

# **Climatologia Horária da Estação Meteorológica do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro: Uma Contribuição ao Estudo do Clima Urbano**

Graziele Rocha Duarte dos Santos

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia do Instituto de Geociências do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências (área: Meteorologia).

Orientador: Prof. Dr. Hugo Abi Karam

Rio de Janeiro-RJ

Setembro de 2019

# **Climatologia Horária da Estação Meteorológica do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro: Uma Contribuição ao Estudo do Clima Urbano**

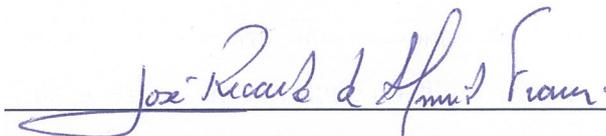
Graziele Rocha Duarte dos Santos

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DO CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ) COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM METEOROLOGIA.

Examinada por:



Orientador : Prof. Dr. Hugo Abi Karam – IGEO – UFRJ



Prof. Dr. José Ricardo de Almeida França - IGEO - UFRJ



Prof. Dr. Andrews José de Lucena - IGEO - UFRJ

RIO DE JANEIRO - RJ - BRASIL

SETEMBRO DE 2019

Da Dissertação, Autor

Climatologia Horária da Estação Meteorológica do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro: Uma Contribuição ao Estudo do Clima Urbano / Grazielle Rocha Duarte dos Santos (DUARTE DOS SANTOS, G. R.) - Rio de Janeiro: UFRJ/PPGM-IGEO/CCMN, 2019.

Volume único. 63 p. : il.; 29,7 cm.

Orientador: Hugo Abi Karam

Dissertação (Mestrado) – UFRJ/PPGM-IGEO/CCMN

Programa de Pós-graduação Meteorologia, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 60-63.

1. Climatologia Horária
2. Preenchimento de falhas
3. clima urbano. I. Duarte dos Santos, Grazielle Rocha . II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, PPGM-IGEO/CCMN, Programa de Pós-graduação em Meteorologia. III. Climatologia Horária da estação meteorológica do aeroporto internacional do Rio de Janeiro: Uma contribuição ao estudo do clima urbano

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGM-IGEO/CCMN/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## **Climatologia Horária da Estação Meteorológica do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro: Uma Contribuição ao Estudo do Clima Urbano**

por

Graziele Rocha Duarte dos Santos

### **RESUMO**

O Aeroporto do Internacional Tom Jobim é o segundo maior aeroporto do Brasil em movimento internacional, situado na Ilha do Governador-RJ. A região é a maior ilha localizada no interior da baía de Guanabara, sendo predominantemente urbanizada. O objetivo principal do trabalho é analisar em uma escala temporal horária a estação do Aeroporto ressaltando o desenvolvimento de precipitações que se concentram sobre a baía de Guanabara. Utiliza-se de análise de variáveis meteorológicas de superfície no período de 1971 a 2019 e dados pluviométricos de 2000 a 2019. Para tal, realizar-se um tratamento de dados de preenchimento de falhas, para obtenção de séries temporais de variáveis climatológicas, contínuas e pareadas. Os mapas climatológicos horários sugerem que aceleração da advecção da brisa marítima a tarde nos meses de verão está associada a formação e desenvolvimento de tempestades convectivas caracterizadas por chuvas de maior intensidade ao fundo da baía de Guanabara. A brisa é capaz de gerar convergência do vento, produzindo o movimento vertical ascendente para a formação de tempestades convectivas. O estabelecimento de climatologias horárias pode servir como referência o comportamento atmosférico (urbano), sendo útil em comparações qualitativas e quantitativas.

**Palavras chave:** Climatologia horária; Aeroporto Internacional do RJ; Precipitação convectiva urbana; Brisa marítima e urbana; Preenchimento e imputação.

Summary of the Master Thesis presented to PPGM- IGEO/CCMN/UFRJ as part of the necessary requirements to obtain the Master of Science degree (M. Sc.).

**Hourly Climatology of the Meteorological Station at the International Airport of Rio de Janeiro: A Contribution to the Study of Urban Climate**

by

Graziele Rocha Duarte dos Santos

**ABSTRACT**

Tom Jobim International Airport is the second largest airport in Brazil in international traffic, situated on Ilha do Governador-RJ. The region is the largest island located inside the Guanabara Bay, being predominantly urbanized. This paper aims to analyze an hourly time frame to Airport station emphasizing the development of rainfall that focus on the Guanabara Bay. It uses analysis of surface meteorological variables in the period 1971 to 2019 and rainfall data from 2000 to 2019. To do this, a data processing of fault completion is performed to obtain time series of climatological variables, continuous and paired. The maps show that acceleration of advection of sea breeze in the afternoon in the summer months is associated with the formation and development of convective storms characterized by higher intensity of rainfall to Guanabara bay background. The breeze generates convergence of the wind, producing an upward vertical movement for the formation of convective storms. The establishment of hourly climatologies can serve as a reference for atmospheric behavior in the city, being useful in qualitative and quantitative comparisons.

**Keywords:** Hourly climatology; International Aiport of Rio de Janeiro; Urban convective precipitation; Sea and urban breeze; Filling in and imputation;

# Agradecimentos

“Até aqui nos ajudou o Senhor e por isso estamos alegres.” 1 Samuel 7:12

Em uma manhã de janeiro em 2017, uma voz me acordou e me disse: verifique seus emails! Eu disse: Em janeiro ? Não estou esperando nada de importante... Mas obedeci. Quando vi, havia um email que mudaria minha vida nos próximos 2 anos e meio: A convocação de Matrícula para o Mestrado em Meteorologia na UFRJ. Um misto de sentimentos passou em minha alma naquele instante e o maior deles era a GRATIDÃO.

Essa voz que falou claro em meu coração era a voz de Deus. Durante esse período Ele me ensinou a sorrir em meio a dor, me ensinou que mesmo em meio aos temporais que possam vir , Ele sempre estará comigo não importa o tamanho da tempestade. Em meio a todas as dificuldades e desafios enfrentados nesses últimos dois anos, recebia mais uma porção diária de força vinda Dele. “Deus não nos deu um espírito de medo, mas um espírito de força, de amor e de sabedoria” (2 Tim 2:7). A Alegria do Senhor é nossa força! Obrigada Senhor, toda honra e glória sejam dadas a ti!

À minha família : minha Mãe Sayonara, meu Pai Alberto e minha irmã Grayciele. Vocês foram meu porto seguro durante todo esse período, me incentivavam a continuar, me ajudavam a acreditar que tudo daria certo. Eu agradeço a Deus todos os dias pela suas vidas e pela nossa união. Ter uma família unida como a nossa, permitia que não só passássemos pelos momentos difíceis juntos, mas passar por eles sabendo que a alegria sempre viria ao amanhecer pois Deus sempre estava conosco. Obrigada por serem os meus pés quando não conseguia caminhar, por me carregarem no colo, por serem um ombro amigo, por chorarem comigo quando as palavras não traduziam o tamanho da dificuldade. Vocês estavam sempre presentes em cada etapa desse período e se eu consegui chegar até aqui, foi porquê tinha vocês ao meu lado. Eu sou a pessoa mais afortunada do mundo em ter pessoas incríveis como vocês como família. Obrigada mãe, obrigada pai, obrigada Grayci e aos membros caninos da família Ed (in memoriam) e Cherrie.

Às minhas avós Ilma, Alice e Tia Tania. Obrigada por todo apoio emocional, pelo colo, pelo amor e carinho. Sei que vocês estão sempre torcendo pela minha felicidade e sempre estão orando por mim! Que Deus prolongue o tempo de vocês aqui na Terra, pois vocês são incríveis.

Ao meu namorado Arthur que veio junto comigo quando fiz a prova e a matrícula no mestrado. Você sempre esteve ao meu lado com todo o seu amor e sonhou esse sonho comigo antes dele se realizar. Você me ouvia e me ajudava e sempre oferecia seu ombro amigo, me ainda me levava para comer tapioca. Nos momentos difíceis, você vinha com todo amor do mundo e sempre me fazia ficar melhor, principalmente por causa do seu maravilhoso senso de humor!! Você Obrigada por me amar, meu amor! Eu agradeço a Deus pela sua vida!

Às minhas minhas amigas Amne e Liz, amizades que se consolidaram ao longo desses anos de mestrado. São irmãs que ganhei de Deus, mulheres sábias, inteligentíssimas, cheias de força! Agradeço por toda amizade, carinho, cuidado, amor, compreensão... Sem vocês seria muuito mais difícil do que já foi (risos)! Obrigada por toda ajuda, por nunca deixarem que eu me sentisse sozinha aqui na UFRJ. Friends forever, amo vocês demais! Que Deus continue as abençoando em tudo que fizerem! Tenho certeza que vocês continuarão sendo cientistas incríveis!

À minha amiga Arianne, pelo apoio incondicional em orações e conversas ao longo desses dois anos. Obrigada minha amiga pela sua amizade, carinho, atenção, por ser essa mulher de fé e por ter batalhado junto comigo nessa peleja. Que Deus continue te ajudando e fortalecendo. Muito Obrigada!

Minhas amigas Cturianas que me acompanham desde 2007: Bia, Giselle e Jéssica. Obrigada por todos esses anos de amizade, por estarem comigo nesses últimos anos, pelos momentos de diversão, pelas madrugadas acordadas, pelas lágrimas compartilhadas, pelas suas orações e amor! Amigas, quero levá-las pra sempre!

Aos meus amigos Ruan e família e Tia Cláudia por todo companheirismo, amizade e orações. Vocês fazem parte de tudo isso! Obrigada por tudo! Que Deus nunca lhes deixe nada faltar! Aos meus amigos Seu Antônio, Tania e Stefany, obrigada por todo carinho dessa família que tanto amo. À minha amiga Tati, que mesmo lá do Acre tem estado presente, compartilhando experiências e me ajudando em oração.

Ao meu amigo Andrews Lucena que me apresentou à pesquisa em Clima Urbano. Obrigada por ter acreditado em mim desde a graduação na UFRuralRJ, por sonhar comigo sobre a possibilidade de fazer um mestrado acadêmico na área que

gostava. Te agradeço também por ser um amigo que eu pudesse contar e por nunca ter medido esforços em me ajudar, inclusive a não desanimar no meio do caminho. Que Deus te abençoe e fortaleça sempre!

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Meteorologia da UFRJ, principalmente aos que não me trataram de forma diferenciada pelo fato de eu ser geógrafa. Dentre esses, agradeço ao Prof. Luiz Cláudio, que se demonstrou um grande amigo ao longo dessa jornada. Obrigada pela sua conduta para comigo, jamais me esquecerei de sua amizade, por ter me ouvido sempre quando necessitava e por sempre me incentivar a continuar.

À Equipe médica que me auxiliou ao longo do processo até eu descobrir a deficiência física que adquiri em 2017. À Equipe de Neurocirurgia do Hospital Universitário da UFRJ, principalmente ao Dr. Marcus Acioly (especialista em nervos periféricos). À Dra Silvia e à Dra Nádia que me ajudaram em momentos muito difíceis, meus sinceros agradecimentos. Aos fisioterapeutas com os quais fiz tratamento, principalmente a Rayane que tem me ajudado muito a diminuir as dores e a andar novamente. Vocês também fazem parte dessa história!

Aos meus amigos do grupo de carona para o Fundão: a Jéssica Fontes que me convidou e aos motoristas Bruno, Rafael, Erick e Filipe.

Ao meu Orientador, Prof. Hugo Abi Karam por ter me recebido em seu laboratório e por ter aceitado prontamente o meu tema de pesquisa. Muito obrigada! À Capes pelo financiamento desse projeto, meus sinceros agradecimentos.

Às pessoas que me ajudaram no meio desse processo, seja subir e descer do ônibus, ou a dizer uma palavra encorajadora o meu muito obrigada. Que Deus lhes recompense.

# Índice

Capítulo 1 – Introdução.....	1
1.1 Considerações Iniciais.....	1
1.2 Justificativa.....	2
1.3 Objetivos.....	3
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica.....	5
2.1. Urbanização e o Clima Urbano.....	5
2.2 Ilha de calor urbana.....	6
2.3 Precipitação.....	8
2.4 Pesquisas sobre a ilha calor urbana e precipitação convectiva.....	9
2.5 Precipitação Convectiva.....	12
Capítulo 3 – Metodologia.....	15
3.1. Domínio Espacial.....	15
3.2. Dados utilizados.....	20
3.3. Imputação para preenchimento de falhas.....	20
3.4. Tratamento dos dados.....	21
3.5 Fluxograma metodológico.....	23
Capítulo 4 – Resultados.....	24
4.1 Contextualização.....	24
4.2 Análise da climatologia horária.....	26
4.3 Taxa de precipitação.....	40
4.4 Comparação de acordo com a intensidade.....	44
4.6. Discussão.....	49
Capítulo 5.....	55
5.1 Conclusões.....	55
5.2 Perspectivas e Recomendações.....	57
Anexo.....	58
Referências.....	60

## Lista de figuras

### Capítulo 2

**Figura 2.1** Estágios de evolução de uma nuvem cumulonimbus, chamados estágio: 1) cúmulos; 2) maduro e 3) dissipativo. (In BARCELLOS, 2009 p. 33, a partir do original de BYERS e BRAHAM, 1949). 13

### Capítulo 3

**Figura 3.1** Regiões de Planejamento, Regiões administrativas e bairros do município do Rio de Janeiro. (Instituto Pereira Passos, 2017). 17

**Figura 3.2** Localização dos bairros situados na Ilha do Governador. (Instituto Pereira Passos, 2006, adaptado por Fialho, 2010). 18

**Figura 3.3** Fluxograma proposto para tratamento dos dados e análise neste trabalho. 23

### Capítulo 4

**Figura 4.1** Série temporal da temperatura do ar reformatada pelo programa reading\_dataset a partir do arquivo csv original (vide anexo) correspondente às medições no Aeroporto Internacional Tom Jobim do Rio de Janeiro (Galeão), Ilha do Governador, RMRJ, Brasil. Obs.: a plotagem dos dados originais não é comoda pois os dados vem com a indicação temporal separada (e.g., “2019-06-10 22:00”, portando como um sequência de caracteres alfanuméricos). 25

**Figura 4.2** Climatologia horária da temperatura do ar [T], em (°C), ao longo das horas do dia (abscissa) e dos meses do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições na estação meteorológica do aeroporto internacional do Rio de Janeiro para o período 1971-2019 (48 anos). No eixo x a coordenada de horas é UTC, i.e., Hora Mundial ou Tempo Coordenado Universal (UTC: Universal Time, Coordinated) ou Hora Média de Greenwich (GMT, Greenwich Mean Time), correspondente a hora do tempo local (TL) do Rio de Janeiro (TL = UTC - 3h). 27

**Figura 4.3** Climatologia horária da temperatura do bulbo úmido [Td], em (°C), ao longo das horas do dia (abscissa) e dos meses do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições na estação meteorológica do 28

aeroporto internacional do Rio de Janeiro para o período 1971-2019 (48 anos). No eixo x a coordenada de horas é UTC, sendo a hora do tempo local (TL) do Rio de Janeiro dada por (TL = UTC - 3h).

**Figura 4.4** Climatologia horária da pressão atmosférica local [p], em (hPa), ao longo das horas do dia (abscissa) e dos meses do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições na estação meteorológica do aeroporto internacional do Rio de Janeiro para o período 1971-2019 (48 anos). No eixo x a coordenada de horas é UTC, sendo a hora do tempo local (TL) do Rio de Janeiro dada por (TL = UTC - 3h).

29

**Figuras 4.5** Climatologia horária da umidade específica [q], em ( $\text{g kg}^{-1}$ ), ao longo das horas do dia (abscissa) e dos meses do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições na estação meteorológica do aeroporto internacional do Rio de Janeiro para o período 1971-2019 (48 anos). No eixo x a coordenada de horas é UTC, sendo a hora do tempo local (TL) do Rio de Janeiro dada por (TL = UTC - 3h).

30

**Figuras 4.6** Climatologia horária da variável umidade relativa [UR], em (%), ao longo das horas do dia (abscissa) e dos meses do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições na estação meteorológica do aeroporto internacional do Rio de Janeiro para o período 1971-2019 (48 anos). No eixo x a coordenada de horas é UTC, sendo a hora do tempo local (TL) do Rio de Janeiro dada por (TL = UTC - 3h).

31

**Figuras 4.7** Climatologia horária da velocidade do vento [vel], em ( $\text{m s}^{-1}$ ), ao longo das horas do dia (abscissa) e dos meses do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições na estação meteorológica do aeroporto internacional do Rio de Janeiro para o período 1971-2019 (48 anos). No eixo x a coordenada de horas é UTC, sendo a hora do tempo local (TL) do Rio de Janeiro dada por (TL = UTC - 3h).

32

**Figura 4.8** Climatologia horária da componente zonal [u] do vetor velocidade do vento, em ( $\text{m s}^{-1}$ ), ao longo das horas do dia (abscissa) e dos meses do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições na estação meteorológica do aeroporto internacional do Rio de Janeiro para o período 1971-2019 (48 anos). No eixo x a coordenada de horas é UTC, sendo a hora do tempo local (TL) do Rio de Janeiro dada por (TL = UTC - 3h).

33

**Figura 4.9** Climatologia horária da componente meridional [v] do vetor

35

velocidade do vento, em ( $\text{m s}^{-1}$ ), ao longo das horas do dia (abscissa) e dos meses do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições na estação meteorológica do aeroporto internacional do Rio de Janeiro para o período 1971-2019 (48 anos). No eixo x a coordenada de horas é UTC, sendo a hora do tempo local (TL) do Rio de Janeiro dada por ( $\text{TL} = \text{UTC} - 3\text{h}$ ).

**Figuras 4.10** Climatologia horária da direção do vento [dir], em (graus), ao longo das horas do dia (abscissa) e dos meses do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições na estação meteorológica do aeroporto internacional do Rio de Janeiro para o período 1971-2019 (48 anos). No eixo x a coordenada de horas é UTC, sendo a hora do tempo local (TL) do Rio de Janeiro dada por ( $\text{TL} = \text{UTC} - 3\text{h}$ ).

**Figuras 4.11** Climatologia horária da temperatura potencial [TP], em (K), ao longo das horas do dia (abscissa) e dos meses do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições na estação meteorológica do aeroporto internacional do Rio de Janeiro para o período 1971-2019 (48 anos). No eixo x a coordenada de horas é UTC, sendo a hora do tempo local (TL) do Rio de Janeiro dada por ( $\text{TL} = \text{UTC} - 3\text{h}$ ).

**Figuras 4.12** Climatologia horária da temperatura potencial equivalente [TPE], em (K), ao longo das horas do dia (abscissa) e dos meses do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições na estação meteorológica do aeroporto internacional do Rio de Janeiro para o período 1971-2019 (48 anos). No eixo x a coordenada de horas é UTC, sendo a hora do tempo local (TL) do Rio de Janeiro dada por ( $\text{TL} = \text{UTC} - 3\text{h}$ ).

**Figuras 4.13** Climatologia horária da altura do nível de condensação por levantamento [NCL], em (m), ao longo das horas do dia (abscissa) e dos meses do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições na estação meteorológica do aeroporto internacional do Rio de Janeiro para o período 1971-2019 (48 anos). No eixo x a coordenada de horas é UTC, sendo a hora do tempo local (TL) do Rio de Janeiro dada por ( $\text{TL} = \text{UTC} - 3\text{h}$ ).

**Figura 4.14** Climatologia horária da precipitação acumulada em 15 minutos [ $r_{15\text{min}}$ ], em (mm), obtida em função da hora do dia (abscissa) e do mês do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições do posto pluviográfico Ilha do Governador da cidade do Rio de Janeiro, para o período 2000-2019 (19 anos). No eixo x a coordenada temporal é a hora local (TL),

considerando o horário de verão, que acresce +1 hora no período que se estende de 3 de novembro a 20 de fevereiro, aproximadamente.

**Figura 4.15** Climatologia horária da precipitação acumulada em 1 hora [ $r_{1h}$ ], em (mm), obtida em função da hora do dia (abscissa) e do mês do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições do posto pluviográfico Ilha do Governador da cidade do Rio de Janeiro, para o período 2000-2019 (19 anos). No eixo x a coordenada temporal é a hora local (TL), considerando o horário de verão, que acresce +1 hora no período que se estende de 3 de novembro a 20 de fevereiro, aproximadamente. 41

**Figura 4.16** Climatologia horária da precipitação acumulada em 4 horas [ $r_{4h}$ ], em (mm), obtida em função da hora do dia (abscissa) e do mês do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições do posto pluviográfico Ilha do Governador da cidade do Rio de Janeiro, para o período 2000-2019 (19 anos). No eixo x a coordenada temporal é a hora local, com horário de verão, para o Rio de Janeiro. 42

**Figura 4.17** Climatologia horária da precipitação acumulada em 24 horas [ $r_{24h}$ ], em (mm), obtida em função da hora do dia (abscissa) e do mês do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições do posto pluviográfico Ilha do Governador da cidade do Rio de Janeiro, para o período 2000-2019 (19 anos). No eixo x a coordenada temporal é a hora local, com horário de verão, para o Rio de Janeiro. 43

**Figura 4.18** Climatologia horária da precipitação acumulada em 96 horas [ $r_{96h}$ ], em (mm), obtida em função da hora do dia (abscissa) e do mês do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições do posto pluviográfico Ilha do Governador da cidade do Rio de Janeiro, para o período 2000-2019 (19 anos). No eixo x a coordenada temporal é a hora local, com horário de verão, para o Rio de Janeiro. 44

**Figura 4.19** Climatologia horária da precipitação acumulada em 1 hora [ $r_{1h}$ ], em (mm), para intensidade igual ou maior que 20 mm, obtida em função da hora do dia (abscissa) e do mês do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições do posto pluviográfico Ilha do Governador da cidade do Rio de Janeiro, para o período 2000-2019 (19 anos). No eixo x a coordenada temporal é a hora local, com horário de verão, para o Rio de Janeiro. 45

**Figura 4.20** Climatologia horária da precipitação acumulada em 24 horas [ $r_{24h}$ ], 46

em (mm), para intensidade igual ou maior que 20 mm, obtida em função da hora do dia (abscissa) e do mês do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições do posto pluviográfico Ilha do Governador da cidade do Rio de Janeiro, para o período 2000-2019 (19 anos). No eixo x a coordenada temporal é a hora local, com horário de verão, para o Rio de Janeiro.

**Figura 4.21** Climatologia horária da precipitação acumulada em 1 hora [ $r_{1h}$ ], em (mm), para intensidade igual ou maior que 40 mm, obtida em função da hora do dia (abscissa) e do mês do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições do posto pluviográfico Ilha do Governador da cidade do Rio de Janeiro, para o período 2000-2019 (19 anos). No eixo x a coordenada temporal é a hora local, com horário de verão, para o Rio de Janeiro.

47

**Figura 4.22** Climatologia horária da precipitação acumulada em 24 horas [ $r_{24h}$ ], em (mm), para intensidade igual ou maior que 40 mm, obtida em função da hora do dia (abscissa) e do mês do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições do posto pluviográfico Ilha do Governador da cidade do Rio de Janeiro, para o período 2000-2019 (19 anos). No eixo x a coordenada temporal é a hora local, com horário de verão, para o Rio de Janeiro.

48

**Figura 4.23:** Três tipos frequentes de precipitação no estado do Rio de Janeiro: a) tipo I: Sistemas convectivos de mesoescala (Linhas de instabilidade); b) tipo II: interação da brisa marítima com a brisa urbana, convergência do escoamento e efeito de bloqueio topográfico; c) tipo III: passagem de frentes frias (Referência: este trabalho).

