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

VIVIANA VANESA URBINA GUERRERO

# Características das circulações locais em regiões metropolitanas do Chile Central

SÃO PAULO
2010

# Livros Grátis

http://www.livrosgratis.com.br

Milhares de livros grátis para download.

VIVIANA VANESA URBINA GUERRERO

# Características das circulações locais em regiões metropolitanas do Chile Central

Dissertação de Mestrado apresentada ao Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como condição parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Meteorologia.

Orientador: Prof. Dr. Edmilson Dias de Freitas

SÃO PAULO

2010

*A minha mãe,*
*quem me ensinou a perseverar para atingir meus objetivos.*

## AGRADECIMENTOS

A meu orientador, Edmilson, quem me ajudou a levar a termino este trabalho. Agradeço enormemente sua grande paciência.

A minha família chilena, que compreendeu minha decisão de me afastar para continuar minha vida profissional e acadêmica, e pelo apoio que, desde longe, me hão dado.

A minha família brasileira, e em especial a meu marido Marcos Vinícius, quem me deu ânimos para concluir este trabalho.

A Ana María Cordova e Sebastián Morales que contribuíram em grande parte para poder estar hoje aqui no Brasil.

A meus colegas do mestrado e do IAG, pelos momentos que passamos juntos, as discussões e jornadas de estudo que passamos. Pela ajuda que me brindaram e sua cálida acolhida.

Aos professores da minha banca de qualificação, Prof. Adilson Gandu e Prof. Ricardo de Camargo, pelas sugestões feitas num momento chave no desenvolvimento do meu projeto de mestrado.

A meu relator, Prof. Adilson Gandu, pelos momentos dedicados na correção dos relatórios do departamento.

Ao Prof. Pedro Leite da Silva Dias pelas dicas que nos ajudaram a solucionar os problemas com os resultados das simulações.

Aos professores do Departamento de Ciências Atmosféricas, que durante suas aulas e, inclusive, fora desses períodos, reforçaram meu conhecimento da meteorologia.

Ao pessoal do Laboratório MASTER, em especial a Bruno, pela sua pronta ajuda quando eu a solicitei.

À Armada do Chile pela informação meteorológica proporcionada para a realização deste trabalho.

À CONAMA-RM, pela informação meteorológica disponibilizada da sua rede de estações na Região Metropolitana de Santiago.

Aos professores do Departamento de Meteorologia no Chile, que me brindaram os primeiros conhecimentos na meteorologia e me incentivaram na continuação dos meus estudos.

Às funcionárias e funcionários das secretarias do DCA e da pós-graduação.

Aos técnicos da seção de informática.

Aos funcionários da biblioteca do IAG.

O desenvolvimento deste projeto de mestrado contou com o apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq; processo: 136411/2008-8).

# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS ..... iii
LISTA DE TABELAS ..... x
LISTA DE ABREVIATURAS ..... xi
RESUMO ..... xiii
ABSTRACT ..... xiv
RESUMEN ..... xv
1. Introdução ..... 16
1.1 Motivação e objetivos ..... 16
1.2 A ilha de Calor Urbana ..... 18
1.3 A Brisa Marítima/Terrestre ..... 21
1.4 Circulações Vale/Montanha ..... 23
1.5 Caracterização das Regiões de Valparaíso e Metropolitana de Santiago ..... 25
2. Análise observacional ..... 30
2.1 Análise sinótica para o ano 2004 ..... 30
2.2 Região de Valparaíso ..... 37
2.2.1 Temperatura ..... 38
2.2.1.1 Comportamento da temperatura ao longo do ano ..... 39
2.2.1.2 Temperatura média horária ..... 40
2.2.2 Vento ..... 42
2.2.2.1 Comportamento do vento ao longo do ano ..... 42
2.2.2.2 Vento médio horário ..... 45
2.3 Região Metropolitana de Santiago ..... 49
2.3.1 Temperatura ..... 50
2.3.1.1 Comportamento da temperatura ao longo do ano ..... 50
2.3.1.2 Temperatura média horária ..... 53
2.3.1.3 Intensidade da ilha de calor urbana ..... 57
2.3.1.4 Diferenças de temperatura entre os diversos tipos de uso de solo ..... 59
2.4 Vento e material particulado ..... 62
3. Estudo Numérico ..... 70
3.1 Atualização do arquivo de uso de solo para a Região Central do Chile ..... 70
3.1.1 Processo de classificação de imagens ..... 71
3.1.2 Resultados do processo de classificação ..... 71

3.2 Descrição do modelo numérico ..... 73
3.2.1 Land Ecosystem-Atmosphere Feedback Model 3 ..... 74
3.2.2 Town Energy Budget (TEB) ..... 76
3.3 Metodologia ..... 78
3.4 Resultados ..... 81
3.4.1 Análise sinótica ..... 81
3.4.2 Temperatura do ar, vento e umidade relativa ..... 85
3.4.3 Efeitos na atmosfera associados a grandes cidades na região central do Chile ..... 94
4. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros ..... 103
4.1 Sugestões para trabalhos futuros ..... 106
Referências Bibliográficas ..... 108

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1**:** Quantidade de poluentes em toneladas por ano para a Região Metropolitana de Santiago (2005). Fonte: CONAMA-RM (2007). ..... 16

Figura 1.2: Topografia da região central do Chile. O contorno *C* indica a localização dos centros urbanos da Grande Valparaíso (setor litoral) e da Grande Santiago (setor interior). Escala de cores e contornos de altura em metros. ..... 18

Figura 1.3: Variação da temperatura para diversos pontos nas regiões rurais, suburbana e urbana. $\Delta T_{u-r}$ representa a diferença entre a temperatura na região mais urbanizada e a região rural. Adaptada de Oke (1987). ..... 20

Figura 1.4: Circulação de brisa marítima (ou lacustre) através da linha de costa a) durante o dia e b) no período noturno. Adaptada de Oke (1987). ..... 22

Figura 1.5: Sistema de ventos vale/montanha para um vale orientado na direção norte-sul para o a) dia e b) noite. Durante o dia os ventos na encosta são anabáticos gerando uma célula que diverge no centro do vale. À noite, o fluxo se inverte, gerando convergência no centro do vale. Adaptada de Oke (1987). ..... 24

Figura 1.6: Mapa das Regiões de Valparaíso (RV) e Metropolitana de Santiago (RMS) localizadas na região central do Chile. O quadrado preto indica a localização das cidades de Valparaíso (na RV) e Santiago (na RMS). Adaptada de INE 2005. ..... 26

Figura 1.7: Localização das estações de Quintero (QT), Valparaíso (VA) e Quinta Normal (QN) na Região Central do Chile. Fonte: Google Earth. ..... 26

Figura 1.8: Valores médios mensais de a) precipitação acumulada e b) temperatura, para as estações de Quintero (QT), Valparaíso (VA) e Quinta Normal (QN) para o período de 1961 a 1990. ..... 28

Figura 2.1: Imagens do satélite GOES-12 do dia 31 de janeiro de 2004 para o horário correspondente às 09 UTC para os canais a) infravermelho e b) vapor d'água. Uma abundância de nuvens estratos pode ser observada no setor oceânico associada ao Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul. Sobre a região central do Chile observa-se escasso conteúdo de umidade. ..... 31

Figura 2.2: Imagens do canal infravermelho do satélite GOES-12 mostrando a evolução de uma baixa costeira que se deslocou para o sul da região central do Chile entre os dias 19 e 20 de fevereiro de 2004. Data e horários são apresentados nas correspondentes figuras. ..... 32

Figura 2.3: Imagens do canal visível do satélite GOES-12 do dia 20 de fevereiro de 2004 das a) 12 UTC e b) 15 UTC. O retângulo mostra a localização dos estratos que penetraram no vale da região central do Chile. ..... 33

Figura 2.4: Precipitação acumulada mensal para o ano de 2004 nas estações a) Quilpué na Região de Valparaíso, e b) Pudahuel, c) Cerrillos e d) Quinta Normal na Região Metropolitana de Santiago. Fonte: INE (2004). ..... 34

Figura 2.5: Localização das estações Quilpué (QP), Pudahuel (PU), Cerrillos (CE) e Quinta Normal (QN) pertencentes à da Direção Meteorológica de Chile. Fonte: Google Earth. 34

Figura 2.6: Sistemas frontais, característicos do regime de inverno, que afetaram a região central do Chile nos dias a) 20 de maio, b) 22 de junho, e c) 19 de julho de 2004. Imagens do satélite GOES-12 no canal infravermelho das 00 UTC. ..... 35

Figura 2.7:Imagens do satélite GOES-12 do canal infravermelho mostrando a) uma baixa costeira de pouca intensidade localizada ao norte dos 30ºS, b) a interação do anticiclone subtropical do Pacífico Sul com uma frente e a formação de estratos próximos da costa centro-norte de Chile, c) o regime anticiclônico sobre grande parte do Chile central e norte, e d) uma baixa localizada no litoral próximo a Santiago. Datas e horários das imagens nas figuras. ..... 36

Figura 2.8: Localização das estações Faro Panul (FA), Valparaíso (VA) e Viña del Mar (VI) da Armada do Chile na região de Valparaíso. Fonte: Google Earth. ..... 38

Figura 2.9: Comportamento da temperatura do ar ao longo do ano de 2004 para as estações de a) Viña del Mar e b) Faro Panul. Valores registrados a cada três horas. ..... 39

Figura 2.10: Média móvel de 7 dias da temperatura do ar, calculada para as estações a) Viña del Mar e b) Faro Panul na Região de Valparaíso ..... 40

Figura 2.11: Temperatura média horária (em ºC) nas estações de Viña del Mar (VI) e Faro Panul (FA) da Armada do Chile para os meses de a) janeiro, b) fevereiro, c) março, d) abril, e) maio, f) junho, g) julho, h) agosto, i) setembro, j) outubro, k) novembro, e l) dezembro do ano de 2004. Barras indicam o desvio padrão. ..... 41

Figura 2.12: Média móvel de 7 dias da direção do vento em graus calculada para as estações a) Viña del Mar, b) Valparaíso e c) Faro Panul na Região de Valparaíso ..... 43

Figura 2.13: Média móvel de 7 dias da intensidade do vento em $ms^{-1}$ calculada para as estações a) Viña del Mar, b) Valparaíso e c) Faro Panul na Região de Valparaíso ..... 44

Figura 2.14: Intensidade do vento em $ms^{-1}$ cada 3 horas para o ano de 2004 registrado nas estações de a) Viña del Mar, b) Valparaíso e c) Faro Panul na Região de Valparaíso. ... 44

Figura 2.15: Direção média horária do vento nas estações de Viña del Mar (VI), Faro Panul (FA) e Valparaíso (VA) da Armada do Chile para os meses de a) janeiro, b) fevereiro, c) março, d) abril, e) maio, f) junho, g) julho, h) agosto, i) setembro, j) outubro, k) novembro, e l) dezembro do ano de 2004. ..... 45

Figura 2.16: Intensidade média horária do vento nas estações de Viña del Mar (VI), Faro Panul (FA) e Valparaíso (VA) da Armada do Chile para os meses de a) janeiro, b) fevereiro, c) março, d) abril, e) maio, f) junho, g) julho, h) agosto, i) setembro, j) outubro, k) novembro, e l) dezembro do ano de 2004. Barras indicam o desvio padrão dos dados para cada horário. ..... 47

Figura 2.17: Localização das estações do CENMA na região metropolitana de Santiago e periferia. Fonte: Google Earth. ..... 50

Figura 2.18: Comportamento da temperatura do ar ao longo do ano de 2004 para as estações de a) Entel, b) El Paico, c) La Platina, d) El Manzano e, e) La Reina. Valores horários registrados em horário local. ..... 51

Figura 2.19: Média móvel de 7 dias da temperatura do ar calculada para as estações CENMA de a) Entel, b) El Paico, c) La Platina, d) El Manzano e, e) La Reina na região metropolitana de Santiago. ..... 52

Figura 2.20**:** Temperatura média horária nas estações do CENMA El Paico (PA), La Platina (PL), Entel (EN), La Reina (RE) e El Manzano (MA) para os meses de a) janeiro, b) fevereiro, c) março, d) abril, e) maio, f) junho, g) julho, h) agosto, i) setembro, j) outubro, k) novembro, e l) dezembro do ano de 2004. ..... 53

Figura 2.21: Desvio padrão para cada horário nas estações do CENMA El Paico (PA), La Platina (PL), Entel (EN), La Reina (RE) e El Manzano (MA) para os meses de a) janeiro, b) fevereiro, c) março, d) abril, e) maio, f) junho, g) julho, h) agosto, i) setembro, j) outubro, k) novembro, e l) dezembro do ano de 2004. ..... 56

Figura 2.22: Intensidade da ilha de calor urbana na região metropolitana de Santiago para o ano de 2004. Escala de tempo em hora local. ..... 58

Figura 2.23: Intensidade da ilha de calor urbana em Santiago do Chile para a) verão e b) inverno. Escala de tempo em hora local. ..... 59

Figura 2.24: Diferença de temperatura entre a) o tipo urbano 1 e o tipo urbano 2, entre b) o tipo urbano 1 e a região não urbana, e c) o tipo urbano 2 e a região não urbana para o ano de 2004. Escala de tempo em hora local. ..... 60

Figura 2.25: Diferença de temperatura entre a) o tipo urbano 1 e o tipo urbano 2, entre b) o tipo urbano 1 e a região não urbana, e c) o tipo urbano 2 e a região não urbana para o período de verão. Escala de tempo em hora local. ..... 61

Figura 2.26: Diferença de temperatura entre a) o tipo urbano 1 e o tipo urbano 2, entre b) o tipo urbano 1 e a região não urbana, e c) o tipo urbano 2 e a região não urbana para o período de inverno. Escala de tempo em hora local. ..... 62

Figura 2.27: Localização das estações da rede de monitoramento da qualidade do ar (MACAM-II) na Região Metropolitana de Santiago. Adaptada de Centro Mario Molina Chile, 2007. ..... 63

Figura 2.28: Número de horas por dia em que o padrão chileno para o $MP_{10}$ foi ultrapassado em pelo menos uma das estações de monitoramento da rede MACAM-II durante o ano de 2004. A linha vermelha indica o limiar de 8 horas $dia^{-1}$, equivalente a duas vezes a média anual de horas de ultrapassagem do padrão. ..... 63

Figura 2.29: Concentração de $MP_{10}$ horária para o mês de maio de 2004 para as estações de a) Pudahuel (PU) e Cerrillos (CE), na zona oeste, b) Independencia (IN), Santiago (SA) e El Bosque (BO), na zona central, e c) Las Condes (CO) e La Florida (FL), na zona leste da Região Metropolitana de Santiago. ..... 65

Figura 2.30: Concentração de $MP_{10}$ horária para o mês de junho de 2004 para as estações de a) Pudahuel (PU) e Cerrillos (CE), na zona oeste, b) Independencia (IN), Santiago (SA) e El Bosque (BO), na zona central, e c) Las Condes (CO) e La Florida (FL), na zona leste da Região Metropolitana de Santiago. ..... 65

Figura 2.31: Concentração de $MP_{10}$ horária para o mês de julho de 2004 para as estações de a) Pudahuel (PU) e Cerrillos (CE), na zona oeste, b) Independencia (IN), Santiago (SA) e El Bosque (BO), na zona central, e c) Las Condes (CO) e La Florida (FL), na zona leste da Região Metropolitana de Santiago. ..... 66

Figura 2.32: Intensidade do vento horário para o mês de maio de 2004 para as estações de a) El Paico (PA), b) Entel (EN), La Platina (PL) e La Reina (RE), e c) El Manzano (MA), na Grande Santiago e arredores. ..... 67

Figura 2.33: Intensidade do vento horário para o mês de junho de 2004 para as estações de a) El Paico (PA), b) Entel (EN), La Platina (PL) e La Reina (RE), e c) El Manzano (MA), na Região Metropolitana de Santiago e arredores. ..... 67

Figura 2.34: Intensidade do vento horário para o mês de julho de 2004 para as estações de a) El Paico (PA), b) Entel (EN), La Platina (PL) e La Reina (RE), e c) El Manzano (MA), na Região Metropolitana de Santiago e arredores. ..... 68

Figura 2.35: Diferença de intensidade do vento entre (a) o tipo urbano 1 e o tipo urbano 2, entre (b) o tipo urbano 1 e a região não urbana, e (c) o tipo urbano 2 e a região não urbana. ..... 69

Figura 3.1: Composição das bandas 2, 3 e 4 do sensor CCD do satélite CBERS-2 mostrando as áreas urbanas da a) Grande Valparaíso e b) Grande Santiago. ..... 71

Figura 3.2: Uso de solo urbano obtido da classificação com o (a) SPRING, com resolução de 500 m, e (b) do arquivo original do USGS, com resolução espacial de 1 km. Em azul indica-se o tipo de solo urbano 2 e em vermelho o tipo de solo urbano 1 (muito urbanizado). ..... 72

Figura 3.3: Tipos de uso de solo urbano a serem utilizados nas simulações com o BRAMS para a região central do Chile. Em azul indica-se o tipo de solo urbano 2 e em vermelho o tipo de solo urbano 1 (muito urbanizado). ..... 73

Figura 3.4: Esquema da transferência de calor e umidade entre os elementos no LEAF-3 e uma célula de grade com dois *patches*, onde A indica a atmosfera, C o ar no dossel, V a vegetação, S indica neve e o solo está indicado pela letra G. Somente um dos *patches* contém neve. As setas indicam os sentidos dos fluxos, a primeira letra do texto que acompanha as setas indica a que está associado o fluxo (transferência de calor [h], transferência de água [w] ou transferência radiativa de onda longa [r]); a segunda e terceira letra indicam a fonte e receptor, respectivamente. Fonte: WALKO et al. (2000). ..... 75

Figura 3.5: Cânion formado por dois prédios considerando 3 camadas para cada elemento. $T_r$, $T_w$ e $T_R$ indicam temperaturas para as camadas da rua, paredes e telhados. $W_r$ e $W_R$ indicam o conteúdo de água na superfície e telhados e $W_{snow\ r}$ e $W_{snow\ R}$ o conteúdo de água na superfície e telhados. $\delta_R$ e $\delta_r$ correspondem as frações de água para os telhados e as ruas, $\delta_{snow\ R}$ e $\delta_{snow\ r}$ ás frações de neve para os telhados e as ruas. $T_{i\ bld}$ é a temperatura interna dos prédios. Adaptada de MASSON (2000). ..... 77

Figura 3.6: Grades utilizadas nas simulações com o modelo BRAMS. G1 corresponde à grade com espaçamento horizontal de 64 km, a grade G2 tem espaçamento de 16 km e a grade G3 tem espaçamento horizontal de 4 km. ..... 79

Figura 3.7: Pressão reduzida ao nível do mar (linhas brancas) em hPa, intensidade do vento em $ms^{-1}$ (escala em cores) e vetor vento em $ms^{-1}$ para o primeiro nível do modelo (33,4 m), para o período entre 00 UTC do 17 de maio e 00 UTC do 19 de maio de 2004. Datas e horários nas figuras correspondentes. ..... 82

Figura 3.8: Diferença de pressão reduzida ao nível do mar (linhas pretas) em Pa, intensidade do vento (escala em cores) em $ms^{-1}$ e vetor vento em $ms^{-1}$ para o primeiro nível do modelo (33,4 m), para o período entre 00 UTC do 17 de maio e 00 UTC do 19 de maio de 2004. Datas e horários nas figuras correspondentes. ..... 84

Figura 3.9: Tipos de solo urbano considerados na simulação com cidades. Em vermelho o tipo urbano 1 (mais urbanizado) e em azul o tipo urbano 2 (menos urbanizado). ..... 85

Figura 3.10: Temperatura do ar em 33,4 m para a simulação com cidades. Círculo e retângulo indica a localização da Grande Santiago e Grande Valparaíso respectivamente. Escala de cores indica valores de temperatura em ºC. Datas e horários nas figuras correspondentes..... 86

Figura 3.11: Umidade relativa (em cinza) e vento horizontal (setas) no nível de 33,4 m para a simulação com cidades. Círculo e retângulo indica a localização da Grande Santiago e Grande Valparaíso respectivamente. A escala em tons de cinza indica valores de umidade relativa em porcentagem. Vento em $ms^{-1}$. Datas e horários nas figuras correspondentes. ..... 88

Figura 3.12: Corte vertical na latitude 33,442ºS para a simulação com cidades. Setas indicam o vetor vento composto por *u* [$ms^{-1}$] e *w* [$10^{-1}$ $ms^{-1}$]. Em cores, a temperatura do ar em ºC. A linha azul nas figuras indica o oceano e, em verde, a localização da Grande Santiago. Datas e horários nas correspondentes figuras. ..... 90

Figura 3.13: Corte vertical na latitude 33,062ºS para a simulação com cidades. Setas indicam o vetor vento composto por *u* [$ms^{-1}$] e *w* [$10^{-1}$ $ms^{-1}$]. Em cores, a temperatura do ar em ºC. A linha azul nas figuras indica o oceano e, em verde, a localização da Grande Valparaíso. Datas e horários nas correspondentes figuras..... 92

Figura 3.14: Campo de divergência do vento horizontal [$10^{-3}$ $s^{-1}$] a 33,4 m acima da superfície na região central do Chile. As linhas vermelhas indicam divergência; linhas azuis indicam convergência. Datas e horários nas correspondentes figuras. ..... 94

Figura 3.15: Intensidade da ilha de calor urbana na região central do Chile. Escala de cores em ºC. Datas e horários nas figuras correspondentes. ..... 95

Figura 3.16: Diferença de intensidade do vento horizontal em 33,4 m na região central do Chile devido à presença de cidades. Escala de cores em $ms^{-1}$. Datas e horários nas figuras correspondentes. ..... 96

Figura 3.17: Diferença de divergência do vento horizontal entre as simulações com cidades e sem cidades em 33,4 m para os horários de máximas diferenças na região central do Chile. Escala de cores em $10^{-4}$ $s^{-1}$. Datas e horários nas figuras correspondentes..... 98

Figura 3.18: Corte vertical na latitude 33,442ºS. Em cores é mostrada a diferença de umidade relativa entre a simulação com cidades e a simulação sem cidades. Escala de cores em porcentagem. Linhas indicam a diferença de *w* em $10^{-2}$ $ms^{-1}$. A linha azul nas figuras indica o oceano e, em verde, a localização da Grande Santiago. Datas e horários correspondentes em cada figura. ..... 99

Figura 3.19: Corte vertical na latitude 33,062ºS. Em cores se mostra a diferença de umidade relativa entre a simulação com cidades e a simulação sem cidades. Escala de cores em porcentagem. Linhas indicam a diferença de *w* em $10^{-2}$ $ms^{-1}$. A linha azul nas figuras indica o oceano e, em verde, a localização da Grande Valparaíso. Datas e horários correspondentes em cada figura. ..... 101

# LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Estações meteorológicas da região de Valparaíso da Armada do Chile utilizadas neste estudo. ..... 37
Tabela 2.2: Estações CENMA da rede de monitoramento meteorológico da CONAMA-RM, Chile, utilizadas neste estudo. ..... 49
Tabela 3.1: Opções disponíveis no BRAMS, utilizadas neste estudo. ..... 80
Tabela 3.2: Valores de alguns parâmetros utilizados dentro do TEB para a simulação com cidades. ..... 81

# LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|---|---|
| ASPS | Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul |
| BATS | Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme |
| BRAMS | Brazilian Regional Atmospheric System |
| CBERS-2 | China-Brazil Earth Resources Satellite - 2 |
| CCD | Câmera Imageadora de Alta Resolução |
| CENMA | Centro Nacional do Meio Ambiente |
| CETESB | Direção de Investigações Científicas e Tecnológicas da Pontifícia Universidade Católica do Chile |
| CONAMA-RM | Comissão Nacional do Meio Ambiente – Região Metropolitana de Santiago |
| CO | Monóxido de Carbono |
| CPTEC | Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos |
| CNPq | Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico |
| DICTUC | Direção de Investigações Científicas e Tecnológicas da Pontifícia Universidade Católica do Chile |
| DPI | Divisão de Processamento de Imagens |
| FDP | Função de Densidade de Probabilidade |
| GFS | Global Forecasting System |
| GS | Grande Santiago |
| GV | Grande Valparaíso |
| HL | Hora Local |
| IC | Ilha de Calor Urbana |
| InIC | Intensidade da Ilha de Calor Urbana |
| INPE | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais |
| LDAS | Land Data Assimilation Systems |

| | |
|---|---|
| LEAF-3 | Land Ecosystem-Atmosphere Feedback model version 3 |
| MACAM-II | Rede de Monitoramento Automática da Qualidade do Ar Metropolitana II |
| $MP_{10}$ | Material Particulado de diâmetro inferior a 10 µm |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| NOx | Óxidos de Nitrogênio |
| RAMS | Regional Atmospheric System |
| RMS | Região Metropolitana de Santiago |
| RMSP | Região Metropolitana de São Paulo |
| RV | Região de Valparaíso |
| SCC | Simulação Com Cidades |
| SIG | Sistema de Informações Geográficas |
| SPRING | Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas |
| SSC | Simulação Sem Cidades |
| TEB | Town Energy Budget |
| USGS | United States Geological Survey |
| UTC | Universal Time Coordinated |

# RESUMO

URBINA GUERRERO, V. V. **Características das circulações locais em regiões metropolitanas do Chile Central. 113** f**.** Dissertação de Mestrado – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

O presente trabalho teve por objetivo caracterizar as circulações locais que se formam na região central do Chile (RCC). Uma análise sinótica para o ano 2004 mostrou que durante o verão a condição de tempo dominante foi de céus claros associados à presença do Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul com o deslocamento de baixas pressões litoral que mudam o regime de ventos. Dados da Armada do Chile mostraram que, no litoral da Região de Valparaíso, a amplitude anual de temperatura é de aproximadamente de 8 ºC. Os extremos de temperatura ocorrem entre as 09 e 12 UTC para as mínimas e 18 e 21 UTC para as máximas. O vento apresenta um ciclo anual com domínio da componente oeste no verão e componente leste no inverno. Maiores intensidades estão associadas à passagem de sistemas frontais no inverno. A brisa marítima é melhor caracterizada nos valores médios horários do vento no período de verão, sendo observada a partir das 12 UTC, com ventos de maior intensidade entre 18 e 21 UTC. A brisa terrestre é observada a partir das 00 UTC com ventos de menor intensidade que na brisa marítima. Dados da CONAMA-RM mostraram um ciclo diurno de temperatura bem definido na Região Metropolitana de Santiago com as temperaturas mínimas ocorrendo entre 06 e 09 HL e valores máximos entre 14 e 16 HL. Ao agrupar as estações localizadas dentro e fora dos limites urbanos foi possível identificar o efeito da ilha de calor (IC). Para o período de verão a IC apresentou intensidades positivas e no inverno uma maior freqüência de valores negativos. A intensidade do vento sofre também os efeitos da cidade, observando-se uma redução desta nas estações que se localizam no centro da Grande Santiago. Valores mínimos de intensidade do vento por períodos prolongados levaram a um incremento nas concentrações de material particulado. A diminuição nas concentrações está associada à passagem de frentes e ao incremento na intensidade do vento. Os efeitos da cidade na atmosfera foram estudados com mais detalhamento mediante a utilização do BRAMS. A análise sinótica mostrou uma região de vento fraco e baixo gradiente barométrico na região de estudo para a maior parte do período. Foi possível identificar a brisa marítima com maior intensidade do vento entre 18 e 19 UTC. A brisa terrestre foi identificada na maior parte das noites, com intensidade de vento maior próximo das 04 UTC. As cidades localizadas na RCC apresentam a tendência de resfriar o ar próximo da superfície e modificam a intensidade do vento e os padrões de umidade relativa. Embora os efeitos das cidades tenham sido encontrados, os efeitos da topografia no escoamento são ainda mais importantes, gerando circulações sobre a região central do Chile que não são completamente modificadas pela presença das cidades.

**Palavras-Chave:** Ilha de Calor Urbana, BRAMS, problemas urbanos, brisa marítima.

# ABSTRACT

URBINA GUERRERO, V. V. **Local Circulation Characteristics over metropolitan areas in Central Chile. 113** pp**.** Master Dissertation – Institute of Astronomy, Geophysics and Atmospheric Sciences, University of São Paulo, São Paulo, 2010.

The objective of this work was to characterize the local circulations that are generated in the Central Chile (CC) region. A synoptic analyze for 2004 show that clear sky weather conditions associated to the Subtropical Anticyclone of South Pacific (SASP) was dominant during the summer. Coastal lows moving from north to CC interacts with SASP changing the wind regime. Meteorological data from Armada do Chile showed that on the coast of Valparaíso, the annual temperature amplitude was approximately 8 ºC. Temperature extremes occur between 09 and 12 UTC for minimum and 18 and 21 UTC for maximum values. The wind showed an annual cycle, with dominant direction to west during summer, while in wintertime, wind dominant direction is to the east. Higher values of wind speed are associated with frontal passages during winter. The sea breeze was better seen in the wind mean hourly values between 12 UTC and 21 UTC with higher wind speeds at 18 UTC. Land breeze was observed around 00 UTC, with lower wind speeds than in the sea breeze case. Meteorological data form CONAMA-RM showed a well defined diurnal cycle of temperature in the Metropolitan Region of Santiago with minimum temperatures occurring between 06 and 09 LT and maximum values between 14 and 16 LT. The urban heat island effect was seen grouping urban and non urban meteorological stations. The urban heat island is, in general, positive during the summer but, during the winter, negative values of intensity are frequent. The wind speed also shows the urban effects, with a wind speed decrease in the meteorological station inside the city. Long periods of low wind speed are associated with an increase in the particulate matter concentrations. The decrease in these concentrations is associated with the passage of frontal systems, as well as wind speed increase. The city effects on the atmosphere were studied in more details through the use of BRAMS. The synoptic analysis showed a weak wind region and low pressure gradient in the study region for most part of the period. The sea breeze was identified with higher wind speeds between 18 and 19 UTC. The land breeze was identified in the most part of the nights, with higher wind speeds near 04 UTC. The cities situated in CC have a tendency to cool down the air near to the surface and modify the wind speed and relative humidity patterns. Although the effects of the cities have been found, the topography effects on the wind flow are even more important, generating circulations over Central Chile that are not completely modified by the presence of the cities.

**Key-words**: Urban Heat Island, BRAMS, Urban Issues, Sea Breeze.

# RESUMEN

URBINA GUERRERO, V. V. **Características de las circulaciones locales en regiones metropolitanas de Chile Central. 113** pp**.** Disertación de Magister – Instituto de Astronomia, Geofísica y Ciencias Atmosféricas, Universidad de São Paulo, São Paulo, 2010.

El presente trabajo tuvo por objetivo caracterizar las circulaciones locales que se forman en la región central de Chile (RCC). Un análisis sinóptico para el año 2004 mostró que durante el verano la condición de tiempo dominante de cielos claros asociados a la presencia del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur y el avance de bajas presiones por la costa que cambiaban el régimen de vientos. Datos de la Armada de Chile mostraron que, en el litoral de la región de Valparaíso, la amplitud anual es de aproximadamente 8 °C. Los extremos de temperatura acontecen entre las 09 y 12 UTC para las mínimas, y entre las 18 e 21 UTC para las máximas. El viento presentó un ciclo anual con dominio de la componente oeste en verano e componente este en invierno. La brisa marítima es mejor caracterizada en los valores medios horarios de viento en el periodo de verano, siendo observada a partir de las 12 UTC, con vientos de mayor intensidad entre las 18 y 21 UTC. La brisa terrestre es observada a partir de las 00 UTC con vientos de menor intensidad que la brisa marítima. Datos de la CONAMA-RM mostraron un ciclo diurno de temperatura bien definido en la Región Metropolitana de Santiago con temperaturas mínimas produciéndose entre las 06 y 09 HL y valores máximos entre las 14 y 16 HL. Al agrupar las estaciones localizadas dentro y fuera de los límites urbanos fue posible identificar el efecto de isla de calor (IC). Para el periodo de verano la IC presentó intensidades positivas y en el invierno una mayor frecuencia de valores negativos. La intensidad de viento también sufre los efectos de la cuidad, observándose una reducción de ésta en las estaciones que se localizan en el centro del Gran Santiago. Valores mínimos de intensidad de viento por periodos prolongados llevaron a un aumento en las concentraciones de material particulado. La disminución en las concentraciones está asociada al paso de frentes y al aumento de la intensidad del viento. Los efectos de la ciudad en la atmósfera fueron estudiados con más detalle mediante la utilización del BRAMS. El análisis sinóptico mostró una región de viento débil y bajo gradiente barométrico en la región de estudio para la mayor parte del periodo. La brisa marítima fue identificada con mayor intensidad de viento entre las 18 y 19 UTC. La brisa terrestre fue identificada en la mayor parte de las noches, con mayor intensidad de viento cerca de las 04 UTC. Las ciudades localizadas en la RCC presentan tendencia a enfriar el aire próximo de la superficie y modifican la intensidad de viento y los padrones de humedad relativa. Aunque los efectos de las ciudades hayan sido encontrados, los efectos de la topografía en el flujo del viento son todavía más importantes, generando circulaciones sobre la región central de Chile que no son completamente modificadas por la presencia de las ciudades.

**Palabras clave:** Isla de Calor Urbana, BRAMS, problemas urbanos, brisa marítima.

# 1. Introdução

## 1.1 Motivação e objetivos

No continente americano é possível encontrar cidades que, pelas suas características, como por exemplo, a quantidade de pessoas e o tipo de urbanização, influenciam de maneira significativa nas condições meteorológicas locais. Além disso, o rápido crescimento das cidades tem produzido mudanças significativas nas características do clima local, passando rapidamente do clima rural para o clima urbano (ROMERO et al., 1999). Este é o caso de Santiago, no Chile, cidade que apresenta elevados níveis de poluição (Figura 1.1) que afetam a população local principalmente nos meses mais frios (entre abril e agosto).

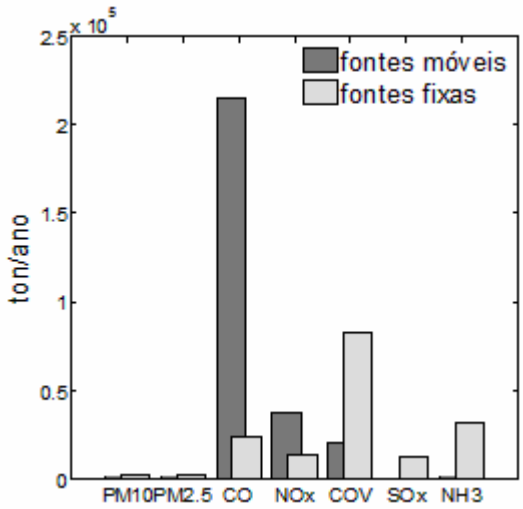


Figura 1.1**:** Quantidade de poluentes em toneladas por ano para a Região Metropolitana de Santiago (2005). Fonte: CONAMA-RM (2007).

Segundo o informe entregue à Comissão Nacional do Meio Ambiente da Região Metropolitana de Santiago (CONAMA-RM) elaborado pela Direção de Investigações Científicas e Tecnológicas da Pontifícia Universidade Católica do Chile (DICTUC) com base no último inventário de emissões (CONAMA, 2007), as principais fontes de CO e NOx são os veículos.

Embora os níveis dos poluentes no ar na cidade de Santiago não sejam tão elevados como em outras grandes cidades, o impacto sobre a saúde das pessoas é significativo. O período mais crítico é, como mencionado anteriormente, o inverno, em que dias com níveis elevados são comuns para toda a temporada. O deslocamento desde o norte de uma baixa pressão pela costa (baixa costeira; RUTLLANT, 1994), após da passagem de uma frente na sua fase de dissipação, e a formação de uma baixa costeira pré-frontal, são dois tipos de condições sinóticas que acontecem neste período e que aumentam a advecção fria e seca de leste, intensificando a inversão de subsidência, fazendo que a base fique mais próxima da superfície (RUTLLANT & GARREAUD, 1995), diminuindo a extensão da camada de mistura e, conseqüentemente, incrementando a concentração dos poluentes (RUTLLANT & SALINAS, 1982).

Devido à sua topografia (Figura 1.2), a Grande Santiago (GS) vê-se afetada de grande forma pelas mudanças no escoamento do ar. Circulações do tipo vale/montanha, circulações associadas à ilha de calor e circulações de brisa marítima modificam as características do ar sobre a cidade. Por isto, variações neste tipo de circulações (mudanças na intensidade e direção do vento) podem favorecer ou piorar a qualidade do ar na GS.

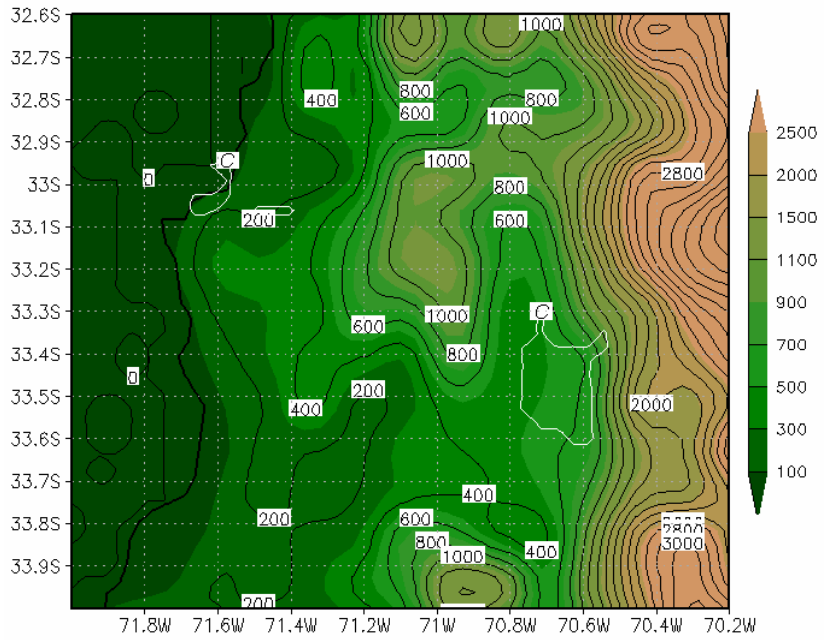


Figura 1.2: Topografia da região central do Chile. O contorno *C* indica a localização dos centros urbanos da Grande Valparaíso (setor litoral) e da Grande Santiago (setor interior). Escala de cores e contornos de altura em metros.

Sendo assim, o principal interesse deste trabalho é estudar as circulações locais que se formam pelas diferenças térmicas entre superfícies de diferentes características, tais como a brisa marítima (ou terrestre, segundo o sentido da mesma) que afetam as áreas metropolitanas associadas às cidades de Valparaíso e Santiago, além de estudar os impactos causados pela presença destes centros urbanos na atmosfera da região central do Chile.

Para um melhor entendimento das circulações locais induzidas termicamente, nas seções a seguir, serão explicados os diversos tipos circulações que se formam na região central do Chile além de caracterizar a região de estudo.

## 1.2 A ilha de Calor Urbana

A ilha de calor urbana (IC) está associada a grandes centros urbanos, como é o caso de Santiago, e recebe esse nome devido à forma que tomam as isotermas de temperatura próximas à superfície, similares os contornos topográficos de uma ilha no meio do mar, onde a cidade fica circundada por regiões de menor temperatura. A IC é mais evidente durante o

período noturno (PIELKE & SEGAL, 1986) e os contrastes térmicos entre as cidades e áreas rurais podem ser superiores a 10 ºC.

O desenvolvimento de uma ilha de calor urbana é devido a processos como, por exemplo, a alteração no uso do solo, que por sua vez, modifica o balanço energético da atmosfera. As atividades humanas, tais como o transporte e a indústria, também geram energia que contribui para o aquecimento urbano (GARCÍA-CUETO et al., 2007). A IC é mais provável quando os ventos de escala sinótica são fracos. Isto pode levar ao desenvolvimento de uma circulação convectiva em grandes centros urbanos e a acumulação de poluentes, fazendo que as concentrações sejam maiores quando comparadas com aquelas das áreas rurais (FREITAS, 2003). No caso das áreas urbanas próximas ao mar ou localizadas em terrenos irregulares, além da circulação associada à IC, existe uma forte influência das brisas marítimas/terrestres e de vale/montanha (PIELKE & SEGAL, 1986).

A intensidade da ilha de calor urbana (InIC) é definida através da diferença de temperatura entre regiões urbanas e rurais (OKE, 1995). Esta diferença nas temperaturas dá-se pelas diversas propriedades de cada tipo de superfície, tais como o albedo das mesmas ou o calor antropogênico liberado. Na Figura 1.3 é possível visualizar a variação que sofre a temperatura ao longo das regiões urbanas e rurais.

Devido ao fato de que a InIC é altamente dependente das dimensões das cidades, em alguns casos de cidades pequenas o efeito da IC pode ser imperceptível. Isto ocorre em virtude da rápida mistura do ar sobre a cidade com o ar das regiões vizinhas (FREITAS & SILVA DIAS, 2005).

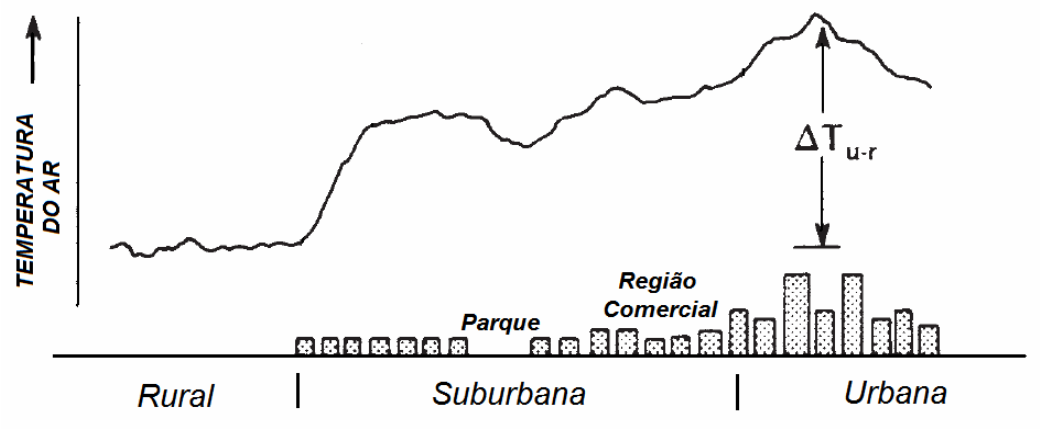


Figura 1.3: Variação da temperatura para diversos pontos nas regiões rurais, suburbana e urbana. $\Delta T_{u-r}$ representa a diferença entre a temperatura na região mais urbanizada e a região rural. Adaptada de Oke (1987).

As características da InIC variam sob diversas condições de tempo. No trabalho de Montálvez et al. (2000) é possível observar que, durante condições de tempo sem nuvens e vento fraco, as diferenças entre a temperatura da cidade e vizinhanças se intensificam no período noturno. Contudo, no período diurno, pode acontecer o fenômeno inverso, encontrando-se intensidades negativas da ilha de calor. Sob outras condições de tempo, a cidade apresenta sempre valores maiores de temperatura quando comparada com áreas não urbanas, tendo maiores valores de InIC no período diurno. Um estudo similar para a cidade de Melbourne (Austrália) feito por Morris & Simmonds (2000) mostrou que podem ser observadas InIC variando entre -3.16 ºC e 6 ºC. Sang et al. (2000) encontrou que, no período de inverno para a cidade chinesa de Shenyang, se forma uma ilha fria durante o dia, cuja intensidade pode atingir valores de -3,8 ºC, e que esta é produto do efeito atenuador dos aerossóis presentes na atmosfera urbana sobre a radiação solar.

Aceituno & Ulriksen (1981) analizaram os efeitos da IC em Santiago e observaram que em dias de céu claro e vento fraco, a difereça de temperatura entre a região suburbana e o centro quente de Santiago era de 4ºC durante a noite.

Sarricolea et al. (2008) encontrou que, para a cidade de Rancagua, localizada aproximadamente 78 km ao sul de Santiago do Chile, a IC se apresenta com maiores

intensidades durante a primavera e o verão. A magnitude de InIC encontrada para esta cidade varia entre 5,4 ºC (verão) e 3,2 ºC (inverno).

Freitas (2003), mediante simulação numérica, encontrou que, durante o período de inverno, a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) pode atingir diferenças de temperatura superiores a 4,5 ºC, as quais são mais intensas no período noturno.

### 1.3 A Brisa Marítima/Terrestre

Brisas marítimas são geradas pelo aquecimento diferencial entre o continente e o oceano (OLIVEIRA & SILVA DIAS, 1982), ocasionando durante o dia um movimento de ar em direção ao continente. Durante a noite, devido ao maior resfriamento radiativo do continente, o sentido da brisa se inverte, gerando a brisa terrestre (Figura 1.4).

Em São Paulo, Oliveira & Silva Dias (1982) caracterizaram a penetração da brisa marítima. A brisa marítima padrão, isto é, com uma condição dominante de ventos do NE fracos que começam a se intensificar durante o decorrer da manhã e logo após viram para ventos de SE durante o período da tarde e intensificam-se até o final do dia, tem como condição sinótica favorável à inexistência de qualquer perturbação pré ou pós-frontal. Outro padrão encontrado é para o caso da brisa marítima em condições sinóticas de vento do NW (contrária à propagação do fluxo vindo do mar). Esta se caracteriza por uma breve rotação na direção do vento para SE no período da tarde e pelas mudanças bruscas na temperatura e umidade do ar, pois a condição de vento de NW em São Paulo está associada a uma condição pré-frontal, onde o ar que se desloca desde o interior do continente é mais seco e quente em relação ao ar marinho. A brisa marítima com intensificação do vento de SE se desenvolve associada a uma alta pressão pós-frontal. São aspectos característicos da penetração da brisa marítima a intensificação do vento na direção antes mencionada, um aumento na umidade do ar e uma ligeira queda ou manutenção da temperatura. Outro resultado importante encontrado neste trabalho é referente ao horário de entrada da brisa marítima em São Paulo: na maioria

dos casos estudados, a entrada acontecia entre as 13HL (Hora Local) e 14HL. Jorgetti et al. (2002) encontraram que o período de entrada da brisa marítima pode variar entre as 13HL e 17HL ao longo do ano para a cidade de São Paulo.

