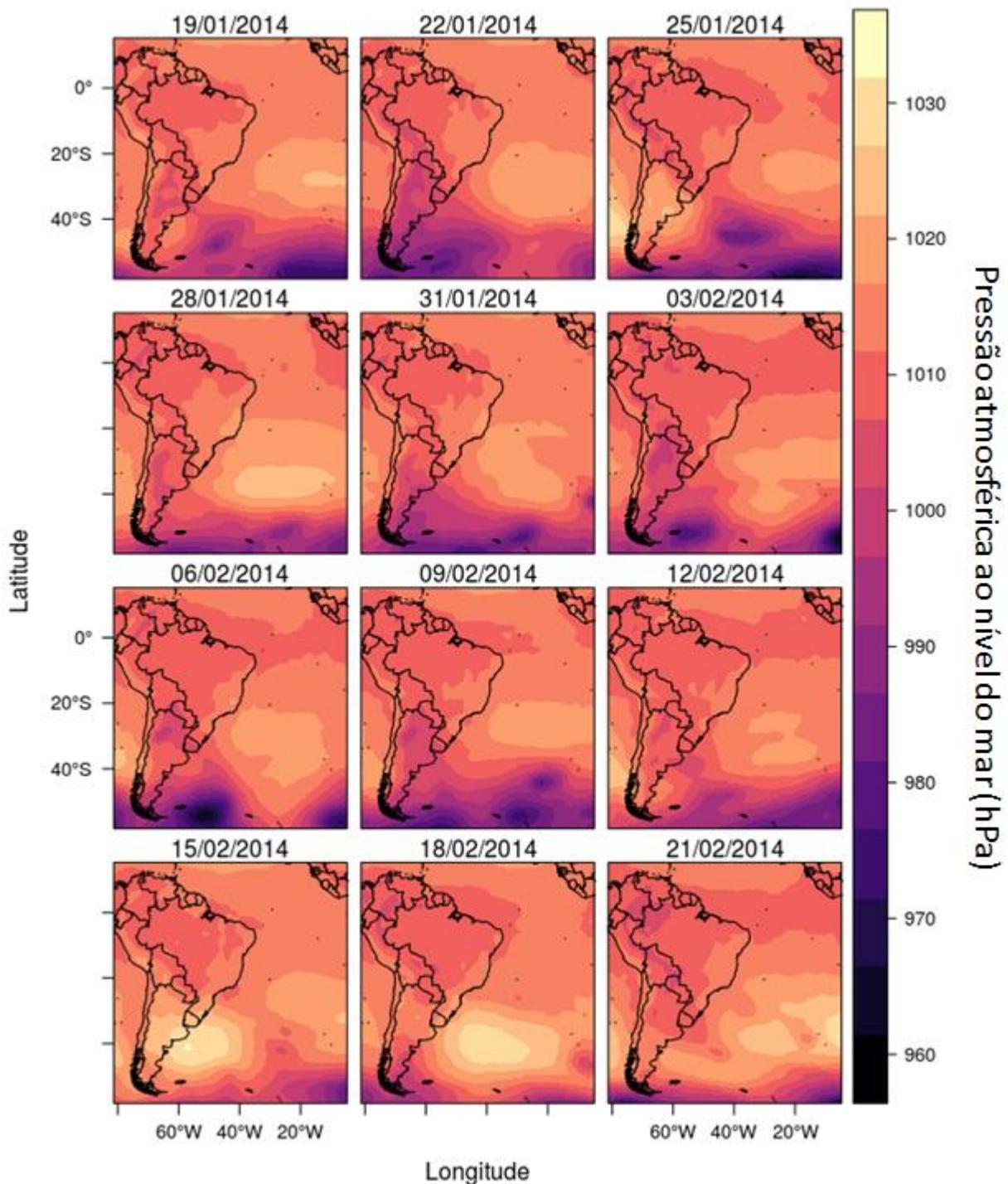


Figura 33 – Evolução do sistema de alta pressão atmosférica (acima de 1010 hPa) com centro no Oceano Atlântico que provocou o episódio de onda de calor no começo de 2014. Cada quadro representa o campo de pressão atmosférica ao nível médio do mar (hPa) de 3 em 3 dias, às 00Z.

Não existe um único critério para definir uma onda de calor. Eles variam de autor para autor,

local para local e normalmente envolvem a determinação de limiares de temperatura, obtidos a partir de quantis, médias climatológicas, etc. Um método cuja citação é facilmente encontrada faz referência à Organização Meteorológica Mundial (OMM), que supostamente define onda de calor aqueles episódios no qual por vários dias a temperatura máxima excede em 5°C ou mais a média da temperatura máxima para o referido mês. Entretanto, cabe salientar que durante a escrita desta tese não foi encontrada uma referência atribuída à OMM que descreva esta metodologia, indicando cautela em sua utilização. De fato, a própria OMM em um recente guia de orientação²⁰ cita diferentes trabalhos que utilizam metodologias distintas na definição de ondas de calor. A mesma publicação detalha o resultado de uma pesquisa conduzida pela própria OMM sobre definições de eventos extremos, indicando que 34 dos 53 países avaliados possuem critérios para definir ondas de calor. Dentre os métodos considerados, 20 são relacionados a algum limiar absoluto, 11 ligados à percentis, 5 à índices de calor extremo e 3 à índices envolvendo saúde (a soma é maior do que 34 pois um mesmo país pode contar com mais de uma definição).

No mesmo guia a OMM esclarece que a caracterização de um episódio de onda de calor deve contemplar quatro critérios quantitativos, sendo eles: magnitude (definida pela excedência de determinada variável em relação a um limiar), duração (persistência do evento), severidade (medido pelo conjunto magnitude e duração) e extensão (área geográfica de abrangência do evento). Embora este não seja o foco principal deste trabalho, uma breve caracterização do episódio de 2014 com base nesses critérios é elaborada a seguir.

Magnitude: Para estimar a magnitude do evento é necessário que inicialmente se estipule um método de classificação. Aqui se adota a mesma metodologia utilizada em Son et al. (2016), que consideraram ondas de calor períodos no qual por dois ou mais dias, a temperatura média diária é igual ou maior do que o nonagésimo sexto percentil (96^o) da média da temperatura do “período quente” (Setembro a Março). Nesse sentido, o 96^o percentil da temperatura obtido pela média do “período quente” de 1996 a 2013 é 25,2°C (2014 propositalmente não incluso). Partindo desta premissa observa-se que do dia 27 de janeiro ao dia 10 de fevereiro a temperatura média registrada esteve acima desse patamar, ou seja, por 14 dias consecutivos, atendendo ao critério em questão. Todavia, a real magnitude dessa onda de calor só pode ser efetivamente determinada comparando-a com outros eventos ocorridos na mesma região, utilizando o mesmo critério. A tabela 6 apresenta um resumo dos eventos detectados no período de 1996 a 2014, bem como sua duração, data de ocorrência e média aritmética da

²⁰ Guidelines on the definition and monitoring of extreme weather and climate events. Disponível em: <<https://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/opace/opace2/documents/DraftversionoftheGuidelinesontheDefinitionandMonitoringofExtremeWeatherandClimateEvents.pdf>>. Acesso em: 24 de julho de 2017.

temperatura em °C acima do 96º percentil. A diferença entre o referido evento de 2014 e o restante identificado é extraordinária, principalmente em relação à sua duração (14 dias, contra 2 a 5 dias do restante), o que de certo modo fornece uma estimativa de sua magnitude.

Duração: Conforme a tabela 6 e baseado nesse critério de identificação, essa onda de calor teve duração de 14 dias, o triplo dos maiores eventos anteriormente registrados, em 2003 e na passagem de 2013 para 2014.

Severidade: Esse item pode ser estimado com base na duração e magnitude do evento. Embora seja possível avaliar isso quantitativamente com a criação de um índice que considere esses parâmetros, isso não será desenvolvido aqui, uma vez que não se trata do enfoque principal dessa tese. Além disso, a severidade desse episódio pode ser percebida através da tabela 6 e da comparação com ondas de calor anteriores.

Extensão: É difícil estimar a extensão do evento pelo campo de pressão, pois nem todas as regiões sob influência do sistema de alta pressão apresentam altas temperaturas. Entretanto, existe a possibilidade de que esse evento tenha possuído tamanho suficiente para ocorrer tanto na RMSP, quanto em outras cidades do Estado. Para determinar a correta extensão da onda de calor sugere-se que no futuro seja feita a análise dos campos de temperatura ou espessura da camada atmosférica no decorrer desse período.

Tabela 6 – Contabilidade dos episódios de onda de calor na RMSP baseado no método de Son et al. (2016).

Ano	Dias consecutivos	Período	Média do valor acima 96º percentil (°C)
1997	02	11-12/11/1997	0,69
	02	22-23/12/1997	2,09
	03	26-28/12/1997	1,07
1998	02	01-02/01/1998	1,07
	02	27-28/01/1998	0,99
	04	30-02/02/1998	1,39
	02	04-05/02/1998	0,79
	02	09-10/02/1998	0,99

continua

1999	03	19-21/01/1999	1,44
	02	28-29/03/1999	0,84
2002	03	26-28/01/2002	0,81
	02	12-13/03/2002	0,19
	02	07-08/10/2002	0,69
	02	23-24/12/2002	1,04
2002/2003	02	31-01/01/2003	0,64
2003	05	08-12/02/2003	0,52
	02	15-16/12/2003	0,64
2006	02	21-22/01/2006	0,99
2007	02	27-28/12/2007	0,54
2009	02	12-13/01/2009	0,34
	02	01-02/03/2009	0,94
	03	05-07/11/2009	0,21
2010	04	13-16/02/2010	0,74
	03	21-23/02/2010	0,41
2011	02	05-06/02/2011	0,44
	02	09-10/02/2011	0,54
2012	04	28-02/03/2012	0,50
	02	18-19/09/2012	1,13
	02	30-31/10/2012	1,24
	03	06-08/12/2012	0,30
	02	25-26/12/2012	1,64
2013	02	11-12/11/2013	1,50
2013/2014	05	30-03/01/2014	1,24
2014	14	27-10/02/2014	0,87
	02	15-16/03/2014	0,30

No que diz respeito às zonas de risco aplicadas a este período observa-se, na figura 34, uma sequência considerável no qual os dias foram categorizados como pertencentes à zona de risco quente. Mais precisamente, isso se deu entre os dias 28 de janeiro e 21 de fevereiro daquele ano, totalizando 25 dias seguidos. Fica assim evidenciado o caráter persistente associado a esse tipo de fenômeno e a

sugestão de que juntamente com a adoção dessa metodologia das zonas de risco é importante que se avalie o número de dias sequenciais nelas enquadradas.

Uma estimativa do número de óbitos de idosos em excesso durante o período de risco quente da onda de calor dá conta de aproximadamente 370 mortes (área positiva entre 29 de janeiro e 19 de fevereiro). Por outro lado, nota-se um déficit abrupto de aproximadamente 190 mortes registrado entre 19 e 26 de fevereiro, que possivelmente ilustra o efeito conhecido por *harvesting* ou *mortality displacement* (que podem ser traduzidos do inglês como “colheita” ou “deslocamento de mortalidade”), situação na qual imediatamente após a onda de calor se observa uma redução na mortalidade. A hipótese por trás desse fenômeno, como esclarecem Kenney et al. (2014), é a de que a onda de calor age no sentido de antecipar óbitos de pessoas mais frágeis e em decorrência disso, após determinado período, se verifica uma redução destes.

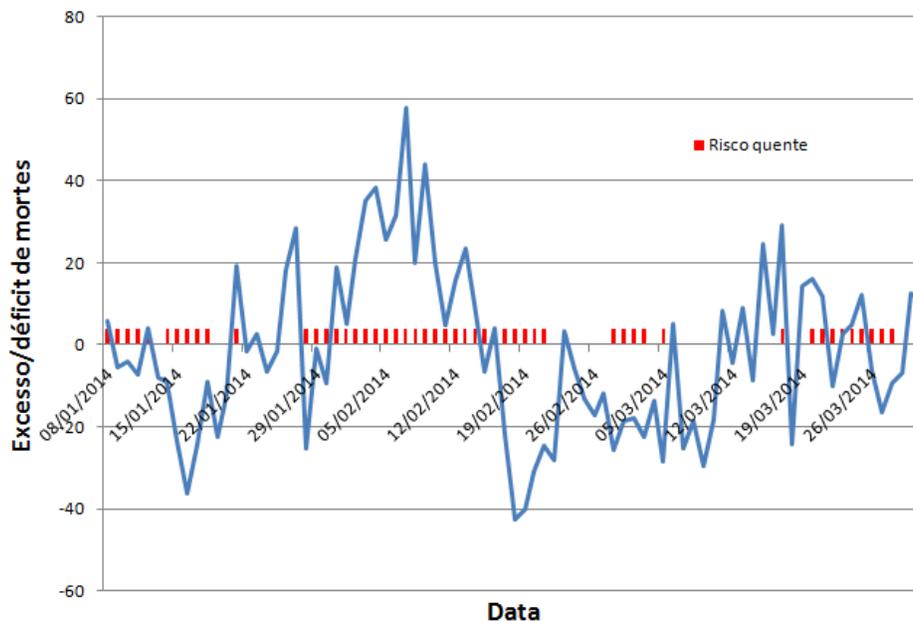


Figura 34 – Excesso de óbitos registrados durante o período da onda de calor e dias enquadrados na zona de risco quente (marcação vermelha), totalizando 25 dias em sequência.

A partir da construção até aqui apresentada, dá-se início ao processo de projeção das zonas de risco de mortalidade para o clima futuro da RMSP. Assim sendo, é necessário que se faça uma análise acerca do desempenho do modelo na simulação do clima atual, tema do próximo capítulo.

4.6 Comparação: RegCM4 vs INMET/IAG

Após construção da metodologia de agrupamento por zonas de risco e visando sua projeção para o clima futuro da RMSP, este capítulo é dedicado à comparação entre os dados do modelo RegCM4 e as estações meteorológicas do IAG e INMET. Cabe salientar que as informações contidas nos itens 4.6 e 4.7 foram publicadas em Batista et al. (2016).