51

# Capítulo 1 - Introdução

## 1.1 Considerações Iniciais

Na formação territorial do Brasil, o Sudeste se transformou no centro articulado com concentração espacial da produção de capital e serviços e da população, em que o espaço natural deu lugar ao espaço urbano associada à problemas de toda ordem desencadeados pela degradação ambiental e condicionados pelo clima. O uso da terra modifica o balanço de energia e de água da superfície, causando um aumento da temperatura do ar local, que é favorável à precipitações concentradas sobre a cidade (e.g., OKE, 1989; MENDONÇA e DANI-OLIVEIRA, 2007; CAVALCANTI *et al.*, 2009).

A cidade do Rio de Janeiro possui uma orografia demasiadamente acidentada, tendo diferentes ambientes variando entre as áreas de maciços e baixadas, com uma população de aproximadamente 6,8 milhões (IBGE, cidades 2019). O processo de urbanização, caracterizado com o rápido aumento da densidade populacional, marcado por desregulamentação fundiária com ocupação de áreas de risco e degradação ambiental. (e.g. MEIRELES *et al.*, 2014; GARTLAND, 2010).

A localidade tem como principal via de transporte aéreo o Aeroporto Internacional Tom Jobim, localizado na da Ilha do Governador. Também conhecido como Aeroporto do Galeão, é o segundo maior aeroporto do Brasil em movimento internacional, possuindo atualmente 26 companhias aéreas em operação, com rotas domésticas e para cidades localizadas na África, América do Norte, Central e do Sul, Europa e Oriente médio(Rio Galeão, 2019).

A Ilha do governador é a maior ilha localizada no interior da baía de Guanabara, com uma área correspondente a 40 km<sup>2</sup>, sendo composta por 14 bairros. A região é predominantemente urbanizada, sendo composto por residências, comércios, indústrias e serviços. Na segunda metade do século XX, mais precisamente no ano de 1952 foi inaugurado o Aeroporto Internacional Tom Jobim, localizado no bairro Galeão, o qual

abrange a maior área construída em relação a outros estabelecimentos do país, sendo a principal via de entrada de aeronaves para o estado do Rio de Janeiro. Nas mesmas instalações do aeroporto se encontra a Base Aérea do Galeão (BAGL), uma base militar da Força Aérea Brasileira (FAB).

## 1.2 Justificativa

Análises climatológicas tem sido muito importantes ao planejamento das atividades humana de longo prazo, quando as condições climáticas podem ser consideradas homogêneas (i.e., métricas e inferências invariantes sob translação ao longo da série temporal). Essas análises podem ser utilizadas no planejamento urbano, da produção agrícola tradicional, de ações mitigadoras dos efeitos de seca .

Dereczynski et al. (2009; 2011) mostraram que o aumento da frequência de eventos extremos de precipitação na cidade do Rio de Janeiro, sendo esta resultante do rápido processo de urbanização ocorrido na segunda metade do século XX (i.e., essas evidências foram obtidas a partir da análise de variáveis meteorológicas de superfície, em particular das estações automáticas de medição do Alto da Boa Vista e de Santa Cruz, bairros do município do Rio de Janeiro-RJ, ambas mantidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Marques Filho et al. (2009), descreve que a Ilha de calor presente Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) possui uma peculiaridade diurna, com máxima amplitude pela manhã. Essa pode ser associada à fraca brisa terrestre observada na RMRJ ao alvorecer, ao mesmo tempo que intensificar a brisa marítima que acelera durante o período da tarde, assim promovendo as condições necessárias à formação e desenvolvimento de tempestades convectivas ao final da tarde e início da noite, podendo algumas delas ser associadas às precipitações nas encostas da Serra do Mar, por vezes intensas.

A série histórica do Aeroporto Internacional do Galeão é uma das séries mais completas de dados presentes na cidade do Rio de Janeiro. Torna-se importante a sua investigação para observar o comportamento dos dados meteorológicos da Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (Redemet/Brasil) e nos dados pluviométricos provenientes do dados pluviométricos da rede de estações da Fundação Instituto de

Geotécnica (GeoRio) e do Sistema de Alerta de Deslizamentos do Rio de Janeiro (AlertaRio) (estação ilha do governador).

Os resultados apresentados neste trabalho podem ser utilizados para obter-se gráficos similares para as demais estações disponíveis na cidade do Rio de Janeiro-RJ, estações de aeroportos e estações da rede de monitoramento de Mesoescala da precipitação mantida pela prefeitura do Rio de Janeiro e as demais estações localizadas no estado do Rio de Janeiro.

### 1.3 Objetivos

O objetivo principal do trabalho é analisar numa escala temporal horária a estação do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro, ressaltando o desenvolvimento de precipitações que se concentram sobre a baía de Guanabara. Utiliza-se de análise de variáveis meteorológicas de superfície no período de 1971 a 2019 e dados pluviométricos de 2000 a 2019.

Como objetivos específicos, tem-se

1. Levantamento dos dados meteorológicas e pluviométricas localizadas na área de estudo (Aeroporto internacional do RJ);
2. Elaboração de mapas térmicos e pluviométricos para cada dia do ano e hora do dia;
3. Análise da relação entre a formação de precipitação convectiva e a evolução das variáveis meteorológicas de superfície ;
4. Análise do papel da brisa sobre a formação das precipitações convectivas na fundo da baia de Guanabara;
5. Caracterização do acúmulo de chuvas no verão e no inverno em diferentes categorias.

A ênfase será observacional, uma vez que os dados apresentam falhas ou sequências de falhas, para as quais recomenda-se preenchimento de falhas (ALLISON, 2001) ou *missing data method*, em inglês. Primeiro, aplica-se deleção pareada como

tratamento de dados faltantes nas séries temporais das variáveis meteorológicas de superfície. A partir das séries reduzidas, contínuas e sem falhas, constrói-se a climatologia, ou seja, valores médios e variância para cada hora do dia e dia do ano.

O trabalho está dividido em sessões, contendo: Introdução (capítulo 1); Revisão bibliográfica (capítulo 2); Metodologia (capítulo 3); discussão de resultados (capítulo 4); conclusões, perspectivas e recomendações (capítulo 5). Também incluiu-se Anexos ao final, mostrando detalhes utilizados na formatação e reformatação das séries de dados.

## Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

### 2.1. Urbanização e o Clima Urbano

Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU, 2016), mais da metade da população mundial já reside em áreas urbanas. Estes dados tendem a aumentar conforme as projeções revelam que em 2030 serão 60%. Tais informações destacam que ao longo do presente século XXI, a maior parte da população viverá nas cidades, sendo influenciadas pelo “clima urbano”. Explica-se: nas cidades, o clima é singular, pois a construção de estruturas habitacionais, estradas, pavimentação, telhados, entre outros, traz mudanças das condições microclimáticas, produzindo diversos microclimas de grande complexidade em metrópoles (BARRY e CHORLEY, 2013).

No Brasil, no início dos anos 1970, Monteiro (1976: USP) discutia o papel do clima urbano, de acordo com ele responsável pela modificação do clima local anterior, no qual o desenvolvimento urbano (i.e., a urbanização) agia para acentuar tais mudanças.

Muitos pesquisadores, arquitetos e climatologistas, como Oke (1982), trouxeram a luz o conceito de “cânion urbano”. A circulação atmosférica no meio urbano é diferenciada pois este ambiente possui uma rugosidade peculiar, que formam corredores de circulação formados pelas construções ali presentes. Estes são chamados “cânions urbanos”, correspondendo a uma configuração do espaço urbano, no qual paredes de edificações em ambos os lados das ruas, criam uma cavidade térmico-radiativa aberta acima, favorecendo o aprisionamento da radiação de ondas longas terrestre (i.e., infravermelho termal), absorção e reabsorção de dos fluxos de radiação, sombreamento das ruas, árvores baixas e áreas construídas e o acúmulo de energia por condução de calor nos elementos urbanos, o que modifica o balanço de energia pelo termo de acúmulo de calor (retenção dentro dos prédios), aumento da turbulência atmosférica da camada rugosa da camada limite superficial, que se estende acima do dossel urbano, além de aumento de convergência do vento sobre a cidade e a redução local da área visível (OKE, 1982; NASCIMENTO *et. al.* 2015, entre muitos outros).

A cidade pode ser considerada a expressão da organização e desorganização social atual, manifestando a ação humana modificadora das condições de superfície-espço e da equidade e desigualdade sociopolítica e econômica. As distâncias deixam de ser apenas métricas, sendo que os fluxos se concentram e se desconcentram, distribuindo e concentrando a renda e capital em geral onde o trabalho de desconcentra e concentra, gerando a injustiça social e os múltiplos pontos de risco ambiental nas metrópoles brasileiras (e.g., SANTOS, 2013).

As edificações, concentração de equipamentos e pessoas, retirada/modificação da cobertura vegetal, impermeabilização e a canalização de drenagem pluvial e canalizações de engenharia sobre rios e ribeirões de água urbana, transformam a dinâmica dos fluxos materiais, energéticos, econômicos e psicossociais, causando ou potencializando riscos naturais, sejam eles hidrometeorológicos ou termais. Em particular, modificam-se os balanço de energia e hídrico da superfície urbana em relação aos mesmos de áreas periurbanas, rurais e florestais (OKE, 1982; DIAS e NASCIMENTO, 2014).

Do ponto de vista qualitativo, Monteiro (1976: USP) já conceitualizava as possíveis transformações causadas no ambiente urbano sobre a população, genericamente apenas, sobre o conforto térmico, a qualidade do ar e as mudanças das precipitações, muito como estava sendo proposto na Europa e EUA. Deste ponto de vista, indicou que a urbanização é m tema importante também no Brasil, e estava por requerer um esforço para conceptualização sistêmica qualitativa e quantitativa de fluxos urbanos, sobretudo energéticos e poluidores.

## **2.2 Ilha de calor urbana**

Do ponto de vista da dinâmica e termodinâmica, Oke (1989) tem mostrado que processo que a urbanização gera profundas uma modificações no balanço de energia da superfície urbana em relação à rural (ou natural) a volta das cidades, descrevendo em detalhes a Ilha de Calor Urbana (ICU) (OKE, 1989; MASSON, 2000; CAVALCANTI *et al.*, 2009 e muitos outros). A ICU está associada à alterações marcantes do microclima local da cidade associadas ao aumento da temperatura local (hot spots), à redução da

velocidade do vento (com alteração da direção e amplitude), convergência do escoamento devido a brisa urbana por contraste térmico, variações da umidade do ar, menor evapotranspiração das áreas impermeabilizadas e de construção, pressão atmosférica, nebulosidade e a precipitação. Landsberg indicou que o mais evidente do processo de urbanização é a tendência de aumento da temperaturas do ar em relação à área rural adjacente, sendo que a diferença fornece a intensidade da ICU, em graus.

Oke (1978) destaca que a temperatura do ar na cidade é mais alta nos locais onde há uma maior intensidade de intervenções e atividades humanas, associando-a com densidade populacional.

Fialho (2017) ressalta que as consequências negativas mais importantes da ICU associando-as ao aumento da temperatura que potencializa a ocorrência de ondas de calor e seus efeitos, incluindo aumento da mortalidade e morbidade de habitantes urbanos. Além de indicar o aumento do desconforto térmico, a elevação do consumo de energia durante o verão (para condicionamento do ar) nas cidades tropicais, à diminuição da qualidade do ar, redução da ventilação etc.

A interação superfície-atmosfera possui processos que desempenham grande destaque no sistema climático terrestre, devido ao transporte de momentum, calor e umidade da Camada Limite Planetária (CLP) (Arya, S.P) A Camada Limite possui geralmente 1 km de espessura, entretanto pode variar de acordo com a localidade, além de possuir uma propensão maior ao resfriamento noturno e ao aquecimento diurno (Barry, 2013).

O ambiente urbano tem crescido com o passar dos anos e neste século a maior parte da população viverá na cidade. Como consequência, haverá o aumento de construções, estradas, entre outros que formam novos microclimas locais (Moraes *et al.*, 2005). Pode se observar que estas condições microclimáticas são influenciadas pelas atividades humanas em diversos processos: desmatamento, urbanização, uso intensivo da superfície terrestre, queima de combustíveis fósseis, entre outros (Silva, 2016). O efeito do novo ambiente gerado devido a estruturas urbanas em conjunto geram modificações na composição atmosférica, no balanço de energia e das características da superfície terrestre

(Barry, 2013). Estes processos favorecem na formação da Ilha de Calor Urbana (UHI) (Oke, 1995).

## 2.3 Precipitação

A precipitação é um dos parâmetros climáticos que mais sofre influência da urbanização, estudos mostram que em áreas urbanas as chuvas são intensificadas sobre as áreas urbanas ou a sota-vento (OKE, 1989; CABRAL, 1997), e nas grandes e médias cidades de latitude média pode chover em maior volume, cerca de 5 a 10% (LANDSBERG). Na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) também se verificou, observacionalmente, por radar, uma maior frequência de chuvas na forma de tempestades (PEREIRA FILHO *et al.*, 2004), como interação da ICU com a entrada da brisa durante a tarde.

Segundo AYOADE (1998), a tendência da precipitação é aumentar sobre as áreas urbanas e isso pode ser associado aos núcleos de condensação de gotas de nuvem urbanos (NCC), que são em maior número. Contudo, existem outros fatores que contribuem para o aumento de chuvas nas cidades: o primeiro consiste na convergência do escoamento associado à convecção térmica induzida ou fortalecida pela própria ICU. A interação das circulações da Camada Limite Urbana e da brisa marítima mostra-se como particularmente importante para o disparo e desenvolvimento de tempestades de grande desenvolvimento vertical (PEREIRA FILHO *et al.*, 2004).

Além disso, as cidades de clima temperado e frio predominante, observa-se que há um acréscimo de vapor d'água e calor na atmosfera devido aos processos de combustão, e.g., por automóveis, fábricas, residências. Parece ser o caso de Tokyo, Nova Iorque, que dependem intensamente de sistemas de aquecimento no inverno. As fontes antrópicas são realmente muito importantes em cidades de clima frio e temperado, por exemplo, em Tóquio onde a intensidade do fluxo antrópico (usado para aquecimento do ar) é equiparável ao fluxo de radiação solar incidente ou mesmo superior durante o inverno (PEREIRA FILHO *et al.*, 2018: JMSJ).

Nas áreas urbanas da Europa e na América do Norte em especial no verão, podem ocorrer grandes quantidades de precipitação. Tal fato tem como gatilho efeitos térmicos e uma maior convergência friccional das áreas construídas, pois essas regiões possuem uma tendência de registrar de 6 a 7% mais dias de chuva por ano, que nas áreas ao seu redor, ocasionando uma elevação de 5 a 10% na precipitação urbana (BARRY e CHORLEY, 2013).

Cabral e Funari (2000) elencam três fatores para explicar esta diferença nos valores de precipitação entre a área rural e urbana: o primeiro é o efeito da convecção associada à ICU; o segundo é o efeito da rugosidade superficial associado às construções (efeito de arrasto aerodinâmico e turbulência mecânica) e o terceiro, é a grande quantidade de material particulado em suspensão, parte do qual em papel de núcleo higroscópico (NCC), no processo de nucleação heterogênea, necessário à formação de gotas de nuvens, que crescem até atingir o tamanho de gotas de chuvisco e chuva.

## **2.4 Pesquisas sobre a ilha calor urbana e precipitação convectiva**

Ao redor do mundo foram desenvolvidos diferentes estudos com o objetivo de investigar o impacto da ilha de calor urbana na precipitação. Em Taiwan, Lin and Chen *et al.* (2010) utilizando o modelo WRF (*Weather Research and Forecasting*) acoplado ao UCM (*Urban Canopy Model*), além de imagens de satélite MODIS, observaram que o efeito da ilha de calor desempenha um importante papel nos processos térmicos e dinâmicos, modificando a localização da precipitação.

Utilizando a mesma metodologia, através da modelagem, para a região do Delta do Rio Yangtze na China (ZHONG *et al.*, 2017), conclui que a ilha de calor urbana aumenta a frequência das precipitações extremas no verão, fortalecendo a convergência das correntes ascendentes na área urbanizada no período da tarde, favorecendo a convecção profunda.

Seino *et al.* 2016, através da simulação numérica realizou o mesmo estudo para a área metropolitana de Tóquio, tendo como resultados o aumento da precipitação média mensal em 10% em relação à parte menos urbanizada, sendo associada a um aumento médio de 1°C na temperatura.

Para a cidade de Denver, Thunen (2013) utilizou dados meteorológicos observados das variáveis: precipitação diária total, temperatura máxima diária e temperatura mínima diária e a partir destes confeccionou mapas de interpolação. No período do estudo, em grande parte cidade houve uma diminuição do valor da precipitação que pode ser atribuída à ilha de calor.

Gu e Li (2018) realizaram um estudo com o objetivo de quantificar a influência da precipitação na intensidade da ICU sobre a região continental dos Estados Unidos em escalas de clima. Resultados de experimentos numéricos mostram que na localidade as intensidades das ilhas de calor urbanas estão positivamente correlacionadas com as quantidades de precipitação no verão, mas não no inverno. Além disso, o estudo destaca as condições climáticas como importantes controles na intensidade da ilha de calor urbana, mostrando que as mesmas influenciam significativamente o ambiente térmico urbano, mesmo que as características da superfície urbana não se alterem.

As cidades tropicais possuem uma característica diferenciada devido à morfologia urbana (densidade de prédios, geometria, mais áreas verdes), à menor quantidade de fonte de calor antrópico, em comparação às cidades de latitudes médias, à maior incidência de irradiância solar de onda curta durante o dia. As áreas urbanas localizadas nos trópicos tendem a ter taxas de resfriamento e aquecimento mais lentas do que as áreas rurais que estão ao seu redor. Assim, o efeito principal noturno da ilha de calor ocorre durante o nascente (BARRY e CHORLEY, 2013), ou à tarde quando podem ser associadas ao desenvolvimento de tempestades convectivas (PEREIRA FILHO *et al.*, 2004).

Na RMSP, de acordo com Pereira Filho *et al.* (2004), a convergência do escoamento da frente da brisa marítima que penetra a tarde (entre 13 e 14h) pode ser associada a formação de tempestades convectivas ao final da tarde, uma vez que as circulações térmica da brisa marítima (que traz ar relativamente úmido e fresco sobre a cidade) e da brisa urbana (associada à ICU) se acoplam, reforçando o ramo de movimento vertical sobre a cidade e induzindo a formação de nuvens de grande estrutura vertical como Cbs, formadores de tempestades.

Na região sudeste do Brasil, as ICU são identificadas em diferentes períodos do ano e por meio de diversas técnicas, não somente nas grandes cidades como São Paulo, Rio de Janeiro e Belo horizonte, ocorrendo também nas de médio porte. As consequências

associadas são o aumento das temperaturas mínimas à noite, a diminuição da umidade relativa e alterações na composição das precipitações: sendo cada vez mais acidificadas, com uma distribuição espacial menos uniforme e ocorrendo de forma mais concentrada (CAVALCANTI *et al.* 2009). O cenário do clima do Sudeste do Brasil, verificada a tendência atual, poderá, até o final do presente século, aumentar sua temperatura 3-6°C e também a frequência de precipitações mais intensas (Relatório IPCC: 2017).

As mudanças climáticas devem ser consideradas por uma perspectiva das alterações globais e a região sudeste do Brasil, com sua intensa urbanização tem modificado o balanço interativo natural e social em superfície. Atrelado a tal fato, temos a ocorrência de precipitações mais concentradas e menos uniformes ao longo do ano que em conjunto com as mudanças no meio atmosférico acabam por contribuir com o aumento de doenças no sudeste como a febre de dengue (MARENGO, 2007; CAVALCANTI *et al.*, 2009).

Na cidade do Rio de Janeiro, segundo Dereczynski *et al.* (2011), os totais pluviométricos anuais estão em elevação, assim como o número de dias com precipitação maior ou igual a 30 e 50 mm tem ocorrido com maior frequência. O estudo é realizado somente para duas estações, Alto da boa vista e Santa Cruz, sendo as tendências na precipitação são mais marcantes na primeira. A autora ressalta que a diferença pode estar associada tanto com uma mudança na circulação em escala sinótica, quanto com a circulação local devido ao efeito de ilha de calor urbana.

Para a Região Metropolitana do Rio de Janeiro, Lucena *et al.* (2011) desenvolveram um estudo inicial considerando a análise de dois dias, um no verão e outro, no inverno, com o objetivo de encontrar a relação correspondente entre a ilha de calor e eventos de precipitação. Nesse trabalho, Lucena *et al.* (2011) utilizaram imagens de satélite, e técnicas de análise de sensoriamento remoto, modelagem meteorológica e mapas de análise sinótica, além de algoritmos de transferência radiativa, para conversão de temperatura de brilho da imagem (i.e, *skin temperature*) em estimativa da temperatura de superfície e para correlacionar a ilha de calor urbana e a precipitação. Os resultados permitem identificar que as regiões mais quentes da RMRJ (i.e., os *hot-spots* da imagem), em geral associados às condições favoráveis à formação de precipitação urbana.

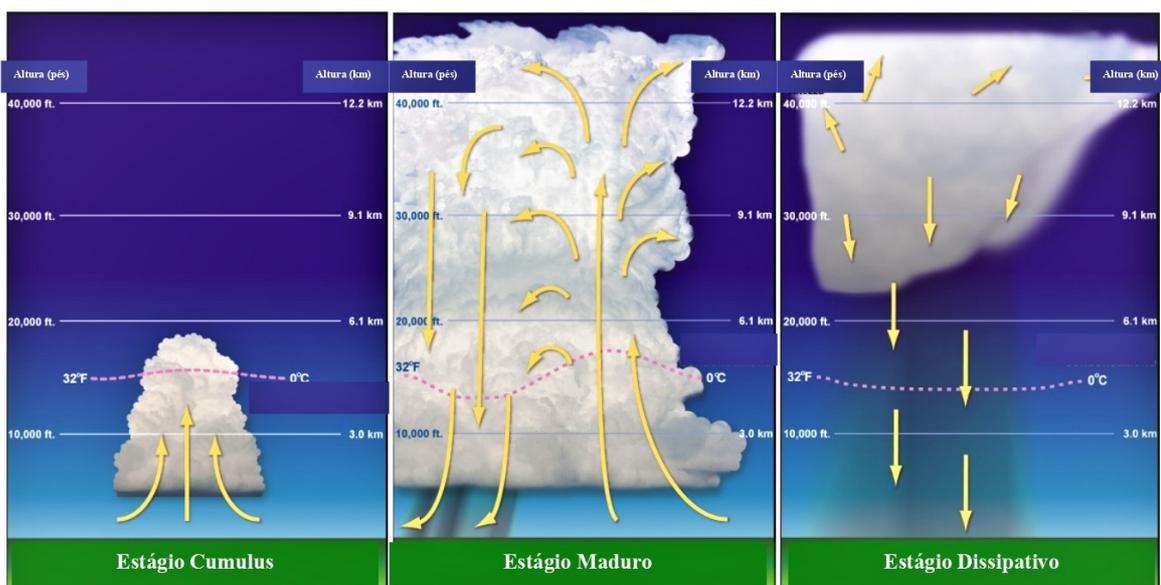
Vemado (2018) e Flores Rojas *et al.* (2017) têm mostrado, principalmente a partir de modelagem numérica 3D com modelo ARPS, que aumentos de 2°C da temperatura

superficial (*hot spots*) são suficientes para desencadear tempestades intensas, de grande desenvolvimento de sua estrutura vertical, sobre superfícies continentais aquecidas diferentemente, como ocorre na ICU da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), gerando grandes volume de precipitação, raios, ventos de mesoescala e convergência do escoamento pelos Cbs. Particularmente a interação das circulações da Camada Limite urbana, associadas à ICU, e da brisa marítima, que chega em São Paulo Capital, em torno das 13h (TL) como uma frente de brisa, trazendo ar mais frio e úmido, convergindo sobre a superfície urbana e favorecendo a convecção térmica (i.e., quente em baixo na superfície urbana e frio acima em cima na atmosfera livre sobre a CL urbana), a formação de nuvens convectiva de tempestades e precipitação (grandes Cbs). Trabalhos do laboratório de hidrometeorologia do IAG-USP têm mostrado que tem chove mais dentro da área urbana, devido às interações das circulações da CL urbana (que tem em sua base a ICU) e a brisa marítima (no período da tarde, quando a ICU é mais intensa na RMSP), que ao redor da conurbação, onde se encontram os mananciais de água potável em área florestadas, de preservação, da RMSP, particularmente ao norte, correspondente à Serra da Cantareira. Naturalmente, isso tem consequências sobre a oferta hídrica, como ocorreu durante a crise da água, em 2014 e 2015.