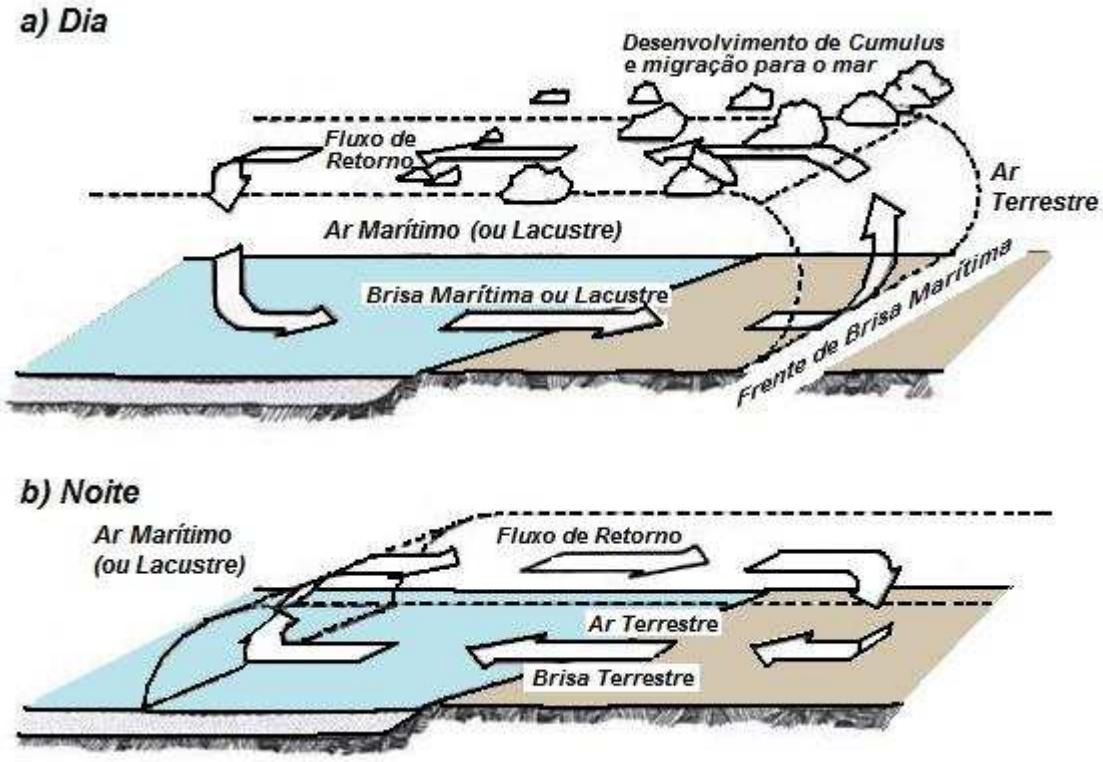


Figura 1.4: Circulação de brisa marítima (ou lacustre) através da linha de costa a) durante o dia e b) no período noturno. Adaptada de Oke (1987).

Freitas (2003) encontrou que a brisa tem também uma menor propagação quando se forma num regime de ventos de NE e que a brisa terrestre atinge maior distância na sua propagação no oceano, quando comparado aos casos de ventos de outra direção. Com ventos de SE a brisa marítima propaga-se a uma maior velocidade, condição já vista em Oliveira & Silva Dias (1982). Embora a brisa tenha uma propagação mais rápida no continente, esta não apresenta maior intensidade de vento quando comparada com a que se gerou no regime de vento NE. A brisa terrestre que se produz na presença de uma alta pressão é muito fraca. Isto levou a conclusão de que a posição de uma alta pressão frente às costas de São Paulo é determinante

na intensificação/desintensificação e na propagação das células de brisa (FREITAS, 2003; FREITAS & SILVA DIAS, 2004).

Condições similares são esperadas para a Região Metropolitana de Santiago, dada a topografia similar que existe entre as localizações de São Paulo e Santiago. A direção dos ventos seria um provável diferencial, já que as configurações sinóticas, como será tratado na sessão 2.1, fazem que o vento dominante seja de sudoeste no período de verão.

A brisa marítima pode interagir com a circulação associada à IC (OHASHI & KIDA, 2002; YOSHIKADO, 1992) nas cidades próximas da costa, assim como nas mais distantes, alterando não padrão de propagação da frente de brisa (FREITAS et al., 2007; KHAN & SIMPSON, 2001; PIELKE & SEGAL, 1986). Dependendo da situação sinótica, a frente de brisa pode permanecer sobre a cidade devido aos efeitos da IC (FREITAS, et al., 2007; YOSHIKADO, 1994), sendo de grande importância em relação à dispersão de poluentes nas áreas costeiras e no desenvolvimento de nuvens convectivas no interior (ATKINSON, 1981).

FREITAS (2003) e FREITAS et al. (2007) encontraram também que a propagação da brisa marítima pode ser intensificada pelo efeito das áreas urbanas.

### 1.4 Circulações Vale/Montanha

Similar ao que acontece com as circulações de brisa marítima, este tipo de circulação se desenvolve melhor em condições anticiclônicas com ventos fracos (OKE, 1987). As características do escoamento estão associadas à morfologia (orientação e geometria) do vale.

Para a geração deste tipo de circulação são necessárias pequenas diferenças entre a temperatura da superfície inclinada e o ar acima. O resfriamento ou aquecimento perto desta superfície cria uma força que desloca o ar horizontal e verticalmente. Dependendo do tamanho relativo destas componentes, as parcelas de ar vão se mover paralelas à superfície inclinada ou afastando-se desta (Figura 1.5).

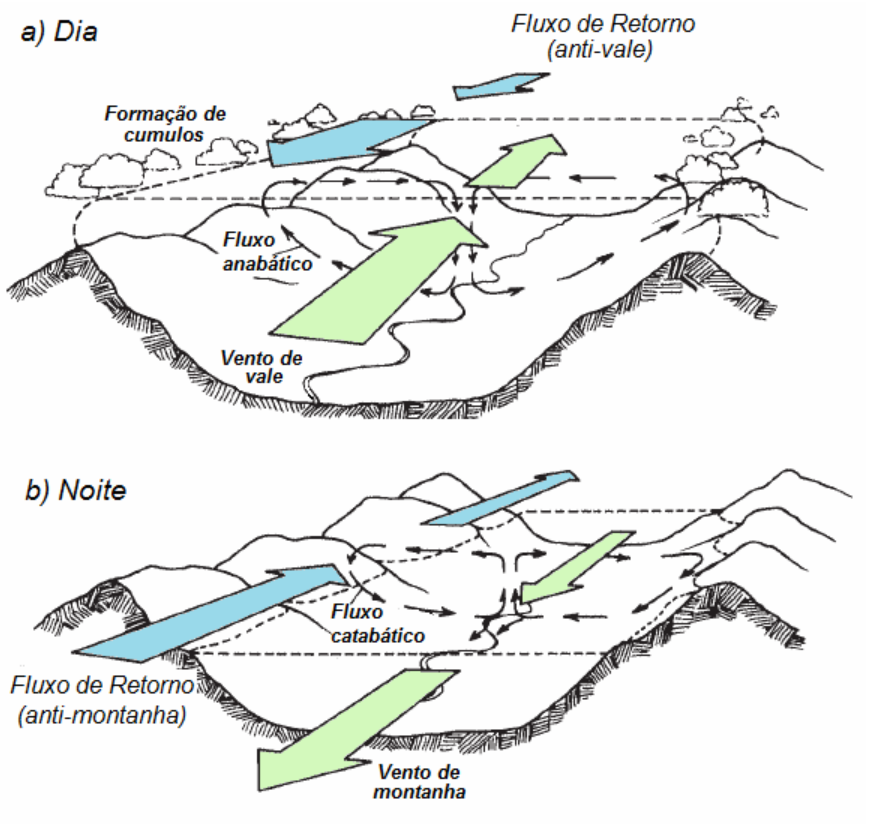


Figura 1.5: Sistema de ventos vale/montanha para um vale orientado na direção norte-sul para o a) dia e b) noite. Durante o dia os ventos na encosta são anabáticos gerando uma célula que diverge no centro do vale. À noite, o fluxo se inverte, gerando convergência no centro do vale. Adaptada de Oke (1987).

Dada a proximidade de algumas cordilheiras com o mar (como no caso do Chile), interações entre este tipo de circulação com brisas marítimas podem ser observadas assim como em outros lugares do mundo. Freitas (2003) mostrou, mediante estudo numérico para a RMSP, que a topografia intensifica as circulações de brisa marítima e terrestre devido à superposição com circulações vale/montanha. Além disto, o deslocamento é mais rápido à medida que a topografia se faz mais acentuada.

Na Região Metropolitana de Santiago (RMS), o fluxo de ar com origem na Cordilheira dos Andes é conhecido localmente como *Raco*, e foi estudado por Rutllant & Garreaud (2004). Em 80% dos episódios em que este vento acontece é observada a presença de uma alta pressão fria que cruza pelo sul do Chile. Os restantes 20% estão associados a passagem de

uma baixa pressão próxima à costa do Chile central. Fluxos descendentes de ar com pouca umidade tendem a destruir a inversão de temperatura associada ao resfriamento radiativo da superfície. Mas isto não acontece neste caso, já que o vento encosta abaixo não é suficientemente forte para conseguí-lo. O anterior leva a uma maior estabilidade atmosférica, que dificulta o desenvolvimento da camada de mistura, que pode provocar acúmulo de poluição e neblina nos vales (ATKINSON, 1981), que por sua vez leva a diminuir a qualidade do ar e reduzir a visibilidade pelo *smog*[1] presente sobre a cidade de Santiago.

Ihl (1998), em seu estudo sobre o problema do smog no verão em Santiago, encontrou que quando o regime sinótico dominante é anticiclônico, aparecem ventos de vale e montanha, brisas devido ao efeito da IC, e que durante a noite, fluxos de ar frio provenientes da cordilheira convergem na cidade, resultados similares aos encontrado por ACEITUNO & ULRIKSEN (1981).

### 1.5 Caracterização das Regiões de Valparaíso e Metropolitana de Santiago

As Regiões de Valparaíso (RV) e Metropolitana de Santiago (RMS) estão localizadas na região central do Chile (Figura 1.6). A topografia característica da região central do Chile (ver Figura 1.2) deixa às cidades que formam parte da Grande Santiago (GS) localizadas num vale formado entre as Cordilheiras da Costa e dos Andes a aproximadamente 500 m acima do nível do mar. As alturas máximas encontradas na Cordilheira da Costa na região central do Chile são maiores que 2000 m, enquanto que na Cordilheira dos Andes os valores encontrados são próximos dos 5000 m. As cidades que formam parte da Grande Valparaíso (GV) localizam-se no setor mais próximo do litoral, no lado oeste da cordilheira da Costa (INE, 2005).

[1] Termo formado pela conjunção de duas palavras inglesas, smoke (fumaça) e fog (nevoeiro).

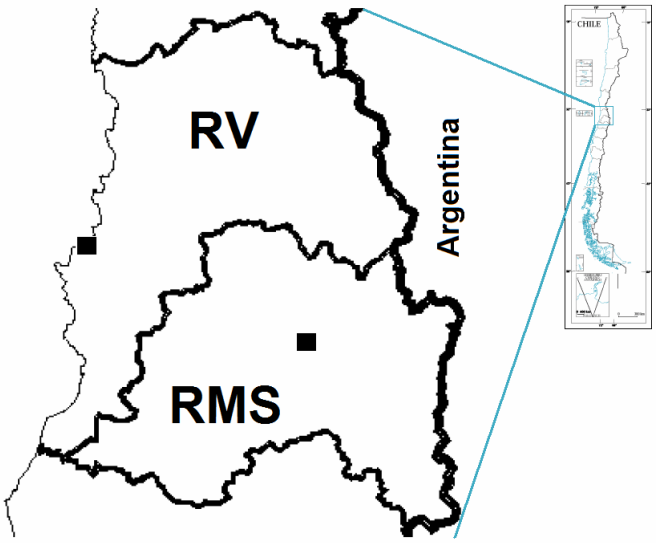


Figura 1.6: Mapa das Regiões de Valparaíso (RV) e Metropolitana de Santiago (RMS) localizadas na região central do Chile. O quadrado preto indica a localização das cidades de Valparaíso (na RV) e Santiago (na RMS). Adaptada de INE 2005.

Figura 1.7: Localização das estações de Quintero (QT), Valparaíso (VA) e Quinta Normal (QN) na Região Central do Chile. Fonte: Google Earth.

Na Figura 1.8 são mostrados valores médios mensais[2] de temperatura e precipitação para três estações (Figura 1.7) localizadas no Chile Central. A precipitação (Figura 1.8.a) na região central do Chile se concentra entre os meses de maio a agosto coincidente com o período de menor temperatura registrada (inverno). A pluviometria no vale da região central é menor quando comparada com os valores registrados no litoral. As temperaturas registradas na cidade de Santiago apresentam maiores amplitudes quando comparadas às temperaturas que se registram nas estações mais próximas do litoral evidenciando o efeito atenuador do oceano sobre a temperatura do ar. Os valores de temperatura no vale interior do Chile Central, ultrapassam em 5 ºC as temperaturas no litoral nos meses mais quentes. No inverno, as temperaturas registradas no vale são inferiores em pelo menos 2 ºC. A amplitude térmica anual na costa está próxima dos 6 ºC enquanto que no vale atinge os 13 ºC.

A população na Grande Santiago é de aproximadamente seis milhões e está concentrada numa área aproximada de 500 $km^2$ sendo o maior centro urbano do país. A Grande Valparaíso, segundo centro urbano em importância a nível nacional, concentra numa área urbana aproximada de 150 $km^2$ aproximadamente 1,5 milhões de habitantes (INE, 2002; INE, 2005).

Dado o grande impacto sobre a saúde das pessoas que moram na RMS, em virtude da grande quantidade de poluentes que se geram nas cidades, a maioria dos estudos nesta região se concentra na dispersão dos poluentes no vale.

A brisa marítima transporta para o vale umidade, material particulado e gases vindos do setor industrial, localizado mais ao sudoeste na RMS, para o centro da cidade no periodo da manhã. No periodo da tarde, estes poluentes são deslocados do centro para o setor oeste (ROMERO et al., 1999).

[2] Valores médios mensais para o período entre 1961-1990, disponíveis em http://www.atmosfera.cl (cedidos pela Dirección Meteorológica de Chile).

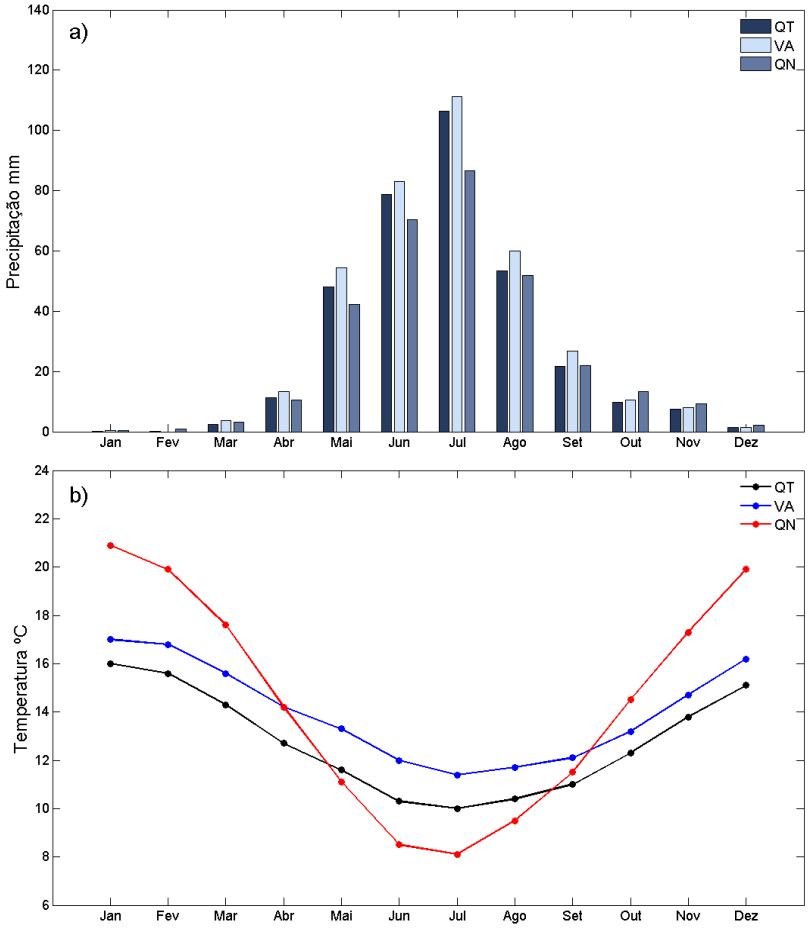


Figura 1.8: Valores médios mensais de a) precipitação acumulada e b) temperatura, para as estações de Quintero (QT), Valparaíso (VA) e Quinta Normal (QN) para o período de 1961 a 1990.

Gramsch et al. (2006) encontraram que durante a tarde na região leste da cidade o vento é de oeste, isto é, do vale para a cordilheira, e que durante a noite acontecia em sentido inverso, sendo possível associar este fenómeno a circulações do tipo brisa marítima/terrestre.

A ventilação no vale de Santiago também vê-se afetada pela passagem de centros de baixa pressão rasos não associados a frentes polares (GARREAUD et al., 2002) pela região central do Chile. Este fenômeno que é conhecido localmente como baixa costeira (GARREAUD & RUTLLANT, 2003) e é caracterizado por ventos de leste que provocam uma estabilização do ar no vale e o conseguinte aumento das concentrações de poluentes (SAIDE, 2008) devido a uma diminuição na altura da base da inversão (RUTLLANT & GARREAUD, 1995).

No caso da região de Valparaíso, o principal problema de poluição está ligado a incendios florestais na estação seca (QUINTANILLA et al., 1998). As altas temperaturas que acontecem no verão, junto com a intensificação do vento associado à brisa marítima, favorecem a sustentação e propagação dos incendios que, devido aos padrões de vento na RV, contribuem com a diminuição da visibilidade e qualidade do ar na GV.

No capítulo 2 será apresentada uma análise observacional realizada para a região de estudo, começando pela escala sinótica até atingir os fenômenos de interesse em mesoescala. No capítulo 3, um estudo numérico é realizado para identificar os impactos que as cidades presentes na região central do Chile causam na atmosfera. Finalmente, no capítulo 4 são apresentadas as conclusões obtidas neste trabalho, além de sugestões para trabalhos futuros.

# 2. Análise observacional

Dentro da análise observacional foi feita uma classificação dos fenômenos meteorológicos que aconteceram durante todo o ano de 2004. Esta classificação teve a finalidade de avaliar posteriormente os efeitos destes sobre as circulações locais que se formam na região central do Chile e mostrar a variabilidade destes fenômenos ao longo do ano. Na seção 2.1 serão apresentados os resultados da análise sinótica feita para o ano de 2004 com imagens dos sensores do satélite geoestacionário GOES-12 nos canais 1 (visível), 3 (vapor de água) e 4 (infravermelho).

Nas seções 2.2 e 2.3 são apresentados os resultados das análises de informações meteorológicas para estações localizadas na região de Valparaíso e Metropolitana de Santiago. Séries de temperatura do ar para o ano de 2004 foram estudadas para verificar o comportamento desta variável ao longo do ano, assim como o comportamento mensal da temperatura média horária para todo o período. Para a região de Valparaíso, intensidade e direção do vento são apresentadas para identificar a brisa marítima. Para a região Metropolitana de Santiago foi estudado o efeito da cidade sobre as temperaturas registradas, comparando os valores obtidos tanto dentro como fora da região urbana. Além disso, a intensidade do vento na Região Metropolitana de Santiago e a concentração de material particulado na Grande Santiago foram analisadas para determinar períodos possíveis para simulação numérica das características da ilha de calor em Santiago do Chile.

## 2.1 Análise sinótica para o ano 2004

Durante o período de verão (especificamente, os meses de janeiro e fevereiro) a condição sinótica dominante na região central do Chile foi a presença de um regime anticiclônico (Figura 2.1), associado ao Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul (ASPS), que impõe um

regime de ventos predominantemente de sudoeste sobre o litoral central do Chile (GARREAUD et al., 2002; GARREAUD & RUTLLANT, 2003; MUÑOZ, 2008). A presença de nebulosidade na costa, do tipo estratocumulos e estratos, é comum durante o período da manhã, às vezes conseguindo se propagar até o vale de Santiago.

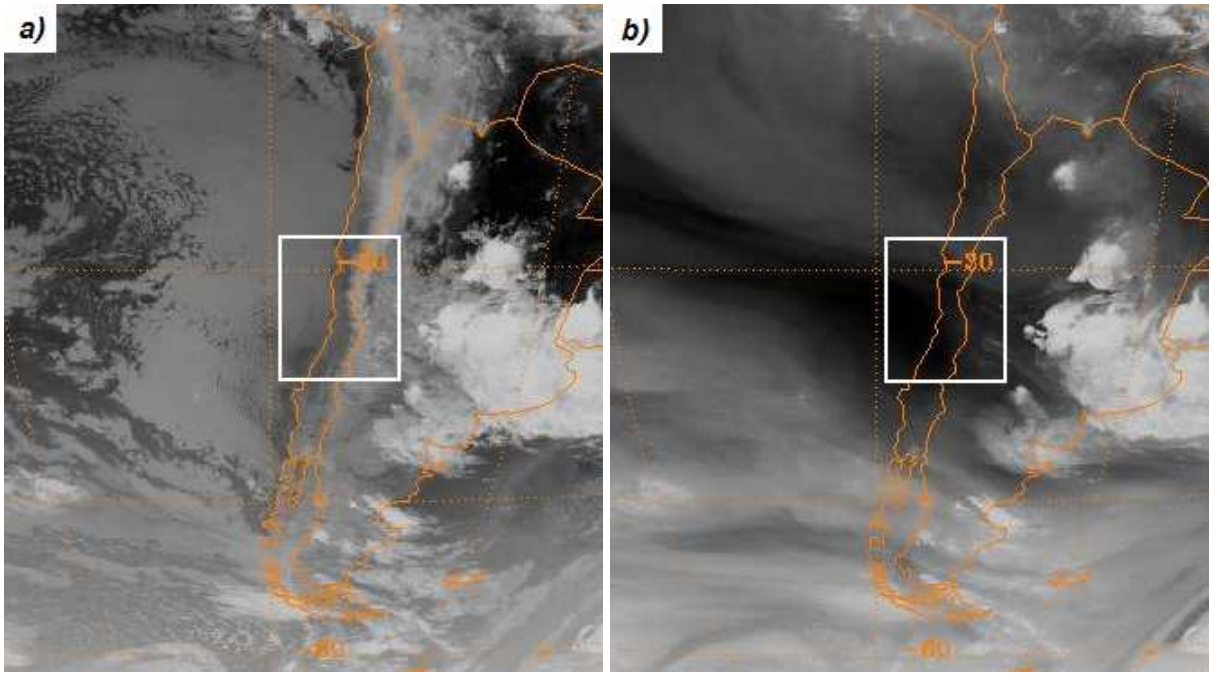


Figura 2.1: Imagens do satélite GOES-12 do dia 31 de janeiro de 2004 para o horário correspondente às 09 UTC para os canais a) infravermelho e b) vapor d'água. Uma abundância de nuvens estratos pode ser observada no setor oceânico associada ao Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul. Sobre a região central do Chile observa-se escasso conteúdo de umidade.