O diagrama de Taylor representado nas figuras 35 (a) e (b) sumariza o coeficiente de correlação, a raiz quadrada do erro médio quadrático centralizada (CRMSE) e o desvio padrão do ciclo anual da temperatura e umidade relativa medidas na estação do IAG com dados simulados no RegCM4, pelos quatro diferentes membros considerados (Hadclm, MPIclm, GFDLclm e Hadctrl). Embora na figura 35 (a) e (b) a referência sejam os dados de temperatura da estação do IAG um gráfico similar foi elaborado usando dados do INMET e está disponível no anexo 7A. O diagrama de Taylor para velocidade do vento não é analisado devido a grande diferença existente entre as medições feitas pelas duas estações, no entanto os gráficos podem ser vistos nos anexos 8A e 9A.

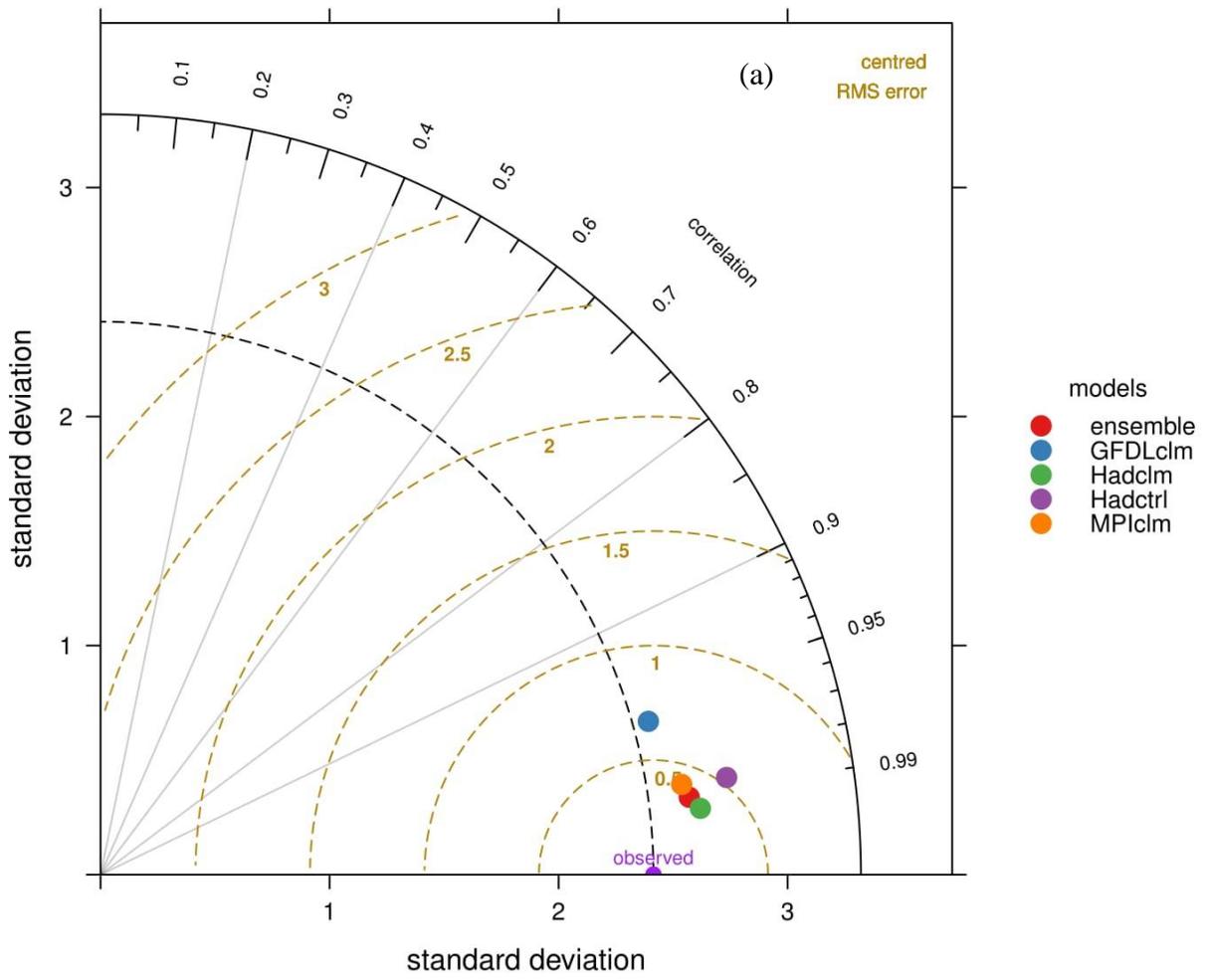
A seguir, é elaborada a análise de cada um dos parâmetros estatísticos inclusos nos diagramas de Taylor.

- Desvio padrão do ciclo anual de temperatura do ar: os quatro membros possuem um desvio padrão maior do que o IAG (2,4°C). O GFDLclm apresenta desvio padrão de 2,5°C e é caracterizado como o membro que teve maior habilidade em capturar a variabilidade do ciclo anual de temperatura na RMSP, pois é mais próximo do valor registrado pelo IAG. Em seguida estão os membros MPIclm e Hadclm, com 2,6°C e Hadctrl com 2,8°C;
- Raiz quadrada do erro médio quadrático centralizado (CRMSE) da temperatura do ar: o mesmo GFDLclm possui o maior CRMSE, 0,7°C. Por outro lado, Hadclm apresenta o menor CRMSE (0,3°C) seguido do MPIclm (0,4 °C) e Hadctrl (0,6°C);
- Coeficiente de correlação da temperatura do ar: todos os membros apresentaram correlação maior que 0,95, sendo que Hadclm, MPIclm e Hadctrl possuem correlações de aproximadamente 0,99;
- Conjunto dos membros (*ensemble*): os índices estatísticos obtidos a partir do conjunto dos quatro membros indica que o RegCM4 representa de forma satisfatória as condições médias de temperatura do ar local (desvio padrão de 2,7°C, CRMSE de 0,4°C e coeficiente de correlação de 0,99);

A figura 35 (b) ilustra o Diagrama de Taylor para umidade relativa tendo como referência

novamente o IAG como série observada (no anexo 7A o mesmo gráfico é produzido com base no INMET). O membro Hadctrl não aparece pelo fato de apresentar desvio padrão, CRMSE e coeficiente de correlação de 2%, 3,8% e -0,46, respectivamente, fazendo com que o ponto esteja fora da área do gráfico.

- Desvio padrão do ciclo anual de umidade relativa: Hadclm apresenta a menor variabilidade do ciclo anual, 1,2%, valor próximo ao do IAG, 1,6%. Por outro lado, MPIclm e GFDLclm possuem maior desvio padrão, 2,2% e 2,8%, respectivamente;
- Raiz quadrada do erro médio quadrático centralizado (CRMSE) de umidade relativa: o menor CRMSE é visto no Hadclm e MPIclm, 1,1%, seguido pelo GFDLclm, 2,2%.
- Coeficiente de correlação da umidade relativa: a maior correlação é vista no MPIclm, 0,86, seguido por Hadclm, 0,74 e GFDLclm, 0,62;
- Conjunto dos membros (*ensemble*): os índices estatísticos obtidos a partir do conjunto dos quatro membros indica que o RegCM4 também representa de forma satisfatória as condições médias de umidade relativa do ar local (desvio padrão de 1,3%, CRMSE de 1,2% e coeficiente de correlação de 0,71).



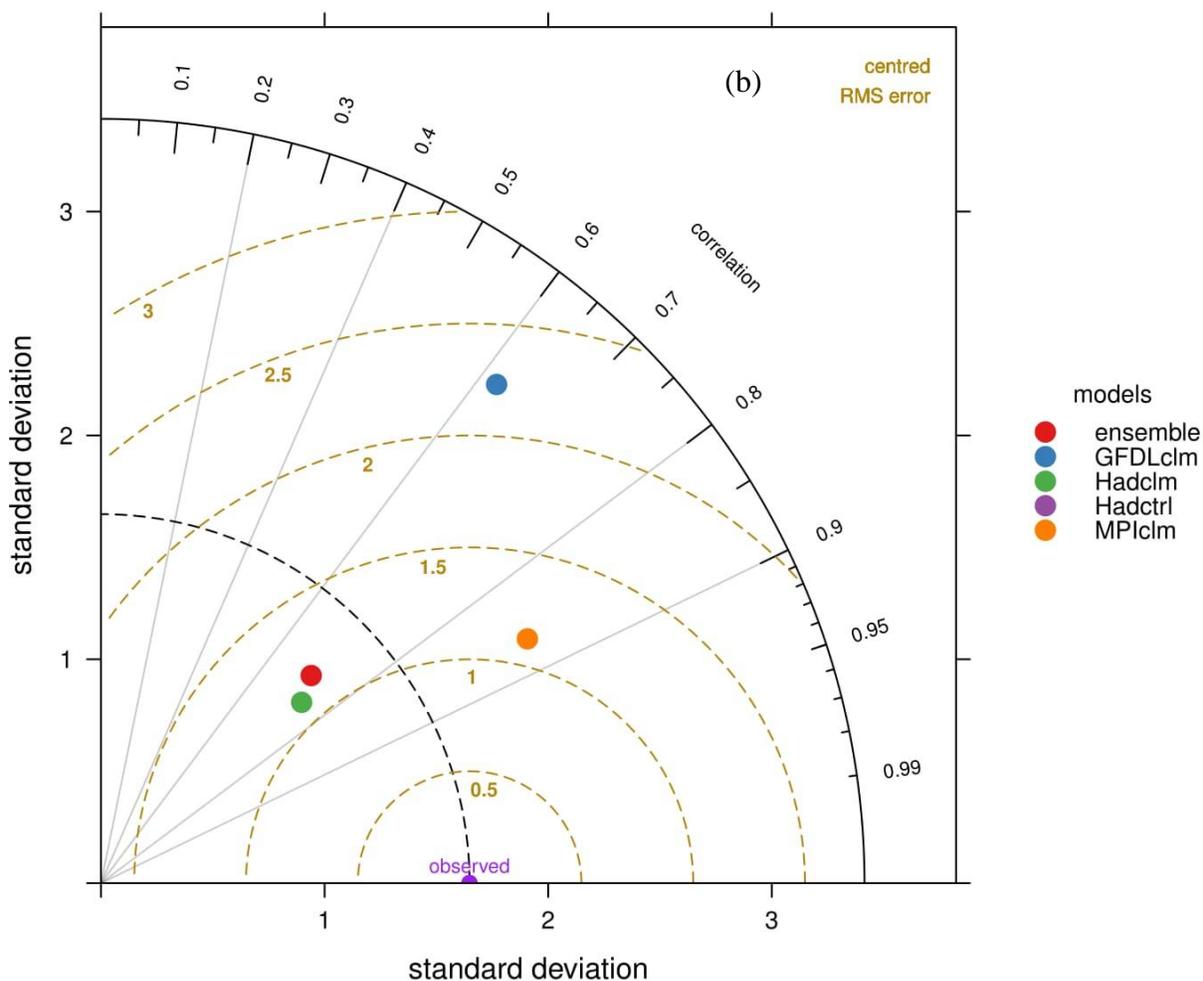


Figura 35 – Em (a) o diagrama de Taylor para temperatura média diária e em (b) umidade relativa média diária, resumando graficamente o CRMSE, desvio padrão e coeficiente de correlação entre dados do IAG e membros utilizados nas simulações do RegCM4.

O boxplot apresentado na figura 36 (a) ressalta a diferença entre as velocidades do vento do IAG e do INMET. Em todos os meses, a velocidade do vento média registrada no IAG é menor do que a registrada no INMET (por aproximadamente $0,7\text{ms}^{-1}$). Ainda é observado que de modo geral a variabilidade da velocidade do vento no IAG é menor do que no INMET. Em alguns meses, como janeiro, fevereiro e março a variabilidade do INMET chega a ser três vezes maior que a do IAG. Uma possível explicação para tamanha diferença se encontra na localização das estações. A estação do IAG está situada dentro de um parque, rodeada por árvores altas que aumentam a rugosidade da superfície e afetam o vento registrado. Já a estação do INMET está localizada no Mirante de Santana, local onde a densidade das árvores no entorno é menor.

É interessante notar na figura 36 (a) que o *ensemble* da velocidade do vento simulada é maior que ambos IAG e INMET, com ciclo anual representado de forma semelhante ao IAG (acrescido de um

viés positivo de $1,2\text{ms}^{-1}$). Dadas estas diferenças, é prudente considerar uma incerteza maior no que diz respeito à validação e utilização da velocidade do vento.