## 2.5 Precipitação Convectiva

Cotton e Anthes (1989), descreveram os três estágios de evolução de uma tempestade isolada, descobertos na década de 1940 por Byers e Braham (1949): estágio cumulus, estágio maduro e estágio dissipativo.

Os três estágios de desenvolvimento de uma tempestade isolada podem ser diferenciadas segundo as correntes ascendentes, descendentes e precipitação e tempo de desenvolvimento (BYERS e BRAHAM, 1949) (Fig. 2.1): 1) estágio Cúmulos, quando predominam correntes ascendente, ascendência de parcelas de ar quentes e úmidas atingindo o nível de livre convecção; 2) Estágio Maduro, precipitante, com simultaneidade de correntes ascendentes e descendentes e 3) Estágio Dissipativo, predomínio de fracas correntes descendentes e precipitação fraca apenas na parte superior da nuvem, que em geral não atinge a superfície, nuvem residual em forma triangular.



**Figura 2.1** Estágios de evolução de uma nuvem cumulonimbus, chamados estágio: 1) cúmulos; 2) maduro e 3) dissipativo. ( BARCELLOS, 2009 p. 33)

Em geral, as tempestades se formam quando existem ambientes termodinâmicos, cinemáticos e dinâmicos favoráveis (COTTON e ANTHES, 1989; AYOADE, 1996; BARRY & CHORLEY, 2011). Assim,

1. São desenvolvidas pelo rápido aquecimento da superfície do solo no verão, principalmente quando atingem as baixas temperaturas na troposfera superior facilitando a liberação da instabilidade convectiva. Alta energia potencial disponível para convecção (em geral, CAPE > 1500). Possuem duração de 30 minutos a 1 hora e afetam áreas pequenas (de 20 a 50 km<sup>2</sup>). A precipitação é classificada como tempestades com trovoadas, podendo incluir granizo ou não. Este tipo é mais conhecida como “chuva de verão”;
2. As nuvens cumulonimbus também podem ser organizadas em bandas espirais ao redor de ciclones tropicais, trazendo precipitação intensa e de longa duração, afetando áreas de milhares de km<sup>2</sup>;
3. Outro tipo ocorre quando o ar frio, úmido e instável encontra uma superfície que sofreu intensa irradiação solar incidente em superfície, comum nas regiões tropicais. As células convectivas avançam com o vento e se formam paralelamente à uma frente fria de superfície ou paralela e anteposta a frente quente. O tipo de

precipitação derivada é de curta duração, dispersa e ocorre em uma localidade específica.

## Capítulo 3 - Metodologia

Neste capítulo apresenta-se resumidamente a fundamentação teórica do trabalho, os métodos de análise e de avaliação dos resultados obtidos. Ao final do capítulo apresenta-se o fluxograma metodológico simplificado.

### 3.1. Domínio Espacial

Localizada no Sudeste do Brasil, a Cidade do Rio de Janeiro é, após a cidade de São Paulo a mais influente do país. Em seu processo de ocupação gerou-se sérias consequências para a população residente e para o meio ambiente. Entre esses, podemos elencar a favelização( trazendo consigo o desmatamento), falta de saneamento básico, poluição, enchentes e inundações são exemplos da ocupação que ocorre como reflexo, também, da segregação espacial para as classes menos favorecidas gerando um alto grau de vulnerabilidade ambiental aos fenômenos naturais e em especial aos eventos extremos, os quais se tornaram cada vez mais recorrentes na cidade.

O RJ apresenta como tipo climático predominante o tropical litorâneo úmido, sendo influenciado diretamente pela massa tropical marítima, com domínio tropical úmido seco (MENDONÇA, 2008). Por ser uma cidade litorânea, possui uma grande costa oceânica à disposição de um intenso processo de evaporação e condensação, conferindo um alto índice de umidade e pluviosidade devido à brisa marítima, a convecção térmica e a atuação dos sistemas atmosféricos.

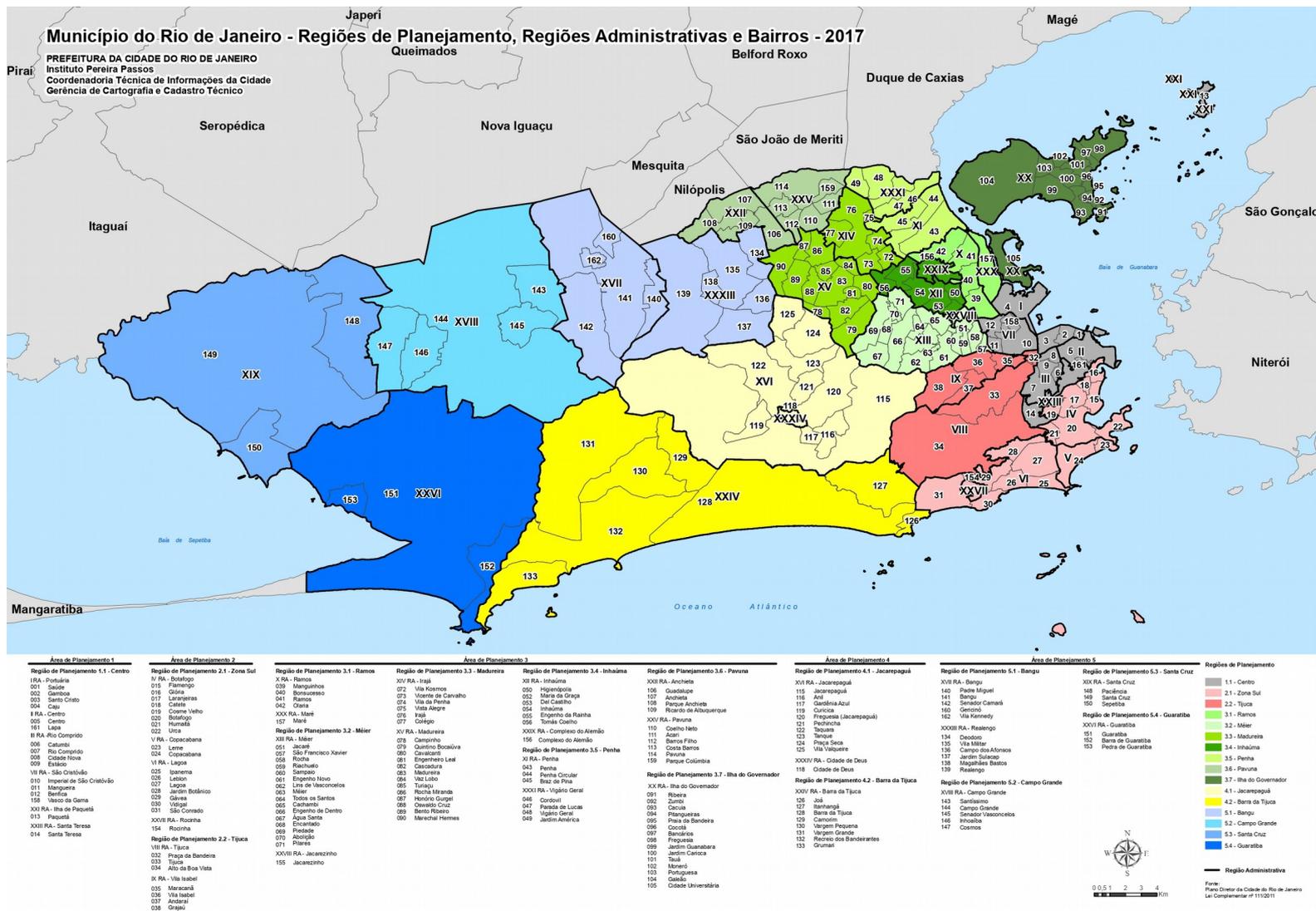
O clima da região é controlado pela circulação da brisa marítima terrestre e para grande incidência de radiação solar, e por dois outros fatores importantes, a topografia irregular, permeada por baixadas, serras de altitudes variadas, morros e morrotes, posição geográfica, e ainda pelo crescente processo de urbanização no qual a cidade está inserido, podendo formar diversos microclimas nas suas diferentes localidades.

Os movimentos atmosféricos de macro e mesoescala também atuam ativamente na formação do clima na cidade, como principais a Massa Polar Atlântica (MPA), a Massa

Tropical Atlântica (MTA), alimentadas pelo Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). Além do ASAS, o clima úmido do Rio de Janeiro se deve principalmente à passagem de frentes frias e da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e aos Sistemas Convectivos de Mesoescala.

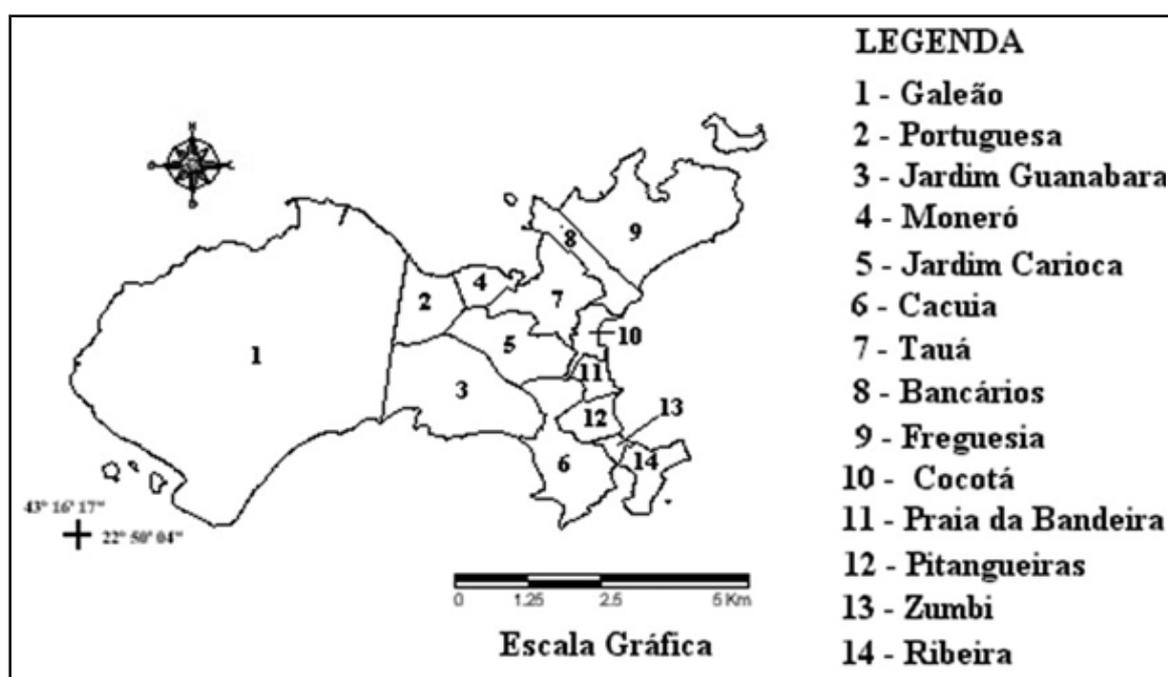
Para determinar o clima e os microclimas, o relevo é um fator importante. Este pode favorecer a formação de brisa de vale pela manhã e da montanha a noite. Os morros e montanhas também podem canalizar e condicionar o escoamento, gerando convergências e divergências. Sabe-se que próximo ao litoral, isso não ocorre porque os ventos se alternam, soprando em direção ao mar durante a noite (como uma fraca brisa terrestre) e em direção ao continente durante o dia (na forma de brisa marítima que se intensifica do meio-dia até as primeiras horas da noite) (CAMARGO, 2010). Além disso, a circulação da brisa terrestre e marítima também podem atuar favorecendo ora a concentração e ora a dispersão de poluentes atmosféricos, devido aos efeitos de recirculação em torno de grandes fontes emissoras, desde que em mesoescala o vento gira em sentido anti-horário no litoral do RJ no período de 24 h, de Sul à tarde e de Norte durante a madrugada e primeiras horas da manhã.

**Figura 3.1 : Regiões de Planejamento, Regiões administrativas e bairros do município do Rio de Janeiro. (Instituto Pereira Passos, 2017)**



O Rio de Janeiro possui uma divisão regional embasado na Lei 5849 de 7 de abril de 2015 com cinco áreas de planejamento (AP's), 33 Regiões Administrativas (RAs) e 161 bairros. Além disso a localidade possui quatro principais zoneamentos: Centro e Zona Sul, Zona Oeste e Zona Norte. Localizado nesta última zona, encontra-se a ilha do governador no qual esta presente o Aeroporto Internacional do Galeão.

Sendo considerado um bairro único durante os anos de 1960 a 1981, a Ilha do Governador abrange a XX Região Administrativa (XX R.A.) do Rio de Janeiro. De acordo com o Decreto Municipal 3157 de 23 de junho de 1981, a região foi delimitada com características próprias de acidentes geográficos, sendo dividida sob a forma de bairros que atualmente integram a cidade do Rio de Janeiro que são: Ribeira, Zumbi, Cacuia, Pitangueiras, Praia da Bandeira, Cocotá, Bancários, Freguesia, Jardim Guanabara, Jardim Carioca, Tauá, Moneró, Portuguesa e Galeão.



**Figura 3.2 :** Localização dos bairros situados na Ilha do Governador (Instituto Pereira Passos, 2006, adaptado por Fialho, 2010)

Destacada como a maior ilha na parte central da Baía de Guanabara , a Ilha do Governador está localizada entre os paralelos de 22°46'13" e 22°50'04" Sul e os meridianos de 43°09'27" e 43°16'17" a Oeste de Greenwich. A sua área corresponde a 40,81 quilômetros quadrados e possui uma população de aproximadamente 212 mil habitantes (IBGE Cidades, 2019). O uso da terra é principalmente residencial apresentando também áreas de comunidades carentes(26,7 %) da população ilhéu. Com relação aos serviços urbanos, grande parte da população possui água canalizada (94 %) e também ligados à rede geral de esgoto (89%) , além disso, na ilha se localizam indústrias e espaços comerciais ( FIALHO, 2010; RUSSO, 1997)

A caracterização climática da Ilha situa -se na faixa intertropical, sendo localizada entre as montanhas e o oceano Atlântico resultando em um clima tropical úmido com duas estações bem definidas. Por estar localizada na parte central da baía de Guanabara , frequentemente ocorre a passagem do Anticiclone Polar Móvel que, quando suas características atuam em conjunto com a Massa Tropical Atlântica (MPA), contribuem para a formação de tempestades, principalmente no verão( FIALHO, 2010).

A Ilha do Governador sofre ação das brisas marinhas e terrestres. Quando o Anticiclone polar atinge a região, modifica a direção dos ventos do quadrante norte(para su-sudeste ou su-sudoeste), devido a maior atuação da Massa tropical Atlântica em relação ao mesmo durante a passagem de sistemas frontais. Pode observar-se a influência do anticiclone sofrer elevações devido a posição do litoral fluminense(leste-oeste) e pela orografia( orientação noroeste-sudeste). (NIMER, 1979; FIALHO, 2010)

A geomorfologia da localidade atua como uma barreira aos avanços meridionais tendo como consequência a ascendência forçada do ar, auxiliando na formação da precipitação ou a deposição de umidade nas vertentes a barlavento que se encontram nas encostas dos maciços litorâneos . Os ventos que predominam na cidade ao entrarem na baía de Guanabara encontram o maciço da Tijuca e sofre um desvio para a esquerda assumindo a componente leste (influenciando o subúrbio e o centro da cidade do Rio de Janeiro) e a componente sudeste, na parte sul da Ilha onde se localiza a estação climatológica do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro( FIALHO, 2010).

## 3.2. Dados utilizados

Neste trabalho serão utilizados dados de diferentes repartições públicas para a análise da área estudada.

### Dados primários:

- dados pluviométricos da rede de estações da Fundação Instituto de Geotécnica (GeoRio) e do Sistema de Alerta de Deslizamentos do Rio de Janeiro (AlertaRio) ( estação ilha do governador)
- dados meteorológicos da Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (Redemet/Brasil) ( estação do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro- Galeão)

## 3.3. Imputação para preenchimento de falhas

Junninen *et al.* (2004) avaliaram a aplicação de diferentes métodos de imputação de dados faltantes de um conjunto de dados de qualidade do ar no contexto univariado (linear, spline e interpolação de vizinho mais próximo), multivariado (imputação baseada em regressão múltipla (REGEM), vizinho multidimensional mais próximo (NN), mapa auto-organizado (SOM), perceptron de multi-camada (MLP), e métodos híbridos dos métodos prévios, com campos de dados faltantes simulados. Seus resultados mostraram que uma ligeira melhoria pode ser obtida da performance dos métodos multivariados usando hibridização e uma melhoria mais substancial por imputações múltiplas onde a estimativa final é composta dos resultados final dos métodos de preenchimento de falhas multivariadas. Nas ciências atmosféricas, a questão de imputação tem recebido atenção de diferentes pesquisadores, particularmente para imputação de dados climatológicos faltantes (e.g., SCHNEIDER, 2001; FARHANGFAR *et al.*, 2008).

O programa *analysis\_cycles* tem como objetivo a organização e formatação os dados, além de inclui a coordenada temporal *ano\_decimal* (e.g., 2019.21500001), que é útil quando longos períodos de série temporal e variáveis termodinâmicas derivadas são

disponibilizadas, e gráficos 1D são plotados. Por exemplo, quando plotamos os gráficos da temperatura potencial, temperatura potencial equivalente, altura do NCL, razão de mistura, umidade específica entre outras, a partir de relações termodinâmicas encontrada em Rogers e Yau (1996) e equações propostas por Bolton (1980), ao longo de toda a série temporal, de amostragem horária, ao longo de muitos anos. Isso é possível pela utilização interna das sub-rotinas *ano\_02.f90* e *ano\_07.f90* em *analysis\_dataset*.

Nos dados brutos provenientes das estações meteorológicas de superfície da área estudada ( Aeroporto do Galeão SBGL( METAR) e Ilha do governador (GeoRio – AlertaRio), realizou-se o preenchimento de falhas por imputação de climatológica horária e obtenção de continuidade temporal nos períodos determinados ( 1971-2019 e 2000 a 2019 ), respectivamente.

### **3.4. Tratamento dos dados**

Como primeiro passo, foi realizado o levantamento bibliográfico sobre o tema e sua repercussão partindo da escala global para a local. Uma vez reunida as informações pertinentes sobre a localidade: climatologia, geomorfologia e a história da ocupação, passa-se ao tratamento dos dados para obtermos séries contínuas e sem falhas no período, para as estações disponíveis.

Após a aquisição dos dados de temperatura e pluviosidade de diferentes estações de órgãos distintos, empregar-se-á um software chamado *reading\_dataset* (f90), com o objetivo de unificar o formato dos arquivos. O programa *reading\_dataset* formata e calcula variáveis derivadas como razão de mistura, umidade específica, temperatura potencial, nível de condensação por levantamento, entre outras.

As séries reformatas são usadas como entrada do software *analysis\_cycles*(f90), que gera as climatologias horárias(meso escala) para cada estação., ou seja, a variações em função da hora do dia para cada mês. A apresentação é na forma de mapas bidimensionais. Os softwares *reading\_dataset* e *analysis\_cycles* foram criados e tem sido desenvolvidos no Laboratório de hidrometeorologia experimental da UFRJ.

A utilização desses softwares permite a obtenção de séries temporais completas, contínuas e de dados pareados, que são necessárias ao desenvolvimento da pesquisa. Após Por fim, com os dados pareados, serão confeccionados mapas climatológicos atualizados, incluindo mapas da distribuição mensal e horária da precipitação e temperatura (i.e., uma climatologia horária para as estações). O objetivo específico é investigar as variáveis atmosféricas e sobre a ocorrência de diferentes limiares da precipitação.

Os tempos de amostragem das medições meteorológicas e de precipitação, além de não terem a mesma extensão temporal, foram obtidos em tempos diferentes, não sendo por isso pareados originalmente. Os dados meteorológicos tipicamente são horários, mas nem sempre, podendo faltar nos horários noturnos quando as operações visuais do aeroporto são interrompidas, além de apresentarem outras falhas ao longo do período disponível de 19 anos. Os dados de precipitação apresentam frequência de 15 minutos, estando disponíveis somente a partir de 2000.

### 3.5 Fluxograma metodológico

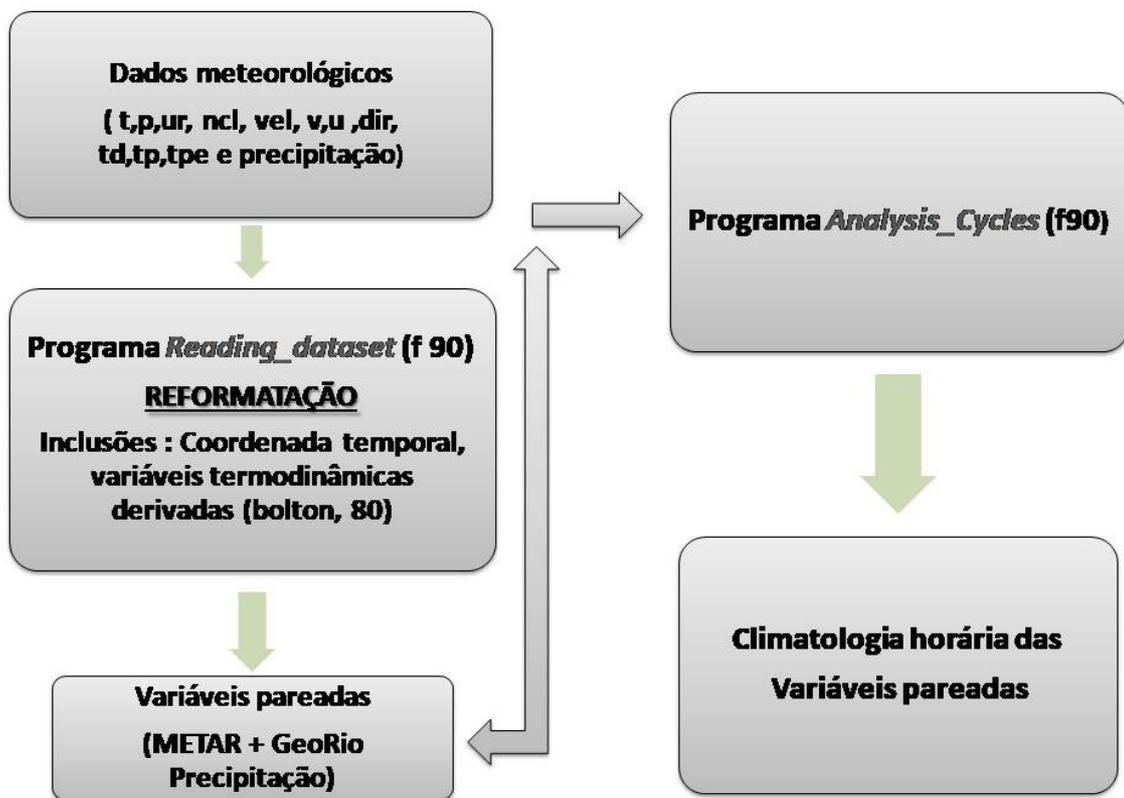


Figura 3.3 Fluxograma proposto para tratamento dos dados e análise.