O deslocamento para o sul de alguns ciclones pela costa (baixas costeiras) foi identificado (Figura 2.2). Este tipo de fenômeno forma-se geralmente com a presença de uma cunha de ar quente na média troposfera sobre a região central do Chile e um cavado ao noroeste da Argentina. A propagação destas baixas acontece geralmente após a passagem de uma frente, sendo frequentemente identificadas pelo crescimento da camada limite sobre o oceano, com abundantes estratos e garoa (RUTLLANT, 1994). A interação das baixas que se deslocam do litoral norte chileno para o sul com o ASPS intensifica a advecção de nuvens desde a costa até

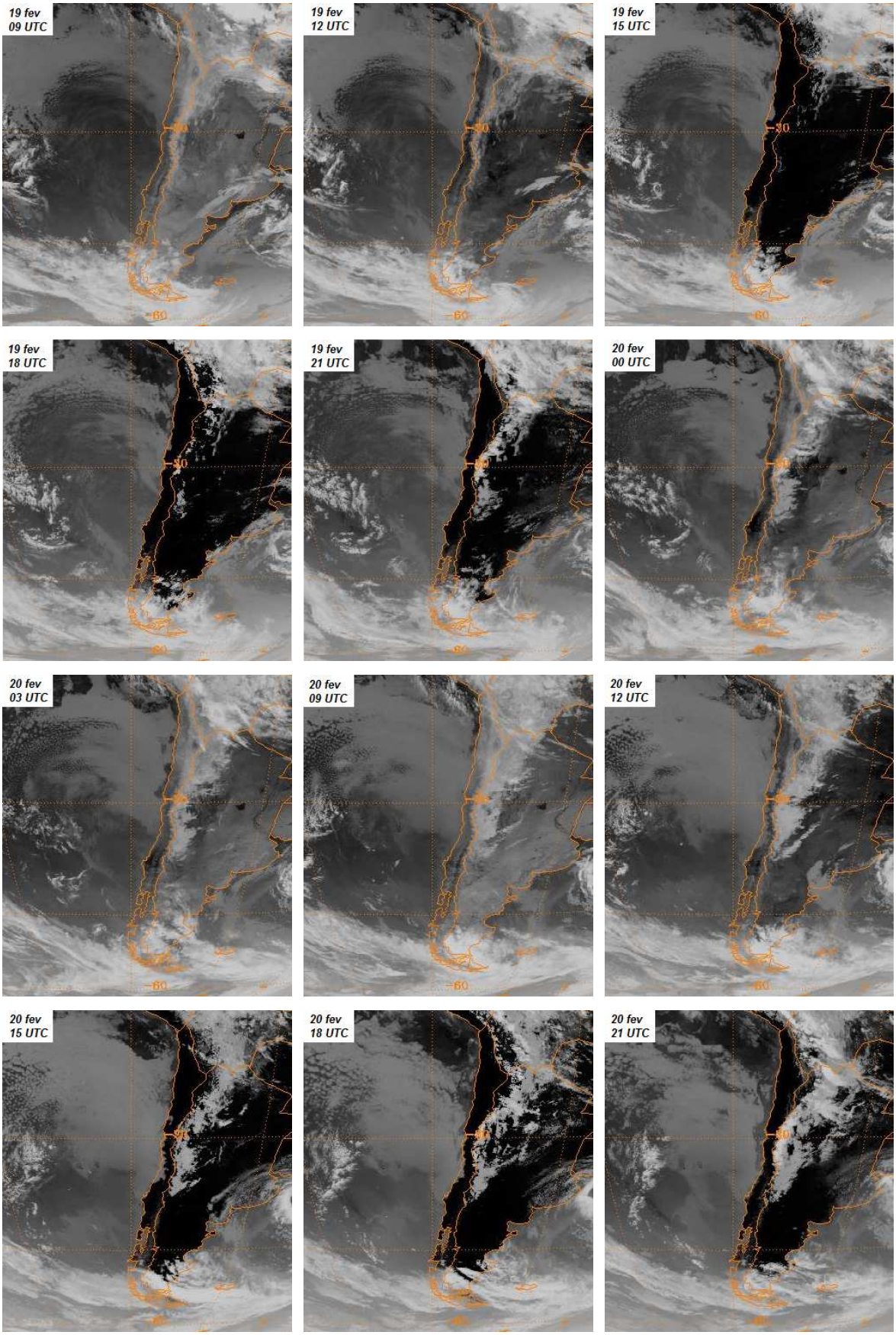


Figura 2.2: Imagens do canal infravermelho do satélite GOES-12 mostrando a evolução de uma baixa costeira que se deslocou para o sul da região central do Chile entre os dias 19 e 20 de fevereiro de 2004. Data e horários são apresentados nas correspondentes figuras.

o interior (Figura 2.3), devido a mudanças na direção do vento, após a passagem destas pela região central do Chile.

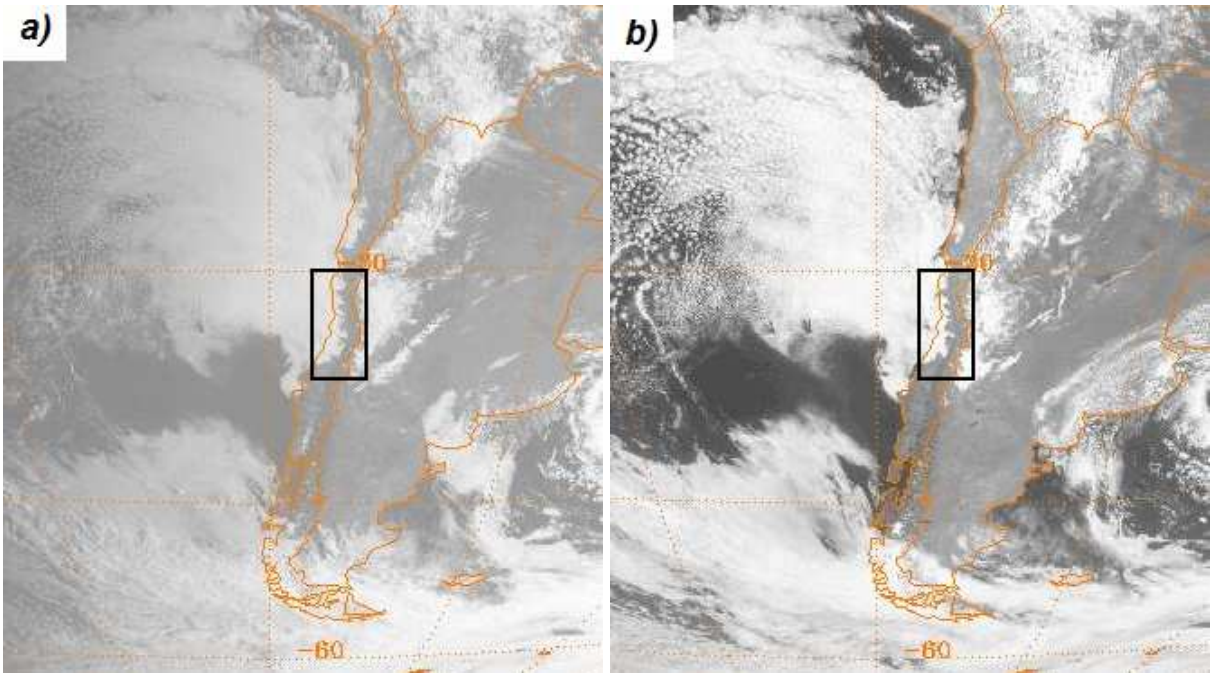


Figura 2.3: Imagens do canal visível do satélite GOES-12 do dia 20 de fevereiro de 2004 das a) 12 UTC e b) 15 UTC. O retângulo mostra a localização dos estratos que penetraram no vale da região central do Chile.

A partir do mês de abril observaram-se as primeiras aproximações de sistemas frontais, incrementando a quantidade de precipitação registrada. A Figura 2.4 mostra os valores de precipitação em 4 estações (Figura 2.5) no Chile central. As frentes, que deixaram abundante nebulosidade sobre a região de estudo, mudam o regime de ventos de SW, associado ao ASPS, para NW devido a seu deslocamento para a região central do Chile. No mês de maio houve um aumento na frequência das passagens frontais. Maior atividade frontal foi observada até o mês de agosto. A Figura 2.6 mostra três sistemas frontais que afetaram a região central do Chile neste período.

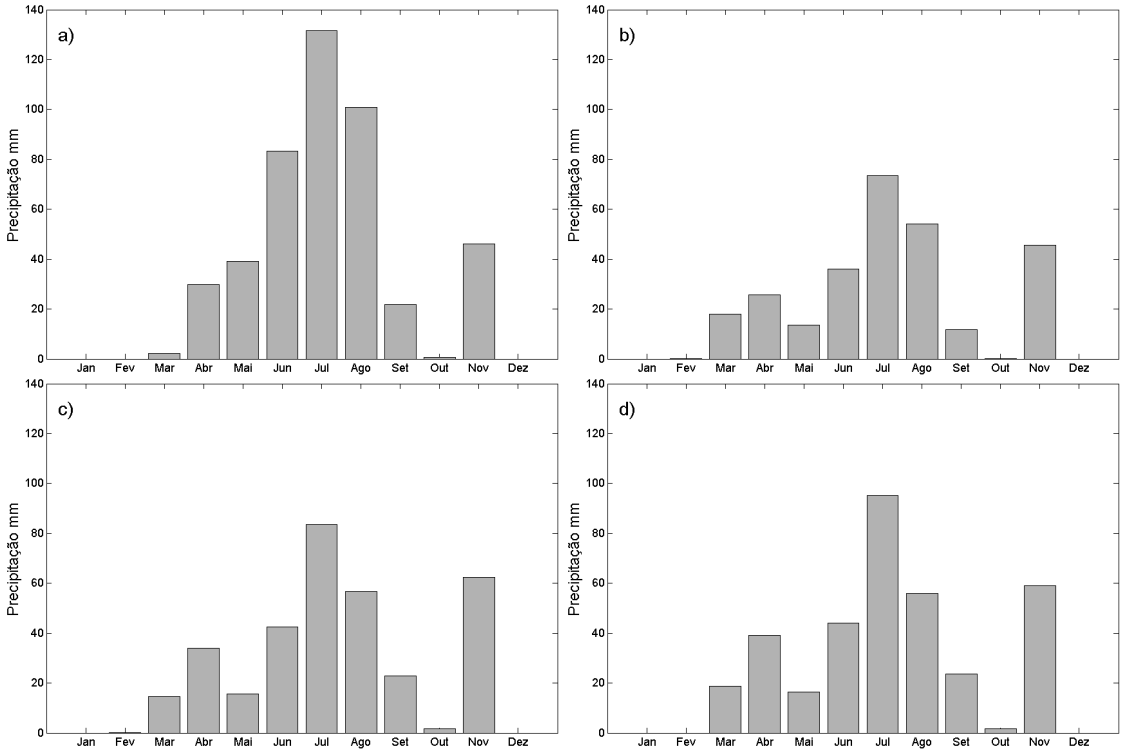


Figura 2.4: Precipitação acumulada mensal para o ano de 2004 nas estações a) Quilpué na Região de Valparaíso, e b) Pudahuel, c) Cerrillos e d) Quinta Normal na Região Metropolitana de Santiago. Fonte: INE (2004).

Figura 2.5: Localização das estações Quilpué (QP), Pudahuel (PU), Cerrillos (CE) e Quinta Normal (QN) pertencentes à da Direção Meteorológica de Chile. Fonte: Google Earth.

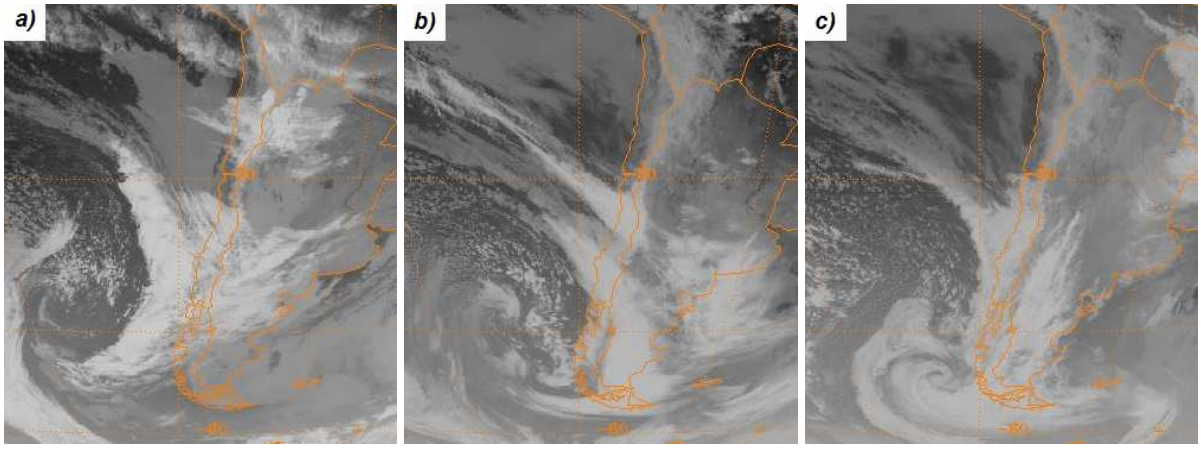


Figura 2.6: Sistemas frontais, característicos do regime de inverno, que afetaram a região central do Chile nos dias a) 20 de maio, b) 22 de junho, e c) 19 de julho de 2004. Imagens do satélite GOES-12 no canal infravermelho das 00 UTC.

A segunda metade de agosto e o mês de setembro foram de transição para a estação de primavera, com reduzida atividade frontal se aproximando da região central do Chile. Observou-se um aumento na frequência de passagens de baixas costeiras com relação ao período de inverno, as quais não conseguiram atingir a região de estudo. Nos últimos meses do ano, o regime característico de verão começa a se estabelecer, com o fortalecimento da circulação anticiclônica em superfície que, por períodos curtos, vê-se debilitada pela passagem das baixas costeiras (Figura 2.7).

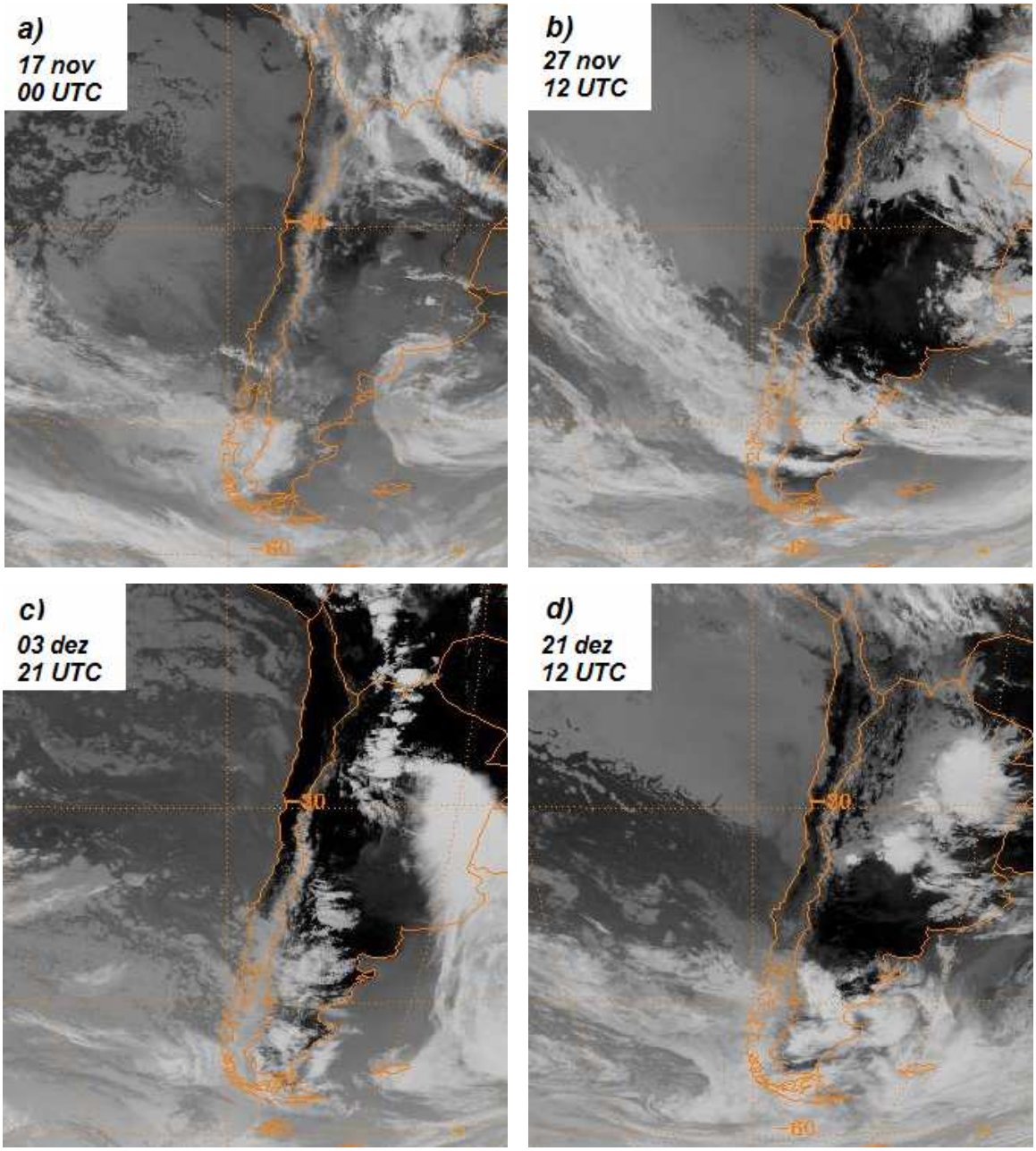


Figura 2.7:Imagens do satélite GOES-12 do canal infravermelho mostrando a) uma baixa costeira de pouca intensidade localizada ao norte dos 30ºS, b) a interação do anticiclone subtropical do Pacífico Sul com uma frente e a formação de estratos próximos da costa centro-norte de Chile, c) o regime anticiclônico sobre grande parte do Chile central e norte, e d) uma baixa localizada no litoral próximo a Santiago. Datas e horários das imagens nas figuras.

## 2.2 Região de Valparaíso

Nesta seção serão analisadas as séries de intensidade e direção do vento, a fim de avaliar o comportamento da brisa marítima na região litorânea do Chile central. O comportamento das séries de temperatura para estações localizadas próximas da costa também serão mostradas.

No litoral central do Chile, tem-se disponível informação meteorológica de três estações da Armada do Chile. A localização destas estações e suas alturas com relação ao nível médio do mar encontram-se na Tabela 2.1. Da estação Valparaíso somente tem-se disponível as informações de intensidade e direção do vento.

Tabela 2.1: Estações meteorológicas da região de Valparaíso da Armada do Chile utilizadas neste estudo.

| ESTAÇÃO | LOCALIZAÇÃO | ALTITUDE (m) |
|---|---|---|
| Viña del Mar (VI) | 71º28’43’’ W – 32º56’59’’ S | 132 |
| Valparaíso (VA) | 71º38’ W – 33º01’ S | 41 |
| Faro Panul (FA) | 71º37’ W – 33º34’ S | 10 |

Na Figura 2.8 é possível observar a localização das estações na RV. Viña Del Mar (VI) e Valparaíso (VA) ficam próximas de regiões mais urbanizadas no litoral central do Chile, enquanto que a estação Faro Panul localiza-se mais ao sul na região de Valparaíso, aproximadamente na latitude da Grande Santiago.

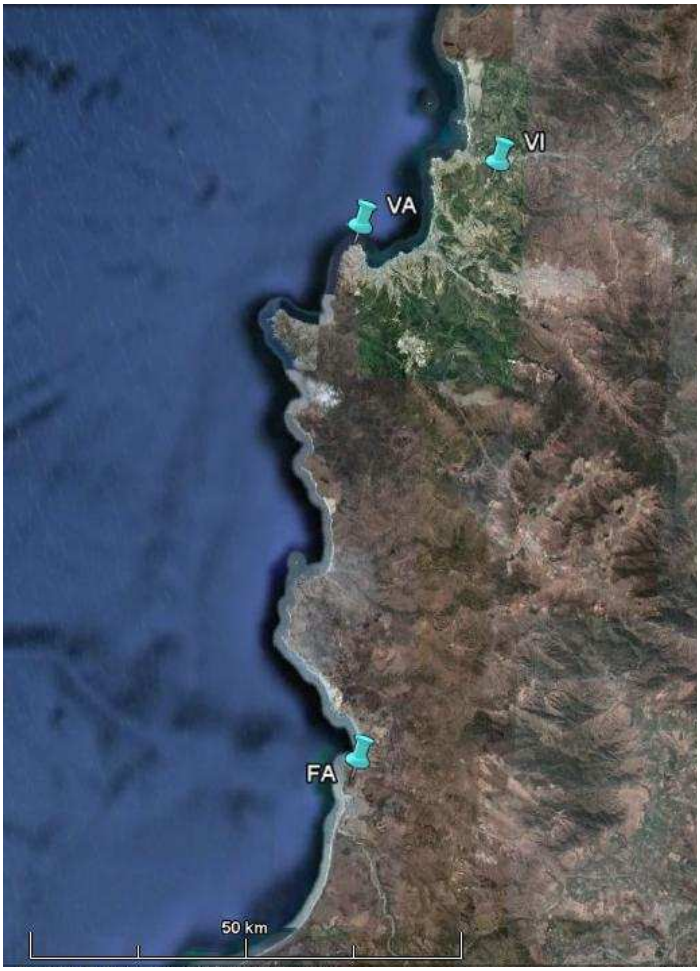


Figura 2.8: Localização das estações Faro Panul (FA), Valparaíso (VA) e Viña del Mar (VI) da Armada do Chile na região de Valparaíso. Fonte: Google Earth.

### 2.2.1 Temperatura

Nesta seção são apresentadas as séries de temperatura para o ano de 2004 para as estações da Região de Valparaíso (RV) a fim de identificar a variabilidade que esta variável apresenta ao longo do ano. Foi calculada a média móvel de sete dias para mostrar a evolução da temperatura ao longo do ano. Finalmente, valores médios horários mensais para o ano completo são apresentados para mostrar o ciclo diurno da temperatura em todos os meses do ano.

#### 2.2.1.1 Comportamento da temperatura ao longo do ano

Na Figura 2.9 são apresentadas as séries de temperatura para as estações de Viña Del Mar (a) e Faro Panul (b) no litoral da região de Valparaíso. A estação Faro Panul apresenta menor variabilidade nos valores observados, observando-se menores valores de temperatura no período de inverno. Para ambas as estações, os valores mínimos de temperatura são superiores a 2,5 ºC. Os valores máximos de temperatura na estação Faro Panul não ultrapassam os 21 ºC enquanto que na estação de Viña del Mar, a temperatura pode atingir valores superiores a 27 ºC.