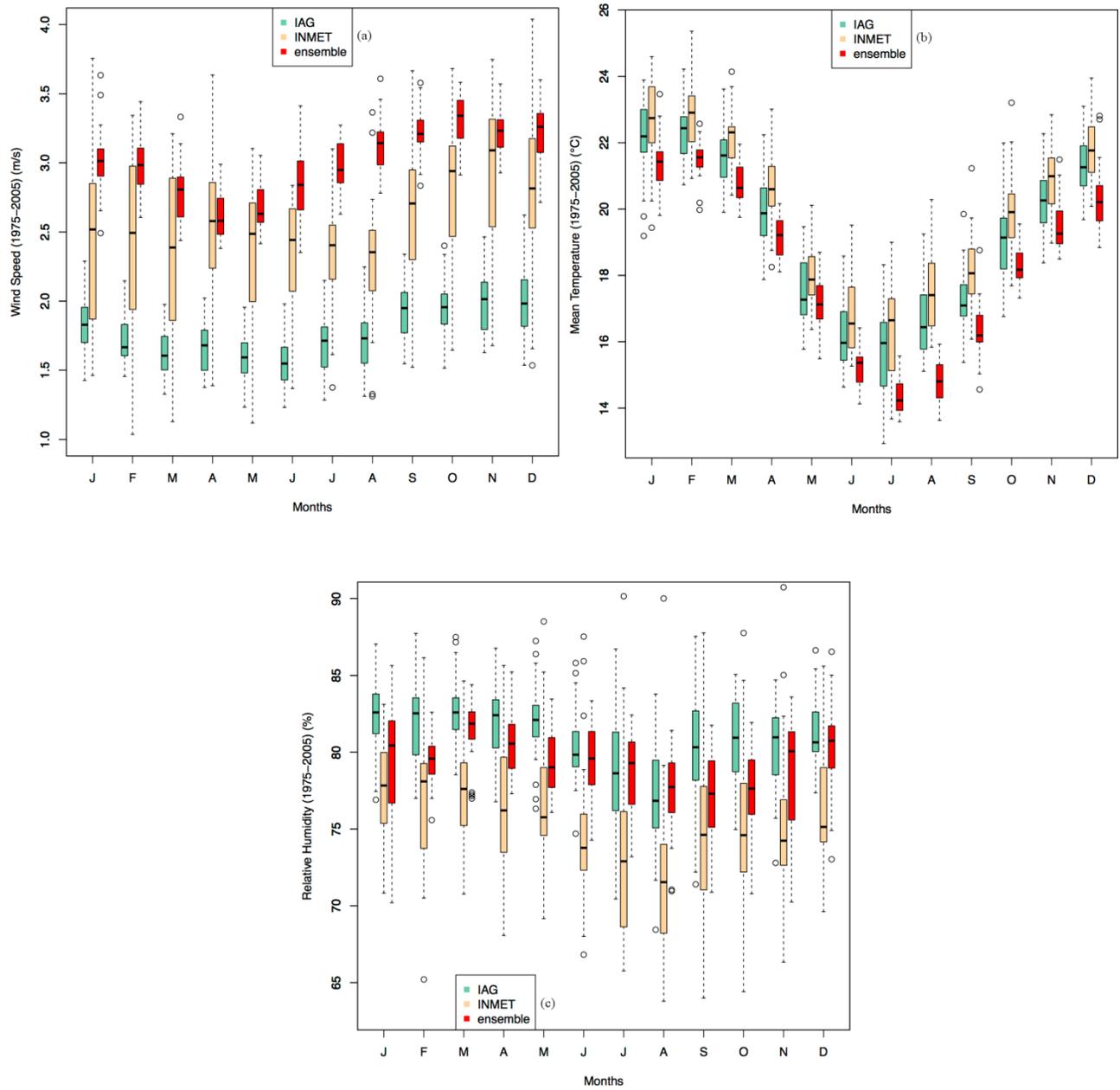


Figura 36 – Em (a) a variação média mensal da velocidade do vento entre as estações do IAG, INMET e conjunto de modelos (*ensemble*), enquanto que em (b) a variação para temperatura média diária e em (c) da umidade relativa média diária.

A figura 36 (b) ilustra o ciclo anual de temperatura na RMSR. As médias mensais de temperatura observadas estão entre 20 e 23°C durante o verão austral (dezembro, janeiro e fevereiro – DJF) e entre 16 a 18°C durante o inverno austral (junho, julho e agosto – JJA). Porém, a temperatura

registrada no decorrer do dia pode variar bastante em relação a estas médias. Temperaturas baixas na RMSP estão relacionadas normalmente a ventos do quadrante sul e advecção fria de temperatura associadas a sistemas de alta pressão pós-frontais (MULLER E BERRI, 2007). Em contraponto, Cavalcanti et al. (2009) mostra que a persistência de temperaturas anormalmente positivas sobre o sudeste do Brasil estão ligadas à presença de sistemas de alta pressão localizados sobre o Oceano Pacífico e que estabelecem um padrão de bloqueio atmosférico para sistemas transientes.

O ciclo anual da umidade relativa para a RMSP é visto na figura 36 (c). Os dados do IAG apresentam maior umidade relativa média que o INMET, fato que também pode ser explicado pela localização da estação do IAG, dentro de um parque ecológico, enquanto que a estação do INMET está cercada por área urbana.

Uma vez caracterizada a acurácia do RegCM4 na representação do clima presente da RMSP, é hora de avaliar as mudanças projetadas pelo modelo, tema do próximo capítulo.

4.7 Mudanças climáticas projetadas para a RMSP

Para avaliação das mudanças climáticas projetadas na RMSP são considerados dois períodos: o primeiro representando o clima presente (1975 a 2005) e o segundo o clima futuro (2065 a 2099). A figura 37 (a) mostra a média anual do índice TAP para os quatro membros do RegCM4 (bem como para o *ensemble*) em ambos os períodos. MPIclm e GFDLclm apresentam valores médios anuais de TAP menores que Hadclm e Hadctrl. Entretanto, todos os membros ilustram um notável padrão de aquecimento de aproximadamente 2°C entre períodos. A inclinação da linha da regressão linear indica que o Hadclm possui o maior padrão de aquecimento (0,038°C/ano), seguido por Hadctrl (0,037°C/ano), MPIclm (0,034°C/ano) e GFDLclm (0,027°C/ano). Já o conjunto dos membros projeta aquecimento de 0,035°C/ano, quase a mesma inclinação projetada pelo MPIclm.

As figuras 37 (b), (c) e (d) mostram o padrão de distribuição espacial das tendências anuais (diferença entre os climas futuro e presente) de temperatura do ar, umidade relativa e TAP. Observa-se, na figura 37 (d), que o TAP aumenta em praticamente todo o Brasil, especialmente na região Centro-Oeste e Norte. Parte desse aumento se reflete na RMSP. Também é possível notar que o principal fator associado a essa mudança do TAP é a tendência positiva de temperatura projetada para o futuro.

A figura 37 (e) compara as taxas de aumento do TAP e da temperatura. É possível notar duas áreas distintas: sobre o continente, onde a temperatura tem um incremento mais acentuado comparado ao TAP e sobre o Oceano Atlântico Sul, onde o oposto ocorre. A existência dessas áreas é explicada

pelo padrão de umidade relativa ilustrado na figura 37 (c).

Na figura 37 (e) ainda é possível notar que a RMSP está localizada numa zona de transição entre essas áreas, levando a crer que não serão identificadas no futuro mudanças significativas nos padrões de umidade. Assim, o aumento do TAP na RMSP pode ser associado apenas ao aumento de temperatura.

De forma similar a estes resultados, Jacobs et al. (2013) mostra que na Austrália o maior aumento de temperatura e do índice Temperatura Aparente é projetado para ocorrer sobre a região noroeste, uma área que de acordo com projeções de modelos integrantes do CMIP3 será mais seca do que o restante do país. Como resultado, o incremento da temperatura aparente não ocorre no mesmo ritmo da temperatura devido aos baixos níveis de umidade relativa, situação similar à encontrada aqui nesta tese.

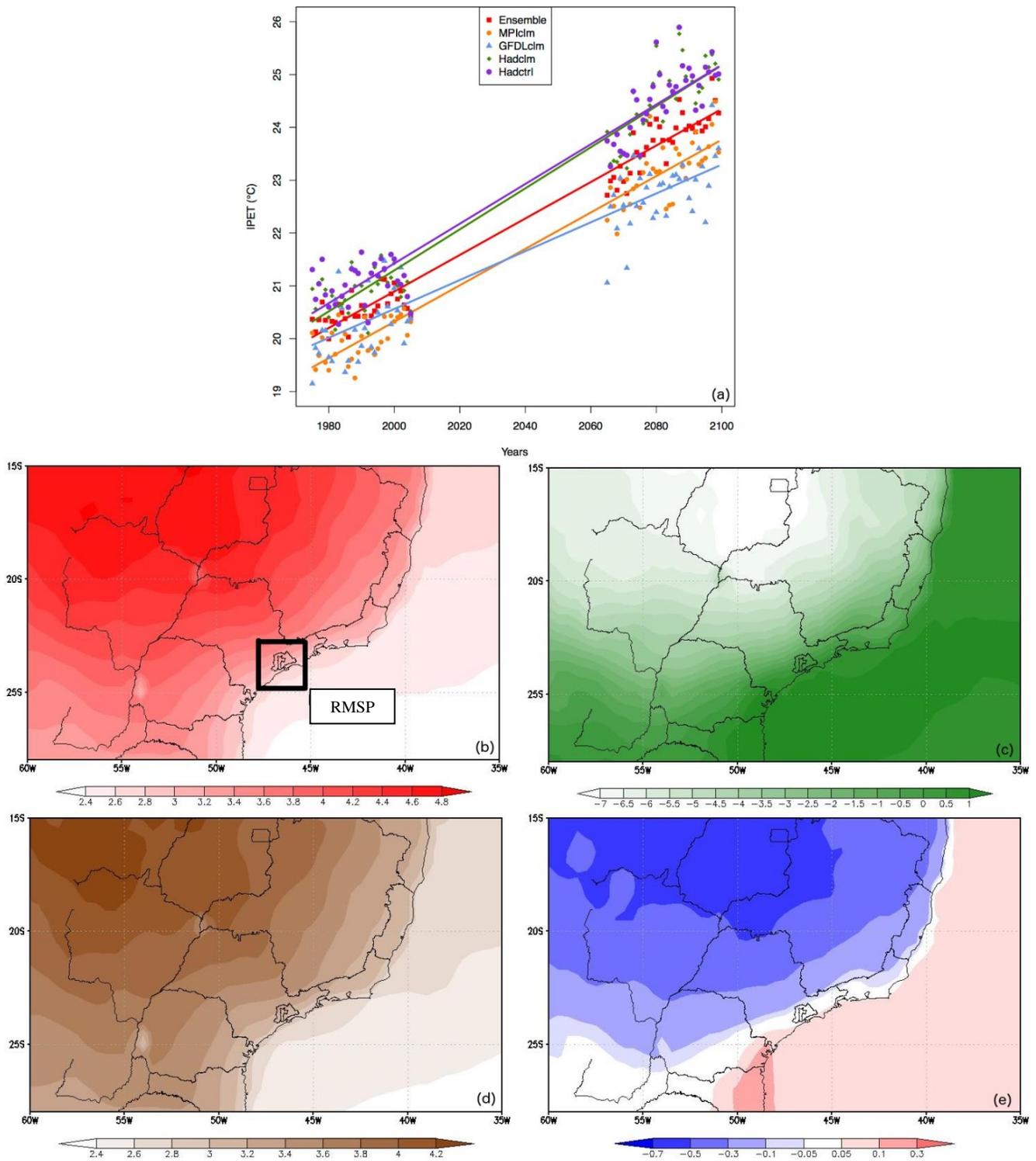


Figura 37 – (a) média anual do TAP para os distintos membros do RegCM4 (MPIclm, GFDLclm, Hadclm e Hadctrl) na RMSP nos períodos de 1975-2005 e 2065-2099 (IPET no eixo y e refere-se ao TAP usado nessa tese); (b) representa a tendência da temperatura (diferença entre as temperaturas futura e presente), (c) o mesmo para umidade relativa e (d) para TAP; Já em (e) a diferença entre TAP e temperatura.

Os resultados apresentados na figura 37 podem ser relacionados ao trabalho de Trezza (2014), que aponta para a umidade relativa (além de exercícios físicos) como fator modificador do desempenho cognitivo de idosos. Conforme visto na análise da figura 37, não foram identificadas alterações no padrão de umidade relativa sobre a RMSD, pois esta se encontra em uma região de transição entre Oceano (no qual se projeta um aumento da umidade relativa) e continente (projeção de diminuição da umidade relativa). Embora a conclusão óbvia seja a de que o desempenho cognitivo de idosos tende a não ser afetado no futuro (caso esse cenário se concretize), o impacto devido ao aumento da temperatura não deve ser descartado, pois ele acarretará em maior estresse térmico por calor, refletido no aumento do TAP. Em outras palavras, o maior estresse térmico na RMSD será associado às maiores temperaturas, mantendo-se os mesmos níveis de umidade atuais.

4.8 Ajuste das simulações através do viés mensal

Conforme explicam da Rocha et al. (2006), para a discussão de cenários futuros do clima é importante que antes se conheçam as deficiências do modelo através da simulação do clima presente. Assim sendo, uma etapa relevante anterior às projeções dos riscos com base nas simulações do clima futuro trata do ajuste (ou melhoramento) da série simulada a partir da identificação de um viés mensal, observado no período de 1975-2005.

A figura 38 mostra as médias mensais do TAP médio diário, tanto observados (calculados a partir dos dados da estação do IAG²¹) quanto simulados pelo RegCM4. É possível notar um viés negativo nas médias mensais do TAP simulado, de aproximadamente 1°C. Todavia, é esperado que o viés apresente uma variação mensal, associada aos períodos no qual o modelo apresenta maior ou menor acurácia. Os valores médios mensais desses vieses são apresentados na tabela 7, onde se nota que o maior viés ocorre em Agosto (1,89°C), enquanto o menor em Junho (0,1°C).

²¹ Para evitar redundância nas análises a partir desse ponto utiliza-se apenas a estação do IAG como referência observada.

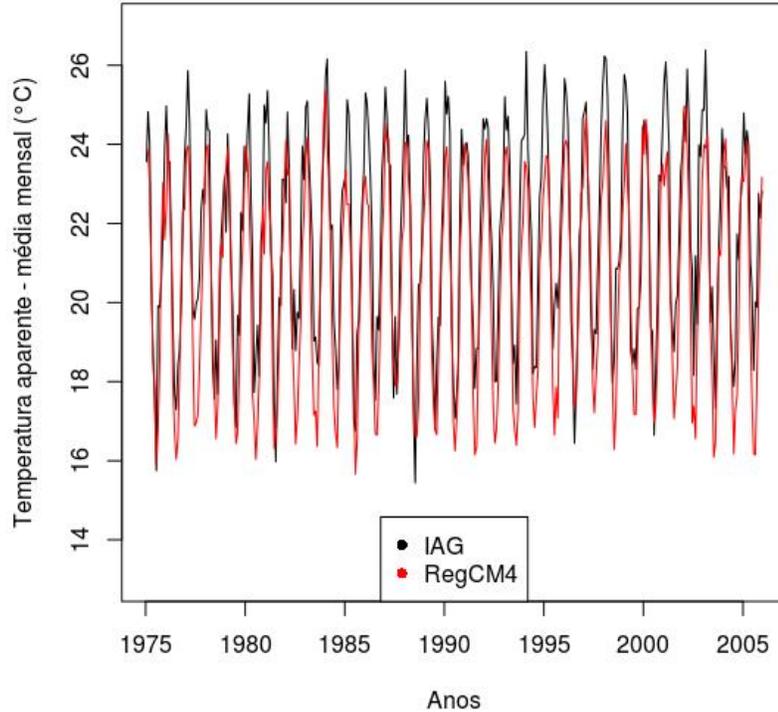


Figura 38 – TAPs médios mensais observados e simulados (°C) de 1975 a 2005, evidenciando um viés médio negativo de aproximadamente 1°C.