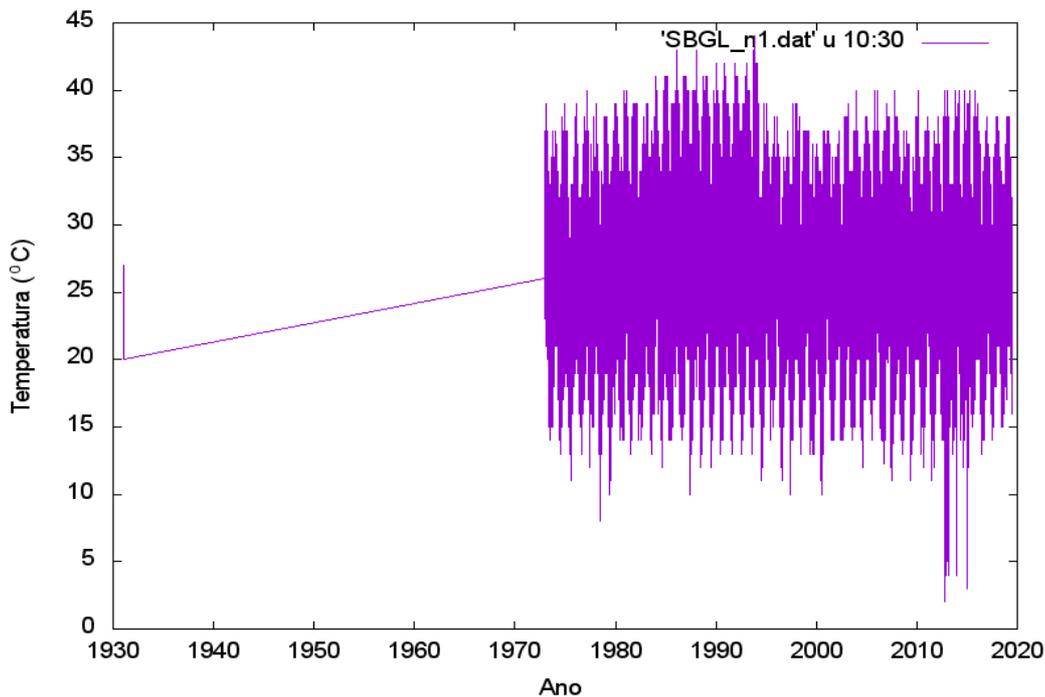
## Capítulo 4

### 4.1 Resultados

Os dados meteorológicos obtidos da estação do aeroporto do Galeão (SBGL) para todo o período disponível (1931 até 06/2019) foram reformatados e acrescidos da coordenada temporal contínua e ano decimal. A Figura 4.1 exemplifica a série temporal da temperatura do ar originalmente presente nos dados brutos (conforme descarregamento do concentrador de dados ambientais coletados pela *Iowa Environmental Mesonet* (IEM), do mundo todo, pela Iowa State University, EUA (<http://mesonet.agron.iastate>) (vide Anexo).

Nota-se que a série com os dados brutos se estende de 1931 a 2019, mas a presença de dados antigos na estação SBGL possui uma baixa frequência no início da série e após isso se descontinua, seguindo com falhas (ausência) até retornar como estação permanente do aeroporto na década de 1970. Na série reformatada pelo programa *reading\_dataset*, correspondente ao arquivo SBGL.csv (vide anexo), note-se que o acréscimo de variáveis termodinâmicas semi conservativas, com nomes abreviados indicados na primeira linha (vide anexo). As variáveis termodinâmicas foram obtidas utilizando-se as equações propostas por Bolton (1980) e Rogers e Yau (1989).

A Figura 4.1 mostra a série temporal da temperatura do ar disponível, no período de 1930 a 2019 na estação SBGL. Nota-se que medições horárias foram sistematicamente realizadas somente após 1970 no aeroporto internacional do Rio de Janeiro. Isso prejudica qualquer análise sobre o efeito da urbanização anteriormente a 1970. Justamente no período anterior à 1970 é que ocorreu urbanização da RMRJ, que resultou na configuração de 2019 (ABREU, 1987, BORTZ et al., 2015). Também prejudica a realização de simulações numéricas 3D do efeito do crescimento urbano sobre a formação da Ilha de Calor urbana e sobre o desenvolvimento da Camada limite urbana e da Camada Interna, no ambiente aonde a circulação da brisa marítima/terrestre interage com a circulação da brisa urbana, da brisa de vale/montanha, e sobre a formação e desenvolvimento de tempestades na área.



**Figura 4.1:** Série temporal da temperatura do ar reformatada pelo programa reading\_dataset a partir do arquivo csv original (vide anexo) correspondente às medições no Aeroporto Internacional Tom Jobim do Rio de Janeiro (Galeão), Ilha do Governador, RMRJ, Brasil. Obs.: a plotagem dos dados originais não é comoda pois os dados vem com a indicação temporal separada (e.g., “2019-06-10 22:00”, portando como um sequência de caracteres alfanuméricos).

Por hipótese, a primeira grande mudança do microclima local foi a remoção da floresta tropical (mata Atlântica), em busca de seus recursos e a posterior substituição da vegetação natural por plantações de cana no século XVI. Posteriormente, a urbanização intensa da metrópole carioca com seus eixos estruturais em direção à Baixada Fluminense oeste (primeiro) e leste (posteriormente), após 1960, modificou sensivelmente o balanço de energia superficial, resultando na forma particularmente desconexa da Ilha de calor da RMRJ, dividida pela Baía de Guanabara e seus hotspots (máximos) presentes nas baixadas; aonde ocorrem as mais altas temperaturas do ar e os menores valores de umidade relativa do ar, com consequências sobre a saúde pública, para não falar de efeitos

fotoquímicos e do levantamento de Material Particulado no ar, tanto por indústrias siderúrgicas, petroquímicas e com fonte no tráfego automotivo, baseado em queima de hidrocarbonetos e na geração de poluentes secundários fotoquímicos, com ocorrência sistemática de ultrapassagem de padrões de qualidade do ar, mesmo com limiares de uma legislação já defasada em relação à europeia, por exemplo.

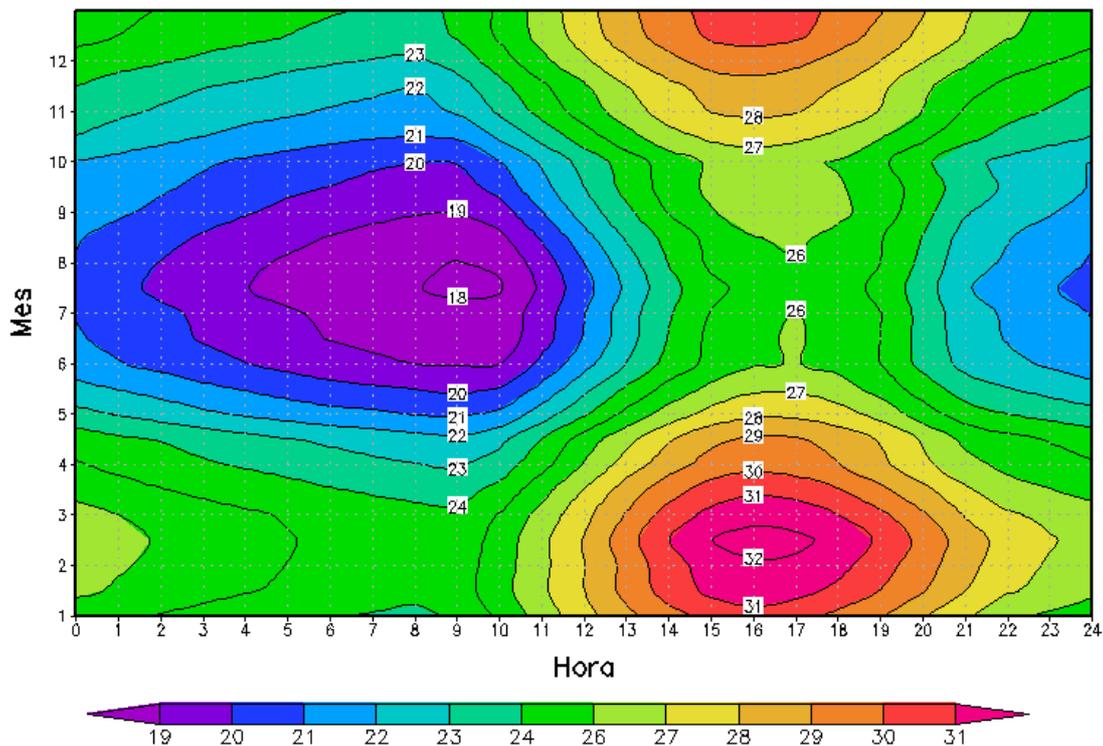
Considera-se a importância de estratégias de completar falhas de dados, seja por aproximações ou por abordagens de verossimilhança como a proposta neste trabalho. Em resumo, os dados da estação SBGL e da estação pluviométrica da Ilha do Governador foram reformatados com o programa *reading\_dataset*. Após essa formatação, que inclui a escala de tempo de ano decimal e variáveis derivadas (e.g., temperatura potencial, umidade específica, altura do nível de condensação por levantamento etc) os dados foram utilizados para gerar a distribuição quase-climatológica horária. Não se trata da série climatológica horária tradicional, por por definição climatologia se refere a séries de 30 anos, de dados horários. Note-se que a estação do aeroporto não transmite no METAR os dados de precipitação na estação do aeroporto Internacional do Rio de Janeiro, mas sugere-se que isso seja implementado oportunamente no futuro, pois o campo no código METAR está presente, mas em geral vem com registro “zero”, independente de estar chovendo ou não no aeroporto.

## **4.2 Análise da climatologia horária**

Os resultados apresentados nesta seção se referem as estações localizadas na região estudada. Entretanto, são gráficos similares aos gráficos “pré”climatológicos que podem ser obtidos da análise para as demais estações disponíveis, estações de aeroportos e estações da rede de monitoramento de mesoescala da precipitação mantida pela prefeitura do Rio de Janeiro e as demais estações localizadas na cidade do Rio de Janeiro.

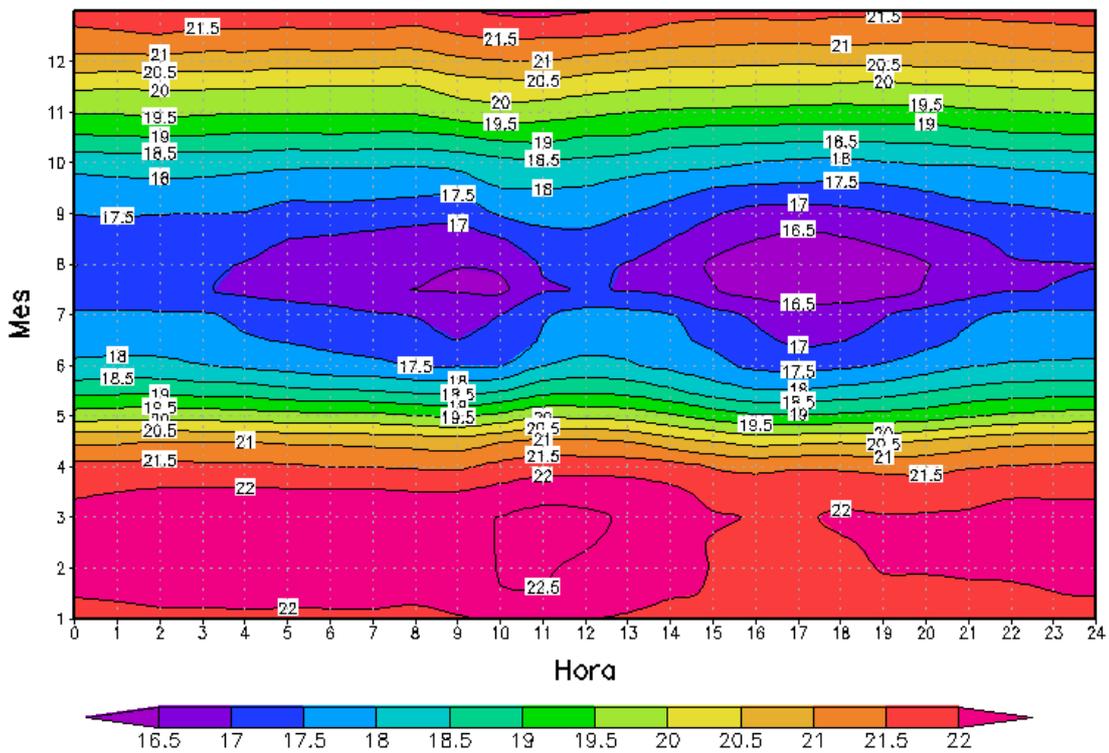
A temperatura do ar média horária é observada na figura 4.2. As máximas e as mínimas são bem demarcadas de acordo com as estações do ano, prevalecendo ao longo do ano valores em torno dos 26 e 28 °C. Nos meses de outono e inverno, observa-se valores menores, concentrando os mais baixos nas primeiras horas do dia no inverno,

devido a grande atuação do ASAS no período sobre a região. Neste período as máximas chegam a 26°C. Na primavera, mas principalmente no verão, os efeitos decorrentes da ilha de calor ocorrem ao longo da tarde, tendo no verão temperaturas que podem ultrapassar os 30°C, o que é um fator determinante para o aumento da convergência do vento (brisa marítima e urbana) e sucessivamente para as condições que favorecem a formação de precipitações convectivas.



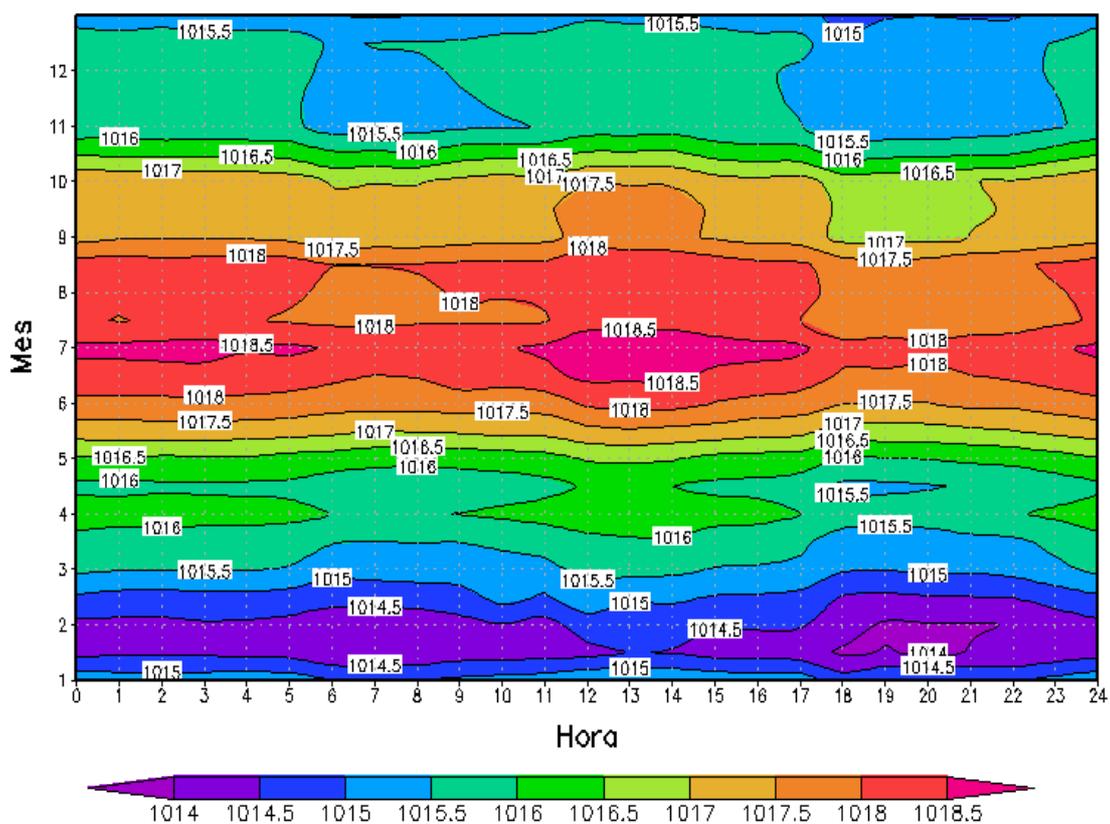
**Figura 4.2** Climatologia horária da temperatura do ar [T], em (°C), ao longo das horas do dia (absocissa) e dos meses do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições na estação meteorológica do aeroporto internacional do Rio de Janeiro para o período 1971-2019 (48 anos). No eixo x a coordenada de horas é UTC, i.e., Hora Mundial ou Tempo Coordenado Universal (UTC: Universal Time, Coordinated) ou Hora Média de Greenwich (GMT, Greenwich Mean Time), correspondente a hora do tempo local (TL) do Rio de Janeiro (TL = UTC - 3h).

A média horária da temperatura do bulbo úmido é observada na figura 4.3. Como no caso da temperatura do ar, observa-se que as máximas (22 °C) são de primavera e verão (estação úmida) e as mínimas no outono/inverno (15°C). Nas estações de transição, as temperaturas variam entre 18 a 20°C, sendo neste período mais influenciadas pelo avanço de frentes frias no outono e das linhas de instabilidade de outono e primavera. No verão, em todas as horas do dia, observam -se valores bem acima da média, caracterizando uma tendência a uma maior umidade no ar, que favorecida pela brisa marítima aumenta a probabilidade de maior ocorrência de chuva.



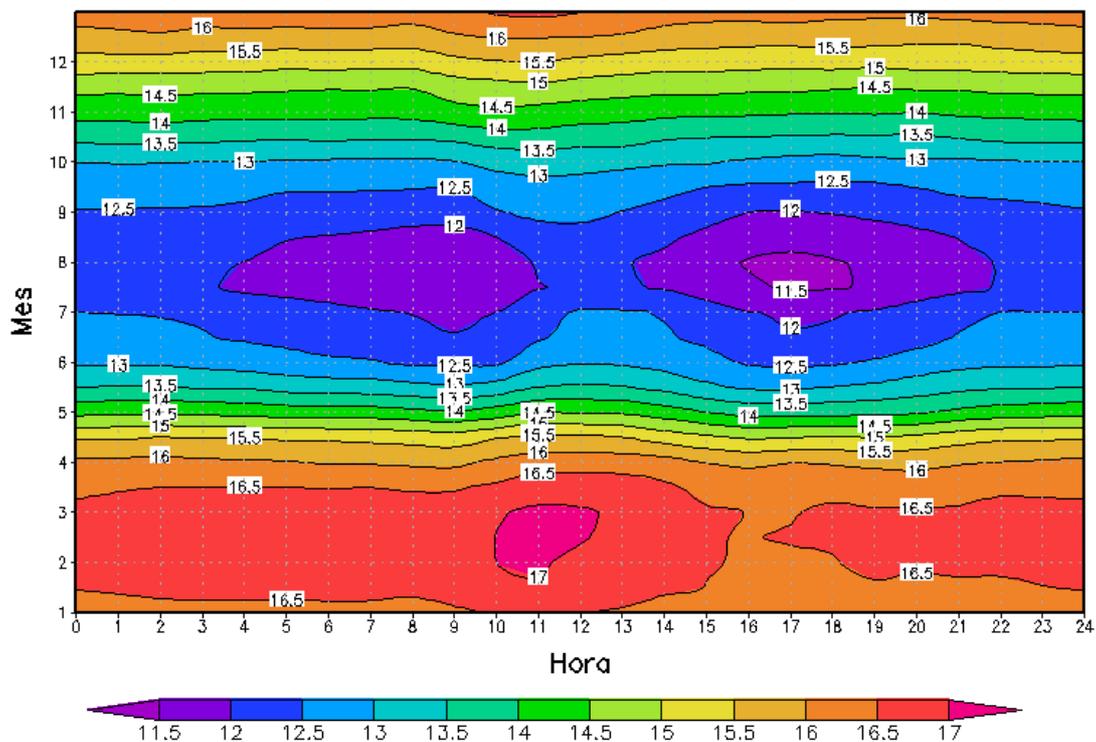
**Figuras 4.3** Climatologia horária da temperatura do bulbo úmido [Td], em (°C), ao longo das horas do dia (abscissa) e dos meses do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições na estação meteorológica do aeroporto internacional do Rio de Janeiro para o período 1971-2019 (48 anos). No eixo x a coordenada de horas é UTC, sendo a hora do tempo local (TL) do Rio de Janeiro dada por (TL = UTC - 3h).

A distribuição da média horária da pressão do ar ao longo das horas do dia (eixo x) e dias do ano (eixo y) é mostrada na figura 4.4. Há a atuação do Anticiclone do Atlântico Sul (ASAS), durante todo o ano, mais forte no inverno, pode ser associado aos valores de pressão mostrados no inverno. No verão há o predomínio de níveis de pressão levemente menores, devido às altas temperaturas do ar e às instabilidades presentes nesta época do ano, associadas as variações de pressão devidas ao sistema de brisa terrestre - marítima, está associada à ocorrência mais frequente de episódios de convecção e precipitação. Nos períodos de primavera e verão há transição entre os níveis, sendo que valores continuam pontualmente menores que na estação seca (inverno).



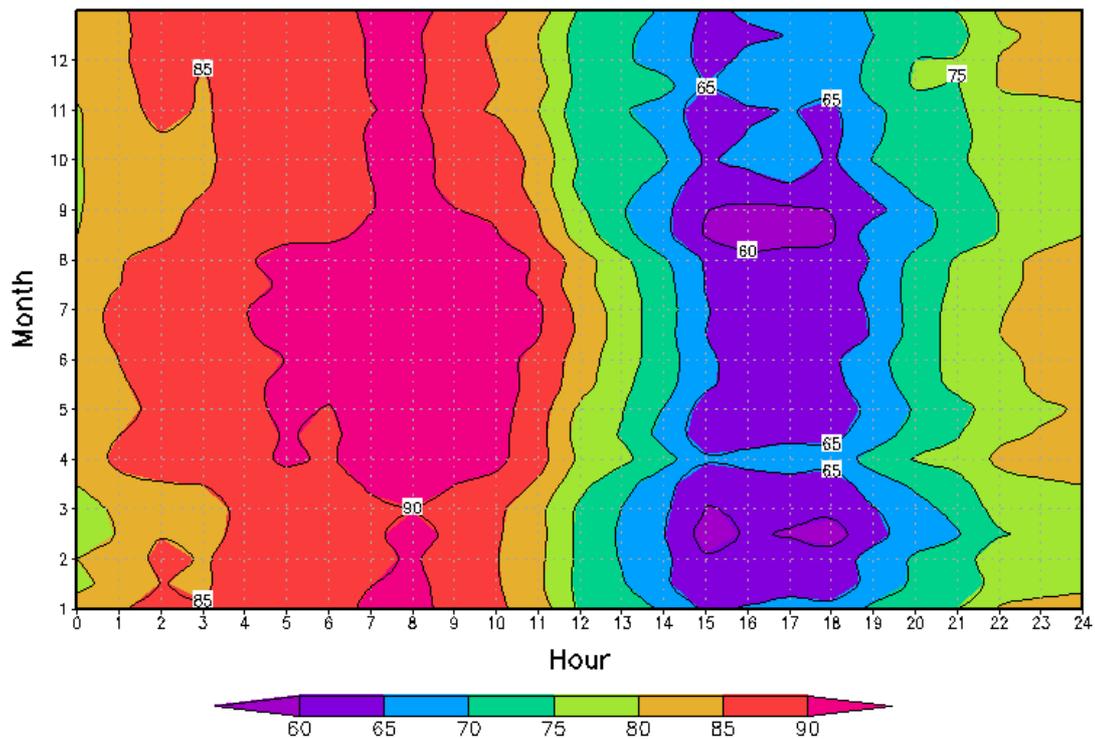
**Figuras 4.4** Climatologia horária da pressão atmosférica local [p], em (hPa), ao longo das horas do dia (abscissa) e dos meses do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições na estação meteorológica do aeroporto internacional do Rio de Janeiro para o período 1971-2019 (48 anos). No eixo x a coordenada de horas é UTC, sendo a hora do tempo local (TL) do Rio de Janeiro dada por (TL = UTC - 3h).