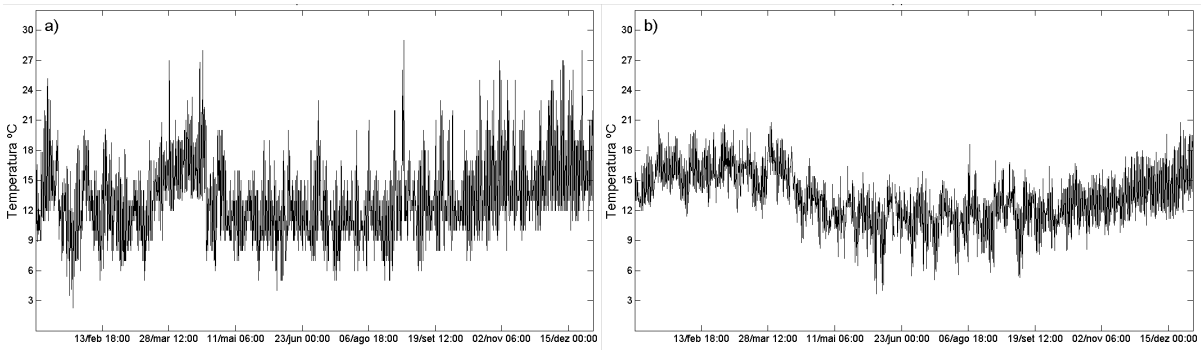


Figura 2.9: Comportamento da temperatura do ar ao longo do ano de 2004 para as estações de a) Viña del Mar e b) Faro Panul. Valores registrados a cada três horas.

A Figura 2.10 mostra mais claramente o comportamento da temperatura ao longo do ano nas estações de Viña del Mar (VI) e Faro Panul (FA). O máximo valor de temperatura na estação FA é atingido entre os meses de janeiro a abril, um pouco diferente do visto na climatologia (ver Figura 1.8.b), onde os máximos valores acontecem entre os meses de dezembro e fevereiro. Para ambas as estações é possível observar que os menores valores de temperatura média são registrados no período de inverno. A amplitude térmica anual para ambas as estações está em torno dos 8 ºC.

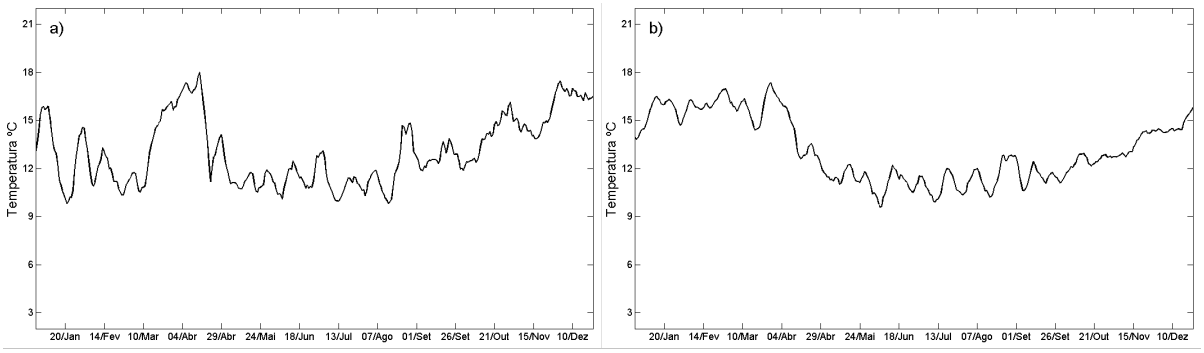


Figura 2.10: Média móvel de 7 dias da temperatura do ar, calculada para as estações a) Viña del Mar e b) Faro Panul na Região de Valparaíso

#### 2.2.1.2 Temperatura média horária

O ciclo diurno médio para cada um dos meses durante o ano de 2004 é apresentado na Figura 2.11. Os primeiros três meses do ano a temperatura registrada na estação de Viña del Mar (VI) foi menor que a registrada na estação Faro Panul (FA). Para todos os meses se observa que a amplitude dos dados é maior na estação de Viña del Mar, provavelmente, associada a sua localização, mais distante da linha de costa, quando comparada com a localização de FA. Esta diferença na amplitude é mais importante nos meses mais quentes (verão). Valores mínimos de temperatura média são observados entre as 09 UTC e 12 UTC (06 HL e 09 HL no horário de verão[3]) enquanto que os máximos valores máximos de temperatura média são registrados entre 18 UTC e 21 UTC. A variabilidade dos valores de temperatura registrados por horário, para ambas as estações, é menor nos meses de inverno.

[3] A diferença do horário UTC com o horário local (HL) no inverno é de 4 horas.

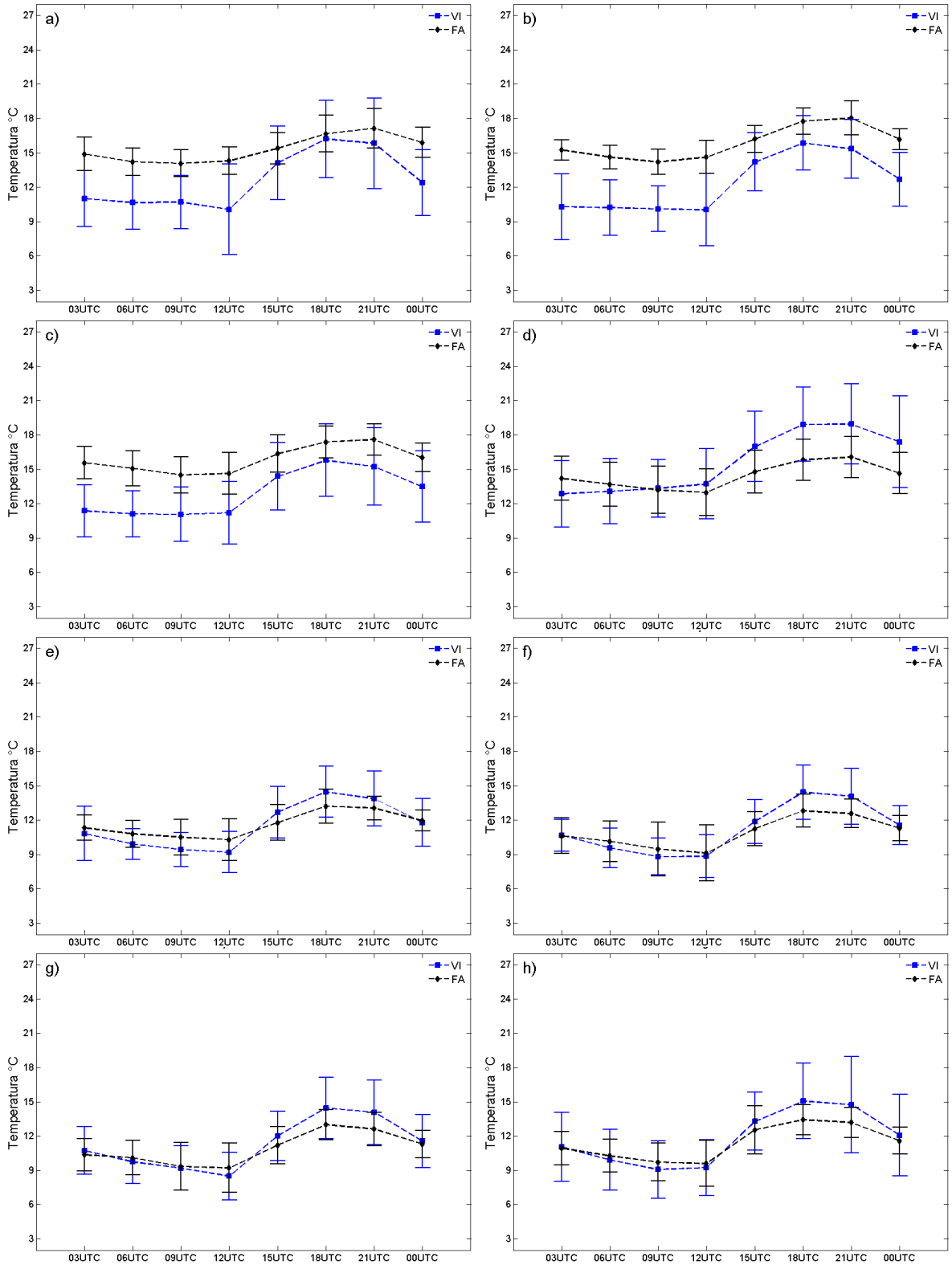


Figura 2.11: Temperatura média horária (em ºC) nas estações de Viña del Mar (VI) e Faro Panul (FA) da Armada do Chile para os meses de a) janeiro, b) fevereiro, c) março, d) abril, e) maio, f) junho, g) julho, h) agosto, i) setembro, j) outubro, k) novembro, e l) dezembro do ano de 2004. Barras indicam o desvio padrão.

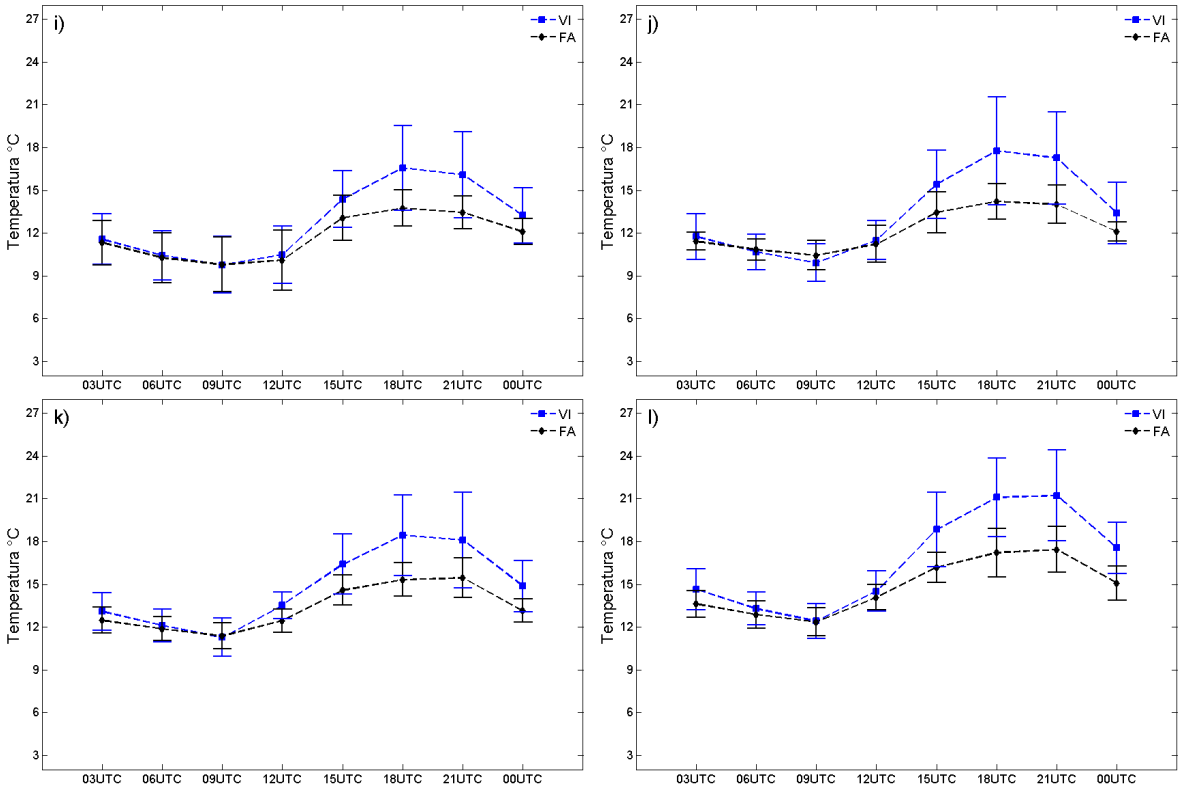


Figura 2.11: Continuação

### 2.2.2 Vento

A série de intensidade do vento para o ano de 2004 é apresentada para mostrar os máximos valores atingidos no período nas estações localizadas no litoral da RV. A média móvel de sete dias foi calculada para a intensidade e direção do vento para mostrar sua evolução ao longo do ano. Por último, valores médios horários de ambas as variáveis são apresentados para mostrar seu comportamento em todos os meses do ano. Não foram considerados dados faltantes no cálculo das médias.

#### 2.2.2.1 Comportamento do vento ao longo do ano

O comportamento da direção do vento ao longo do ano de 2004 pode ser observado na Figura 2.12. Para todas as estações analisadas é observada uma mudança na componente zonal da direção do vento, passando de oeste no verão, vento característico de uma condição anticiclônica (como mostrado na análise sinótica da seção 2.1), para leste durante o inverno,

devido à maior atividade frontal que atinge a região central do Chile. O domínio da direção oeste é maior na estação Faro Panul quando comparada às estações restantes. Quanto à intensidade do vento (Figura 2.13), a estação que apresenta menores variações ao longo do ano é Viña del Mar, com valores em torno de 2,5 $ms^{-1}$. Na primeira metade do ano Faro Panul apresenta ventos médios em torno de 3 $ms^{-1}$, com um aumento nesta intensidade para 4 $ms^{-1}$ no final do inverno e na estação de primavera. Este aumento do vento médio também é observado na estação de Valparaíso (Figura 2.13.b). Na Figura 2.14 pode ser observado que a intensidade do vento pode atingir valores superiores a 20 $ms^{-1}$ (Faro Panul). As estações mais próximas do litoral apresentam maior quantidade de picos de intensidade superior a 10 $ms^{-1}$, que no verão podem estar associados aos períodos de maior intensidade das brisas marítima e terrestre. No inverno, estes valores se associam à passagem de frentes pela região do Chile central.

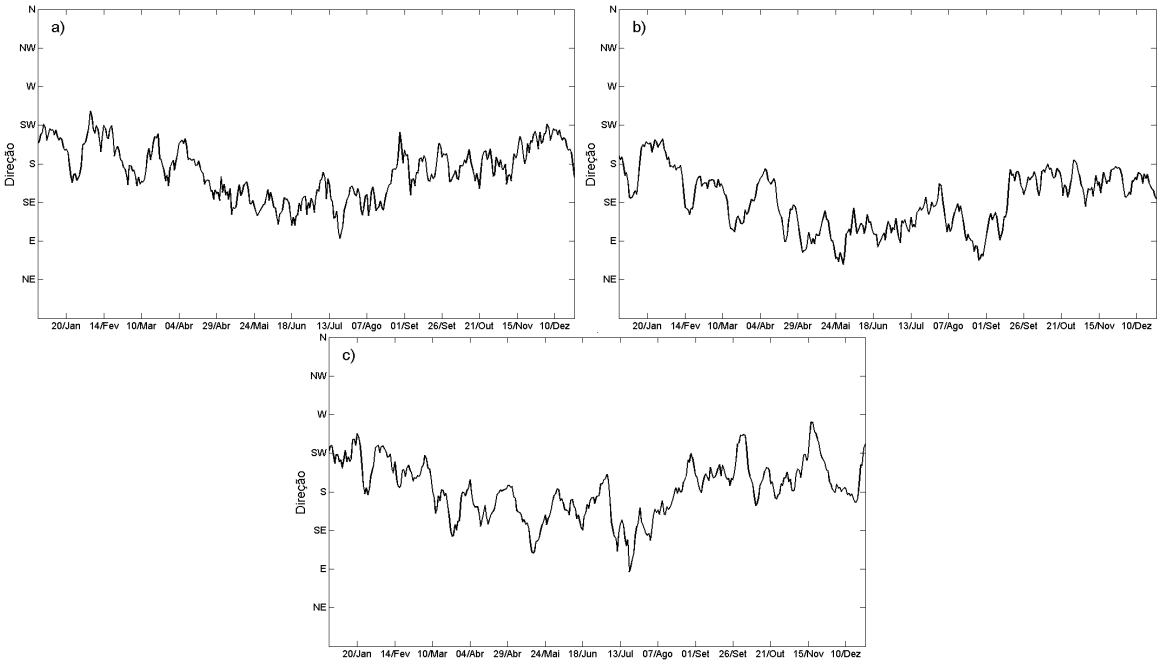


Figura 2.12: Média móvel de 7 dias da direção do vento em graus calculada para as estações a) Viña del Mar, b) Valparaíso e c) Faro Panul na Região de Valparaíso

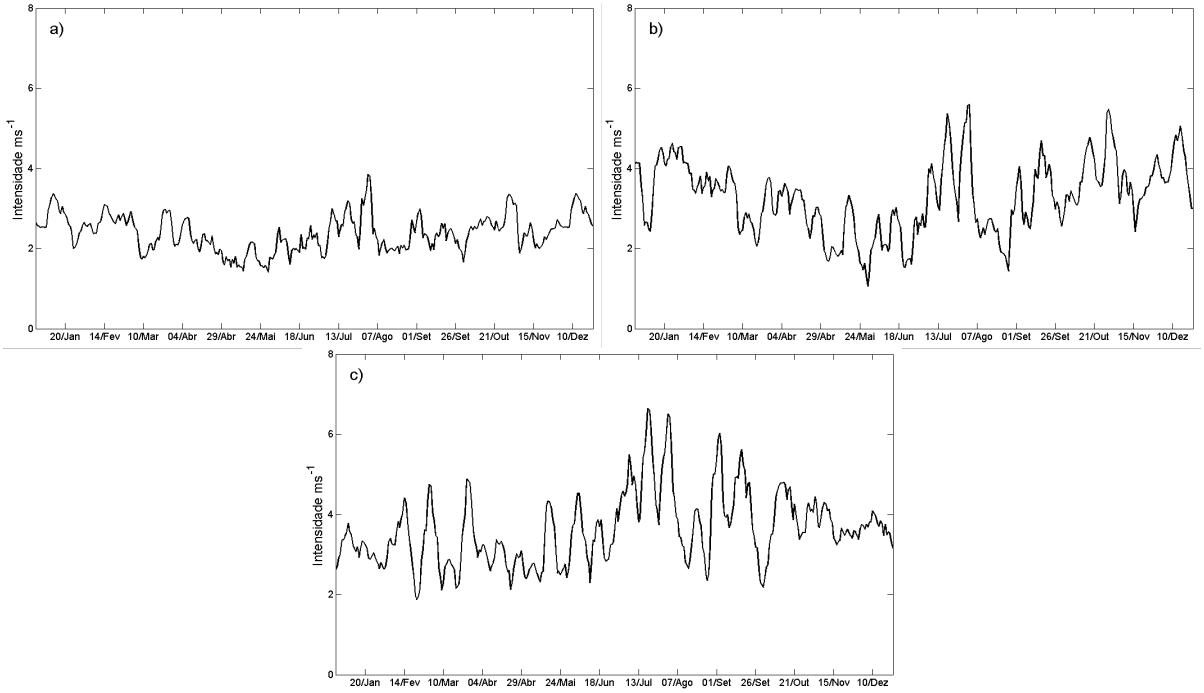


Figura 2.13: Média móvel de 7 dias da intensidade do vento em $ms^{-1}$ calculada para as estações a) Viña del Mar, b) Valparaíso e c) Faro Panul na Região de Valparaíso

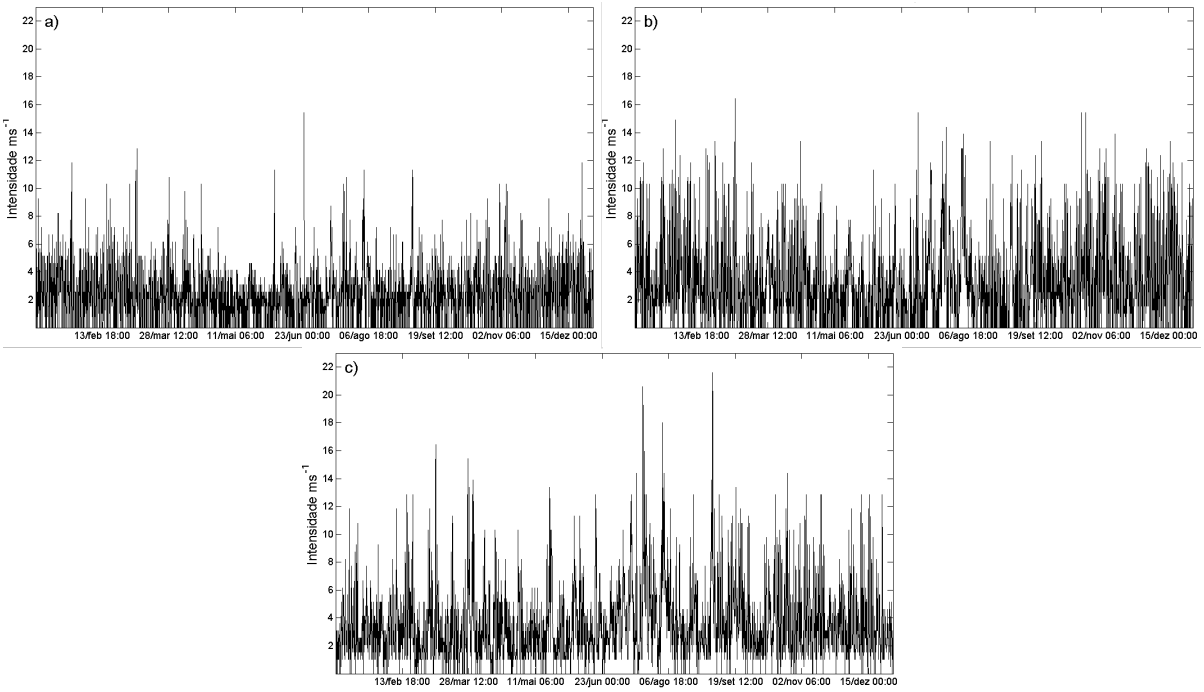


Figura 2.14: Intensidade do vento em $ms^{-1}$ cada 3 horas para o ano de 2004 registrado nas estações de a) Viña del Mar, b) Valparaíso e c) Faro Panul na Região de Valparaíso.

#### 2.2.2.2 Vento médio horário

A Figura 2.15 mostra a ciclo diurno médio mensal da direção do vento no litoral do Chile central. Durante o período do inverno, a variação na direção do vento não é tão evidente, sendo mais frequentes os ventos com direção leste e sul, principalmente no período noturno e começo da manhã (03 UTC a 12 UTC). Já durante os meses mais quentes, a circulação de brisa marítima é mais evidente, com exceção de novembro, mês que apresentou precipitações associadas a frentes não concordantes com os valores climatológicos e, por isso, não foi possível identificar a mudança da componente zonal do vento em todas as estações (Figura 2.15.k). Durante o dia, no período mais quente, a brisa marítima domina com ventos de direção oeste entre 15 UTC e 21 UTC. As estações em que é mais facilmente identificável a brisa marítima são Viña del Mar (linha azul) e Faro Panul (linha preta).