Tabela 7 – Vieses médios mensais de TAP (°C) de 1975 a 2005.

JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN
0,97	1,03	0,95	0,90	0,64	0,10
JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1,36	1,89	1,16	1,06	0,85	1,12

A fim de ajustar a série de dados simulada pelo RegCM4, os vieses mensais apresentados na tabela 7 são somados a cada um dos TAPs diários, ou seja, para cada dia soma-se o viés do respectivo mês. O resultado, visualizado na figura 39, mostra que após aplicação dessa correção diária as médias mensais do TAP simuladas ficam muito mais próximas das observadas. Esse mesmo ajuste é feito na série futura, também utilizando valores da tabela 7, de modo que a estimativa das zonas de risco para o futuro se baseie nos valores de TAP ajustados pelos vieses.

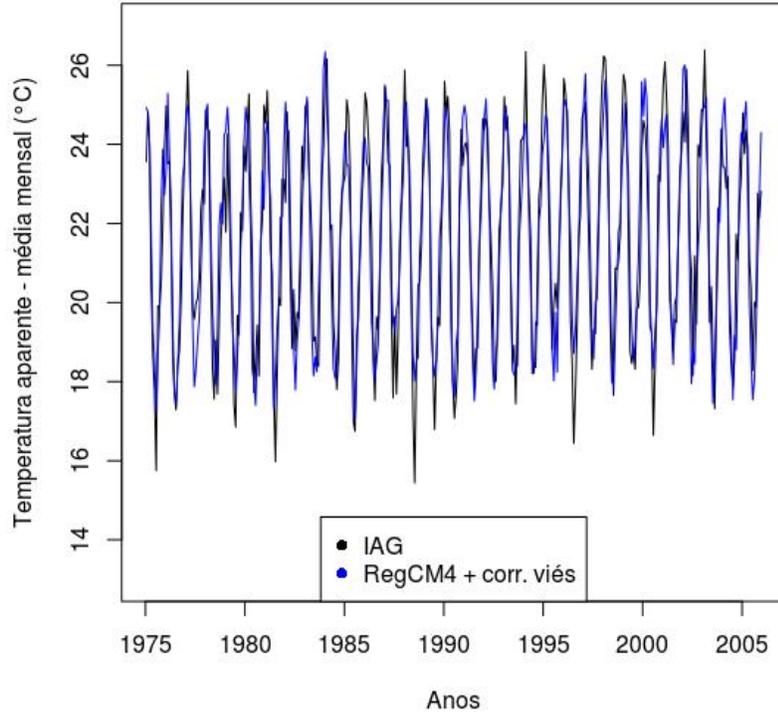


Figura 39 – TAPs médios mensais observados e simulados (°C) de 1975 a 2005, após somados os vieses mensais da tabela 7.

4.9 Análise de risco para clima futuro

Toda a construção até aqui apresentada culmina na estimativa futura da quantidade de dias por ano em cada uma das zonas de risco de mortalidade. Porém, como boa prática, inicialmente é comparada a estimativa feita para o clima presente através de ambas as fontes de dados, do modelo RegCM4 e observados na estação do IAG. Por isso esse tópico será subdividido em duas partes, uma relativa ao risco presente e outra relativa ao risco futuro.

4.9.1 Quantificação das zonas de risco no presente (1975-2005)

A figura 40 indica a variabilidade da quantidade anual de dias pertencentes a cada uma das zonas de risco, no período de 1975 a 2005. Observa-se que as estimativas das zonas de risco frio e quente das simulações tendem a ser subestimadas em relação à observada, mesmo após ajuste dos

dados simulados pelas somas dos vieses mensais. Enquanto isso, a zona de risco neutra do modelo que é representativa da maior parte dos dias na RMSP é superestimada em relação à observada. Ou seja, em linhas gerais pode-se concluir que o modelo tende a suavizar a categorização dos dias nas três zonas de risco. Vale ressaltar que pela similaridade entre os limiares de risco o gráfico da figura 40 (e posteriormente da 42) é também válido para as zonas de risco de Pinheiro et al. (2014).

De forma análoga, na figura 41 é apresentada variação anual da quantidade de dias para as duas zonas baseadas em Son et al. (2016). Neste caso nota-se que a quantificação feita com os dados do modelo RegCM4 é semelhante à observada (muito por conta de se considerar apenas duas zonas). Nessa categorização, dias de risco frio correspondem a aproximadamente 65 a 70% dos dias anuais, sendo o restante de risco quente.

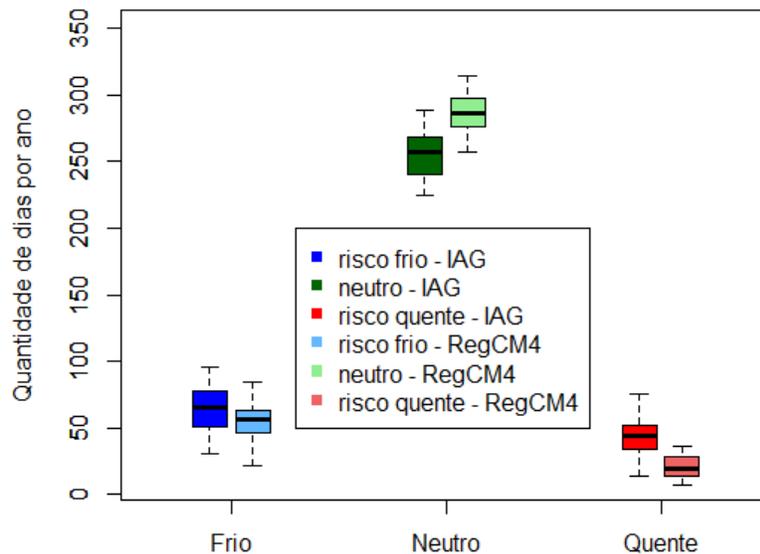


Figura 40 – Variação da quantidade de dias por ano pertencentes às zonas de risco, de 1975 a 2005, tanto para dados do RegCM4 quanto da estação do IAG. A quantidade de dias nas zonas de risco frio e quente estimadas com base no RegCM4 são menores do que o que de fato se observa. Já na zona de risco neutro, o oposto ocorre.

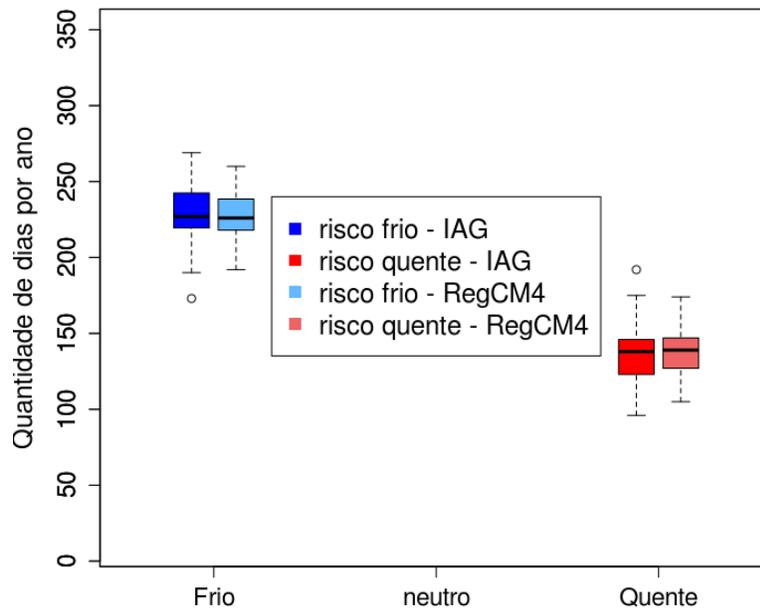


Figura 41 – Variação da quantidade de dias por ano pertencentes às zonas de risco baseadas no trabalho de Son et al. (2016), de 1975 a 2005, tanto para dados do RegCM4 quanto da estação do IAG. A quantidade de dias nas zonas de risco frio e quente estimadas com base no RegCM4 são similares ao que de fato se observa.

4.9.2 Quantificação das zonas de risco no futuro (2065-2099)

Essa sessão trata da quantificação dos dias em relação às zonas de risco para o período de 2065 a 2099. Na figura 42 observa-se de imediato que a quantidade de dias associados à zona de risco frio é praticamente nula. Em contrapartida, o número de dias enquadrados na zona de risco quente mais que triplica, partindo de menos de 30 dias por ano para aproximadamente 150. Ao mesmo tempo se identifica uma leve redução nos dias da zona neutra, que tendem a oscilar em torno de 200. Entretanto, lembrando-se da suavização descrita no primeiro parágrafo do item 5.3.1, pode-se subjetivamente imaginar que na prática a quantidade de dias da zona de risco neutra possa ser um pouco menor, enquanto que na zona de risco quente um pouco maior. Caso isso de fato ocorra, irão se verificar anos nos quais metade dos dias serão enquadrados na zona de risco neutra e metade na quente.

No que diz respeito às zonas de Son et al. (2016), retratado na figura 43, se identifica uma mudança drástica no sentido em que aproximadamente 80% dos dias (no decorrer de um ano) pertencerão à zona de risco quente. Em termos práticos, esse resultado se traduz em uma inversão do

panorama presente, onde de acordo com a figura 41, de 65 a 70% dos dias estão enquadrados na zona de risco frio.

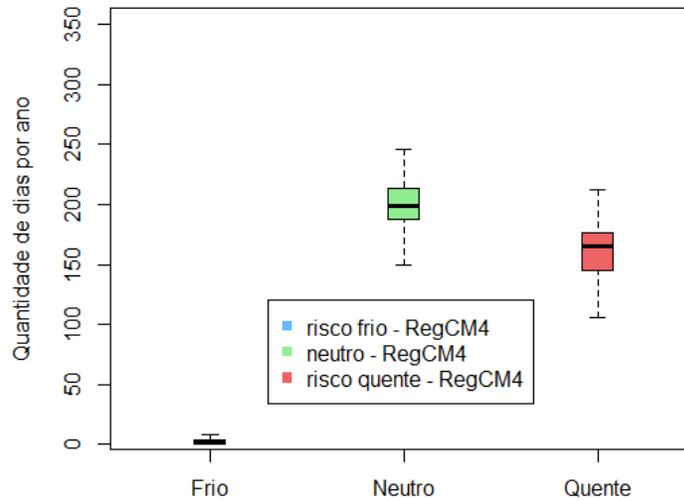


Figura 42 – Variação da quantidade de dias por ano pertencentes às zonas de risco, de 2065 a 2099, apenas para dados do RegCM4. Devido ao aumento médio da temperatura, a variabilidade associada à zona de risco frio é bastante pequena.

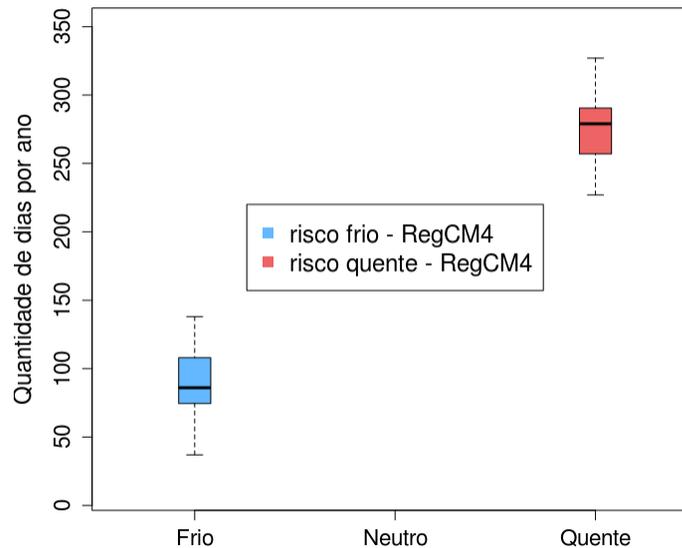


Figura 43 – Variação da quantidade de dias por ano pertencentes às zonas de risco baseadas em Son et al. (2016), de 2065 a 2099, apenas com dados do RegCM4. Devido ao aumento médio da temperatura, aproximadamente 80% dos dias estarão na zona de risco quente.

É interessante notar a evolução desse quadro anual, conforme figura 44. Como pode ser visto no período de 1975 a 2005, o padrão de dias na zona de risco neutro praticamente não sofre alteração e oscila em torno dos 280 dias por ano. Isso era esperado uma vez que a RMSP é caracterizada como uma região de clima ameno. Em relação às zonas de risco frio e quente, é possível notar uma tendência de diminuição do número de dias no risco frio e aumento no risco quente, de forma a convergir para que ambas tenham a mesma quantidade de dias. Essa tendência de “equilíbrio” é confirmada na figura 29, relativa ao período de 1996 a 2014, onde se vê que a quantidade de dias por ano pertencentes a essas zonas de risco variam aproximadamente em torno de 60.

Em 2065 o cenário já será bastante diferente, de forma que a zona de risco frio corresponderá apenas a algo entorno de 20 dias por ano, diminuindo ainda mais nos anos seguintes. O restante será distribuído entre neutro e quente. A partir de 2065 também se observará a convergência nas zonas de risco quente e neutro, que atingirão o mesmo patamar por volta de 2081, ano no qual metade dos dias pertencerão a essas duas zonas.