A distribuição anual da média horária da umidade específica é mostrada na figura 4.5. Ao longo da série observa-se que os maiores valores concentram-se nos meses de janeiro a março. O maior valor médio se concentra entre os horários logo após o amanhecer ( $17 \text{ g kg}^{-1}$ ). Nos meses transicionais, primavera e outono, os valores são intermediários e no inverno, são registrados os menores valores da série climatológica, principalmente nos horários da manhã e ao meio dia, onde ocorre o valor mínimo médio ( $11,5 \text{ g kg}^{-1}$ ). Assim, os meses que concentram maior disponibilidade de vapor no ar superficial são Jan-Fev-Mar. Esse fato também é favorável ao desenvolvimento de tempestades nestes meses.



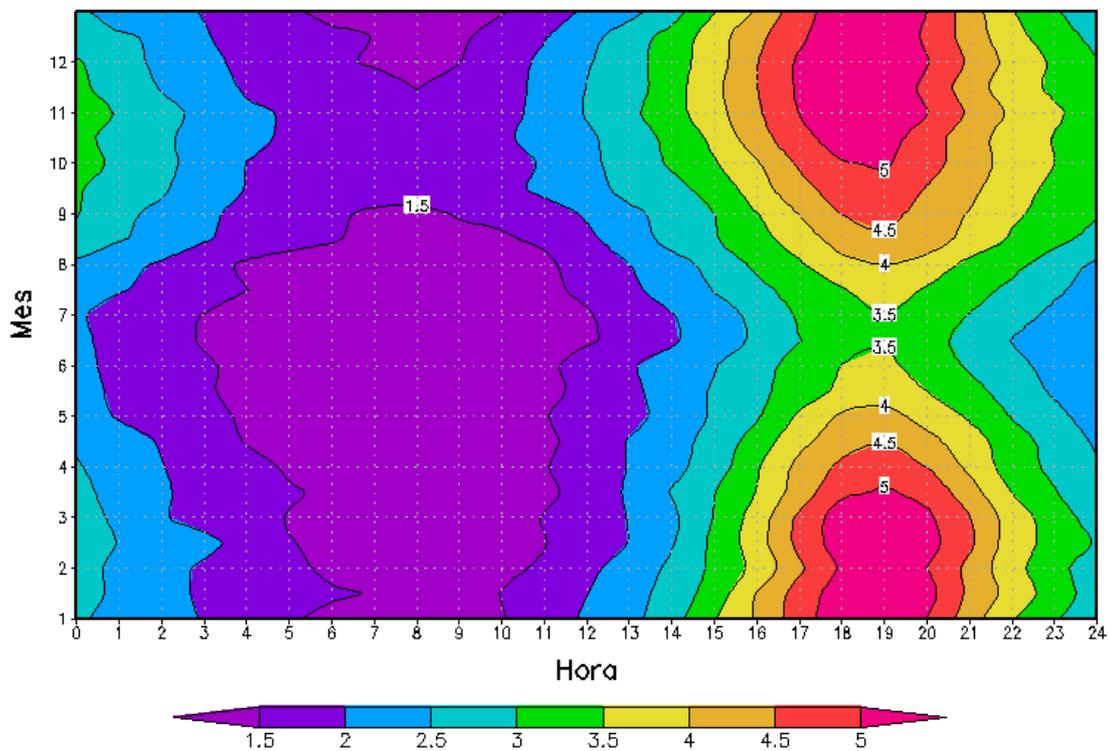
**Figuras 4.5** Climatologia horária da umidade específica [q], em ( $\text{g kg}^{-1}$ ), ao longo das horas do dia (abscissa) e dos meses do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições na estação meteorológica do aeroporto internacional do Rio de Janeiro para o período 1971-2019 (48 anos). No eixo x a coordenada de horas é UTC, sendo a hora do tempo local (TL) do Rio de Janeiro dada por ( $\text{TL} = \text{UTC} - 3\text{h}$ ).

A distribuição anual da média horária da variável umidade relativa do ar é mostrada na figura 4.6. Em geral, aumento da umidade relativa do ar está associado à redução da temperatura do ar e vice-versa. Observa-se um padrão ao longo dos meses do ano, salvo os meses de outono e inverno, que registram os maiores valores pela manhã, em torno de 90%. Nesta época é muito comum a ocorrência de nevoeiros na cidade. Entretanto, ao longo do ano o padrão é o mesmo ao longo do dia, tendo as máximas no período da manhã, decaindo ao longo da tarde e aumentando novamente próximo à meia noite. Nota-se também um máximo de verão à tarde (60%), associado tanto ao máximo de umidade específica do ar quanto ao efeito de umedecimento da superfície pelas precipitações convectivas mais frequentes no horário da tarde.

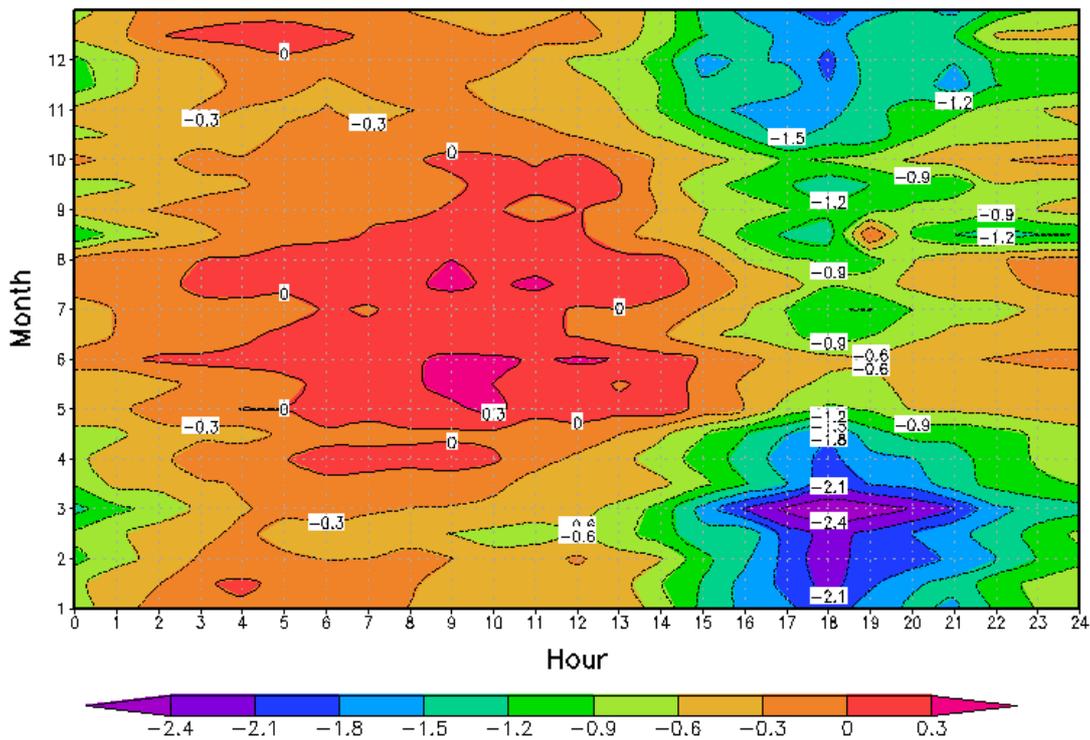


**Figuras 4.6** Climatologia horária da variável umidade relativa [UR], em (%), ao longo das horas do dia (abscissa) e dos meses do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições na estação meteorológica do aeroporto internacional do Rio de Janeiro para o período 1971-2019 (48 anos). No eixo x a coordenada de horas é UTC, sendo a hora do tempo local (TL) do Rio de Janeiro dada por (TL = UTC - 3h).

A climatologia horária da velocidade do vento é apresentada na figura 4.7. Para a variável velocidade do vento, a climatologia horária revela que no período da manhã a brisa predominante é a terrestre, com uma velocidade em média de  $2 \text{ m s}^{-1}$ . Ao longo da tarde, ocorre uma mudança muito considerável nos meses de verão e da primavera, nos quais ocorre um predomínio da brisa marítima, principalmente nos horários da tarde e noite. Os ventos que sopram em direção a baía de Guanabara favorecem a convergência no fundo da baía, gerando as famosas chuvas de verão que ocorrem na cidade. Nos meses de outono e inverno, as noites predominam calmas, exceto por valores pontuais, podendo ser correspondentes a passagem de frentes frias.



**Figuras 4.7** Climatologia horária da velocidade do vento [vel], em ( $\text{m s}^{-1}$ ), ao longo das horas do dia (abscissa) e dos meses do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições na estação meteorológica do aeroporto internacional do Rio de Janeiro para o Climatologia horária da velocidade do vento período 1971-2019 (48 anos). No eixo x a coordenada de horas é UTC, sendo a hora do tempo local (TL) do Rio de Janeiro dada por ( $\text{TL} = \text{UTC} - 3\text{h}$ ).



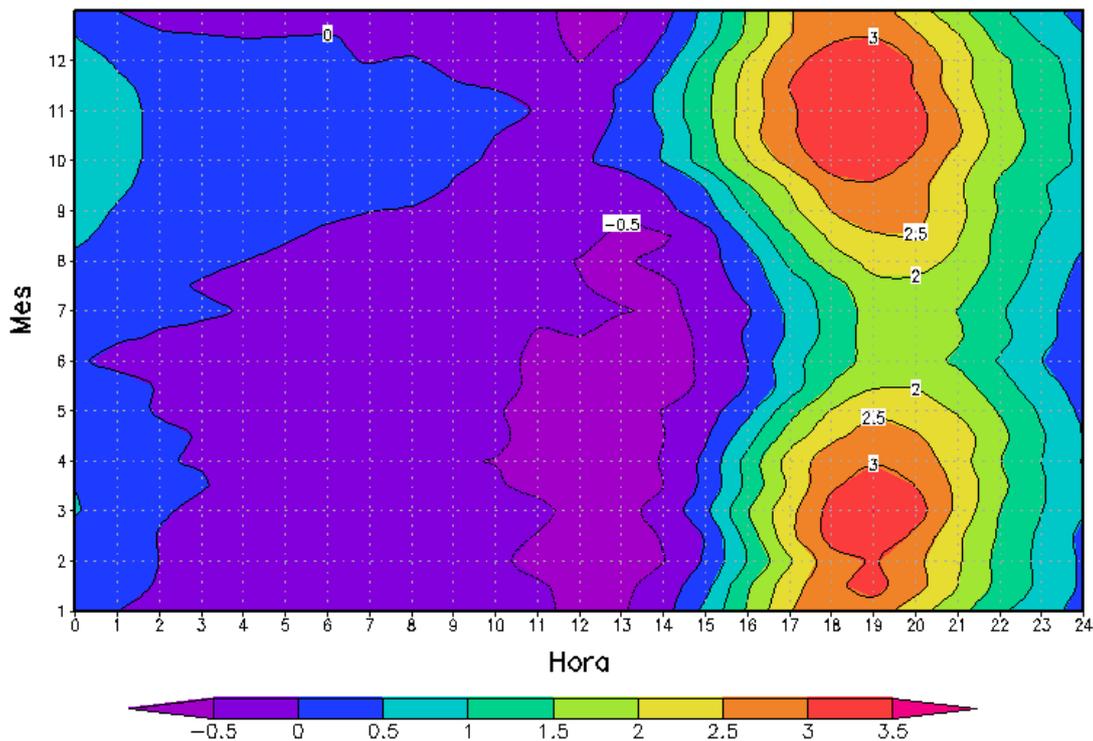
**Figura 4.8** Climatologia horária da componente zonal do vetor velocidade do vento [ $u$ ], em ( $\text{m s}^{-1}$ ), ao longo das horas do dia (abscissa) e dos meses do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições na estação meteorológica do aeroporto internacional do Rio de Janeiro para o período 1971-2019 (48 anos). No eixo x a coordenada de horas é UTC, sendo a hora do tempo local (TL) do Rio de Janeiro dada por ( $\text{TL} = \text{UTC} - 3\text{h}$ ).

A distribuição temporal da velocidade do vento (média horária) é mostrada na figura 4.9. As máximas intensidades do vetor velocidade do vento ocorrem ao final da tarde, em torno das 16h do tempo local (TL), sendo presente ao longo de todo o ano, com máximos durante os equinócios (outono e primavera). Os máximos são em torno de  $3 \text{ m s}^{-1}$ , enquanto rajadas na frente de brisa são em geral 2,4 vezes maior, da ordem aproximada de  $6 \text{ a } 7 \text{ m s}^{-1}$  ( $\sim 20 \text{ km h}^{-1}$ ). Como já indicado, a penetração da brisa na RMRJ, onde não é bloqueada pelos maciços rochosos (morros graníticos) da orografia local, é a principal responsável pela melhoria da sensação térmica ao final da tarde, principalmente na cidade do Rio de Janeiro, mais exposta à entrada da brisa que os bairros da Baixada Fluminense oeste (BF-W) (e.g., Campos e outros bairros, no vale entre a encosta da Serra do Mar ao

norte, e o maciço de Gericinó, ao sul, que praticamente impedem o livre escoamento da brisa que só pode entrar parcialmente por SE, já mais tarde da noite).

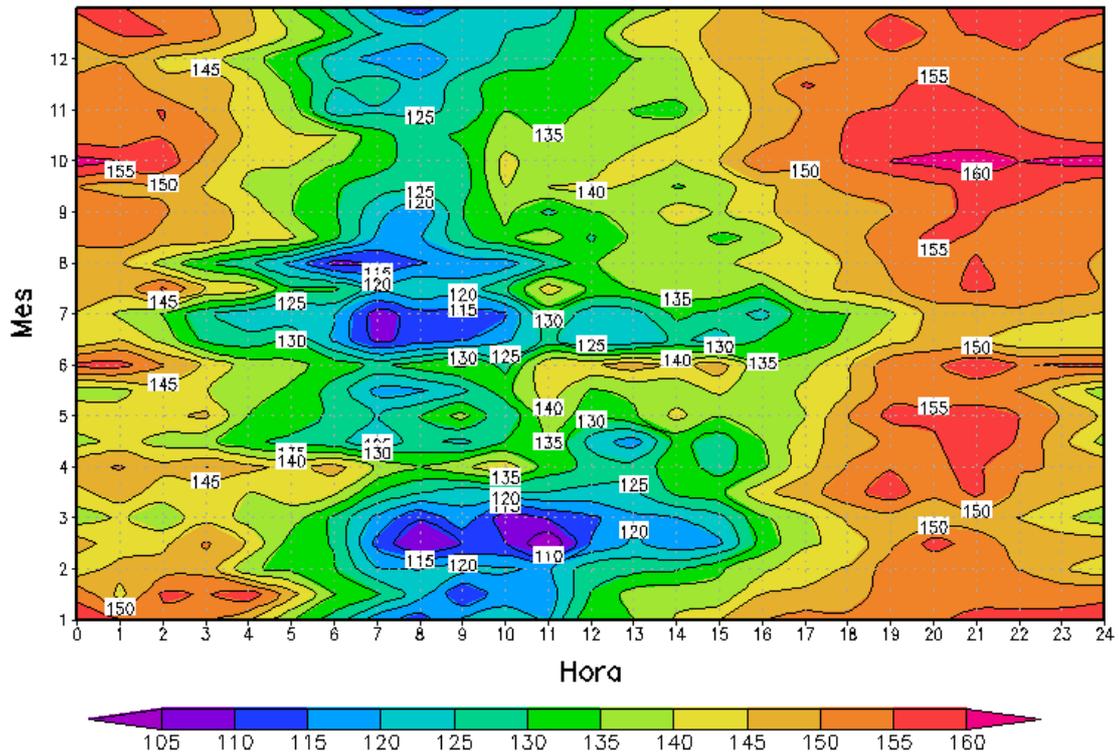
Note-se que o vento da brisa marítima inicialmente de S na linha de praia, gira em sentido anti-horário com as horas, pelo mecanismo de oscilação inercial. Consequentemente, o arrefecimento térmico (i.e., para o conforto térmico) dos bairros da BF-W é predominantemente pela entrada do ramo da brisa por leste, a partir do fundo NW da BG, e isso ocorre de forma limitada, não direta, como a frente de brisa que acelera de S para N em direção ao fundo da BG, passando pelas pistas dos aeroportos, sobretudo do Internacional, no bairro do Galeão da ilha do Governador.

A aceleração da componente meridional do vento associada à aceleração da brisa marítima à tarde aparece assim associada à definição de áreas de convergência ao fundo da BG, e esta convergência é favorável ou muito favorável à formação de tempestades localizadas (convectivas), em conjunção com as altas temperaturas urbanas e da área a volta, portanto como um todo e o desenvolvimento da CL urbana, com máxima altura da Camada de Mistura ( $z_i$ ) atingida à tarde. A ICU modula a altitude da CL, particularmente no período matutino ou inicial de seu desenvolvimento. A CL urbana mostra seu máximo desenvolvimento durante a tarde quanto a brisa marítima acelera simultaneamente. A formação de cúmulos ativos com capacidade de libera grande quantidade de calor latente na parcelas de ar ascendentes, depende das condições de umidade do ar, i.e., depende de valores relativamente elevados da umidade específica do ar (Fig. 4.5), e esse altos altos ocorrem para os dias da tríade Jan-Fev-Mar, com valores máximos da média horário entre 16,5 e 17,5 g kg<sup>-1</sup>. As diferenças entre a temperatura do ar e a temperatura do ponto de orvalho alcançam valores da ordem de 10°C, logo, a ascensão das parcelas de ar úmido superficial até o NCL e daí até o nível de livre convecção (FLL) é essencial para o disparo (aceleração) do desenvolvimento vertical da tempestade Cb. Não se pode menosprezar o papel importantíssimo da convergência da brisa, seja contra as encostas da topografia elevada, seja contra linhas de convergência do escoamento, no caso de linhas de instabilidade, com padrões térmicos, de convergência e de velocidade vertical alternados no espaço e tempo, como das *ondas de gravidade* propagantes, como as estudadas nos livros de dinâmica da atmosfera (e.g., HOLTON, 1973).



**Figura 4.9** Climatologia horária da componente meridional [ $v$ ] do vetor velocidade do vento, em ( $\text{m s}^{-1}$ ), ao longo das horas do dia (abscissa) e dos meses do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições na estação meteorológica do aeroporto internacional do Rio de Janeiro para o período 1971-2019 (48 anos). No eixo x a coordenada de horas é UTC, sendo a hora do tempo local (TL) do Rio de Janeiro dada por ( $\text{TL} = \text{UTC} - 3\text{h}$ ).

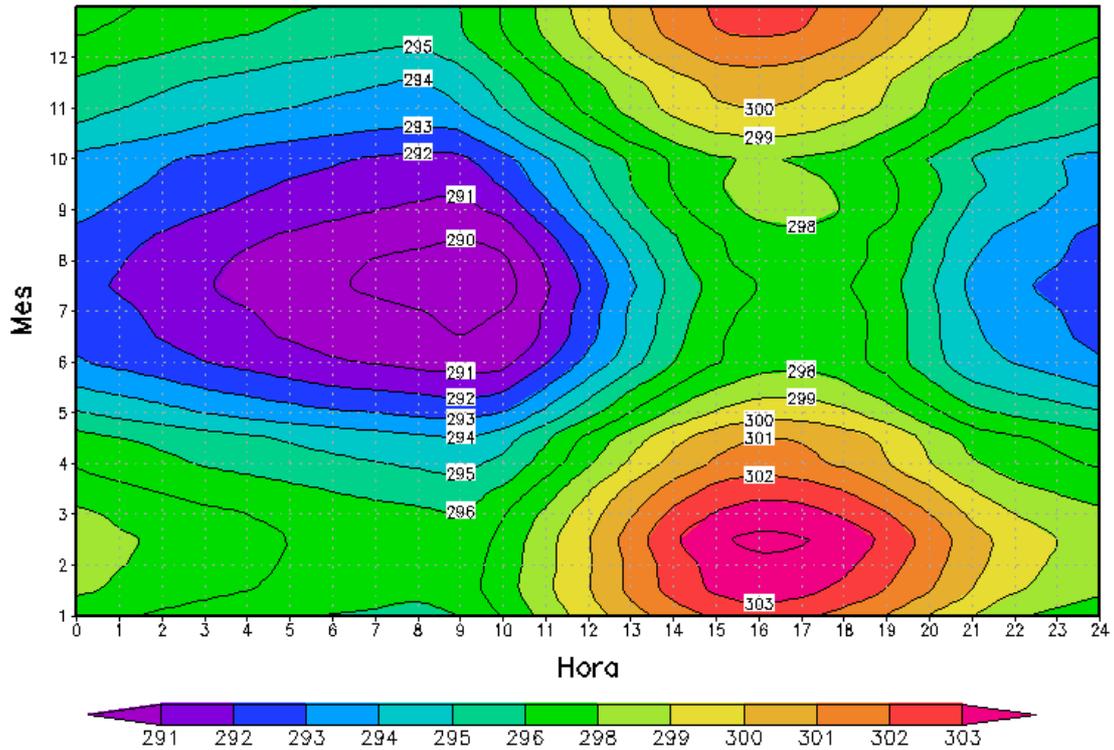
A distribuição temporal da direção do vento (media) de cada horário do ano é mostrada na figura 4.10. O ciclo diurno associado às brisas terrestre (madrugada e manhã) e brisa marítima (tarde e noite) é bem presente durante todo o ano. Daí a importância da circulação da brisa marítima-terrestre na análise dos microclimas e da ICU da cidade do Rio de Janeiro. No século XIX as embarcações a vela usavam o escoamento da brisa terrestre (de NW para SE/S) para vir do interior da Baixada Fluminense (Noroeste) para o porto, na região central da cidade do Rio de Janeiro. O retorno ocorria a tarde e noite, quando a brisa marítima soprava de S, e girava para SE no flanco oeste da Baía de Guanabara, e de S para SW, no flanco leste da Baía de Guanabara.



**Figuras 4.10** Climatologia horária da direção do vento [dir], em (graus), ao longo das horas do dia (abscissa) e dos meses do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições na estação meteorológica do aeroporto internacional do Rio de Janeiro para o período 1971-2019 (48 anos). No eixo x a coordenada de horas é UTC, sendo a hora do tempo local (TL) do Rio de Janeiro dada por (TL = UTC - 3h).

A distribuição temporal dos valores médios de temperatura potencial [TP] é mostrada na figura 4.11. Nota-se um máximo intenso à tarde durante os dias de verão e outono, em torno de 305 K, um valor bastante elevado, considerando que o nível de pressão de 1000 hPa, está junto ao topo da CL urbana, portanto acima da superfície. Esse valor é característico de clima tropical com chuvas de verão. Logo, no verão, o estado do Rio de Janeiro apresenta predomínio de condições típicas do clima tropical, chuvoso, principalmente na tríade Jan-fev-Mar. O mínimo marcante de TP se dá em pleno inverno, pela manhã, mostrando a existência de duas distribuições de probabilidade, uma de verão e outra de inverno. Colocando todos os dados juntos, a Função densidade de probabilidade(f.d.p.) empírica pode ser bem representada por duas distribuições Normais

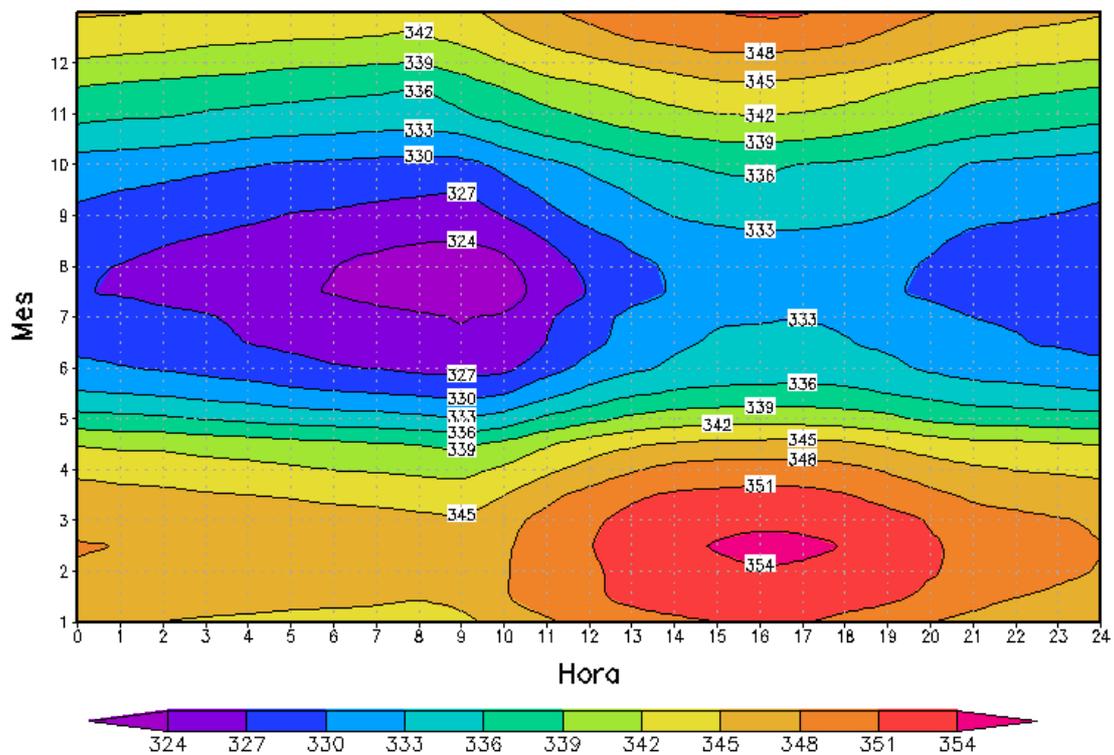
sobrepostas, uma para os meses de verão e outra para os meses de inverno, com dois máximos de frequência (bimodal).