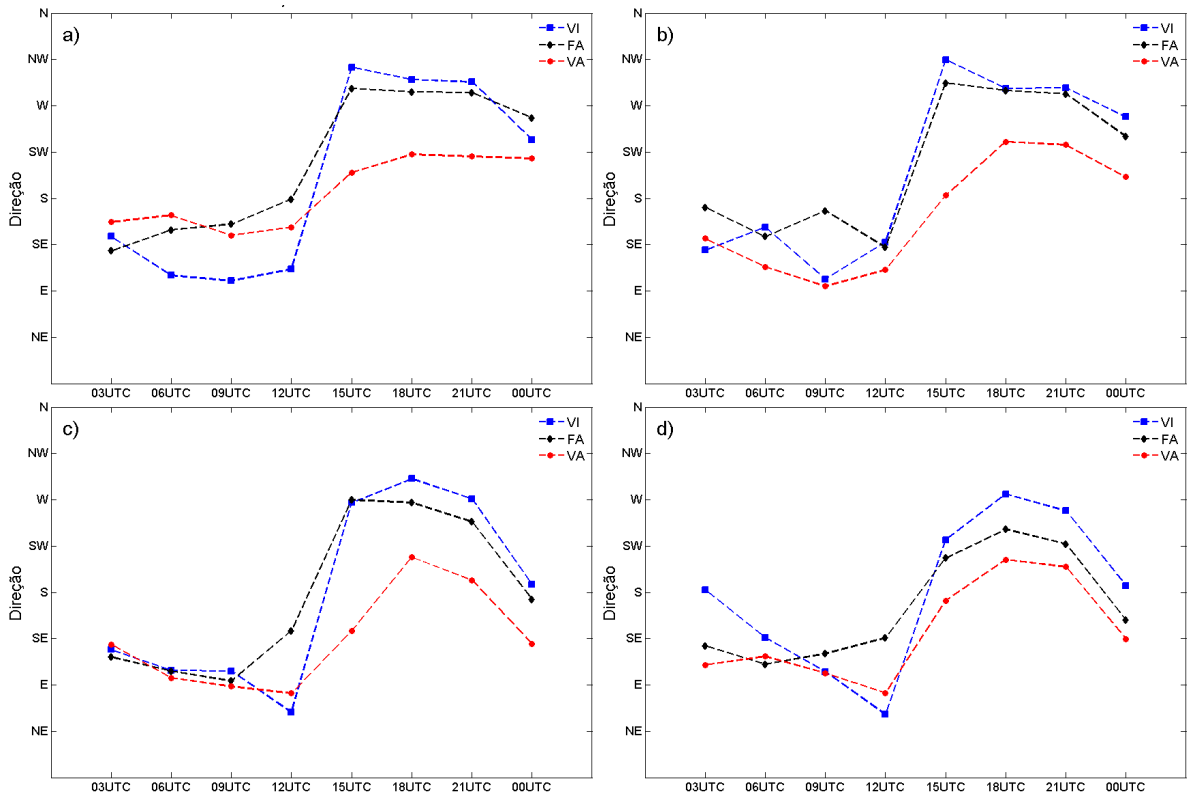


Figura 2.15: Direção média horária do vento nas estações de Viña del Mar (VI), Faro Panul (FA) e Valparaíso (VA) da Armada do Chile para os meses de a) janeiro, b) fevereiro, c) março, d) abril, e) maio, f) junho, g) julho, h) agosto, i) setembro, j) outubro, k) novembro, e l) dezembro do ano de 2004.

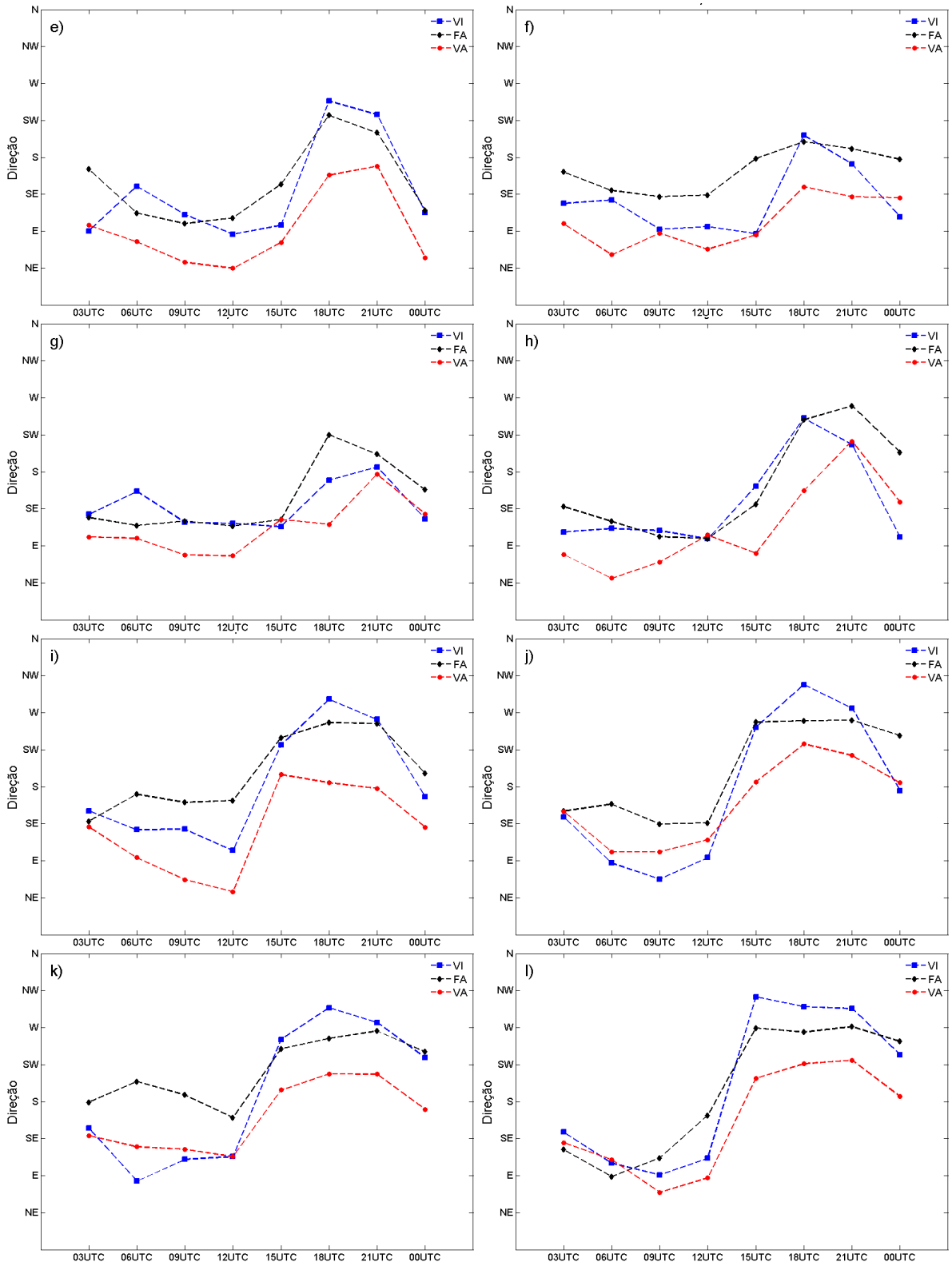


Figura 2.15: Continuação.

O comportamento da intensidade do vento médio horário (Figura 2.16) mostra que, durante o inverno, estes valores são mais homogêneos, não se observando grandes variações na intensidade ao longo do dia. Já no período mais quente, há um aumento na intensidade do vento após as 12 UTC, período em que é observada a rotação na direção do vento, associada ao ingresso da frente de brisa marítima sobre o continente. Os máximos valores de intensidade do vento foram registrados entre 18 UTC e 21 UTC, coincidentes com o período em que as temperaturas médias horárias máximas foram observadas.

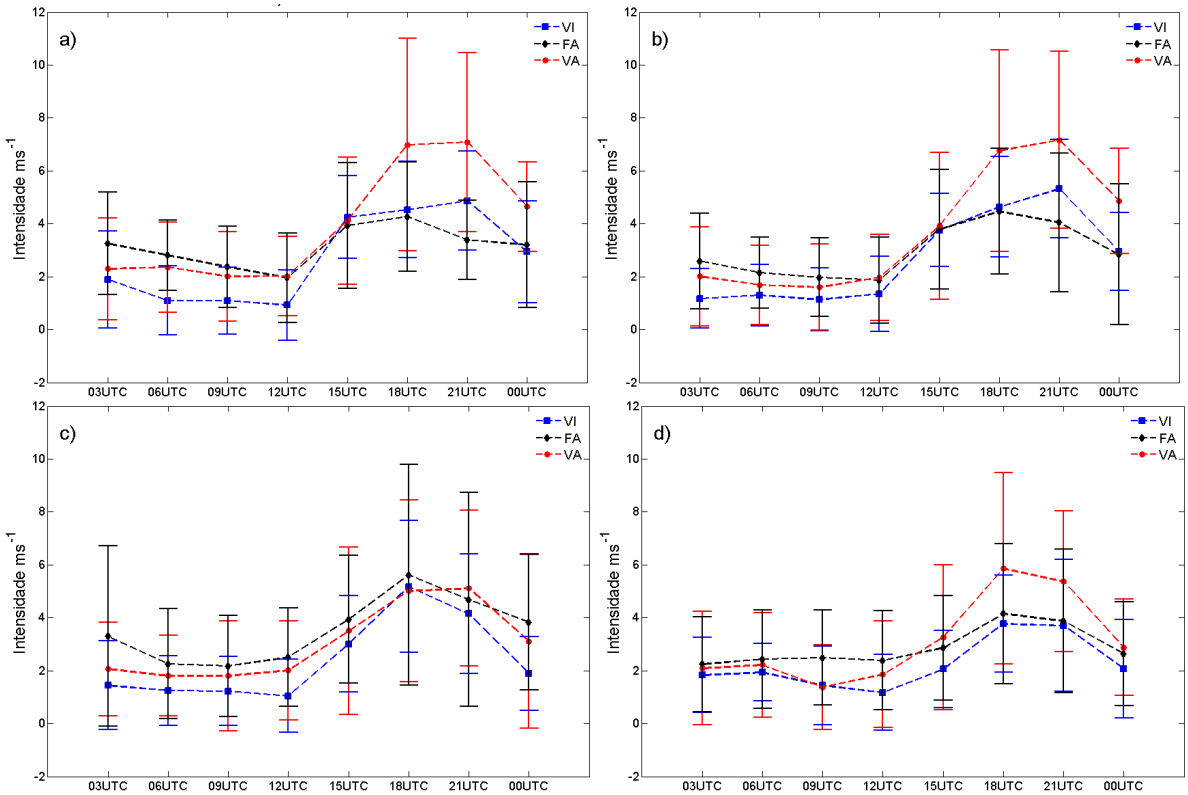


Figura 2.16: Intensidade média horária do vento nas estações de Viña del Mar (VI), Faro Panul (FA) e Valparaíso (VA) da Armada do Chile para os meses de a) janeiro, b) fevereiro, c) março, d) abril, e) maio, f) junho, g) julho, h) agosto, i) setembro, j) outubro, k) novembro, e l) dezembro do ano de 2004. Barras indicam o desvio padrão dos dados para cada horário.

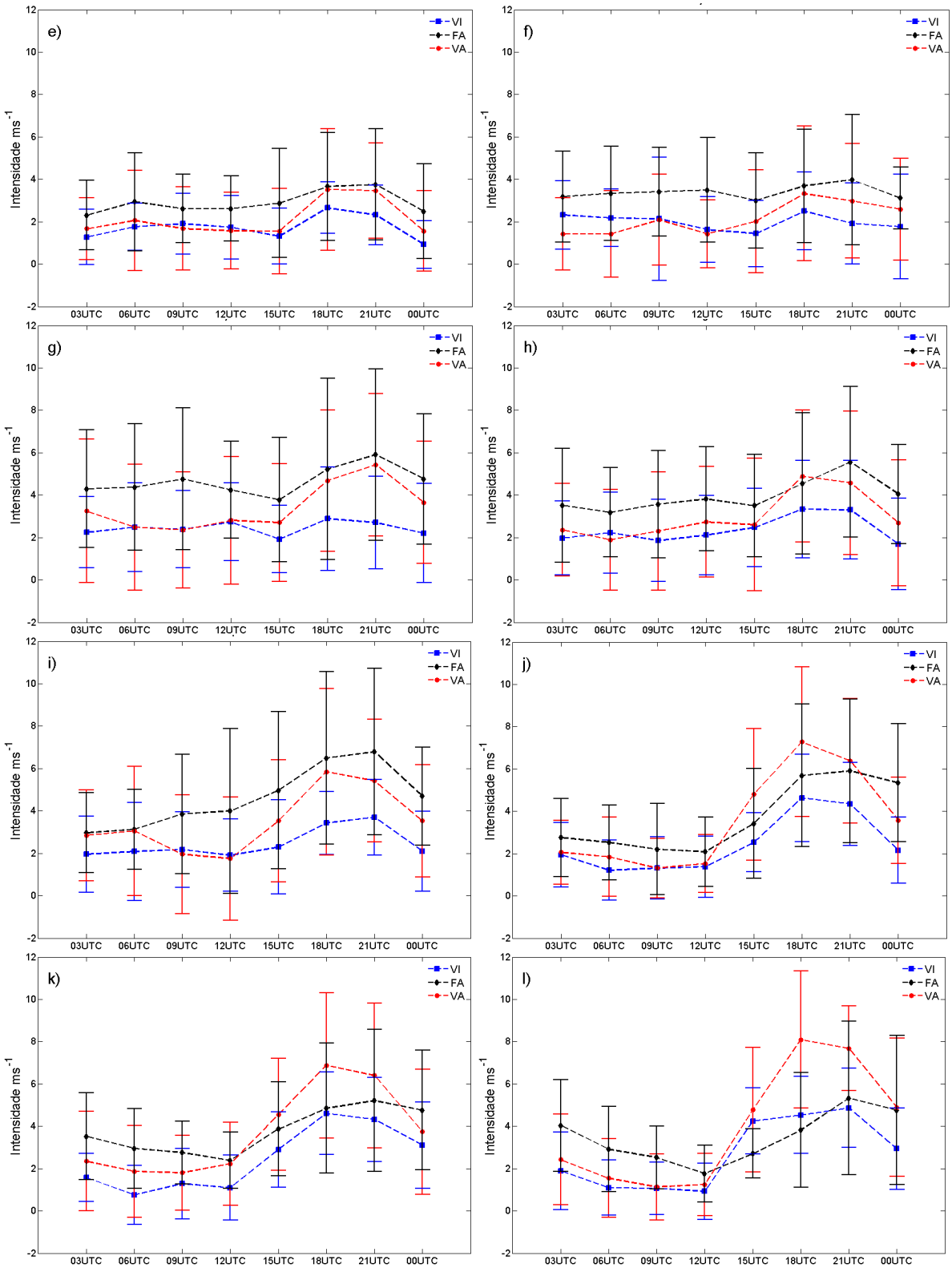


Figura 2.16: Continuação.

### 2.3 Região Metropolitana de Santiago

Nesta seção serão analisadas as séries de temperatura do ar, vento e material particulado para a Região Metropolitana de Santiago, além de avaliar os efeitos da cidade sobre a temperatura do ar, mediante o cálculo da intensidade da ilha de calor.

Para a RMS, foram utilizados dados meteorológicos de seis estações de monitoramento meteorológico da Comissão Nacional do Meio Ambiente da Região Metropolitana de Santiago (CONAMA-RM), as quais são operadas pelo Centro Nacional do Meio Ambiente (CENMA). A Tabela 2.2 mostra as estações consideradas para a região metropolitana de Santiago, sua localização e altura com relação ao nível médio do mar.

Tabela 2.2: Estações CENMA da rede de monitoramento meteorológico da CONAMA-RM, Chile, utilizadas neste estudo.

| ESTAÇÃO | LOCALIZAÇÃO | ALTITUDE (m) |
|---|---|---|
| Entel (EN) | 70,6500°W – 33,4405°S | 554 |
| El Manzano (MA) | 70,3667°W – 33,5908°S | 874 |
| El Paico (PA) | 71,0000°W – 33,7013°S | 255 |
| La Platina (PL) | 70,6167°W – 33,5698°S | 652 |
| La Reina (RE) | 70,5167°W – 33,4502°S | 680 |

As estações de El Paico e El Manzano (em branco) localizam-se fora dos limites urbanos, enquanto que as estações de La Platina e La Reina estão localizadas dentro da cidade (em verde). A estação Entel localiza-se numa área mais urbanizada, no centro da cidade de Santiago. A Figura 2.17 mostra a localização das estações dentro e fora da cidade.

Figura 2.17: Localização das estações do CENMA na região metropolitana de Santiago e periferia. Fonte: Google Earth.

### 2.3.1 Temperatura

Valores horários de temperatura do ar foram utilizados para identificar a variabilidade que esta apresenta. Em seguida, uma média móvel de sete dias foi calculada para mostrar a evolução da temperatura ao longo do ano de 2004. Foi calculada a temperatura média horária mensal para todos os meses do ano para mostrar as diferenças que apresenta o ciclo diurno em cada mês. Finalmente, a intensidade da ilha de calor em Santiago foi calculada segundo OKE (1995), considerando a média das temperaturas das estações na região urbana e a média das temperaturas das estações localizadas fora da região urbana. Realizaram-se, além disso, diferenças de temperatura entre as estações localizadas nos dois diferentes tipos de uso urbano identificados na Grande Santiago e as regiões não urbanas. Dados faltantes foram omitidos nos cálculos.

#### 2.3.1.1 Comportamento da temperatura ao longo do ano

Na Figura 2.18 pode ser observado o comportamento da temperatura do ar ao longo do ano para as estações da RMS mencionadas na Tabela 2.2. O padrão da temperatura do ar registrado pelas estações do CENMA é similar para todos os pontos. Pode ser notado que,

para todas as estações, os valores mais baixos registrados encontram-se no período de junho a agosto (inverno), período em que a migração para a região central do Chile de massas de ar com características mais frias associadas a passagens de frentes é mais frequente. O aumento na quantidade de nebulosidade associada às frentes impede um aquecimento maior do ar em virtude de uma diminuição na radiação solar direta. Valores máximos de temperatura do ar são registrados em janeiro, fevereiro e dezembro (verão), período coincidente com o posicionamento mais ao sul do ASPS e menor quantidade de nebulosidade presente na região central do Chile.

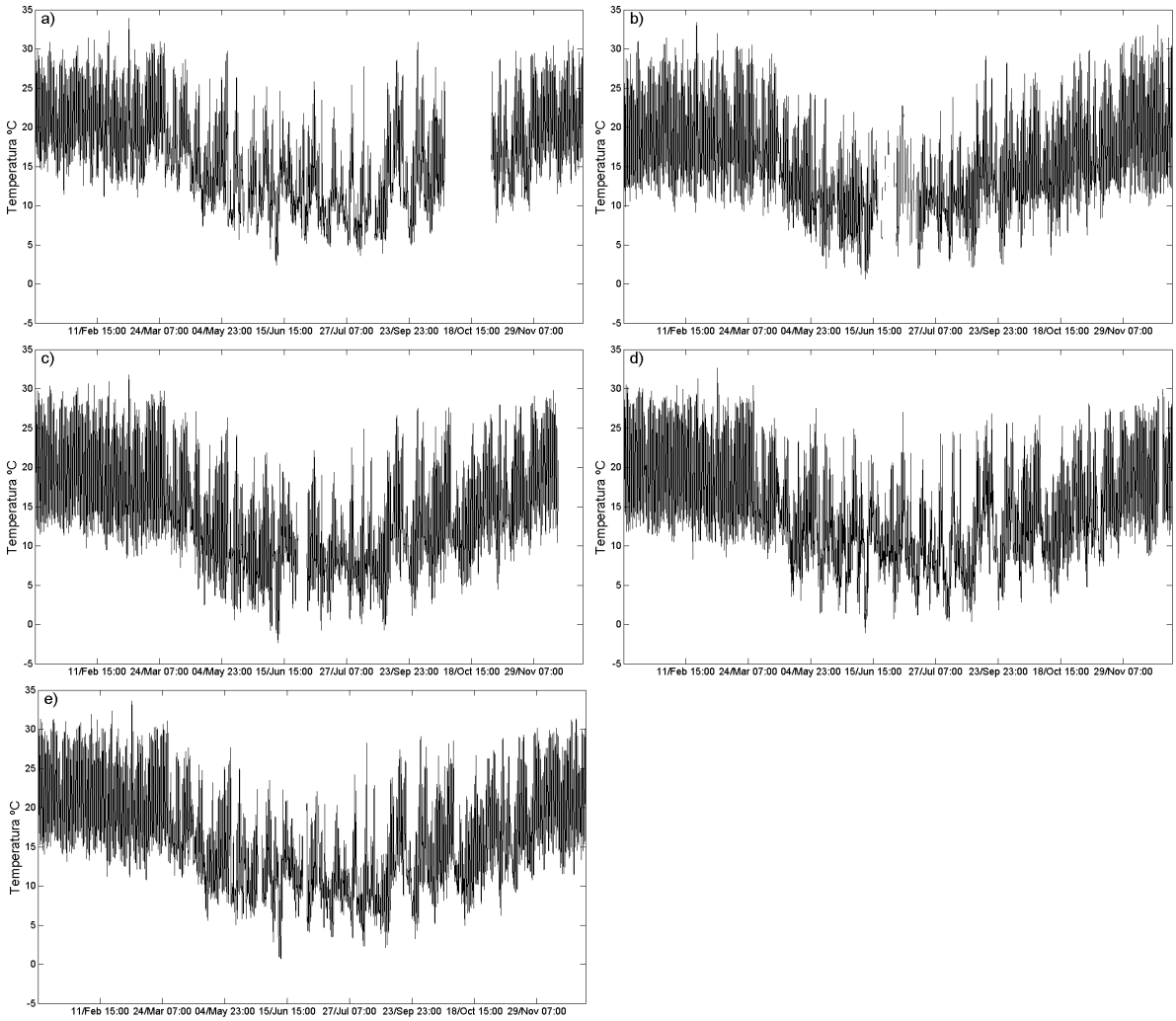


Figura 2.18: Comportamento da temperatura do ar ao longo do ano de 2004 para as estações de a) Entel, b) El Paico, c) La Platina, d) El Manzano e, e) La Reina. Valores horários registrados em horário local.

O ciclo anual das temperaturas é melhor visualizado na Figura 2.19. Os menores valores de temperatura são registrados nas seis estações entre os meses de junho e agosto, coincidente com o inverno local. As temperaturas médias não são inferiores a 5 ºC neste período.

A variabilidade das temperaturas é maior no mês de setembro para quase todas as estações. Durante os meses mais quentes não são observadas variações muito bruscas nas temperaturas médias e os valores não ultrapassam os 24 ºC.