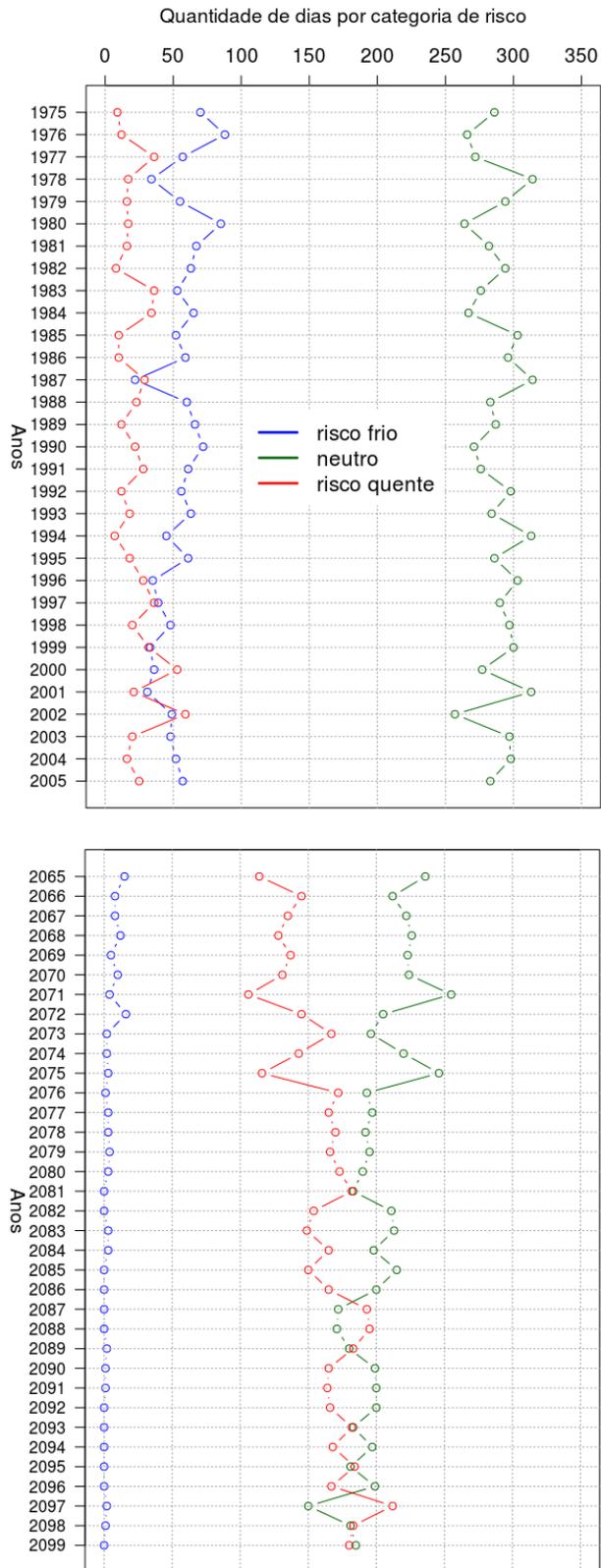


Figura 44 – Quantidade de dias por zonas de risco na RMSP simuladas pelo RegCM4, para o presente (1975 a 2005) e futuro (2065 a 2099). No futuro os dias tendem a ser compreendidos pelas zonas de risco quente e neutro apenas.

A partir das figuras 42, 43 e 44 é possível responder à hipótese inicial da tese, que trata do aumento do risco de mortalidade associado ao calor de maneira a contrabalancear com o risco ligado ao frio. Uma vez observado que a ocorrência de dias pertencentes à zona de risco frio praticamente deixará de existir em detrimento do aumento dramático da frequência de dias na zona de risco quente, sugere-se que a mortalidade de idosos na RMSP por fatores associados ao calor terá maior importância frente aos fatores vinculados ao frio. Desta forma, não haverá um contrabalanceamento entre estes riscos e sim o predomínio de apenas um. Nesse contexto, mortes causadas por agravamento de doenças cardiovasculares crônicas, como hipertensão essencial, por exemplo, tendem a ter um papel preponderante na distribuição anual da mortalidade de idosos provocada por causas naturais.

Desconsiderando processos adaptativos que ocorrerão caso altas temperaturas sejam mais frequentes no futuro, é possível tomar a onda de calor ocorrida no começo de 2014 como exemplo dos possíveis impactos causados pelas mudanças projetadas. O TAP médio calculado a partir dos dados da estação do IAG para o período de 25 dias de maior estresse térmico, de 21 de janeiro a 14 de fevereiro de 2014, foi de 26,9°C. Após ajustar a série simulada pelo modelo regional climático com os vieses mensais, no período de 2065 a 2099, foram contabilizados 42 episódios nos quais o TAP médio diário foi igual ou superior a esse valor de 26,9°C por pelo menos 1 semana (dias em sequência).

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES

A estimativa do impacto das mudanças climáticas em um determinado grupo populacional passa necessariamente pela interação de diversas áreas do conhecimento. Nesse sentido e como medida conjunta de esforços é que o projeto temático Biometeorologia Humana, inserido no Núcleo de Apoio a Pesquisas em Mudanças Climáticas (INCLINE), foi proposto. O objetivo geral desta tese, como integrante do projeto temático supracitado, é estimar o impacto que as mudanças climáticas projetadas para a RMSP podem causar na população idosa residente. Especificamente, buscou-se avaliar em quanto as mudanças do clima poderiam modificar o balanço atual existente entre risco de mortalidade associado ao frio e ao calor, dado que simulações realizadas com o modelo RegCM4 apontam para temperaturas médias maiores no futuro. Entretanto, antes de atingir o resultado final, diversas etapas foram empenhadas no sentido de melhor descrever a interação tempo/clima-mortalidade por doenças respiratórias e cardiovasculares, bem como no intuito de caracterizar a variável risco, aqui utilizada.

O passo inicial deu conta da análise descritiva da mortalidade de idosos, que ocorreram em consequência de problemas respiratórios ou cardiovasculares. Após filtragem dos dados, foi constatado que 20,3% das ocorrências eram relativas ao infarto agudo do miocárdio. Demais doenças como broncopneumonia (8,9%), acidente vascular cerebral (6,3%), doença pulmonar obstrutiva (4,5%), hemorragia intracerebral (3,9%) e pneumonia (3,3%) completam a lista das de maior porcentagem de ocorrência nos dados utilizados. Também foi identificado o tradicional padrão em forma de u invertido, com pico de mortalidade durante o inverno e mínimo no verão. Nesse sentido, foi também observado que em alguns anos esse padrão não é tão claro, havendo pouca distinção entre os períodos de maior e menor mortalidade média de idosos, como no caso de 2005. Todavia, não foram identificadas as componentes climáticas responsáveis por essa variação na amplitude, indicativo de que essa relação não se dá de forma tão direta, tornando necessária a consideração da ação conjunta de outros fatores como, por exemplo, da concentração de poluentes atmosféricos.

A relação individual das variáveis meteorológicas temperatura e umidade específica foi avaliada para 5 combinações distintas, com o objetivo de simular diferentes cenários térmicos, sendo eles: cenário médio diário, quente-úmido, quente-seco, frio-úmido e frio-seco. Os diagramas mostram que a maior mortalidade ocorre nos períodos de menor temperatura e umidade, (característicos do inverno) ou nos de maior temperatura e umidade (associadas ao verão), ou seja, nos extremos frio-seco e quente-úmido. Esse padrão foi identificado em todos os cenários, com uma diferença na dispersão da mortalidade, que existe em função da maior variabilidade da temperatura máxima (mortalidade mais dispersa) em comparação com a mínima (mortalidade menos dispersa). É importante destacar o papel

da umidade nesse resultado que demonstra um caráter ambíguo, podendo aumentar ou reduzir o estresse térmico sentido pela população idosa, dependendo do cenário considerado. Em caso de frio, o menor conteúdo de umidade atua no sentido de agravar o estresse térmico, enquanto que o maior conteúdo atua no sentido de amenizá-lo. Já nos dias quentes, o oposto é verificado, ou seja, quanto mais umidade no ar, maior o estresse térmico sentido e conseqüentemente maior a tendência de impactar na população idosa. De certa forma, o resultado obtido por Trezza (2014) corrobora essa afirmativa, dado que em seus resultados a umidade relativa do ar foi identificada como uma das variáveis positivamente responsáveis pela piora do desempenho cognitivo de idosos da RMSP, em um ambiente de altas temperaturas.

Parte integrante da tese trata do risco de mortalidade associado a intervalos de temperatura (média diária, máxima e mínima), umidade específica (média diária, máxima e mínima), além do índice TAP para os mesmos cenários térmicos descritos acima. O risco calculado em todas as variáveis apresenta o mesmo padrão: maior (positivo) nos extremos e menor (negativo) na região central, com curva em forma de “u”. Além disso, os extremos frio-seco e quente-úmido aparecem de forma coerente como sendo os de maior risco de mortalidade associada, estando em acordo com as afirmações do parágrafo anterior, bem como com Barreca (2012).

Nessa tese é feita a proposição da separação do risco de mortalidade em 3 zonas, denominadas risco frio, neutro e risco quente. Neste ponto, um importante resultado aparece no sentido em que as zonas elaboradas a partir do risco calculado nessa tese são praticamente as mesmas da obtida em Pinheiro (2013), muito embora elas sejam construídas de formas totalmente diferentes. Os limiares que definem a zona neutra nessa tese a partir do TAP médio diário são os bins maiores que 19°C e menores que 25°C, muito próximos aos de Pinheiro (2013) considerando temperatura média diária superiores a 16°C e inferiores a 24°C. Isso significa que os resultados encontrados referentes ao comportamento futuro das zonas de risco também são válidos para o risco da referida autora. A similaridade entre as zonas de risco se evidencia pela contabilidade dos dias pertencente a cada uma delas no clima atual: cerca de 250 dias por ano fazem parte do neutro, enquanto que o restante dos dias (aproximadamente 115) distribui-se de forma equilibrada entre os riscos quente e frio. A mesma subdivisão e contabilidade de dias anuais por zona de risco feita a partir do trabalho de Son et al. (2016) mostra resultados um tanto diferentes, que decorrem do próprio método empregado pelo autor. Neste caso, apenas 2 zonas são consideradas, de risco frio e quente, sem zona neutra. Assim sendo, atualmente são identificados mais dias enquadrados na zona de risco frio (cerca de 220) do que na quente (aproximadamente 145), na RMSP.

No começo de 2014 (aproximadamente entre 20 de janeiro e 14 de fevereiro) um episódio de onda de calor foi registrado na RMSP e usado para avaliar o comportamento da zona de risco quente na prática. A onda de calor em questão, descrita nessa tese, se sobressai em relação a qualquer outro evento desse tipo dentro do período considerado, de 1996 a 2014. A análise do campo de pressão atmosférica corrigida para o nível do mar mostrou que o vento na RMSP era proveniente da direção norte, decorrente da circulação de ar associada a um sistema de alta pressão com centro sobre o Oceano Atlântico. Como consequência, por 26 dias a temperatura máxima passou dos 30°C. Destes, 25 dias foram enquadrados na zona de risco quente e 370 mortes de idosos em excesso foram registradas. Tal resultado aponta para a relevância de no futuro se considerar não apenas as zonas de risco de modo individual, mas também a sua persistência. Até onde se tem conhecimento, este foi o primeiro trabalho no qual esse episódio foi abordado.

Com respeito à projeção futura das zonas de risco de mortalidade, esta foi feita a partir de simulações do modelo climático regional RegCM4, para o cenário de emissões de gases de efeito estufa RCP8.5 (tido como pessimista). Todavia, antes desta abordagem, foi elaborada uma comparação das simulações do modelo com dados observados para demonstrar se de fato ele tem capacidade de representar o clima atual da RMSP de forma aceitável. Os resultados, publicados em Batista et al. (2016), mostram que o modelo simula de forma satisfatória a temperatura e umidade relativa, variáveis utilizadas no cálculo do TAP. O diagrama de Taylor da temperatura média diária, que compara os diversos membros com dados do IAG, mostrou bons resultados nos parâmetros estatísticos avaliados (desvio padrão, raiz quadrada do erro médio quadrático centralizado e coeficiente de correlação), estando os pontos agrupados em torno da base representativa dos dados observados. Já para a umidade relativa, o membro Hadclm apresentou melhores resultados entre os 4. Nestes mesmos diagramas, as análises estatísticas também foram feitas para o conjunto dos membros (*ensemble*), de forma que os resultados se mostraram satisfatórios, estando o ponto vermelho (relativo ao conjunto dos membros) sempre localizado próximo dos membros de melhor desempenho.

No tocante às mudanças do clima para a RMSP, os resultados desta tese mostram um padrão de aquecimento aproximado de 2°C no índice TAP, entre os períodos de 1975-2005 e 2065-2099. Geograficamente, esse aumento do TAP é explicado pelo aumento da temperatura média do ar (também verificado em grande parte do Brasil, especialmente região Norte e Centro-Oeste) e manutenção do conteúdo de umidade na RMSP. Esse resultado endossa o trabalho de Nobre et al. (2010), que projeta um aumento de 2-4°C na temperatura também para um cenário de alta concentração de gases de efeito estufa, além da redução do número de noites/dias frios e aumento de noites/dias quentes.

A partir da estimativa do clima da RMSP para o final do século e visando responder à questão inicial posta relativa ao balanço existente entre os riscos de mortalidade de idosos por conta do frio e calor, é elaborada a projeção das zonas de risco para o futuro. Os resultados apontam para um cenário onde a quantidade de dias anuais pertencentes à zona de risco quente aumenta drasticamente, passando de menos de 30 dias por ano para aproximadamente 150 (no fim do século), fato que ocorre em detrimento da diminuição dos dias da zona de risco frio, que praticamente deixam de existir. Isto significa que a mortalidade como consequência do frio tende a ser reduzida de forma que até mesmo a assinatura vislumbrada atualmente, que confere formato de “v” invertido ao ciclo anual de óbitos, pelas causas aqui consideradas, possa ser diferente no futuro.

Outro resultado relevante dá conta da quantidade de episódios com pelo menos 7 dias em sequência cujo TAP médio diário foi igual ou maior ao verificado durante a onda de calor de 2014. De 2065 a 2099 foram contabilizados 42 destes episódios, que não necessariamente serão ondas de calor (pois isso significaria atender aos critérios de extensão, magnitude, duração e severidade), mas que terão similar nível de estresse térmico dadas as altas temperaturas, o que, subjetivamente, pode levar ao aumento momentâneo da mortalidade de idosos.

Por outro lado, é importante destacar que outros fatores não considerados nesta tese podem desempenhar um papel importante no padrão de mortalidade estimado. Neste trabalho, por exemplo, não foram analisadas defasagens (*lag*) entre o registro do óbito e as das variáveis dos dias anteriores. Além disso, na projeção não é considerado o aumento da temperatura em decorrência da urbanização, ou seja, é possível que o cenário de altas temperaturas seja ainda mais agressivo do que o que está sendo projetado. Além disso, Ikefuti (2016) mostra que há diferenças geográficas no tocante ao risco de mortalidade por embolia pulmonar e AVC, de forma que o impacto previsto nesta tese também possa ocorrer de modos distintos em diferentes microrregiões. Outro fator não considerado é colocado por Martens (1998), que ressalta que o balanço entre a mortalidade do inverno e verão depende significativamente de respostas adaptativas, tanto fisiológicas quanto comportamentais, aqui não levadas em consideração.