**Figuras 4.11** Climatologia horária da temperatura potencial [TP], em (K), ao longo das horas do dia (abscissa) e dos meses do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições na estação meteorológica do aeroporto internacional do Rio de Janeiro para o período 1971-2019 (48 anos). No eixo x a coordenada de horas é UTC, sendo a hora do tempo local (TL) do Rio de Janeiro dada por ( $TL = UTC - 3h$ ).

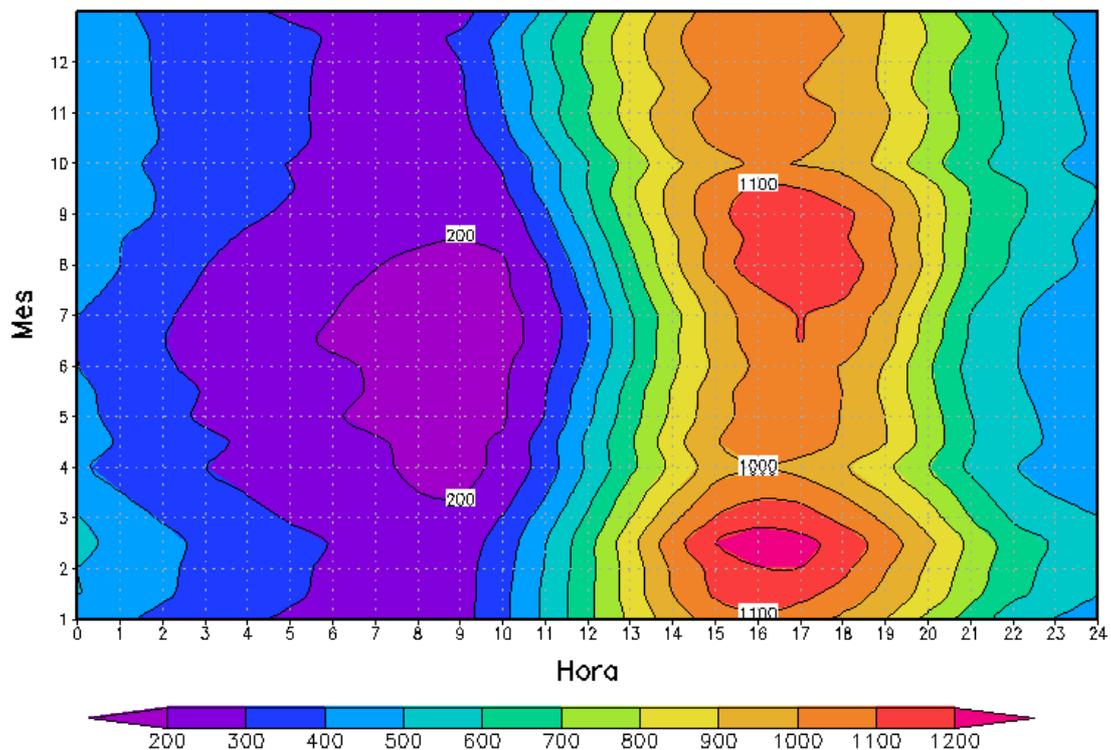
A distribuição temporal dos valores médios de temperatura potencial equivalente é mostrada na figura 4.12. Prevaecem os maiores valores nos horários da tarde, o que pode ser associado na ocorrência de tempestades nas horas seguintes, no verão e outono. Isso pode estar associado a liberação de instabilidade potencial, quando gradientes verticais de temperatura potencial equivalentes são negativos (i.e., diminuem com a altura dentro da CL urbana).

No inverno os valores são mais baixos pela manhã, principalmente nos meses de junho a outubro. As máximas são registradas à tarde, e reforçadas pela brisa que sopra do mar, levando ao favorecimento de um maior aquecimento do ar, podendo gerar convecção.



**Figuras 4.12** Climatologia horária da temperatura potencial equivalente [TPE], em (K), ao longo das horas do dia (abscissa) e dos meses do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições na estação meteorológica do aeroporto internacional do Rio de Janeiro para o período 1971-2019 (48 anos). No eixo x a coordenada de horas é UTC, sendo a hora do tempo local (TL) do Rio de Janeiro dada por (TL = UTC - 3h).

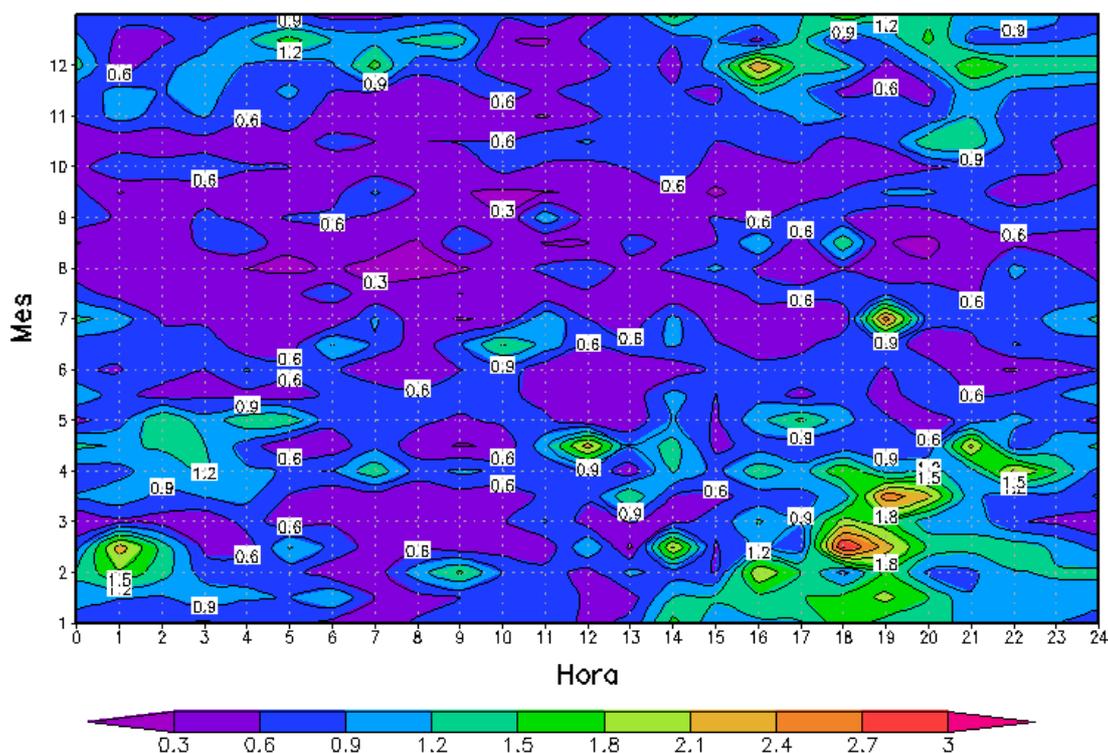
A distribuição da altura do nível de condensação por levantamento (NCL) é bem caracterizado ao longo das horas do dia e dias do ano (Figura 4.13), sendo bem definido nos ciclo diurno e sazonal. Pela manhã sempre ocorrem os menores valores, e na parte da tarde ocorrem os maiores valores. De acordo com as estações do ano pode-se observar o destaque no verão, com o maior valor da altura do NCL da série correspondendo a 1200 m, ultrapassando o nível da troposfera. O período que isso ocorre é ao final da tarde, também associado à formação de chuvas convectivas.



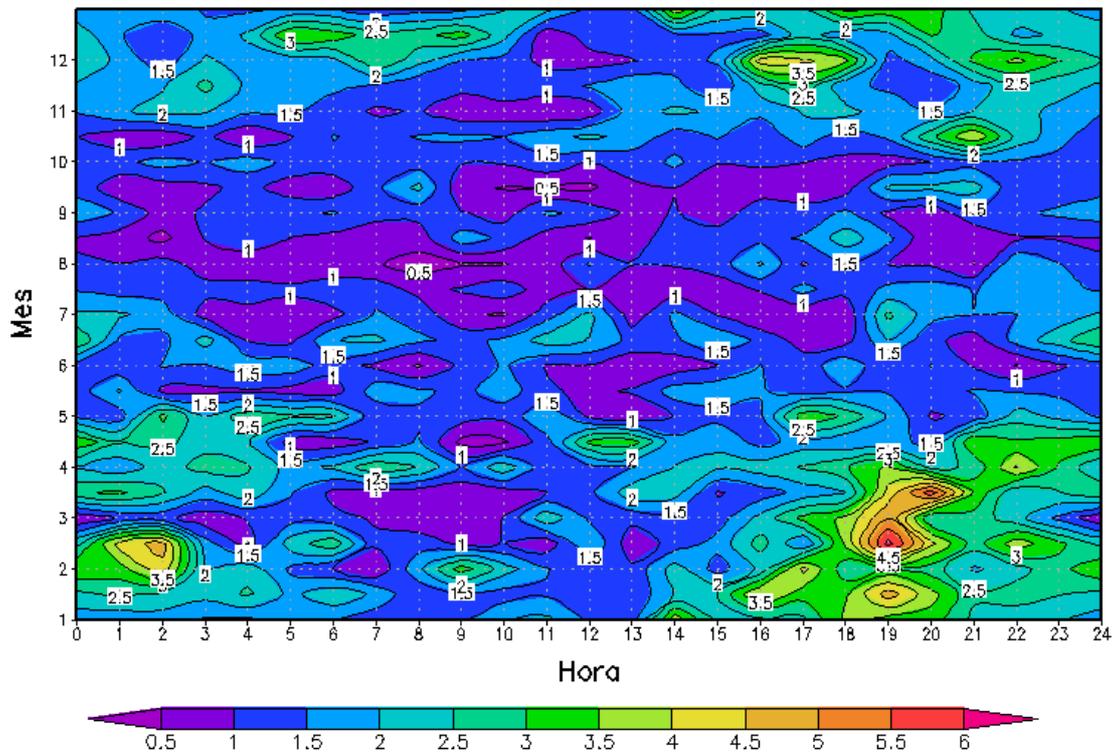
**Figuras 4.13** Climatologia horária da altura do nível de condensação por levantamento [NCL], em (m), ao longo das horas do dia (abscissa) e dos meses do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições na estação meteorológica do aeroporto internacional do Rio de Janeiro para o período 1971-2019 (48 anos). No eixo x a coordenada de horas é UTC, sendo a hora do tempo local (TL) do Rio de Janeiro dada por (TL = UTC - 3h).

### 4.3 Taxa de precipitação

Na sessão a seguir, são observadas as diferentes taxas de precipitação que ocorrem ao longo do tempo em mm da estação Ilha do governador. São divididas de acordo com a duração e a intensidade, tendo diferentes resultados de acordo com a duração de acumulação da chuva: 15 min, 1 hora, 4 hrs, 24 hrs e 96 horas. Os quatro (4) mapas, a seguir, serão apresentados de acordo com o período de acumulação da água, primeiro para 15 minutos de acumulação, depois para 1 hora de acumulação e assim por diante.

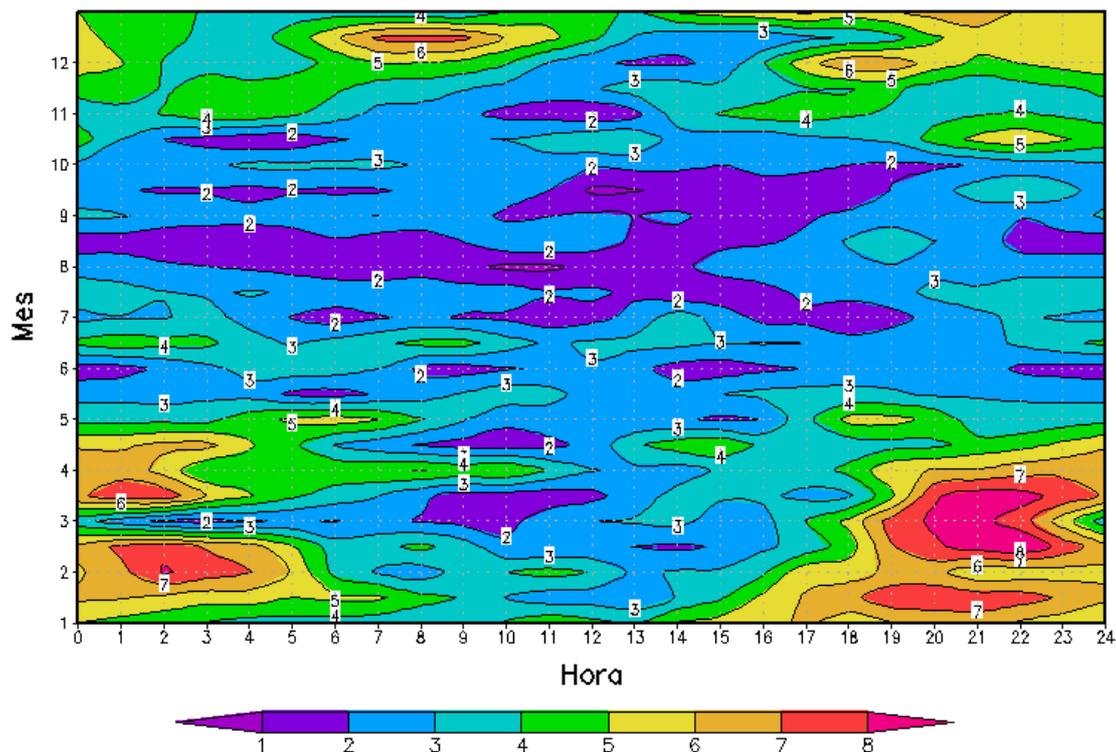


**Figura 4.14** Climatologia horária da precipitação acumulada em 15 minutos [ $\Gamma_{15\text{min}}$ ], em (mm), obtida em função da hora do dia (abscissa) e do mês do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições do posto pluviográfico Ilha do Governador da cidade do Rio de Janeiro, para o período 2000-2019 (19 anos). No eixo x a coordenada temporal é a hora local (TL), considerando o horário de verão, que acresce +1 hora no período que se estende de 3 de novembro a 20 de fevereiro, aproximadamente.



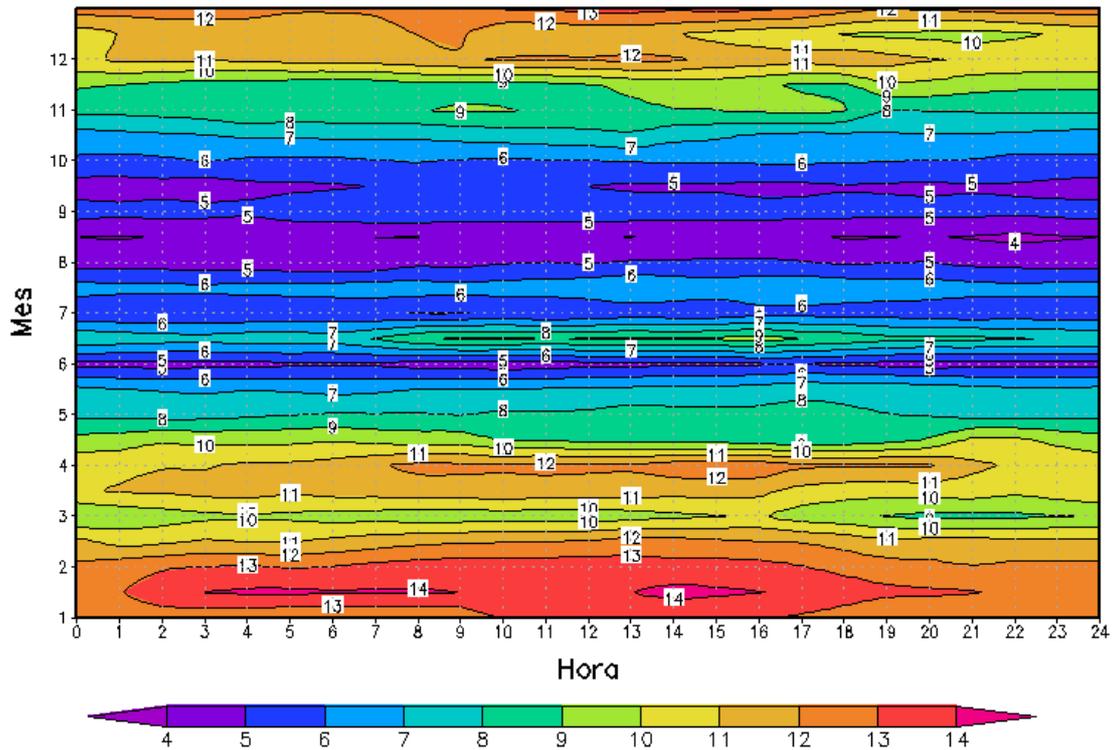
**Figura 4.15** Climatologia horária da precipitação acumulada em 1 hora [ $r_{1h}$ ], em (mm), obtida em função da hora do dia (abscissa) e do mês do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições do posto pluviográfico Ilha do Governador da cidade do Rio de Janeiro, para o período 2000-2019 (19 anos). No eixo x a coordenada temporal é a hora local (TL), considerando o horário de verão, que acresce +1 hora no período que se estende de 3 de novembro a 20 de fevereiro, aproximadamente.

Nas figuras 4.14 e 4.15, observa-se respectivamente a climatologia da precipitação acumulada em 15 minutos e 1 hora. Ao longo do ano a variável concentra seus máximos (5 mm) no verão próximo ao anoitecer. Destaca-se nessa figura a diferença presente entre as estações seca e úmida. Os valores máximos se encontram logo após ao horário em que a temperatura do ar destaca os seus maiores valores, o que demonstra a maior probabilidade da ocorrência de tempestades.



**Figura 4.16** Climatologia horária da precipitação acumulada em 4 horas [ $r_{4h}$ ], em (mm), obtida em função da hora do dia (abscissa) e do mês do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições do posto pluviográfico Ilha do Governador da cidade do Rio de Janeiro, para o período 2000-2019 (19 anos). No eixo x a coordenada temporal é a hora local, com horário de verão, para o Rio de Janeiro.

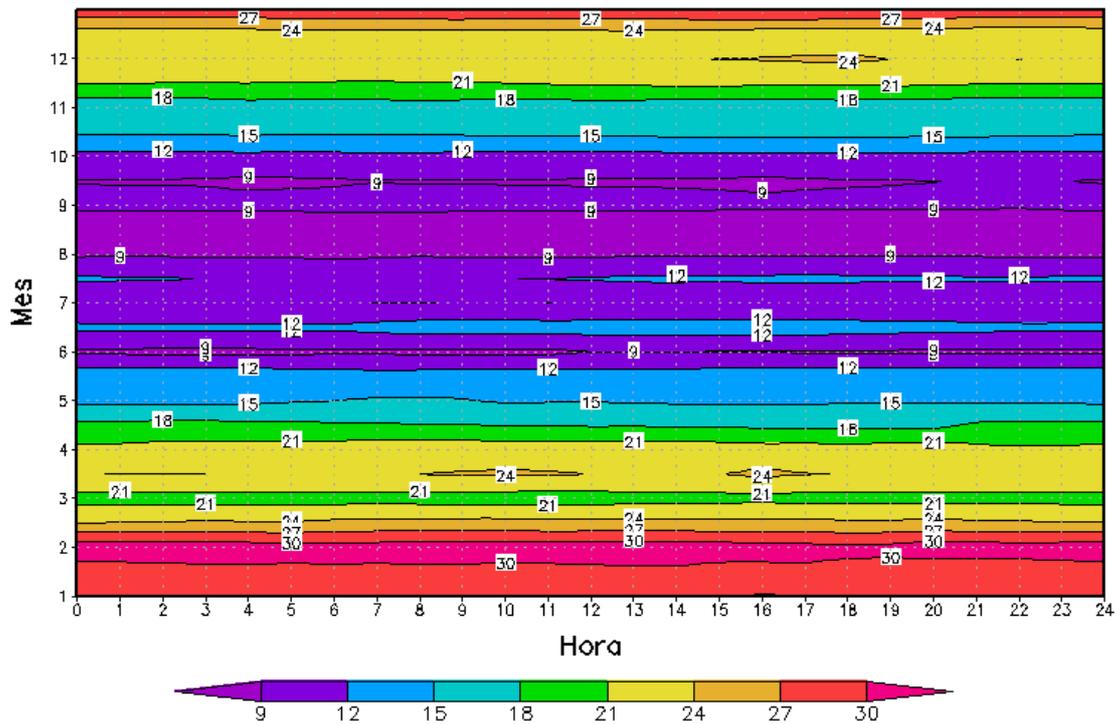
A precipitação acumulada em 4 horas é a continuidade das figuras anteriores. Há o aumento da chuva, que continua predominante nos meses de verão, principalmente ao entardecer. No inverno os valores são menores, correspondentes a estação seca.



**Figura 4.17** Climatologia horária da precipitação acumulada em 24 horas [ $r_{24h}$ ], em (mm), obtida em função da hora do dia (abscissa) e do mês do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições do posto pluviográfico Ilha do Governador da cidade do Rio de Janeiro, para o período 2000-2019 (19 anos). No eixo x a coordenada temporal é a hora local, com horário de verão, para o Rio de Janeiro.

No período de 24 horas, observa-se a mesma estrutura de distribuição, a qual demarca bem a estação úmida da seca.