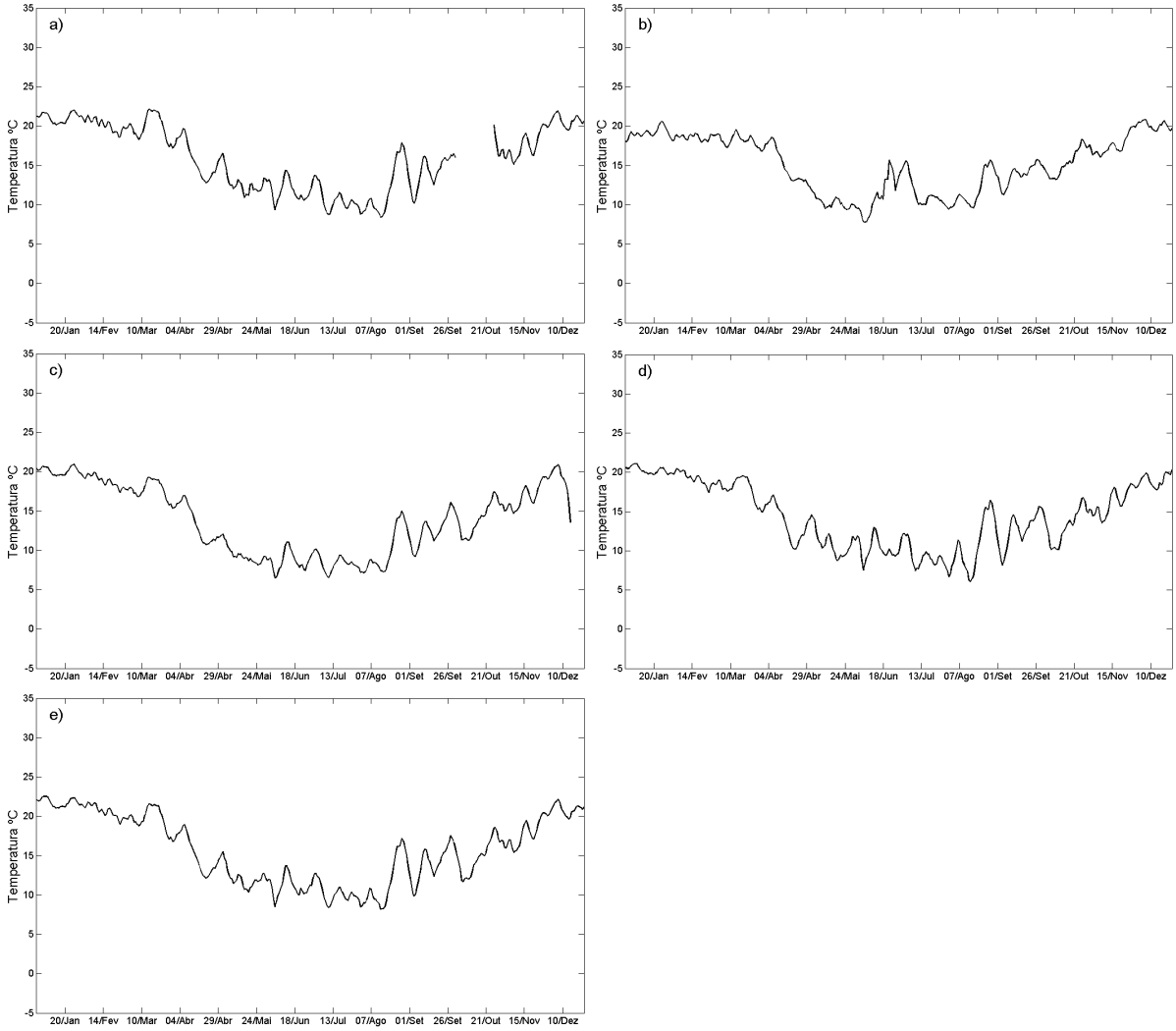


Figura 2.19: Média móvel de 7 dias da temperatura do ar calculada para as estações CENMA de a) Entel, b) El Paico, c) La Platina, d) El Manzano e, e) La Reina na região metropolitana de Santiago.

#### 2.3.1.2 Temperatura média horária

Na Figura 2.20 pode ser vista a evolução do ciclo diurno de temperatura durante o ano de 2004. Os valores de temperatura mínima média na estação de El Paico (PA) foram registrados entre 06 HL e 08 HL com os menores valores durante o período de inverno, como pode ser visto na Figura 2.20. Os valores de temperatura máxima média nesta estação foram registrados entre 15 HL e 16 HL correspondendo o último horário aos valores registrados durante o inverno.

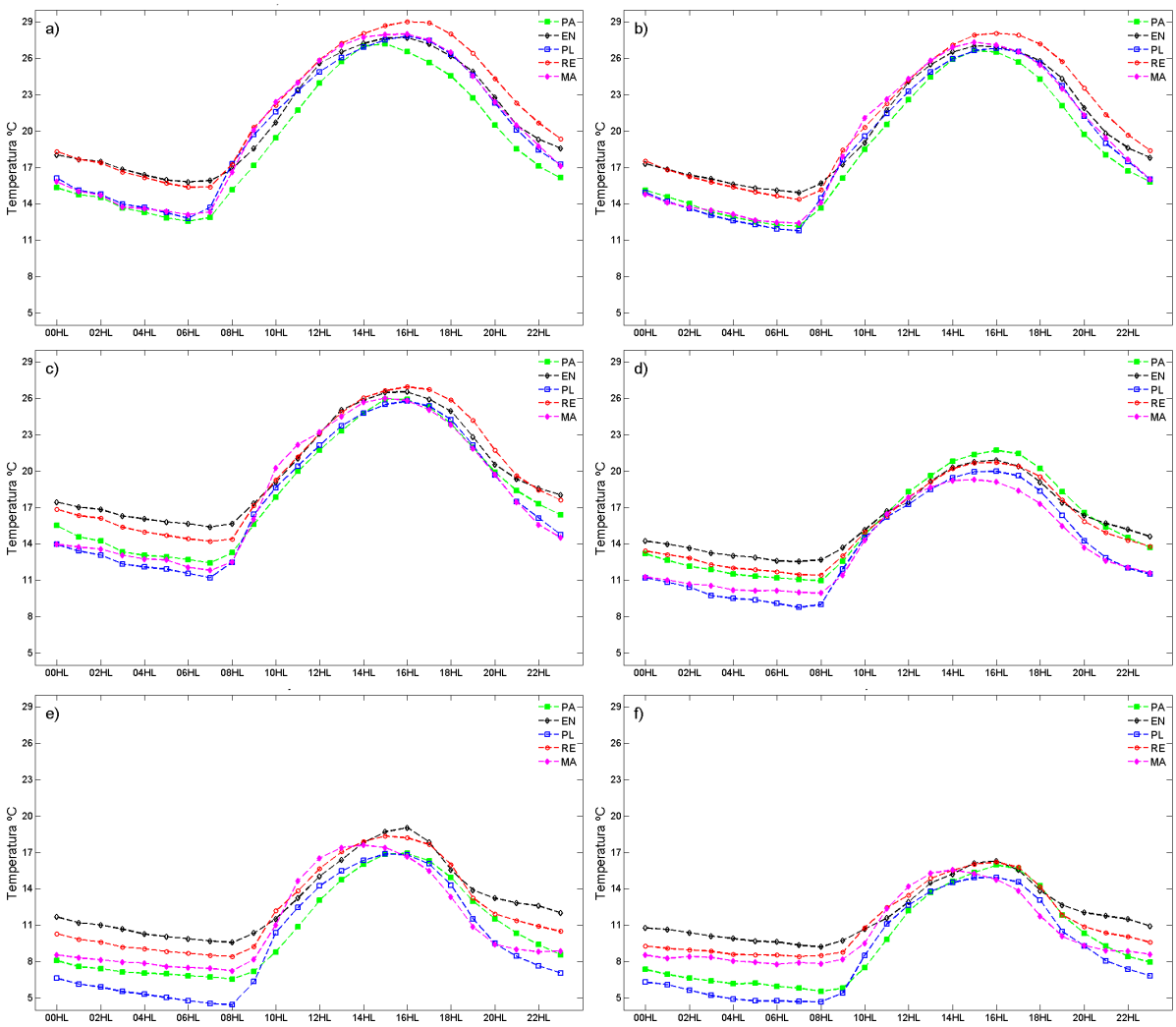


Figura 2.20**:** Temperatura média horária nas estações do CENMA El Paico (PA), La Platina (PL), Entel (EN), La Reina (RE) e El Manzano (MA) para os meses de a) janeiro, b) fevereiro, c) março, d) abril, e) maio, f) junho, g) julho, h) agosto, i) setembro, j) outubro, k) novembro, e l) dezembro do ano de 2004.

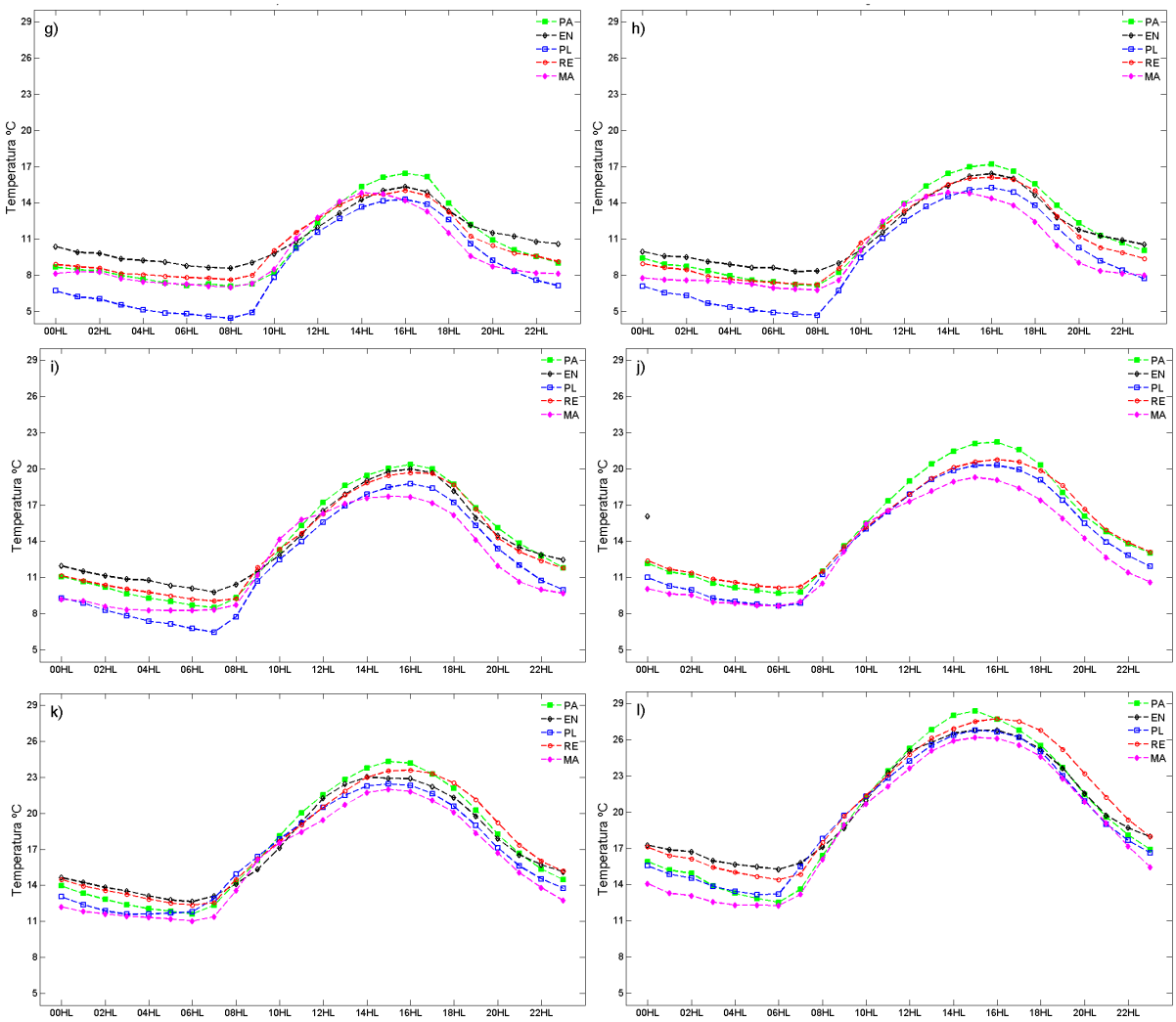


Figura 2.20: Continuação.

A estação de El Manzano (MA) apresenta algumas diferenças ao ser comparada à estação de El Paico, principalmente nos horários em que se registram os valores de temperatura máxima. No verão, o valor máximo é atingido com uma hora de antecedência, enquanto que no inverno, El Manzano registra o período de maior aquecimento aproximadamente as 14 HL. Os valores médios de temperatura mínima nesta estação foram observados entre o mesmo período apresentado na estação de El Paico.

Das duas estações não urbanas analisadas, El Manzano foi a estação que apresentou valores horários mais próximos de 0 ºC (0,34 ºC; agosto).

Na estação urbana de Entel, localizada no centro da GS, a temperatura mínima média se registra entre 6 HL e 7 HL ao longo do ano. A temperatura máxima média, por sua vez, é observada entre 16 HL e 17 HL.

A temperatura mínima média na estação de La Platina se registra, preferencialmente, entre 7 HL e 8 HL durante o inverno e entre 6 HL e 7 HL durante o verão, ao contrário do que acontece com a estação de Entel, na qual os valores médios de temperatura mínima se registraram entre o mesmo período para o ano inteiro (entre 06 HL e 07 HL). Já os valores médios de temperatura máxima registrados nesta estação têm sido observados as 16 HL com bastante frequência. E importante destacar que esta é a única das estações urbanas que apresentou valores negativos de temperatura durante os meses de junho a agosto (- 0,72 ºC, - 0,72 ºC, - 0,68 ºC, respectivamente).

Na estação de La Reina pode ser visto que os horários em que foram registrados os valores médios mínimos não são regulares, como o acontecido com as demais estações analisadas, não ficando evidente o adiantamento no horário de registro do mínimo de temperatura no inverno. Já a temperatura máxima média é registrada com maior frequência no horário das 16 HL.

Na Figura 2.21 é apresentado o desvio padrão dos valores médios horários calculados para as estações do CENMA. Para a estação de El Paico pode ser visto que durante a noite a variabilidade da temperatura é menor e, no inverno, esta variabilidade se incrementa para todos os horários, principalmente durante o dia.

Uma diferença que apresenta a estação de El Manzano no desvio padrão da temperatura média com relação ao obtido para El Paico é que, no inverno, as diferenças nos valores registrados de temperatura horária são maiores para esta última estação. Neste período, El Manzano atinge valores superiores a 6ºC (agosto), enquanto que em El Paico dificilmente são superados os 4 ºC no mesmo período. No verão, o comportamento do desvio padrão é similar

ao obtido em El Paico para o mesmo período, isto é, com menor variabilidade nos valores de temperatura durante a noite.

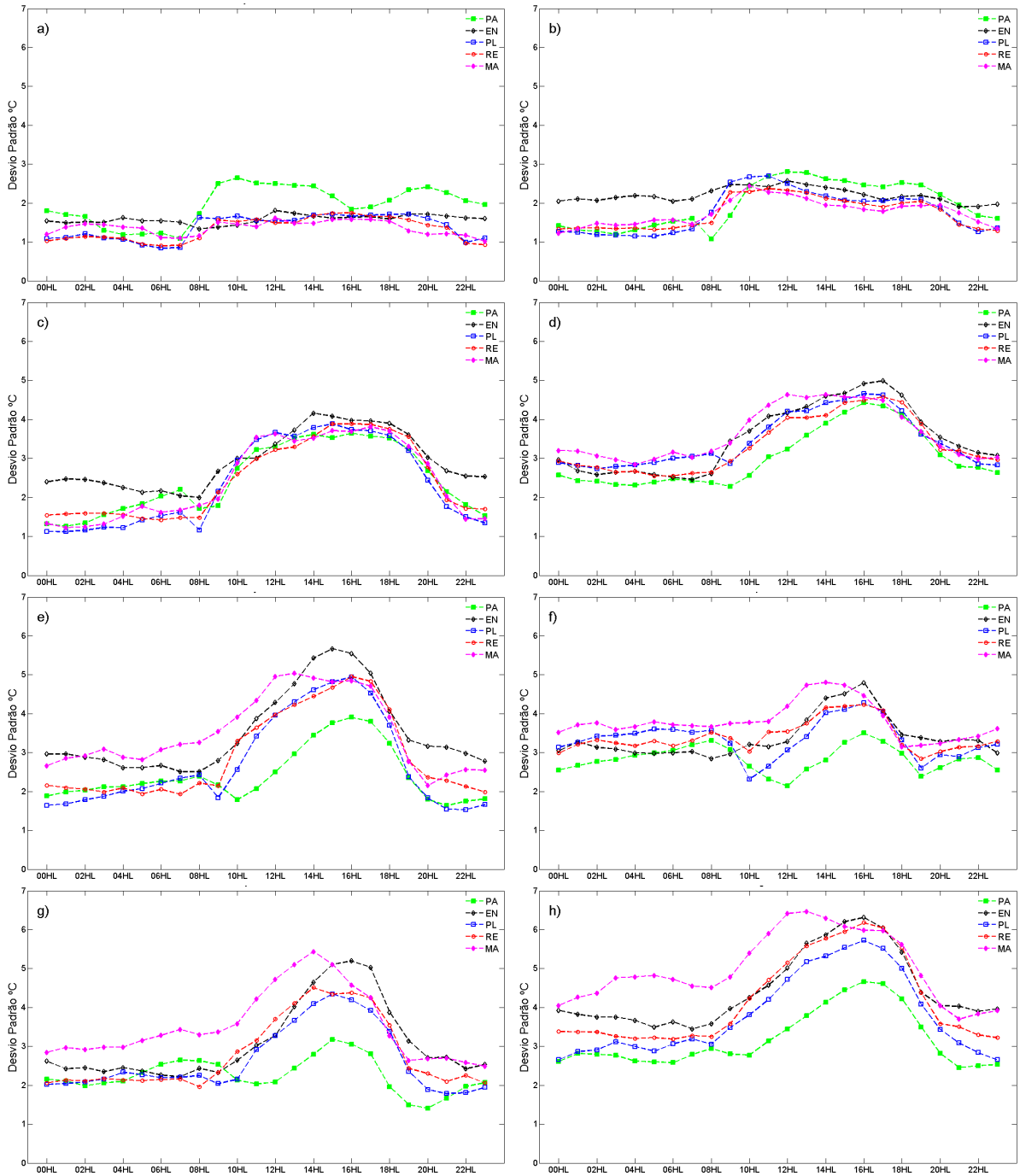


Figura 2.21: Desvio padrão para cada horário nas estações do CENMA El Paico (PA), La Platina (PL), Entel (EN), La Reina (RE) e El Manzano (MA) para os meses de a) janeiro, b) fevereiro, c) março, d) abril, e) maio, f) junho, g) julho, h) agosto, i) setembro, j) outubro, k) novembro, e l) dezembro do ano de 2004.

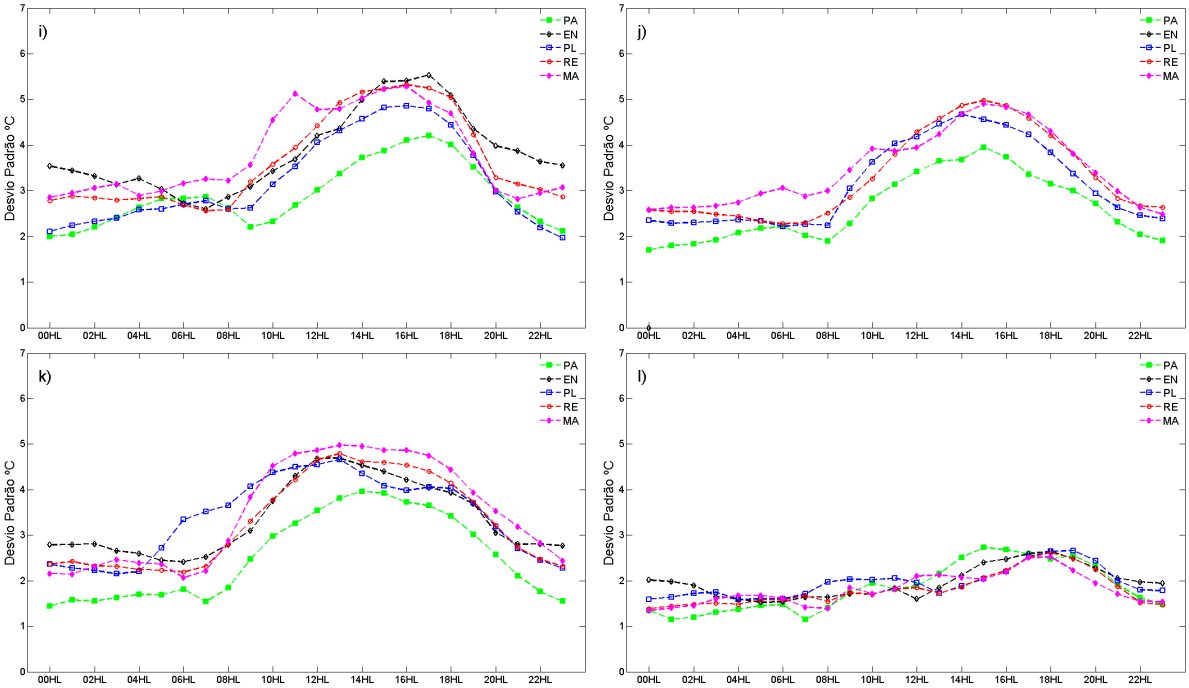


Figura 2.21: Continuação.

A variabilidade da temperatura na estação Entel é maior quando comparado ao que acontece nas outras estações urbanas, principalmente no período de inverno. Essas diferenças são menores no período de verão. Esta estação, similarmente às estações de La Reina e La Platina, apresenta maiores diferenças dos valores registrados para cada horário com relação ao valor médio durante o dia. À noite, os valores de temperatura horária são mais próximos dos valores médios obtidos. O desvio padrão em Entel atinge o maior valor no mês de agosto (maior que 6 ºC), seguindo o mesmo padrão observado nas outras estações.

#### 2.3.1.3 Intensidade da ilha de calor urbana

A Figura 2.22 mostra a intensidade da ilha de calor urbana (InIC) para a Região Metropolitana de Santiago durante o ano de 2004. Valores positivos de InIC podem ser observados na maior parte do ano.

Valores extremos de intensidade mostram que a cidade pode ser 8 ºC mais quente que a região rural e que, no inverno, quando períodos com InIC negativa são mais frequentes, a cidade pode se apresentar até 8 ºC mais fria que o seu entorno não urbanizado.

Na Figura 2.23 é mostrado com mais detalhamento o que acontece nos períodos de verão e inverno. No verão (Figura 2.23.a), a cidade poucas vezes apresenta-se mais fria que o entorno, provavelmente associado à maior quantidade de radiação solar recebida devido à pouca presença de nebulosidade no interior do vale na região central do Chile, condição meteorológica que está associada à influência do ASPS nesta época do ano.