Em relação às perspectivas, espera-se que em um futuro próximo as mesmas análises sejam feitas levando-se em conta outros cenários de emissões de gases de efeito estufa, para que no fim, possa ser estabelecido um intervalo de resultados, o qual possibilitará a elaboração de um conjunto de possíveis soluções. Além disso, é recomendável que, a fim de estabelecer um senso prático para essas previsões, se façam comparativos entre o clima futuro dado pelo modelo e cidades onde o perfil térmico atual seja similar, ou encontre-se no mesmo patamar de temperatura e umidade.

Por fim, é importante que se faça uma reflexão a partir do cenário macro apresentado, no sentido de planejamento de ações que mitiguem os efeitos esperados do maior risco de mortalidade por calor aqui estimado. Tais ações devem levar em conta que o perfil de impacto do calor é diferente do frio, sendo que o primeiro tem ação mais imediata e o segundo mais prolongada. Além disso, ressalta-se a importância e necessidade de mais estudos interdisciplinares, para que eventuais barreiras de conhecimento inerentes às diferentes áreas da ciência possam ser superadas. Ao longo desta tese, é possível identificar que determinados pontos podem (e devem) ser aprofundados por pesquisadores de outras áreas do conhecimento, como medicina (para validar o impacto de variáveis meteorológicas em doenças específicas), arquitetura (no aprimoramento do índice TAP para outros cenários ou faixas etárias específicas), meteorologistas (na utilização e compartilhamento de simulações de modelos climáticos que ampliem o horizonte de pesquisa dessas áreas, contribuindo para seu avanço), entre outros. Nesse sentido, é importante que os resultados aqui apresentados, que se caracterizam como integrantes do Núcleo de Apoio à Pesquisa sobre Mudanças Climáticas da USP sirvam no âmbito da tomada de decisões capazes de moldar o futuro da nossa sociedade.

Bibliografia

- Alberdi JC et al. (1998) Daily mortality in Madrid community 1986–1992: relationship with meteorological variables. *Eur J Epidemiol.* 14:571–578.
- Akerlof et al. (2015) Vulnerable Populations Perceive Their Health as at Risk from Climate Change. *Int J Environ Res Public Health.* 12(12):15419-33.
- Barnett AG (2007) Temperature and cardiovascular deaths in the US elderly: changes over time. *Epidemiology* 18:369–372.
- Barreca AI (2012) Climate change, humidity, and mortality in the United States. *Journal of Environmental Economics and Management* 63(1), 19–34.
- Batista et al. (2016) Present climate and future projections of the thermal comfort index for the metropolitan region of São Paulo, Brazil. *Climatic Change* (137) Issue 3-4 439-454.
- Bell ML et al. (2008) Vulnerability to heat-related mortality in Latin America: a case-crossover study in São Paulo, Brazil, Santiago, Chile and Mexico City, Mexico. *Int J Epidemiol.* 37(4): 796–804.
- Blatteis CM (2012) Age-Dependent Changes in Temperature Regulation – A Mini Review. *Gerontology* 2012;58:289–295 DOI: 10.1159/000333148.
- Boulay et al. (2001) Seasonal variation in hospital admission for deep vein thrombosis and pulmonary embolism: analysis of discharge data. *British Medical Journal* 323:601-602.
- Bröde P et al. (2012) Deriving the Operational Procedure for the Universal Thermal Climate Index UTCI. *Int J Biometeorol - Special Issue (UTCI).*
- Camargo EP (2008). Doenças tropicais. *Estudos Avançados*, 22(64), 95-110.
- Carslaw DC (2015) The openair manual — open-source tools for analyzing air pollution data. Manual for version 1.1-4, King's College London.
- Cavalcanti IFA et al. (2009) Tempo e clima no Brasil. *Oficina de Textos*, São Paulo, Brasil.
- Curriero FC et al. (2002) Temperature and mortality in 11 cities of the eastern United States. *Am J Epidemiol* 155:80–87.
- da Rocha RP et al. (2006) RegCM3 simulations nested in the Hadley Center model over South America: the present day climate. *Proceedings of 8 ICSHMO*, Foz do Iguaçu, Brazil, April 24-28, 2006, INPE, p. 373-378.
- Dee et al. (2011) The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656): 553-597.
- Dessai S (2002) Heat stress and mortality in Lisbon Part I - Model construction and validation. *Int J Biometeorol.* 47: 6-12.
- Dessai S (2003) Heat stress and mortality in Lisbon Part II. An assessment of the potential impacts of climate change. *Int J Biometeorol.* 48: 37-44.
- Dickinson RE et al. (1993) Biosphere-atmosphere-transfer scheme (BATS) version 1E as coupled to

NCAR Community Climate Model. NCAR Technical Notes, Boulder, Colorado, EUA.

- Dunne JP et al. (2012) GFDL's ESM2 global coupled climate-carbon earth system models. Part I: physical formulation and baseline simulation characteristics. *J Clim* 25:6646-6665.
- Emanuel KA et al. (1999) Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models. *J Atmos Sci* 56:1766-1782.
- Fanger PO (1972) *Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering*. New York, McGraw-Hill.
- Fouillet A et al. (2006) Excess mortality related to the August 2003 heat wave in France. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 80(1):16-24. <http://doi.org/10.1007/s00420-006-0089-4>.
- Gamble JL et al. (2016) Ch. 9: Populations of Concern. *The Impacts of Climate Change on Human Health in the United States: A Scientific Assessment*. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, 247-286. <http://dx.doi.org/10.7930/J0Q81B0T>.
- Giorgetta M et al. (2012) CMIP5 simulations of the Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M) based on the MPI-ESM-LR model: The rcp85 experiment, served by ESGF. *World Data Cent Clim*.
- Giorgi F et al. (2012) RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Climate Res* 52:7-29.
- Giorgi F (2014) Introduction to the special issue: the phase I CORDEX RegCM4 hyper-matrix (CREMA) experiment. *Clim Chang* 125:1-5.
- Giles BD et al. (1990) Too hot for comfort. The heat waves in Greece in 1987 and 1988. *Int J Biometeorol* 34:98-104.
- Gonçalves FLT et al. (2007) Influences of the weather and air pollutants on cardiovascular disease in the metropolitan area of São Paulo. *Environ Res* 104(2):275-81.
- Gonçalves FLT; Coelho MSZS (2010) Variação da morbidade de doenças respiratórias em função da variação da temperatura entre os meses de abril e maio em São Paulo. *Ciência e Natura*, [S.l.], p. 103-118.
- Gouveia N et al. (2003) Socioeconomic differentials in the temperature-mortality relationship in São Paulo, Brazil. *Int J Epidemiol*. 32(3):390-7.
- Grell G (1993) Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *Mon Weather Rev* 121:764-787.
- Guest et al. (1999) Climate and mortality in Australia: retrospective study, 1979-1990, and predicted impacts in five major cities in 2030. *Clim Res* 13: 1-15.
- Guergova S; Dufour A (2011) Thermal sensitivity in the elderly: a review. *Ageing Res Rev*. 10(1):80-92.
- Guyton AC (1991) *Textbook of Medical Physiology*. W.B. Saunders, Philadelphia.

- Hajat S et al. (2005) Mortality displacement of heat-related deaths: a comparison of Delhi, São Paulo, and London. *Epidemiology* 16(5):613-20.
- Haq G et al. (2008) *Growing old in a changing climate*. New York: Stockholm Environment Institute.
- Heaviside et al. (2016) Attribution of mortality to the urban heat island during heatwaves in the West Midlands, UK. *Environmental Health* 15:1-27.
- Humphreys MA; Nicol JF (1998) Understanding the adaptive approach to thermal comfort. *ASHRAE Transactions*; Atlanta 104: 991.
- IOM (1997) Institute of Medicine (US) Committee on Pharmacokinetics and Drug Interactions in the Elderly. *Pharmacokinetics and Drug Interactions in the Elderly and Special Issues in Elderly African-American Populations: Workshop Summary*. Washington (DC): National Academies Press (US).
- Ikefuti PV (2016) Associação entre variáveis meteorológicas, Índice Climático, fatores socioeconômicos e mortalidade por doenças do aparelho circulatório (Acidente Vascular Cerebral e Embolia Pulmonar) no município de São Paulo – SP. Tese (Doutorado) - Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.
- IPCC (2007) *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 University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2014) *Climate Change 2014: Synthesis Report* Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.
- ISO 7730 (2005) *Ergonomics of the thermal environment: analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indexes and local thermal comfort criteria*. ISO 2005, Switzerland.
- Jacobs SJ et al. (2013) An analysis of the meteorological variables leading to apparent temperature in Australia: Present climate, trends, and global warming simulations. *Glob Planet Chang* 107:145–156.
- Kalkstein LS; Greene JS (1997) An evaluation of climate/mortality relationships in large U.S. cities and the possible impacts of a climate change. *Environ Health Perspect*. 105(1): 84–93.
- Kenney WL et al. (2014) Heat waves, aging, and human cardiovascular health. *Med Sci Sports Exerc*. 2014 Oct; 46(10): 1891–1899.
- Kodama YM (1992) Large-scale common features of sub-tropical precipitation zones (the Baiu Frontal Zone, the SPCZ, and the SACZ). Part I: characteristics of subtropical frontal zones. *J. Meteor. Soc. Japan*, 70, 813-835.
- Kodama YM (1993) Large-scale common features of sub-tropical precipitation zones (the Baiu Frontal Zone, the SPCZ, and the SACZ). Part II: Conditions of the circulations for generating the STCZs. *J. Meteor. Soc. Japan*, 71, 581-610.
- Krueger-Beck E et al. (2011) Potencial de ação: do estímulo à adaptação neural. *Fisioter. Mov.*,

Curitiba, 24(3): 535-547.

- Kunst AE et al. (1993) Outdoor temperature and mortality in the Netherlands: a time-series analysis. *Am J Epidemiol* 137:331–341.
- Larsen U (1990) The effects of monthly temperature fluctuations on mortality in the United States from 1921 to 1985. *Int J Biometeorol.* 34(3):136-45.
- Lent R (2005) Cem Bilhões de neurônios: conceitos fundamentais de neurociência. São Paulo: Editora Atheneu 183 - 187.
- Lima-Costa MF; Barreto SM (2003) Tipos de estudos epidemiológicos: conceitos básicos e aplicações na área do envelhecimento. *Epidemiologia e Serviços de Saúde*, 12(4), 189-201.
- Llopart M et al. (2014) Climate change impact on precipitation for the Amazon and La Plata basins. *Clim Chang* 125(1):111-125.
- Lowe et al. (1997) Blood viscosity and risk of cardiovascular events: the Edinburgh Artery Study. *Br J Haematol.* 96(1):168-73.
- Martens WJM (1998) Climate change, thermal stress and mortality changes. *Soe. Sci. Med.* 46(3): 331-344.
- Martin GM et al (2011) The HadGEM2 family of met office unified model climate configurations. *Geosci Model Dev Discuss* 4:765-841.
- Monteiro LM (2008) Modelos preditivos de conforto térmico: quantificação de relações entre variáveis microclimáticas e de sensação térmica para avaliação e projeto de espaços abertos. Tese de doutorado, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, University of São Paulo, São Paulo. doi:10.11606/T.16.2008.tde-25032010-142206.
- Monteiro LM; Alucci MP (2009) An outdoor thermal comfort for the subtropics. *Architecture Energy and the Occupant's Perspective*. Quebec: Les Presses de l'Université Laval, 2009. v.2. p.129-136.
- Muller GV; Berri GJ (2007) Atmospheric Circulation Associated with Persistent Generalized Frosts in Central-Southern South America. *Mon Wea Rev*, 135, 1268-1289.
- Nobre CA et al. (2010) Vulnerabilidades das Megacidades Brasileiras às Mudanças Climáticas: Região Metropolitana de São Paulo. INPE, IPT, UNICAMP, USP, UNESP- Rio Claro.
- Pal J et al. (2007) RegCM Version 3.1 User's Guide. International Centre for Theoretical Physics, Trieste Italy.
- Peel et al. (2007) Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 1633-1644.
- Pinheiro SLLA (2013) Clima e mortalidade: uma abordagem observacional ecológica na cidade de São Paulo. Tese de Doutorado, Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Pinheiro SLLA et al. (2014) Efeitos isolados e sinérgicos do MP10 e da temperatura média na mortalidade por doenças cardiovasculares e respiratórias. *Rev. Saúde Pública [online]* 48(6): 881-888.

- R Development Core Team (2008). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- Riahi K et al. (2011) RCP 8.5 — A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change* (2011) 109: 33-57.
- Robine JM et al. (2008) Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *Comptes Rendus Biologies* 331 (2): 171-178.
- Robinson PJ (2001) On the Definition of a Heat Wave. *J. Appl. Meteor.*, 40, 762–775.
- RStudio Team (2015). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc., Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>.
- Ruas AC (1999) Conforto Térmico nos ambientes de trabalho. São Paulo: FUNDACENTRO, 1999.
- Saha S (2006) The NCEP climate forecast system. *J. Climate*, 19: 3483-3517.
- Saha S et al. (2011) NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) Selected Hourly Time-Series Products. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. <https://doi.org/10.5065/D6N877VB>.
- Saha S et al. (2014) The NCEP Climate Forecast System Version 2. *Journal of Climate* *J. Climate*, 27, 2185–2208.
- Saldiva PHN et al. (1994) Association between Air Pollution and Mortality Due to Respiratory Diseases in Children in São Paulo, Brazil: A Preliminary Report. *Environmental Research* 65(2): 218-225.
- Sawyer OD et al. (1999) Projeção populacional, por sexo e grupos quinquenais, da Unidades da Federação, Brasil, 1920-2020. Belo Horizonte: Cedeplar-UFMG (Pronex).
- Schaanning J et al. (1986) Effects of cold air inhalation combined with prolonged sub-maximal exercise on airway function in healthy young males. *Eur J Resp Dis Suppl.* 143:74–77.
- SEADE, Fundação (2013). 1a Análise, n. 6, setembro 2013.
- Segalin B et al. (2017) Size-segregated particulate matter inside residences of elderly in the Metropolitan Area of São Paulo, Brazil. *Atmospheric Environment*, 148: 139-151.
- Sharovsky et al. (2004) Temperature, air pollution, and mortality from myocardial infarction in São Paulo, Brazil. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research* 37(11), 1651-1657.
- Smith KR et al. (2014) Human health: impacts, adaptation, and co-benefits. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 709-754.
- Son JY et al. (2016) The impact of temperature on mortality in a subtropical city: Effects of cold, heat, and heat waves in São Paulo, Brazil. *Int J Biometeorol.* 60(1): 113–121.