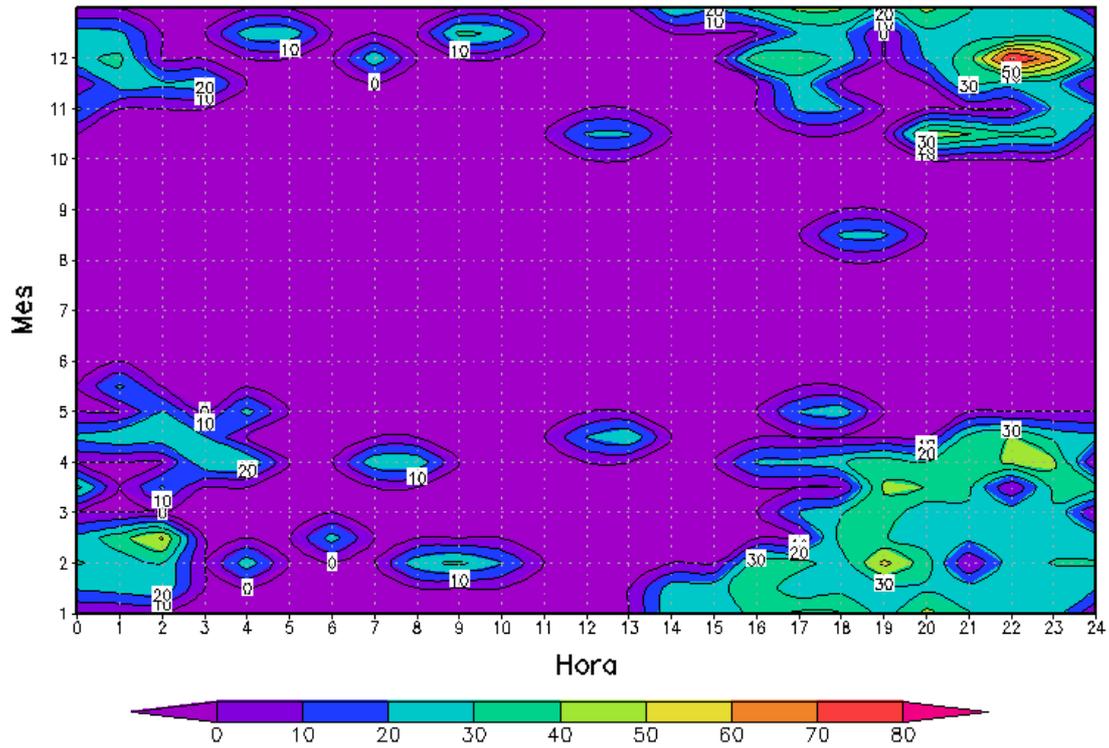
Na precipitação acumulada de 96 horas observa-se a continuidade do padrão de chuvas anterior. Os valores refletem o comportamento da precipitação da cidade, com destaque para os meses de verão. No inverno ocorrem os menores valores. As estações de transição estão bem demarcadas, com a diminuição em direção ao inverno e o aumento nos meses de verão.



**Figura 4.18** Climatologia horária da precipitação acumulada em 96 horas [ $\Gamma_{96h}$ ], em (mm), obtida em função da hora do dia (abscissa) e do mês do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições do posto pluviográfico Ilha do Governador da cidade do Rio de Janeiro, para o período 2000-2019 (19 anos). No eixo x a coordenada temporal é a hora local, com horário de verão, para o Rio de Janeiro.

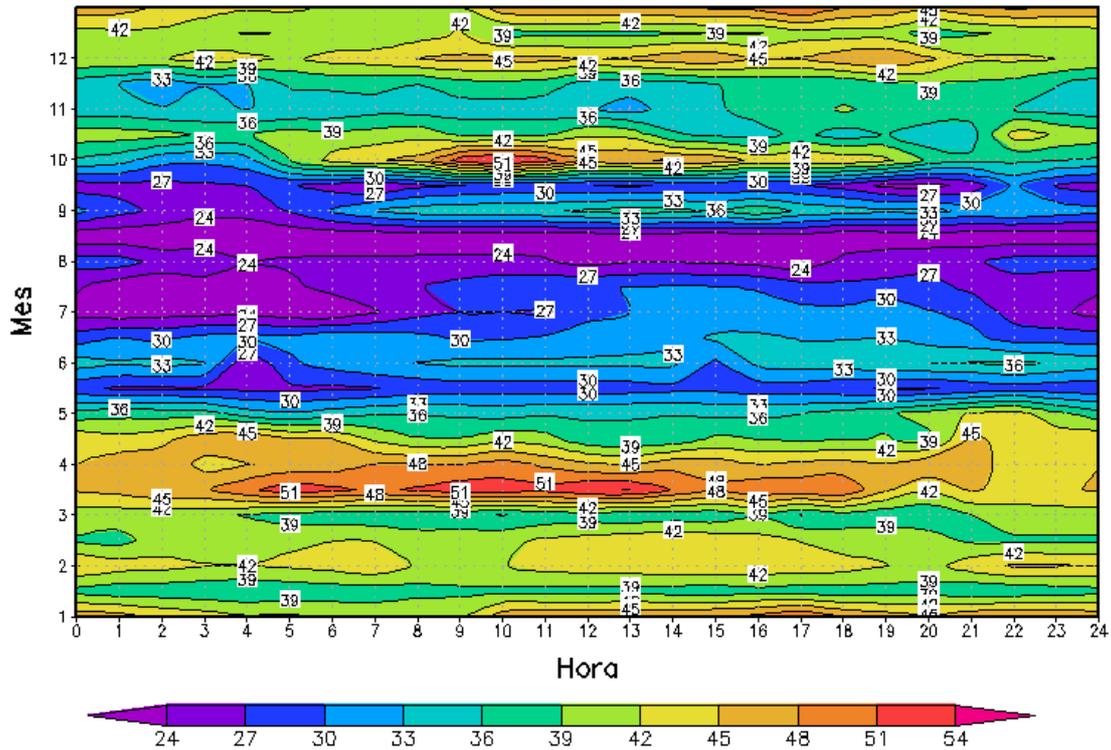
#### 4.4 Comparação de acordo com a intensidade

Pode-se observar que no período de 1 hora, a maior ocorrência de precipitação acumulada igual ou acima de 20 mm é nos meses de primavera e verão. Os maiores valores se concentram na estação úmida, ocorrendo nos meses de novembro e dezembro, valores acima de 80 mm por hora. Nos meses de inverno e outono, a passagem de frentes frias é bem demarcada, com valores máximos de 20 mm de acordo com a climatologia.



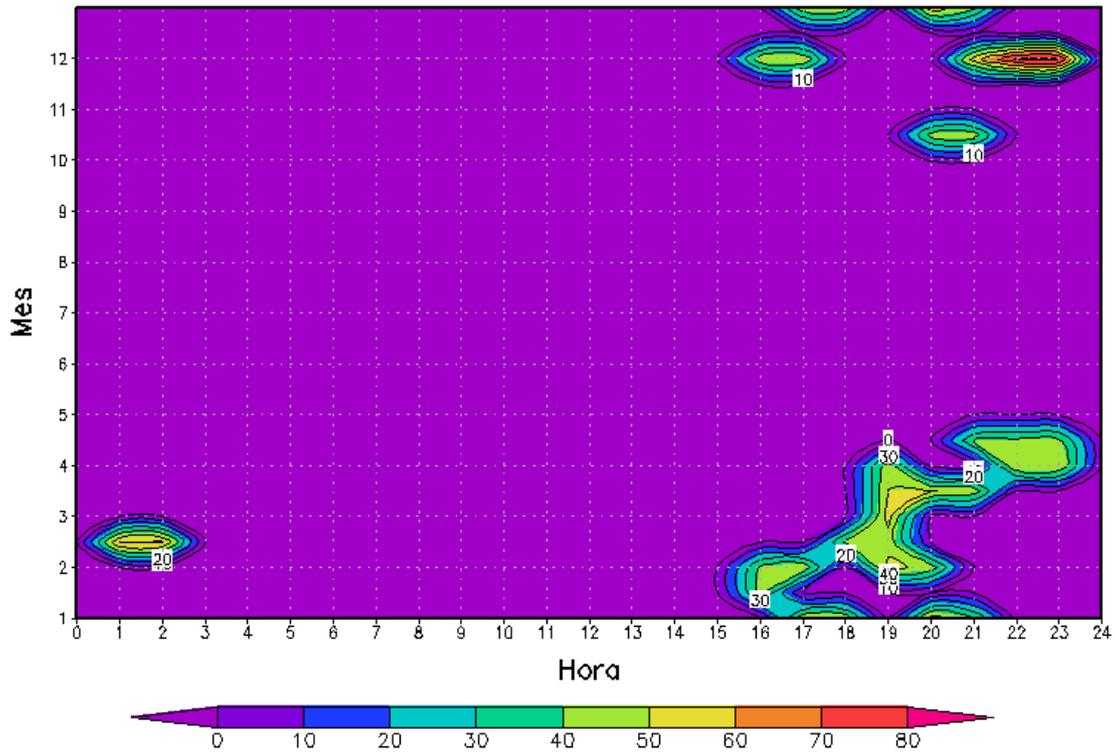
**Figura 4.19** Climatologia horária da precipitação acumulada em 1 hora [ $r_{1h}$ ], em (mm), para intensidade igual ou maior que 20 mm, obtida em função da hora do dia (abscissa) e do mês do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições do posto pluviográfico Ilha do Governador da cidade do Rio de Janeiro, para o período 2000-2019 (19 anos). No eixo x a coordenada temporal é a hora local, com horário de verão, para o Rio de Janeiro.

Os valores acumulados em 24 horas ressaltam de forma demarcada a estação úmida da seca com os maiores e menores valores respectivamente. No mês de março é observado o destaque da serie, com valores acima de 50 mm no período. Em outubro, observa-se este valor de forma pontual também.



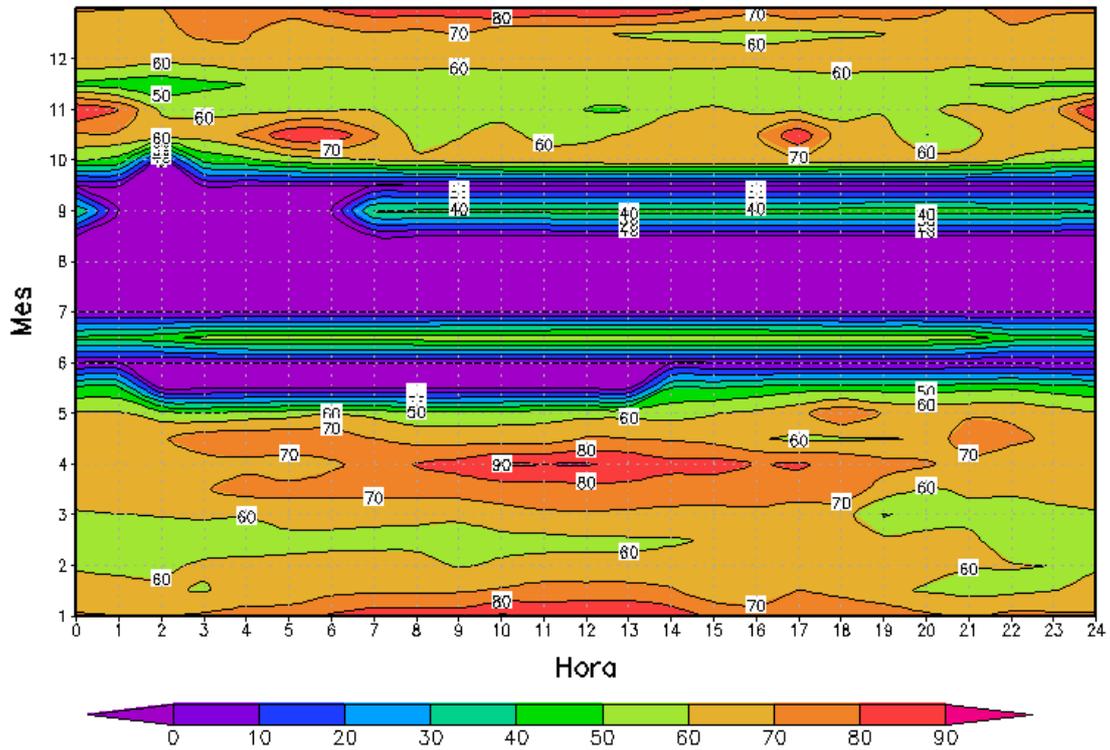
**Figura 4.20** Climatologia horária da precipitação acumulada em 24 horas [ $I_{24h}$ ], em (mm), para intensidade igual ou maior que 20 mm, obtida em função da hora do dia (abscissa) e do mês do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições do posto pluviográfico Ilha do Governador da cidade do Rio de Janeiro, para o período 2000-2019 (19 anos). No eixo x a coordenada temporal é a hora local, com horário de verão, para o Rio de Janeiro.

Os valores iguais ou maiores que 40 mm são mais frequentes do período de primavera e verão. Eles ocorrem no período do entardecer, sendo reforçadas pela brisa marítima, criando eventos extremos que podem causar sérios danos a população da cidade do Rio de Janeiro. É necessária a ação do poder público para prevenir possíveis deslizamentos em áreas de encostas para que haja como forma de proteção para as famílias que residem em tais áreas de risco.



**Figura 4.21** Climatologia horária da precipitação acumulada em 1 hora [ $r_{1h}$ ], em (mm), para intensidade igual ou maior que 40 mm, obtida em função da hora do dia (abscissa) e do mês do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições do posto pluviográfico Ilha do Governador da cidade do Rio de Janeiro, para o período 2000-2019 (19 anos). No eixo x a coordenada temporal é a hora local, com horário de verão, para o Rio de Janeiro.

Nas figuras 4.21 e 4.22 , é claramente observado que os meses de inverno são demarcados pelos menores valores da série. Nos meses de primavera, outono e verão, observa-se acumulados a partir de 60 mm em 24 horas, destacam se os meses de janeiro e dezembro, outubro e em abril acumulados que chegam a 80 mm ao longo de um dia.



**Figura 4.22** Climatologia horária da precipitação acumulada em 24 horas [ $r_{24h}$ ], em (mm), para intensidade igual ou maior que 40 mm, obtida em função da hora do dia (abscissa) e do mês do ano (ordenada). A distribuição foi obtida a partir das medições do posto pluviográfico Ilha do Governador da cidade do Rio de Janeiro, para o período 2000-2019 (19 anos). No eixo x a coordenada temporal é a hora local, com horário de verão, para o Rio de Janeiro.

## 4.6. Discussão

As cidades possuem rugosidade peculiar associadas aos elementos urbanos, edificações, vias, cânions urbanos, parques, avenidas e bullevarés, que formam corredores para o deslocamento de ar dentro da camada de dossel urbano. Os *cânions urbanos* (Oke, 1978) contribuem alterando o padrão de circulação regional, considerados seus efeitos mecânicos e térmicos, seja pelas configurações arquitetônicas que definem (i.e., cavidade 2D), seja por geração de energia e momento (e.g., automóveis, trens e trólebus) ou mesmo, por modificações do balanço de radiação e energia em relação às áreas rurais, naturais ou também modificadas pelo homem. Além disso no estabelecimento da cidade (i.e., por urbanização) há a transformação do espaço geográfico, alterando a topografia, a rugosidade aerodinâmica original e a hidrologia do solo (i.e., por impermeabilização parcial ou total). Esse conjunto de modificações altera a distribuição das variáveis meteorológicas de superfície, como temperatura, umidade do ar, pressão atmosférica, velocidade e direção do vento, nebulosidade e também precipitação (NUNES *et al.*, 2009).

A circulação da CL urbana se estende além da fronteira periurbana, principalmente quando há ventos mais intensos e não há bloqueios topográficos elevados. No caso da baía de Guanabara os ventos são em geral muito fracos, por exemplo, com fraco potencial eólico, como mostram pesquisas anteriores. Além disso ao norte da localidade, a escarpa da Serra do Mar com altitudes da ordem de 1000 m bloqueiam de forma relevante os ventos de Norte, ao mesmo tempo que permitem a convergência (i.e., divergência negativa) dos ventos vindos de Sul.

O clima na cidade do Rio de Janeiro – RJ pode ser associado à semi permanência do ramo descendente oeste do Anticiclone do Atlântico Sul (ASAS), presente durante todo o ano, definindo o domínio da Massa Tropical Atlântica advectada de NE sobre a cidade, e que contribui para as condições de tempo presentes da região. No inverno, como é bem conhecido ocorre a chegada da massa de ar com circulação anticiclônica originalmente de característica polar, mas já modificado pelo deslocamento pelo Sul do Brasil. No verão, há o predomínio de pressões ligeiramente menores (~1014 hPa), devido

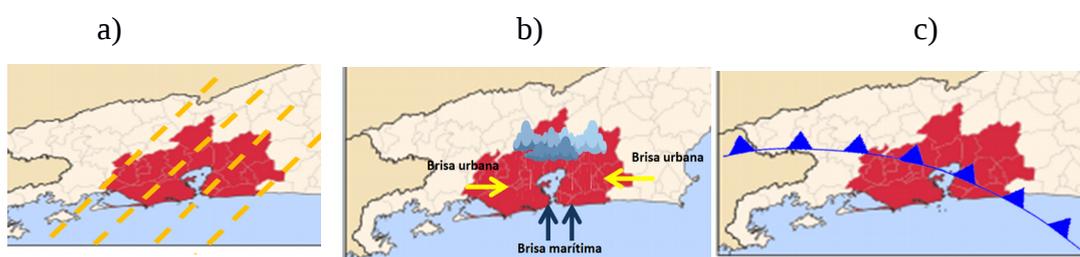
as instabilidades presentes, nesta época do ano também reforçadas pela brisa, aumentando a frequência de episódios de convecção na região estudada. Além disso, a ocorrência da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) pode aumentar a frequência de precipitações mais intensas. A primavera e outono são períodos de transição entre maiores taxas de precipitação (verão) e menores taxas (inverno).

A Fig. 4.1 demonstra a formação de chuvas mais frequentes no estado do Rio de Janeiro. Três padrões de precipitação são propostos: a) tipo I: Sistemas convectivos de mesoescala (Linhas de instabilidade); b) tipo II: interação da brisa marítima com a brisa urbana, convergência do escoamento e efeitos de bloqueio topográfico; c) tipo III: passagem de frentes frias.

- **Tipo I:** Sistemas convectivos de mesoescala (Linhas de instabilidade). Muitas chuvas que ocorrem no outono e primavera podem ser associadas à passagem de linhas de instabilidade pré-frontais, sendo que estas podem se apresentar como várias linhas que chegam em sucessão, com deslocamento de NW para SE, em geral com wind shear (cisalhamento do vento) girando em sentido horário de baixo para cima, associado às condições de advecção quente. Certamente neste caso, as circulações de brisa também têm um papel de fornecimento de ar úmido marítimo que alimenta o fluxo de ar de baixos níveis troposféricos (i.e., camada limite litorânea) entrando pela base das nuvens de tempestade.
- **Tipo II:** Interação da brisa marítima com a brisa urbana, convergência do escoamento e efeitos de bloqueio topográfico. Chuvas convectivas associadas à convergência da brisa marítima à tarde e à noite ocorrem quando a temperatura potencial equivalente é maior ou igual a 348 K. A convergência da brisa associada à aceleração da componente meridional (de S para N) e ao bloqueio das encostas da Serra do Mar, que tem vetor normal de S, é da ordem de  $-3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ , que no topo da camada limite urbana implica em movimento vertical da ordem de  $+0,3 \text{ m s}^{-1}$ , suficiente para em 2 horas elevar uma parcela a  $0,3 \text{ m s}^{-1} \times 2 \text{ h} \times 3600 \text{ s h}^{-1} = 2160 \text{ m}$ , bem acima do topo da CL urbana da RMRJ (~1200 m), com condições de formar cúmulos de bom tempo e de atingir o

nível de convecção espontânea (NCE), e a partir deste nível, as parcelas acidentadas podem acelerar na vertical na forma de tempestade convectiva (Cb).

- o **Tipo III: Passagem de frentes frias**. No inverno, o regime de chuvas é dominado por precipitação associada à passagem de frentes frias. A taxa de precipitação média horária não apresenta valores comparáveis às taxas convectivas do verão, sendo predominantemente fracas, mas que acumular valores significativos durante períodos de 24, 48 e 96 horas.



**Figura 4.23:** Três tipos frequentes de precipitação no estado do Rio de Janeiro: a) tipo I: Sistemas convectivos de mesoescala (Linhas de instabilidade); b) tipo II: interação da brisa marítima com a brisa urbana, convergência do escoamento e efeito de bloqueio topográfico; c) tipo III: passagem de frentes frias (Referência: este trabalho).

Nos mapas climatológicos horários foram observados comportamentos condizentes mas inéditos e, relação à pesquisas na localidade, em geral feitos com climatologia mensal e anual (e.g., da precipitação acumulada). As climatologias horárias obtidas neste trabalho mostram-se consistentes com as climatologias mensais de outros trabalhos( Dereczynski *et al.* (2009; 2011); Marques Filho *et al.* (2009) ). Por exemplo, a climatologia horária temperatura do ar mostra a existência de temperaturas máximas e mínimas bem demarcadas ao longo de todo o ano, concentrando as máximas na primavera e verão, nos quais o efeito da ICU se estendem ao longo da tarde, com temperaturas urbanas ultrapassando os 31°C, com superfícies dos elementos urbanos muito aquecidos. Isso também pode indicar a grande capacidade de retenção de calor durante o período da tarde, com aumento do fluxo de calor condutivo para dentro do solo, ruas e paredes das edificações.

A temperatura do bulbo úmido concentra seus máximos ao final da tarde nos meses de primavera e verão, podendo chegar aos 31°C (saturação de vapor, intenso umedecimento da CLU). A pressão do ar, em escala sinóptica, é caracterizada pela forte presença semi permanente da circulação do Anticiclone do Atlântico Sul (ASAS), tendo uma maior intensidade nos meses de inverno. No verão os níveis de pressão são levemente menores, devido ao afastamento do centro de pressão da ASAS e em associação ao desenvolvimento da CLU, parcelas de ar em ascensão convectiva, formação de Cúmulos ativos, liberação de calor latente de condensação nas nuvens e às instabilidades termodinâmicas e dinâmicas (convergência do escoamento da CLU), presentes nesta época do ano, podendo estar associadas à variações de pressão de alguns hectopascals (mb) devido tanto ao ajuste de pressão hidrostático dos sistema de brisas, i.e., terrestre & marítima (vespertina sobretudo), brisa urbana (matutina sobretudo), brisa de planície litorânea & escalar da Serra do Mar ( diurna sobretudo), gerando convergências que são favoráveis à intensificação da convecção, altura do topo do domo da CLU, atingimento do Nível de Condensação por Levantamento (NCL) e do Nível de Convecção Espontânea (FCL), associados à formação de tempestades Cbs sobre a área.

Os valores de umidade específica destacam-se no verão, concentrando uma maior disponibilidade de vapor d'água no ar, como combustível superficial da convecção, e formação de cúmulos no topo da CLU. A umidade relativa do ar possui um padrão ao longo do ano, tendo as máximas no período da manhã (i.e., com padrão praticamente reverso em relação à temperatura do ar). Entretanto observa-se um destaque no período do verão à tarde, associado também ao máximo dos valores de umidade específica, cuja elevação acima de 95% mostra associado a presença de tempestades convectivas no final da tarde. Este é quadro geral preliminar da relações entre o desenvolvimento da CLU, circulações de brisa e desenvolvimento de tempestades locais, entretanto, também convergências de escala sinótica são relevantes para o desenvolvimento de tempestades e chuvas intensas, como indicada pelos eventos de tempo severo ou muito chuvoso associado à presença de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).

A climatologia horária dos ventos é importante para o entendimento do transporte de umidade e os tipos de brisa existentes na área. Observou-se que no período da manhã a brisa predominante é a terrestre e à tarde a marítima. No verão os ventos que sopram em

direção à baía de Guanabara (ventos de Sul, i.e., que sopram de Sul para Norte) favorecem a convergência no fundo da baía, colaborando para a formação de tempestades e chuvas de verão localizada, que se propagam pouco ou muito pouco do local de formação (hotspots termais de superfície, encostas de bloqueio do escoamento, linhas de convergência da brisa marítima para um contorno de costa curvo (não linear). Os componentes zonal e meridional do vetor velocidade de vento são respectivamente de oeste para leste e de sul para norte, gerando um padrão de ventos que contribui carregando umidade e calor para o fundo da baía de Guanabara, que atinge e é bloqueado pelo relevo das escarpas da Serra do Mar, com formação de nuvens convectivas (cúmulos e cumulonimbus). Em relação à direção do vento, predominam-se os de Sul (S) na estação do Galeão, que ganha força ao longo do dia a brisa marítima (que acelera a tarde), contrapondo com a circulação da brisa urbana, de menor intensidade associada ao desenvolvimento da ilha de frescor. A própria brisa é a principal responsável, por hipótese, pela intensificação da ilha de frescor da cidade do Rio de Janeiro, uma vez que a temperatura média do mar é em torno de 23°C com variação de poucos graus ao longo do ano. A brisa marítima traz um ar mais frio e úmido para a localidade.