- Susser E et al. (1999) Paradoxical heat sensation in healthy subjects: peripherally conducted by A delta or C fibres. *Brain* 122 (Pt 2), 239–246.
- Taylor KE (2001) Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geophys. Res.*, 106(D7), 7183–7192, doi:10.1029/2000JD900719.
- Tawfik AB; Steiner AL (2011) The role of soil ice in land-atmosphere coupling over the United States: A soil moisture-precipitation winter feedback mechanism. *J Geophys Res Atmos* 116, D02113. doi:10.1029/2010JD014333.
- Thom EC (1959) The discomfort index. *Weatherwise* 12:57-60.
- Trezza BM (2014) O efeito da exposição ao calor sobre o desempenho cognitivo de idosos: um estudo controlado. Tese de doutorado, Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Trezza BM et al. (2015) Environmental heat exposure and cognitive performance in older adults: a controlled trial. *Age (Dordr)* 37(3):9783. doi: 10.1007/s11357-015-9783-z.
- United Nations (2015) *World Population Prospects: The 2015 Revision, Key Findings and Advance Tables*. Department of Economic and Social Affairs, Population Division, Working Paper No. ESA/P/WP.241.
- Waldvogel BC et al. (2003) Projeção da população paulista como instrumento de planejamento. *São Paulo Perspec.* 17: 3-4.
- WMO (1996) *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (6th Edition)*. Geneva, World Meteorological Organization, Publicação WMO No. 8.
- Wong LR; Carvalho JA (2006) O rápido processo de envelhecimento populacional do Brasil: sérios desafios para as políticas públicas. *R bras. Est. Pop.* 23(1): 5-26.
- Zanobetti A et al. (2012) Summer temperature variability and long-term survival among elderly people with chronic disease. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 109(17): 6608–6613.
- Zotterman Y (1959) Thermal sensations. In: Field, J., Magan, H.W., Hall, Victor.E. (Eds.), *Handbook of Physiology*. American Physiological Society, Washington, 431–458.

Anexos

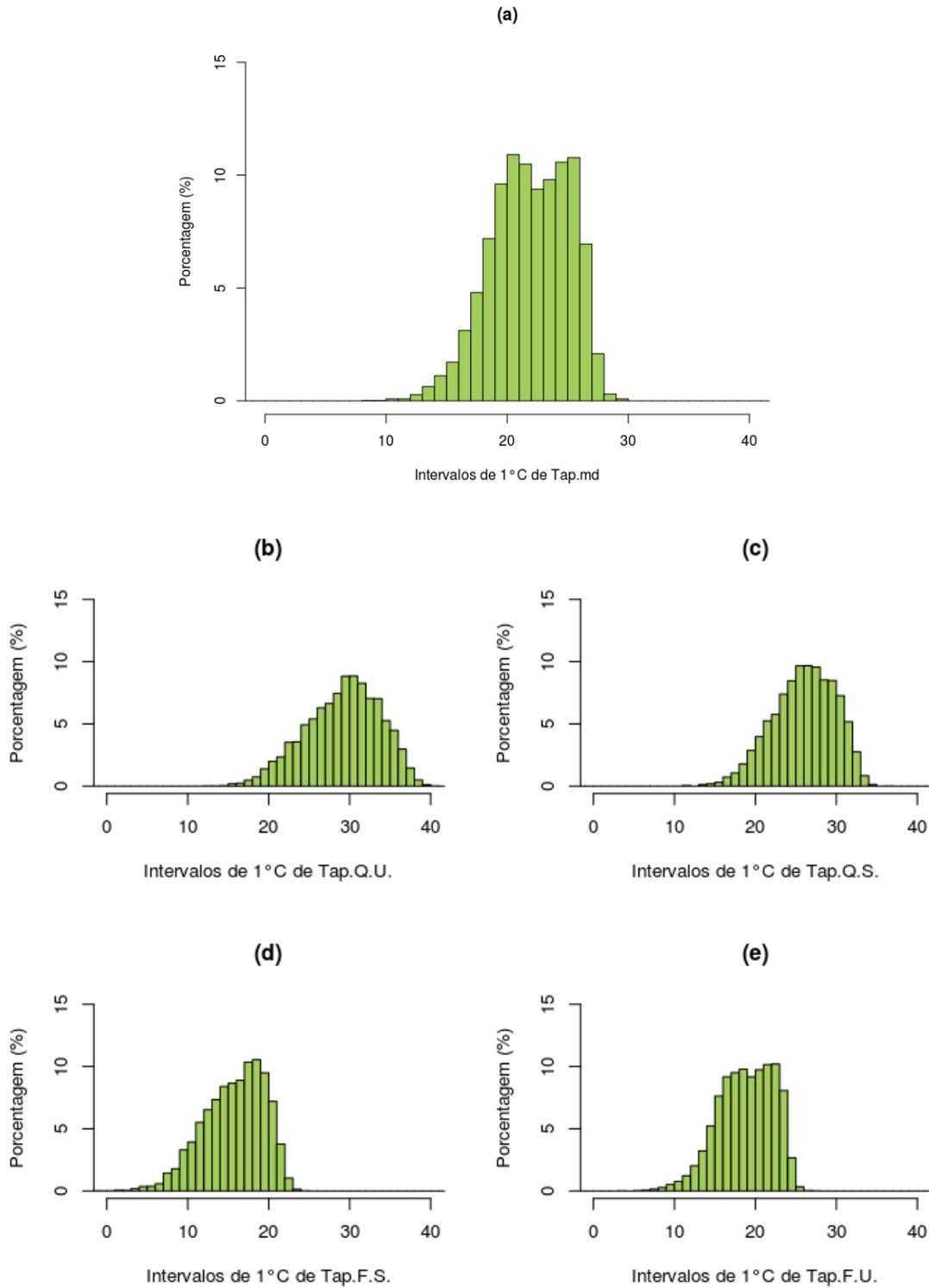


Figura 1A – Distribuição em porcentagem do TAP médio diário (a), quente-úmido (b), quente-seco (c), frio-seco (d) e frio-úmido (e), em intervalos de 1°C, de 1996 a 2014 para a RMSP.

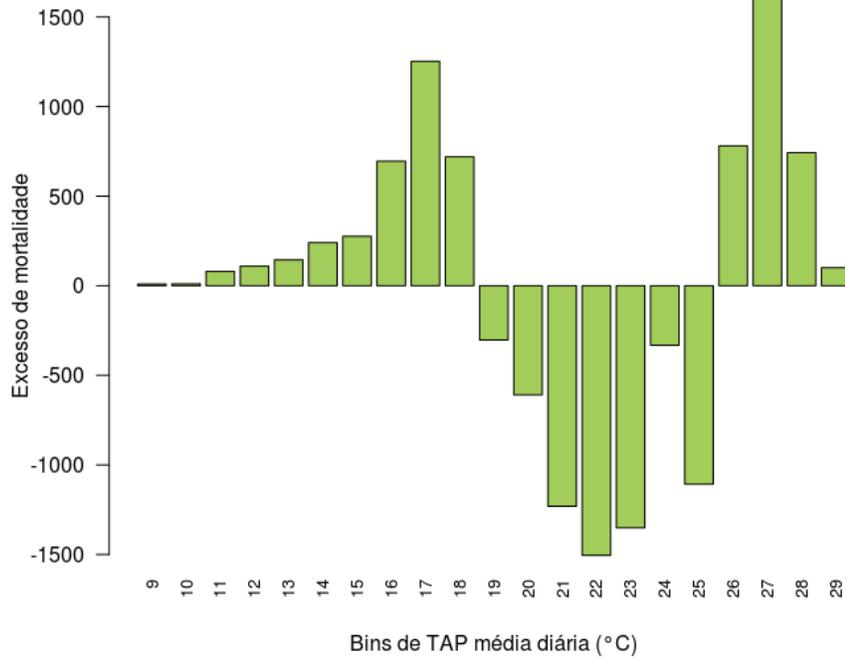


Figura 2A – Excesso de mortalidade em idosos da RMSP por bins de TAP médio diário (°C), de 1996 a 2014.

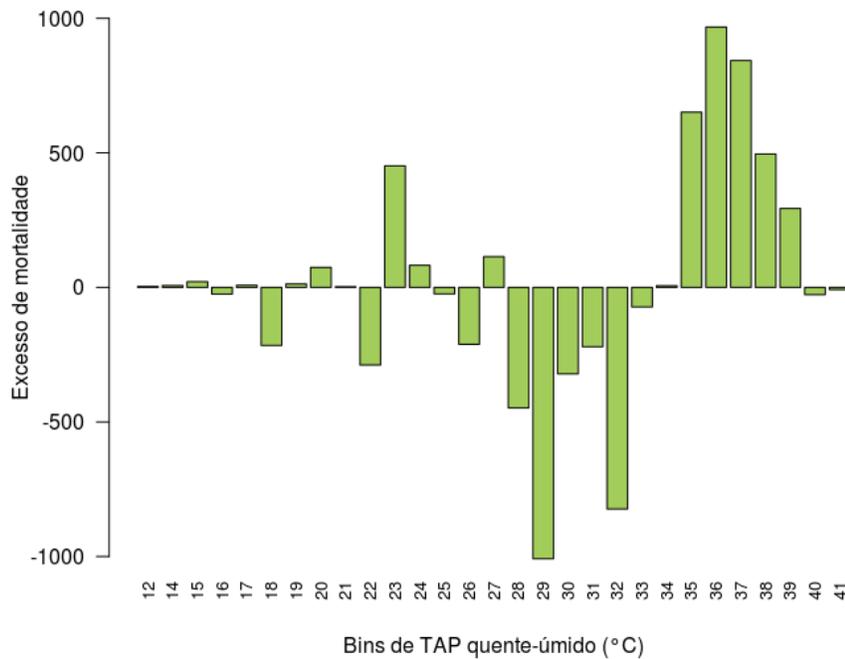


Figura 3A – Excesso de mortalidade em idosos da RMSP por bins de TAP quente-úmido (°C), de 1996 a 2014.

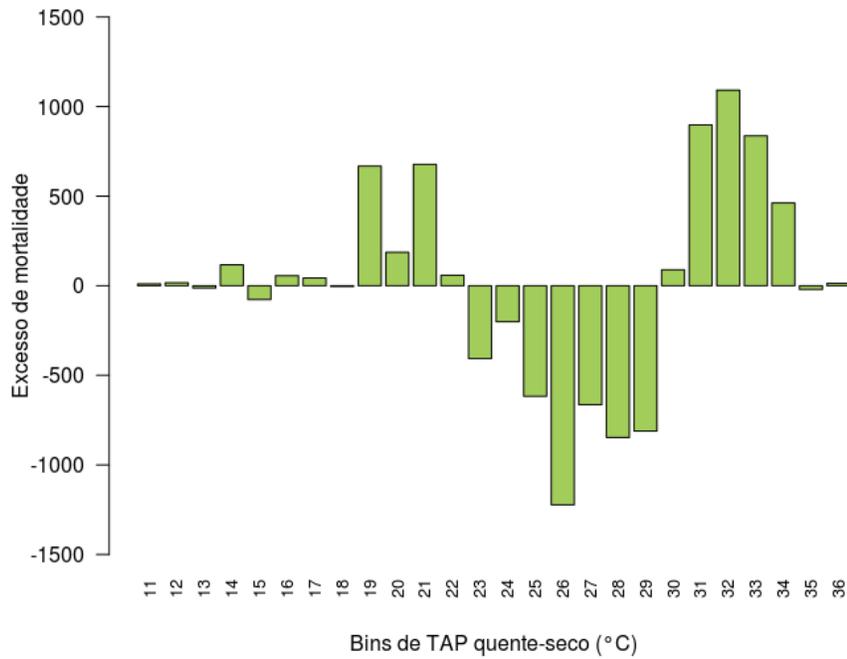


Figura 4A – Excesso de mortalidade em idosos da RMSP por bins de TAP quente-seco (°C), de 1996 a 2014.

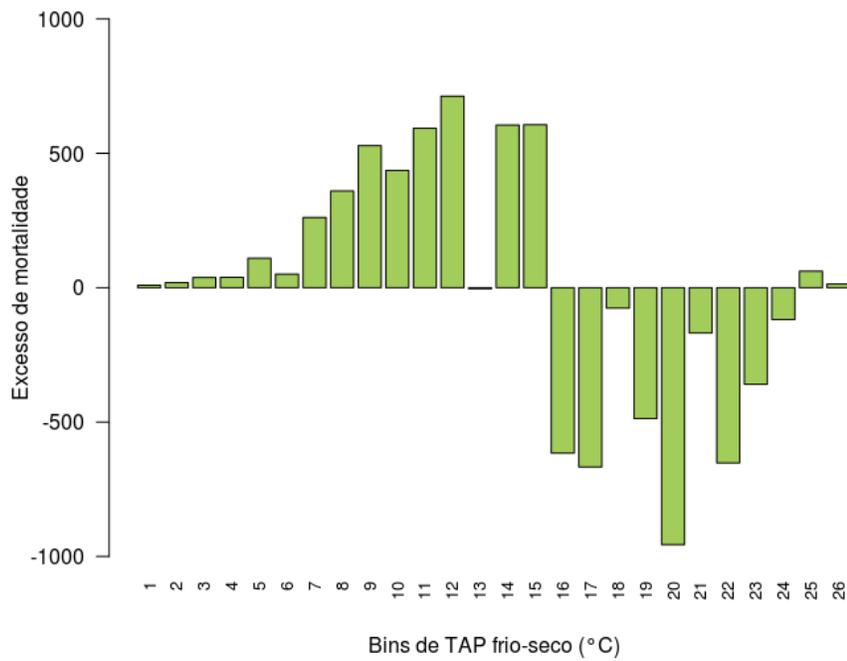


Figura 5A – Excesso de mortalidade em idosos da RMSP por bins de TAP frio-seco (°C), de 1996 a 2014.