Em relação a temperatura potencial e a potencial equivalente demonstram as máximas registradas à tarde, principalmente nos períodos de primavera e verão em que a primeira pode chegar ao máximo de 303 K e a segunda a valores no mesmo período acima de 340K. Ambas possuem uma grande diferença, principalmente no período do verão, onde a potencial equivalente chega a 354 K no fim da tarde, essa diferença demonstra a grande quantidade de umidade sobre a superfície, fazendo com que o calor latente seja liberado, possibilitando a ocorrência de instabilidades convectivas. A Altura do NCL possui os maiores valores no verão, chegando a 1200 m. Isso indica que o topo da CLU deve atingir pelo menos esta altura sobre a superfície para que se forme a base da nuvem convectiva durante a tarde. Este é um indício seguro de que o papel da convergência das circulações de mesoescala (brisas que se acoplam e bloqueio topográfico) desempenham um papel importante para a ativação das nuvens cúmulos, convertendo-as de nuvens passivas (sem empuxo) para ativas (com empuxo, quanto os topos dos cúmulos ultrapassam a altura do nível de convecção espontânea, acima de  $z_i$ , o topo da CLU, e do NCL).

Os mapas climatológicos do valor médio da precipitação acumulada, de 15 minutos a 1 hora, tem com principais característica a formação de precipitação no horário do entardecer, principalmente no verão (máximo primário) e na primavera (máximo secundário). Os valores máximos de encontram logo após o horário em que a temperatura do ar apresenta seus máximos. Simultaneamente à precipitação, ocorre uma variação temporal local da temperatura potencial equivalente, diminuindo de seu máximo, que ocorre em fase com o máximo da temperatura absoluta do ar. As precipitações acumuladas de 4 e 24 horas mostram-se destacadas também no verão, com períodos mais úmidos na primavera e verão e, os mais secos, no outono e inverno.

Em relação aos mapas climatológicos da intensidade de precipitação em 1 hora e 24 horas, respectivamente, destacaram-se duas classes principais de acordo com a intensidade mínima considerada: maior ou igual a 20 mm e maior ou igual a 40 mm. Para os valores acumulados em uma hora, ambas as classes registram altos valores no verão, podendo chegar a 80 mm nos períodos de primavera e verão. Entretanto, os valores maiores ou iguais a 20 mm pode-se observar valores acumulados de forma pontual no período de outono inverno, correspondentes a passagens de frentes frias e condições de advecção de ar marítimo frio e úmido pós-frontais. Já os valores iguais ou acima de 40 mm para o mesmo período de tempo se concentram apenas no verão ao final da tarde, caracterizando a formação de nuvens convectivas, associadas ao desenvolvimento da CLU, brisa marítima e convergência do escoamento.

É importante ressaltar que no período de primavera e verão, há a maior ocorrência de tempestades convectivas na localidade, que são reforçadas pelo comportamento das variáveis citadas anteriormente (temperatura, pressão, umidade, vento, NCL, etc). Neste período, a série climatológica mostra acumulados que podem chegar a até 90 mm em 24 horas. Em 1 hora, os valores também são altos, podendo chegar de 60 a 70 mm. As chamadas “chuvas de verão” ocorrem de forma intensa e causam sérios danos a localidade, desde enchentes a deslizamentos que trazem risco a população.

## Capítulo 5

### 5.1 Conclusões

Este trabalho de caráter local, isto é, associado às circulações locais de mesoescala sobretudo (i.e., associadas ao acoplamentos das circulações de brisas marítima e urbana), com o desenvolvimento da Camada Limite Urbana. Neste estudo buscou-se investigar a Climatologia Horária de duas estações meteorológicas localizadas na Ilha do governador – Rio de Janeiro. Para tal, foram utilizados dados horários das estações Metar e das estações pluviométricas do Sistema Alerta-Rio no período de 2000 a 2018. Como os dados possuíam diferentes estruturas, para o seu tratamento foram utilizados dois códigos criados no Laboratório de Hidrometeorologia Experimental da UFRJ: 1) Reading data set (unifica o formato dos arquivos); 2) Analysis Cyclus (gera a climatologia horária para cada variável). O resultado consiste em mapas climatológicos atualizados com distribuição mensal e horária para as estações estudadas.

Para o tratamento dos dados faltantes foi realizado o procedimento de imputação, substituindo os mesmos por valores apropriados para a série histórica, no caso a climatologia horária para as variáveis: Temperatura do ar, temperatura do bulbo úmido, pressão atmosférica local, umidade específica, umidade relativa, velocidade do vento, componente zonal e meridional da velocidade do vento, direção do vento, temperatura potencial e potencial equivalente, altura do nível de condensação por levantamento, a taxa de precipitação e a intensidade da precipitação. É importante ressaltar que os dados apresentam diferentes frequências: 1 hora (METAR) e de 15 em 15 minutos (GeoRIO).

Destacam-se os principais resultados:

1. Os mapas climatológicos horários sugerem que aceleração da advecção da brisa marítima a tarde nos meses de verão está associada a formação e desenvolvimento

de tempestades convectiva caracterizadas por chuvas de maior intensidade ao fundo da baía de Guanabara;

2. A maior intensidade dos máximos térmicos diurnos no verão também está associada ao desenvolvimento de chuvas ao final da tarde e início da noite;
3. Os resultados indicam que a brisa é capaz de gerar convergência do vento ao fundo da baía de Guanabara, produzindo o movimento vertical ascendente para a formação de tempestades convectivas;
4. Apesar de pouco ou menos intensas as taxas de precipitação frontal acumulam valores significativos de água durante o inverno. Por outro lado, as chuvas convectivas que são rápidas no verão apresentam maiores taxas de precipitação, acumulando água mais rapidamente, tipicamente em poucas horas;
5. Chuvas convectivas associadas a convergência da brisa marítima à tarde e à noite ocorrem quando a temperatura potencial equivalente é maior ou igual a 348 K;
6. A convergência da brisa associada à aceleração da componente meridional (de S para N) e ao bloqueio das encostas da Serra do Mar, que tem vetor normal de S, é da ordem de  $-3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ , que no topo da camada limite urbana implica em movimento vertical da ordem de  $+0,3 \text{ m s}^{-1}$ , suficiente para em 2 horas elevar uma parcela a  $0,3 \text{ m s}^{-1} \times 2 \text{ h} \times 3600 \text{ s h}^{-1} = 2160 \text{ m}$ , bem acima do topo da CL urbana da RMRJ ( $\sim 1200 \text{ m}$ ), com condições de formar *cúmulos de bom tempo* e de atingir o nível de convecção espontânea (NCE), e a partir deste nível, as parcelas ascendentes podem acelerar na vertical na forma de tempestade convectiva (Cb);

Portanto, o estabelecimento de climatologias horárias pode servir como referência o comportamento atmosférico (urbano), que será útil em comparações qualitativas e quantitativas, enquanto as mudanças climáticas se aprofundam na atualidade, induzidas pela forma atual desacompanhada de utilização dos recursos naturais disponíveis na Terra.

## 5.2 Perspectivas e Recomendações

A curto prazo, será implementado o tratamento dos dados faltantes com procedimento de imputação, substituindo os mesmos por valores faltantes por valores da climatologia horária para cada variável: temperatura do ar, temperatura do bulbo úmido, pressão atmosférica local, umidade específica, umidade relativa, velocidade do vento, componente zonal e meridional da velocidade do vento, direção do vento, temperatura potencial e potencial equivalente, altura do nível de condensação por levantamento, taxa de precipitação, precipitação acumulada etc. É importante ressaltar que os dados horários originais apresentam diferentes frequências: 1 hora (Metar) e de 15 em 15 minutos (GeoRIO), requerendo interpolação de 1 hora para 15 minutos no caso do Metar. Isto é particularmente útil para obter-se séries completas (sem falhas) para rodar-se modelos ou parametrizações para representação de superfície urbanas, de forma a se realizar testes e inferências estatísticas detalhadas.

Os dados também podem ser utilizados de diferentes formas com o objetivo de contribuir às pesquisas de dados sobre a formação histórica/geográfica da Climatologia da cidade do Rio de Janeiro e da Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Dentre essas, elencam-se:

- utilização para a calibração de modelos atmosféricos;
- teste de modelo de superfície urbana e rural;
- análise de detalhes da variabilidade e da estrutura térmica da ilha de calor urbana;
- contribuição à análise de eventos extremos (chuvas muito intensas, ondas de calor, epidemias e doenças infecciosas tropicais etc);
- mapeamento da variabilidade temporal e da covariância espacial; e
- redes neurais aplicadas a períodos de dados estendidos.

## Anexos

**Tabela 4.1** Exemplo das primeiras linhas do arquivo SBGL de extensão .csv (tipo variáveis em colunas “XYZ”) [i.e., SBGL.csv] descarregado do provedor de acesso do *Iowa Environmental Mesonet (IEM)*, neste caso, para a estação do aeroporto do Galeão. Note que a série se estende de 1931 a 2019, mas a presença de dados antigos do Rio em baixa frequência e por um pequeno período em 1931 se descontinua, e segue como falha (ausência) até retornar como estação permanente do aeroporto na década de 1970. A primeira linha do arquivo contém o nome das coordenadas e as variáveis, a mensagem codificada METAR original do aeroporto segue ao final de cada linha.

SBGL.dat	
station,valid,lon,lat,tmpf,dwpcf,relh,drct,sknt,p01i,alti,mslp,vsby,gust,skyc1,skyc2,skyc3,skyc4,skyl1,skyl2,skyl3,skyl4,wxcodes,ice_accretion_1hr,ice_accretion_3hr,ice_accretion_6hr,peak_wind_gust,peak_wind_drct,peak_wind_time,feel,metar	
SBGL,1931-01-01	12:00,-43.2437,-22.8089,77.00,M,M,320.00,5.00,M,30.01,1016.40,M,SBGL 011200Z AUTO 32005KT 25/ RMK SLP164 IEM_DS3505
SBGL,1931-01-02	12:00,-43.2437,-22.8089,78.80,M,M,360.00,5.00,M,30.00,1015.90,M,SBGL 021200Z AUTO 36005KT 26/ RMK SLP159 IEM_DS3505
...	
SBGL,2019-06-10	22:00,-43.2437,-22.8089,73.40,69.80,88.51,120.00,6.00,0.00,30.15,M,6.21,M,FEW,BKN,M,M,1500.00,9000.00,M,M,M,M,M,M,M,M,M,73.40,SBGL 102200Z 12006KT 9999 FEW015 BKN090 23/21 Q1021
SBGL,2019-06-10	23:00,-43.2437,-22.8089,73.40,66.20,78.19,90.00,5.00,0.00,30.15,M,6.21,M,FEW,BKN,M,M,1500.00,9000.00,M,M,M,M,M,M,M,M,M,73.40,SBGL 102300Z 09005KT 9999 FEW015 BKN090 23/19 Q1021

**Tabela 4.2** Exemplo das primeiras linhas do arquivo “SBGL\_n1” de extensão “.dat” (tipo variáveis em colunas “XYZ”) [i.e., SBGL\_n1.dat]reformatado pelo programa *reading\_dataset*, correspondente ao arquivo SBGL.csv indicado na Tabela 4.1. Note-se o acréscimo de variáveis termodinâmicas semiconservativas, com nomes abreviados indicados na primeira linha. As variáveis termodinâmicas foram obtidas utilizando-se as equações propostas por Bolton (1980) e Rogers e Yau (1989), além do ano contínuo (e.g., “1931.001342773”), na coluna 10 do arquivo tipo XYZ.

SBGL_n1.dat							
#	01lon	02lat	03alt	04anoi	05mesi	06diai	07hori
08mini	09segi	10anor	11mesr	12diar	13horr	14minr	
15segr	16ndiar	17ndanor	18anrad	19decl	20nasch	21porh	
22hrelóg	23hapar	24anghor	25angzen	26cosz	27octop	28trans	
29ocb	30t	31td	32tv	33vel	34dir	35u	36v
37dtemp	38rain	39p	40qs_	41dqs_dt	42q	43r	
44ur	45tp	46tpd	47tpv	48esat	49e	50tl	51tpdl
52tpe	53rhoa	54ncl	55pncl	56rsat	57ocbglo	58es/100.	
59qs_*1000.	60rs_*1000.	61e/100.	62q*1000.	63r*1000.	64ur*100.		
65tl	66tpd	67tpdl	68tp	69tpe	70tpes		
-43.243610382	-22.808889389	9.000000000	1931	1	1	12	
15	0	1931.001342773	0.016465055	0.510416687	12.250000000		
15.000000000	0.000000000	0.510416687	365.000000000	0.008786418			
-0.401759326	5.313824177	18.686176300	9.250000000	9.119237900			
-0.754181802	0.692059815	0.769933224	1089.400390625	0.649449825			
809.352111816	25.000000000	19.000000000	27.456176758	2.572219849			
320.000000000	1.653390527	-1.970435143	6.000000000	0.000000000			
1016.400024414	19.614574432	1.158126950	13.549421310	13.735529900			
69.330871582	23.624328613	25.474822998	26.062347412	31.674293518			
21.960063934	17.586273193	25.503723145	63.473693848	1.177911520			
720.000000000	933.230163574	20.007003784	-809.352111816	31.674293518			
19.614574432	20.007003784	21.960063934	13.549421310	13.735529900			
69.330871582	290.736267090	298.624816895	298.653717041	296.774322510			
336.623687744	356.885437012						
...							

## Referências

1. ARYA, S. P., 2001: Introduction to micrometeorology. Academic Press, San Diego, 307 p.
2. ABREU, M. A., *Evolução urbana do Rio de Janeiro*. 1987. *Book in Portuguese*.
3. ALISSON, P. D. *Missing Data. Series: Quantitative Applications in the Social Sciences*, N 136, SAGE University Paper, 93 p., 2001.
4. ANDRADE, H. O Clima urbano – Natureza, escalas de análise e aplicabilidade. **Finisterra**, XL, 80, 2005, pp. 67-91.
5. ARNFIELD, A. J. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. **Int. J. Climatol.** 23: 1-26, 2003.
6. AYOADE, J. O. Introdução à Climatologia para os Trópicos. 11a Edição. Bertrand Brasil. 2006.
7. BARCELLOS, P. C. L. Precipitações intensas na cidade do Rio de Janeiro: probabilidade e previsibilidade . Dissertação de mestrado em Engenharia Civil– Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.
8. BOLTON, D., The computation of equivalent potential temperature. *Monthly weather review* 108, no. 7: 1046-1053, 1980.
9. BORTZ, M., KANO, M., RAMROTH, H., BARCELLOS, C., WEAVER, S. R., ROTHENBERG, R., MAGALHÃES, M., Disaggregating health inequalities within Rio de Janeiro, Brazil, 2002-2010, by applying an urban health inequality index. *Cad Saude Publica*. 2015 November ; 31(0 1): 107–119. doi:10.1590/0102-311X00081214.
10. CABRAL, E.; FUNARI, F. L.; SALUM, S. T. Análise da precipitação diária no município de S.Paulo, segundo os dias da semana. In 4º Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica, 2000, Rio de Janeiro-RJ. v. 1. p. 10-10, 2000.
11. CARDOSO, R.M.M. Contribuição do balanço de energia sobre superfícies urbanas no desenvolvimento de tempestades na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.
12. CHUAN-YAO L IN AND WAN -CHIN CHEN. Impact of the Urban Heat Island Effect on Precipitation over a Complex Geographic Environment in Northern Taiwan. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, 50. 2011.
13. CONNORS; J. P., GALLETTI, S., CHOW, W. T. L., Landscape configuration and urban heat island effects: assessing the relationship between landscape characteristics and land surface temperature in Phoenix, Arizona. **Landscape Ecol.** 28:271–283, 2013.
14. DANIEL, M., LEMONSU, A., DÉQUEÉ, M. SOMOT, S., ALIAS, A., MASSON, V. Benefits of explicit urban parameterization in regional climate modeling to study climate and city interactions. **Climate Dynamics**, 20 p., 2018.
15. DAVIDSON, R., MacKINNON, J. G., *The Method of Maximum Likelihood: Fundamental Concepts and Notation. Estimation and Inference in Econometrics*. New York: Oxford University Press. pp. 247–253. ISBN 0-19-506011-3. 1993.

16. DERECHYNSKI, C.P. [et al.] A Climatologia da precipitação no município do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.24, n.1, 24-38, 2009
17. FARHANGFAR, A., KURGAN, L., DY, J., Impact of imputation of missing values on classification error for discrete data. *Pattern Recognition* 41.12 (2008): 3692-3705.
18. FIALHO, E. F. Ilha de calor : reflexões acerca de um conceito. ACTA Geográfica, Boa Vista, Ed. Esp., **Climatologia Geográfica**, 61-76, 2012.  
 \_\_\_\_\_ *Unidades climáticas urbanas: o caso da Ilha do Governador-RJ*  
 Revista de C. Humanas, Vol. 10, No 1, p. 26-46, jan./jun. 2010
19. GELMAN, A.; HILL, J. **Data analysis using regression and multilevel/hierarchical models**. Cambridge University Press, 2006.
20. GU, Y.; LI, D. A modeling study of the sensitivity of urban heat islands to precipitation at climate scales. **Urban Climate**. 2018.
21. HAIDER, T. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. **Energy and Buildings**, 25, 99-103, 1997.
22. HOLTON, J. R. An introduction to dynamic meteorology. Book. *American Journal of Physics* 41, No. 5 (1973): 752-754.
23. HORTON, N. J.; KLEINMAN, K. P. Much ado about nothing: A comparison of missing data methods and software to fit incomplete data regression models. **The American Statistician**, 61 (1): 79–90. 2007.
24. IPANEMA, C.d. *História da Ilha do Governador*. Rio de Janeiro: Livraria e Editora Marcello de Ipanema, 1991. 200 p.
25. JUNNINEN, H., NISKA, H., TUPPURAINEN, K., RUUSKANEN, J., KOLEHMAINEN., M., Methods for imputation of missing values in air quality data sets. **Atmospheric Environment**, 38(18): 2895-907, 2004.
26. KARAM, H. A., *The Rainfall Distribution on the Metropolitan Area of Rio de Janeiro* (lecture). 3rd WMO/WWRP International Symposium on Nowcasting and Very Short Range Forecasting (WSN12), 2012.
27. KRÜGER, E.; ROSSI, F. Quantificação da ilha de calor de Curitiba considerando aspectos de estabilidade atmosférica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 4, 394-404, 2015
28. LANDSBERG, H. E. **Urban climates**. Academic Press, New York, 1981.
29. LEAL FILHO, W., ICAZA, L. E. [et al.]. Coping with the impacts of Urban Heat Islands: A literature based study on understanding urban heat vulnerability and the need for resilience in cities in a global climate change context. **Journal of cleaner Production**.
30. LENCIONI, S. Urbanização difusa e a constituição de megaregiões: O caso de São Paulo-Rio de Janeiro. **E-metropolis Rio de Janeiro**, v. 6, n. 22, p. 6-15, 2015. Disponível em <<http://emetropolis.net/artigo/167?name=urbanizacao-difusa-e-a-constituicao-de-megarregioes-o-caso-de-sao-paulo-rio-de-janeiro>> ,
31. LIN, C.-Y.; CHEN, F.; CHEN, W.-C.; LIU, S.-C. Urban Heat Island Effect and its Impact on Boundary Layer Development and Precipitation over Northern Taiwan. *The seventh International Conference on Urban Climate*, 29 June - 3 July, Yokohama, Japan. 2009.

32. LUCENA, J. A. [et al.]. A evolução da ilha de calor na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. **Revista Geonorte**, 2(5): 8-21, 2012.
33. LUCENA, A. J.; CORREA, E. B. ; ROTUNNO FILHO, O.C. ; PERES, L. F. ; FRANÇA, J. R.A. ; JUSTI da SILVA, M. G. A. *Ilhas de Calor e Eventos de Precipitação na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ)*. In: XIV IWRA Congresso Mundial da Água, 2011, Porto de Galinhas. XIV IWRA Congresso Mundial da Água, 2011.
34. LUCENA, J. A. Notas conceituais e metodológicas em clima urbano e ilhas de calor. **Revista Continentes (UFRRJ)**, ano 2, n.2, 2013.
35. MARQUES FILHO, E. P., KARAM, H. A., MIRANDA, A. G., FRANÇA, J. R. A. *Rio de Janeiro's Tropical Urban Climate*. **Urban Climate News (online)**, News letters of the International Association for Urban Climate (IAUC), Issue N.32, June 2009. Available at the URL <<http://www.urban-climate.org/newsletters/IAUC032.pdf>>.
36. NIMER, E. Clima da região Sudeste. In: Geografia do Brasil. Rio de Janeiro/IBGE,1971 Climatologia do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE,1979.
37. NUNES, L. H., 2009. Clima da Região Sudeste do Brasil (Chapter). In **Tempo e Clima no Brasil**. Organizadores: Cavalcanti, I. F. A.; Ferreira, N. J.; Justi da Silva, M. G. A.; Silva Dias, M. A. F., 2009. 464 p., *In Portuguese*.
38. OKE, T. R. City size and the urban heat island. **Atmospheric Environment**. Vol. 7, pp. 769-779. 1973.
39. OKE, T. R. The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects. Oke, T. R. In **Wind climate in cities**, pp. 81-107. Springer, Dordrecht, 1995.
40. PARHAM, MIRZAEI, A.; HAGHIGHAT, F. Approaches to study Urban Heat Island e Abilities and limitations. **Building and Environment** 45, 2192-2201. 2010.
41. PICKLES, A. *An Introduction to Likelihood Analysis*. Norwich: W. H. Hutchins & Sons. p. 9. ISBN 0-86094-190-6. 1985.
42. PIMENTEL, L. C. G.; MARTON, E.; SILVA, M. S.; JOURDAN, P. Caracterização do regime de vento em superfície na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v.19, n.2, p. 121 - 132, 2014.
43. ROGERS, R. R. and YAU, M. K. , *A short course in cloud physics* [Also cited as: Yau, M. K. and Rogers, R. R.]. Elsevier, 1996.
44. RUSSO, P. R. *Ilha do Governador: Considerações acerca de seu Processo de Ocupação*. GeoUerj n. 2 1997
45. SCHNEIDER, T.. Analysis of incomplete climate data: Estimation of mean values and covariance matrices and imputation of missing values. *Journal of climate* 14.5 (2001): 853-871.
46. STEWART; OKE. T. Local climate zones for urban temperature studies. **BAMS**.
47. ROGERS, R. R. R., YAU, M. K., *A Short Course in Cloud Physics, 3rd edition*, International Series in Natural Philosophy, Butterworth-Heinemann, 1989: 304p.

48. SEINO, N.; AOYAGI, T.; TSUGUTI, H. Numerical simulation of urban impact on precipitation in Tokyo: How does urban temperature rise affect precipitation? **Urban Climate** 23, 8-35, 201.
49. SILVA, F. B., Análise dos efeitos combinados da ilha de calor e da poluição do ar urbanas”. Tese de Doutorado do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE/BR), xxxii + 266 p., São José dos Campos-SP, Brasil, 2016. Disponível na Internet na URL <sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/03.02.17.48-TDI>. *In Portuguese*.
50. THUNEN, D. The Urban Heat Island and its Influence on Precipitation in Denver, Colorado. Theses and Dissertations. 650. 2013.
51. VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. Meteorologia básica e aplicações. Viçosa; Imprensa Universitária, 1991. Universidade Federal de Viçosa.
52. WILKS, D., *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Vol. 100, 2nd Edition, Academic Press, 648 p., 2005.
53. ZHONG, S.; QIAN, Y.; ZHAO, C. Urbanization-induced urban heat island and aerosol effects on climate extremes in the Yangtze River Delta region of China. **Atmos. Chem. Phys.**, 17, 5439-5457, 2017.