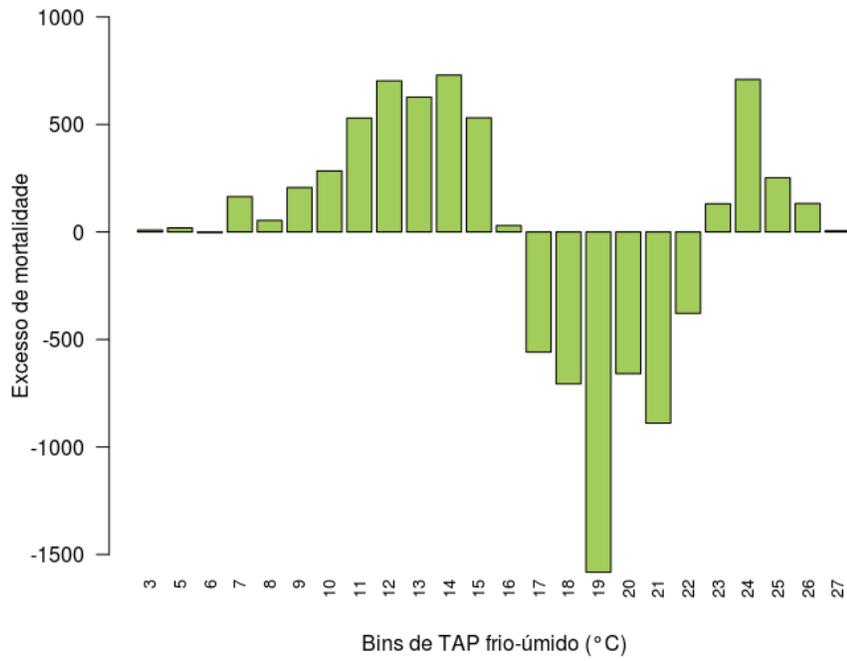
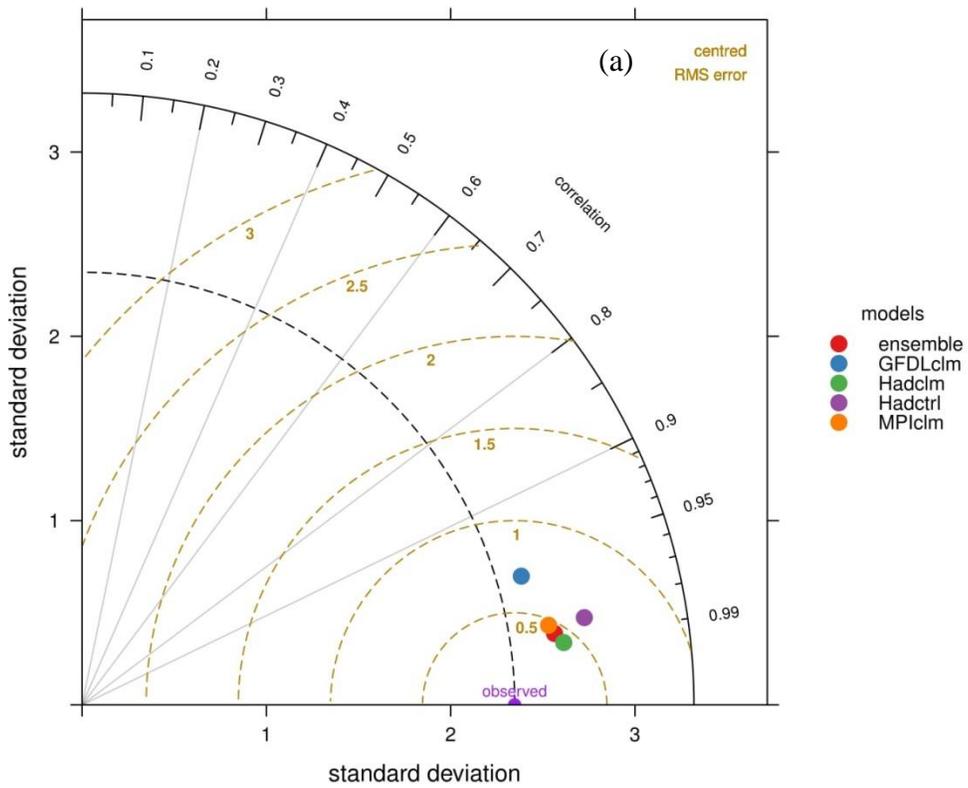


Figura 6A – Excesso de mortalidade em idosos da RMSP por bins de TAP frio-úmido (°C), de 1996 a 2014.



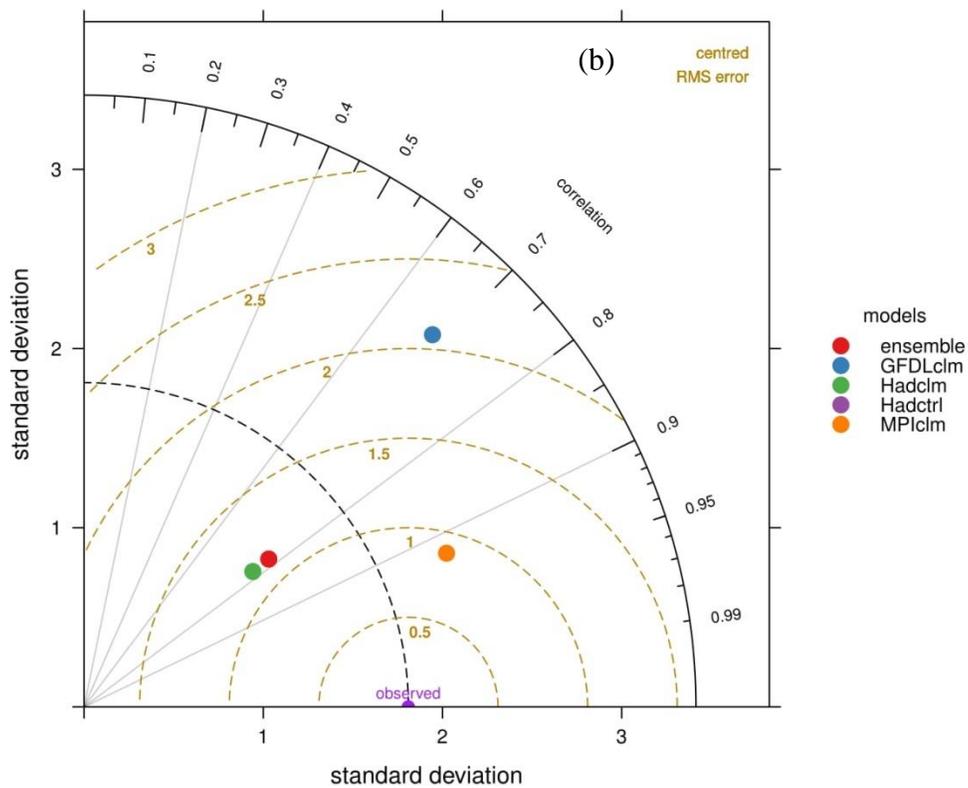


Figura 7A – Em (a) o diagrama de Taylor para temperatura média diária e em (b) umidade relativa média diária, resumando graficamente o CRMSE, desvio padrão e coeficiente de correlação entre dados do INMET e membros utilizados nas simulações do RegCM4.

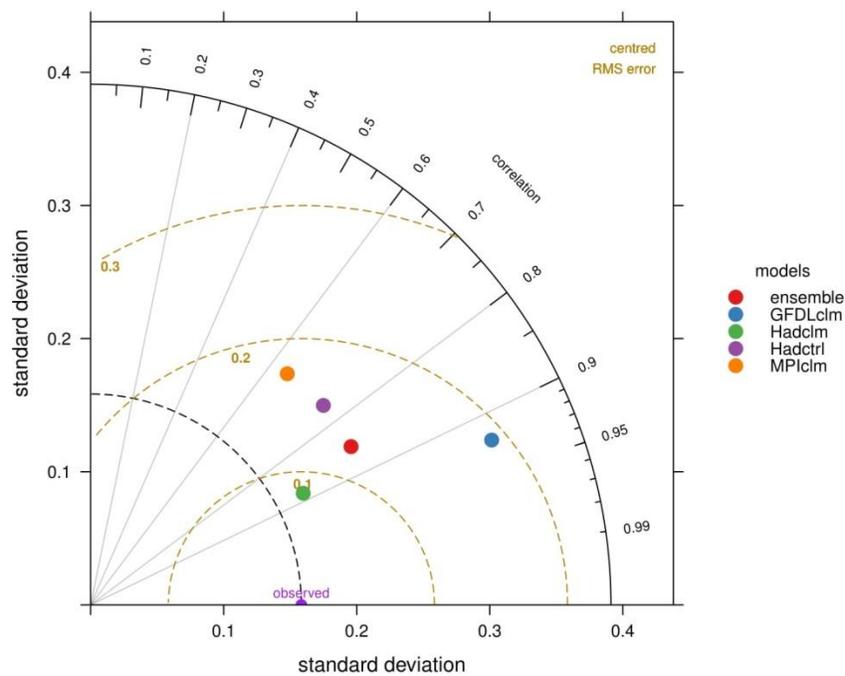


Figura 8A – Diagrama de Taylor para velocidade do vento, resumando graficamente o CRMSE, desvio padrão e coeficiente de correlação entre dados do IAG e membros utilizados nas simulações do RegCM4.

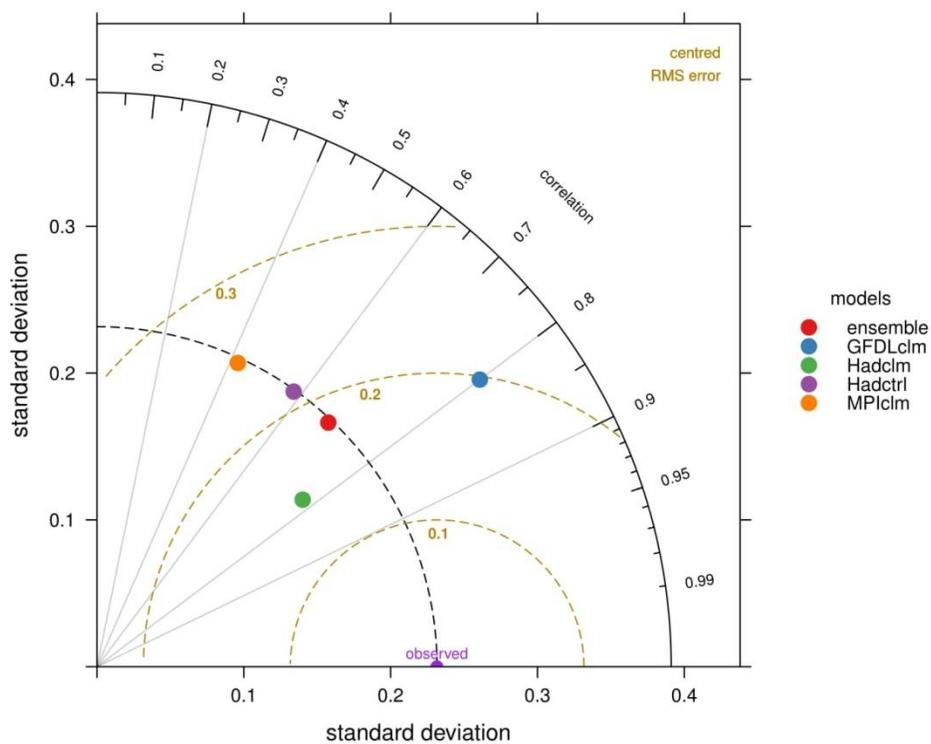


Figura 9A – Diagrama de Taylor para velocidade do vento, resumando graficamente o CRMSE, desvio padrão e coeficiente de correlação entre dados do INMET e membros utilizados nas simulações do RegCM4.

Resumo do projeto temático - Biometeorologia Humana: Análise dos efeitos de variáveis ambientais (meteorológicas, conforto térmico e poluição atmosférica) e das mudanças climáticas na população geriátrica da cidade de São Paulo

“Este é um projeto multidisciplinar, visando estudar o impacto na população geriátrica, i. e., acima de 65 anos de variáveis meteorológicas associadas ao conforto térmico humano, referentes à atual climatologia e às mudanças climáticas na região metropolitana da cidade de São Paulo. Esta temática está dentro do âmbito de estudos biometeorológicos, na subdivisão humana, baseado na ISB (*International Society of Biometeorology*). De acordo com a sociedade, os efeitos ambientais são considerados meteorotrópicos, onde uma ou mais variáveis ambientais (no caso, meteorológicas, climáticas ou mesmo de poluição atmosférica) afetam um ou mais indivíduos de uma população. A poluição atmosférica será estudada de forma indireta, no que concerne impacto de situações meteorológicas desfavoráveis versus favoráveis, onde os poluentes atmosféricos serão avaliados comparando os resultados dos testes durante a estação seca (com alta concentração de poluentes) e úmida (com baixa concentração). Este temática está dentro do âmbito de estudos biometeorológicos, na subdivisão humana, baseado na ISB (*International Society of Biometeorology*). O foco do estudo será, portanto, avaliar o desempenho cognitivo e físico da população geriátrica em um grupo pré-selecionado de idosos considerados aptos (saudáveis). Este desempenho é afetado por condições ambientais, das quais o conforto térmico humano (onde as variáveis meteorológicas atuam em conjunto) e a poluição do ar são os fatores meteorotrópicos. Conseqüentemente, um dos objetivos do estudo é estabelecer um índice de conforto térmico humano para as populações geriátricas. Premissas arquitetônicas (de desempenho térmico e ergonomia) serão igualmente desenvolvidas. Uma câmara climatizada será usada para simular os extremos do clima de São Paulo e propor um índice de conforto. Ambientes externos e internos (a câmara) serão utilizados para avaliar o impacto na população selecionada. Finalmente, a mudança climática está baseada em modelos globais GCMs, os quais mostram as variações meteorológicas para a proposição do índice de conforto, o desempenho cognitivo e físico, bem como para as proposições arquitetônicas (de desempenho térmico e ergonomia).”

Os resultados associados ao referido projeto temático de pesquisa podem ser encontrados no relatório do Processo FAPESP número 2010/10189-5.