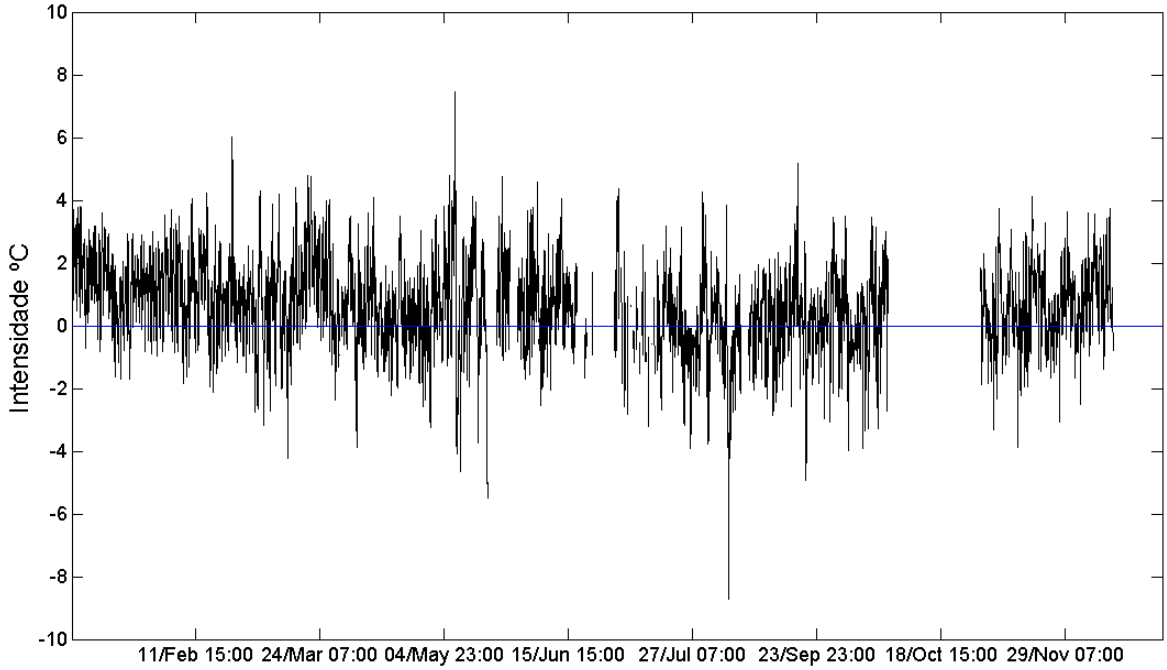


Figura 2.22: Intensidade da ilha de calor urbana na região metropolitana de Santiago para o ano de 2004. Escala de tempo em hora local.

São mais frequentes as inversões no sinal da intensidade da ilha de calor com o começo dos meses mais frios (a contar de março), período no qual o anticiclone começa o seu deslocamento para o norte, deixando a passagem livre para as frentes, que no outono, têm suas primeiras aproximações à região central do Chile. A intensidade da ilha de calor registrada durante o período de verão não ultrapassou os 6 ºC e o menor valor registrado foi de -4 ºC para finais do verão.

Durante os meses de inverno (Figura 2.23.b), a InIC mostra maior quantidade de períodos com valores negativos. A diminuição da temperatura do ar associada com o estabelecimento

de massas de ar mais frias após a passagem de frentes e a capacidade térmica dos materiais das construções na mesma cidade podem estar associadas a esta característica.

Em geral, a intensidade da ilha de calor é menor durante o inverno (variando entre valores de -3 ºC e 4 ºC), mas extremos de InIC podem ser observados, atingindo valores de intensidade aproximados de até -8 ºC e 8 ºC.

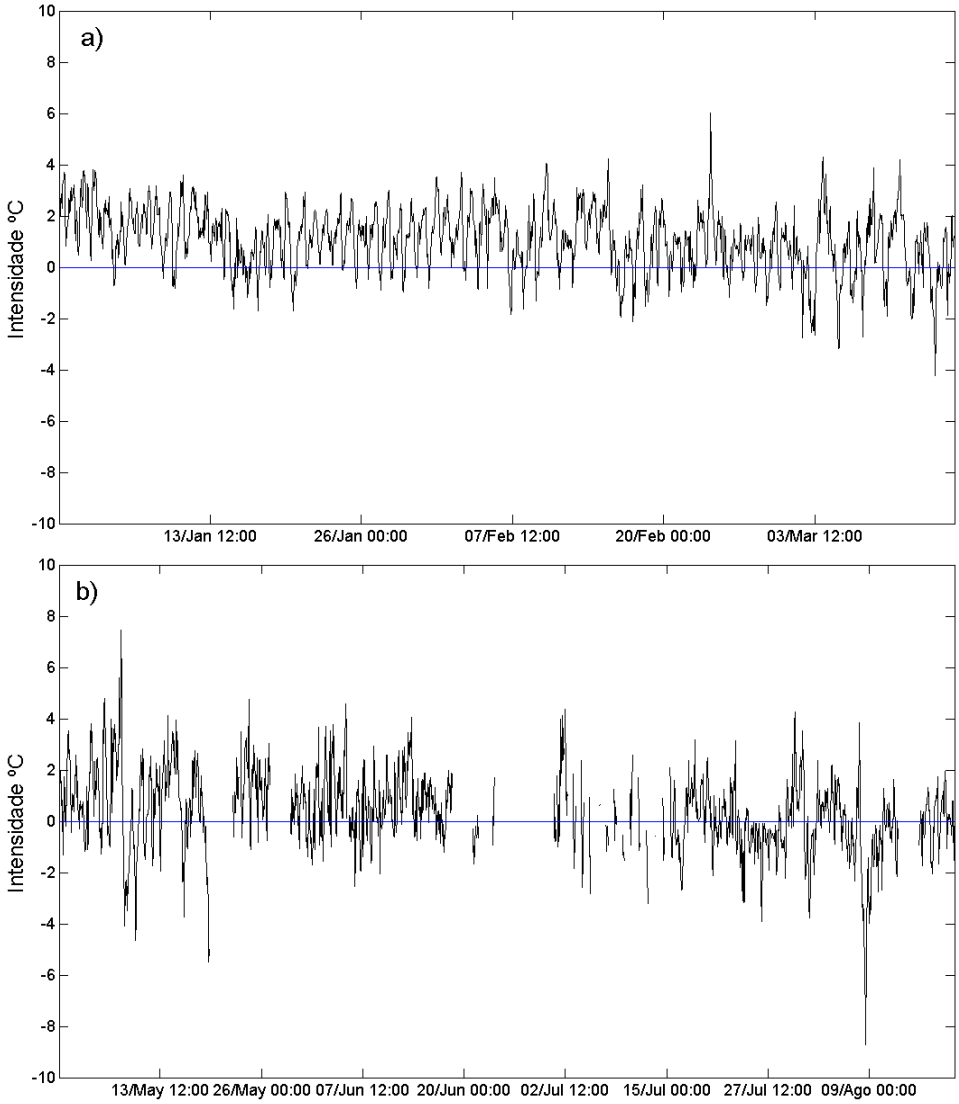


Figura 2.23: Intensidade da ilha de calor urbana em Santiago do Chile para a) verão e b) inverno. Escala de tempo em hora local.

#### 2.3.1.4 Diferenças de temperatura entre os diversos tipos de uso de solo

Para estudar a variabilidade da temperatura sobre a Grande Santiago (GS) e suas vizinhanças, foram agrupadas as estações urbanas em dois subtipos. O tipo urbano 1 caracterizado pela estação Entel, localizada numa região com domínio de construções de

maior altura, enquanto que o tipo urbano 2 foi feito com a média das observações de La Reina e La Platina, localizadas dentro da cidade em áreas com maior arborização e construções de altura menor. A média da temperatura para as estações não urbanas (El Paico e El Manzano) foi também utilizada.

A Figura 2.24 mostra a evolução das diferenças de temperatura entre os dois tipos urbanos definidos anteriormente para a GS e a temperatura registrada fora dos limites urbanos. Na Figura 2.24.a pode-se observar que o centro da cidade (tipo urbano 1) é, para quase o período completo, mais quente que as regiões afastadas dele. A diferença de temperatura é maior no período de inverno. Ao comparar a região associada com o tipo de solo urbano 1 com a região não urbanizada (Figura 2.24.b) observa-se mais variabilidade nas diferenças de temperatura e que diferenças negativas são mais frequentes, o que indica uma maior temperatura nas áreas não urbanizadas. A diferença na temperatura entre o tipo de solo urbano 2 e a região não urbana (Figura 2.24.c) tem amplitude menor mostrando-se, na maior parte do ano, mais quente a região não urbana.

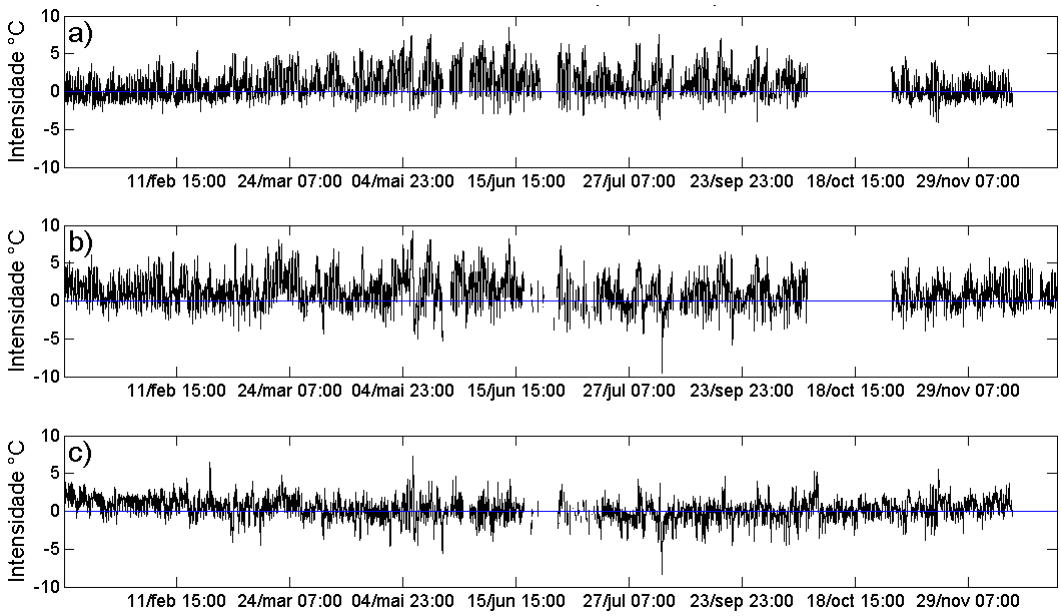


Figura 2.24: Diferença de temperatura entre a) o tipo urbano 1 e o tipo urbano 2, entre b) o tipo urbano 1 e a região não urbana, e c) o tipo urbano 2 e a região não urbana para o ano de 2004. Escala de tempo em hora local.

Focando a análise no período de verão (Figura 2.25), as diferenças de temperaturas do ar que se observam entre os diversos tipos de uso de solo (urbano e não urbano) mostram que a cidade neste período é relativamente mais quente. O centro da cidade passa a ser o setor mais quente da região estudada. Para finais do período de verão, a região rural apresenta um leve aumento das temperaturas, chegando a ser 4 ºC mais quente que a região urbana (Figura 2.25.c).

No período de inverno os contrastes de temperatura entre os dois tipos de uso de solo urbano são mais evidentes, apresentando-se o centro da cidade, na maior parte do período, mais quente (Figura 2.26.a). O tipo urbano 1 apresenta maiores valores de temperatura do ar com relação à região não urbana (Figura 2.26.b), ao contrário do que acontece com a diferença entre o tipo urbano 2 e a região não urbana (Figura 2.26.c). Neste caso, o tipo urbano 2 registrou, para a maioria dos horários, temperaturas inferiores às registradas nas regiões não urbanizadas, sendo em alguns períodos até 8 ºC mais frio que a região rural.

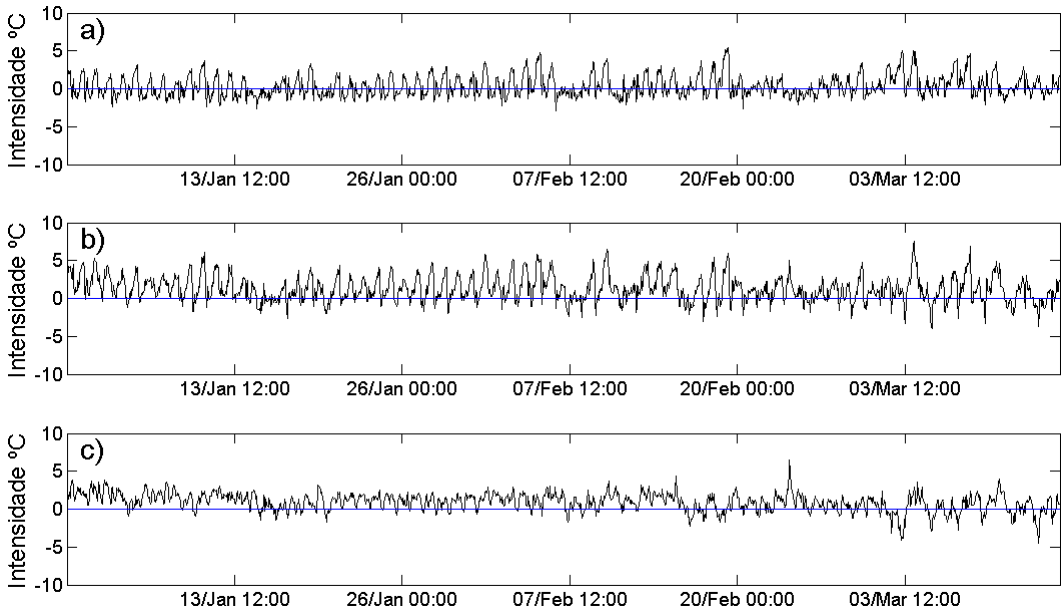


Figura 2.25: Diferença de temperatura entre a) o tipo urbano 1 e o tipo urbano 2, entre b) o tipo urbano 1 e a região não urbana, e c) o tipo urbano 2 e a região não urbana para o período de verão. Escala de tempo em hora local.

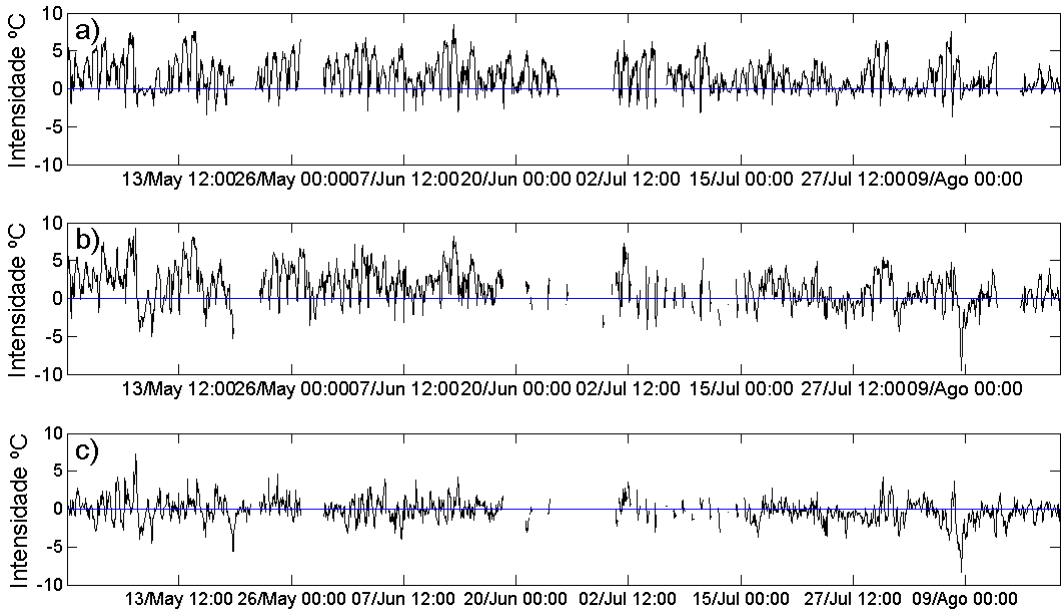


Figura 2.26: Diferença de temperatura entre a) o tipo urbano 1 e o tipo urbano 2, entre b) o tipo urbano 1 e a região não urbana, e c) o tipo urbano 2 e a região não urbana para o período de inverno. Escala de tempo em hora local.

## 2.4 Vento e material particulado

Com a finalidade de determinar o período a ser simulado foi feita uma análise dos padrões de qualidade do ar em Santiago com a informação horária disponível da rede de monitoramento da qualidade do ar (MACAM-II) em conjunto com o comportamento da intensidade do vento nas estações da rede meteorológica do CENMA, mostradas na Figura 2.27. Foram selecionados todos os horários em que as concentrações de $MP_{10}$ ultrapassaram os 150 $\mu g\ m^{-3}$, concentração decretada pelo governo do Chile como limite para considerar o estado de pré-emergência ambiental (MINSEGPRES, 1998). A Figura 2.28 mostra a quantidade de horas por dia em que esta condição foi atingida em pelo menos uma das estações de monitoramento analisadas durante o ano de 2004. É durante o inverno que ocorre a maior quantidade de ultrapassagens dentro do período de 24 horas.

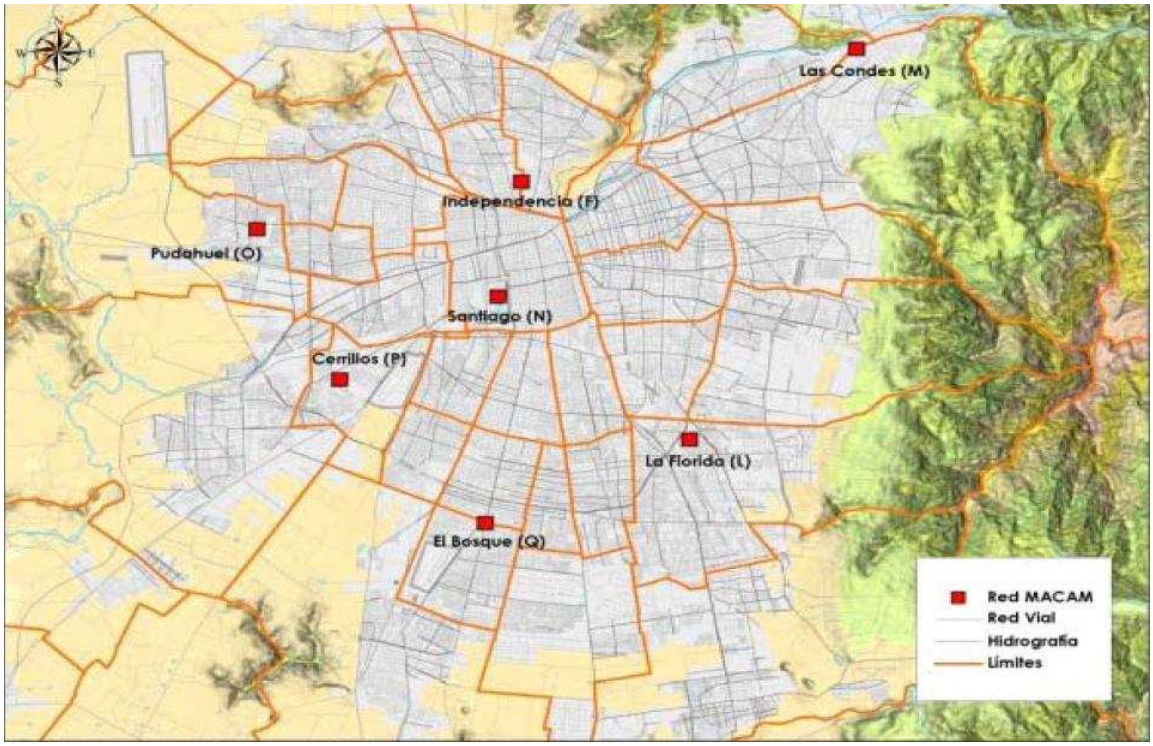


Figura 2.27: Localização das estações da rede de monitoramento da qualidade do ar (MACAM-II) na Região Metropolitana de Santiago. Adaptada de Centro Mario Molina Chile, 2007.

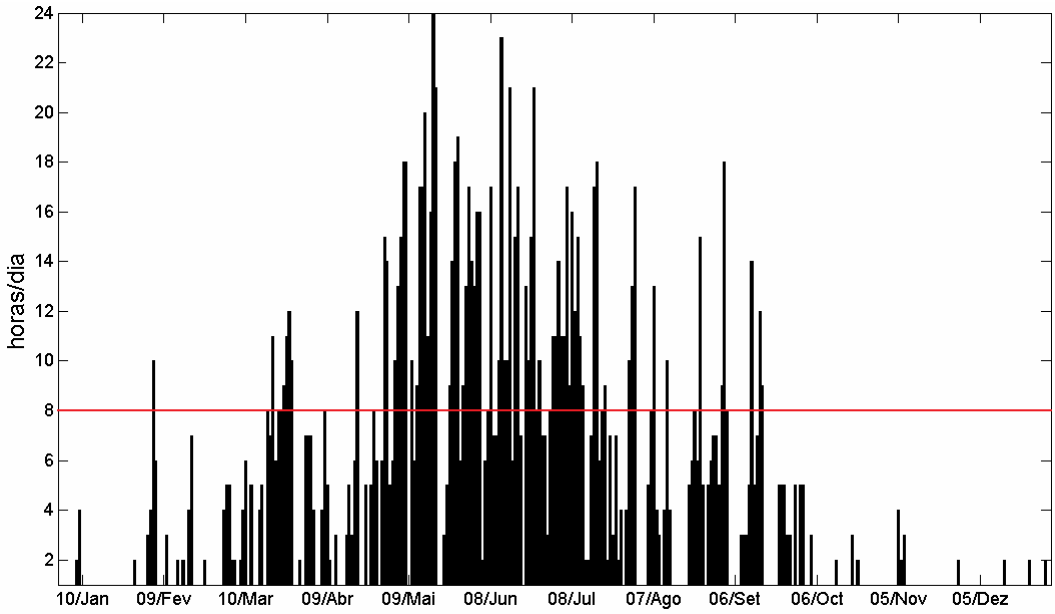


Figura 2.28: Número de horas por dia em que o padrão chileno para o $MP_{10}$ foi ultrapassado em pelo menos uma das estações de monitoramento da rede MACAM-II durante o ano de 2004. A linha vermelha indica o limiar de 8 horas $dia^{-1}$, equivalente a duas vezes a média anual de horas de ultrapassagem do padrão.

A média anual de horas com concentrações superiores a 150 µg $m^{-3}$ foi de 4 horas $dia^{-1}$ para o ano de 2004. Pode ser observado que, para alguns dias, principalmente no período de inverno, podem ocorrer 24 horas com pelo menos uma estação de monitoramento da qualidade do ar que registre concentrações acima do valor permitido. A linha vermelha na Figura 2.28 mostra o limiar em que a média anual de horas por dia é ultrapassada em duas vezes. Dada a maior quantidade de horas por dia que ultrapassaram este limiar no período entre maio e julho em comparação com os restantes meses do ano, uma análise das concentrações de material particulado desse período foi realizada.

Nas Figuras 2.29 a 2.31 podem ser observadas as concentrações horárias de $MP_{10}$ para o período entre maio e julho.

Para o mês de maio (Figura 2.29), as concentrações mais elevadas foram registradas no setor oriental da Grande Santiago. É identificado ainda o período de transição do regime de verão para o inverno em que as concentrações são mais elevadas no setor mais próximo da Cordilheira dos Andes, pois o vento de escala sinótica dominante de sudoeste faz com que os poluentes sejam advectados e confinados nessa região. Os mínimos e máximos para todas as estações durante o mês de maio estão em fase. Mínimos nas concentrações, que podem até atingir o nível zero no ar da GS, estão associados às passagens de frentes na região central do Chile.

Nos meses de junho (Figura 2.30) e julho (Figura 2.31) o padrão das concentrações de $MP_{10}$ é similar para todas as estações de monitoramento. Devido à maior atividade frontal que se observa neste período, as concentrações de poluentes não atingem níveis críticos, salvo quando existem condições de máxima estabilidade atmosférica, onde as concentrações ficam próximas a 600 µg $m^{-3}$. Outra diferença importante e característica do período de inverno é o aumento da concentração dos poluentes no setor oeste da GS.

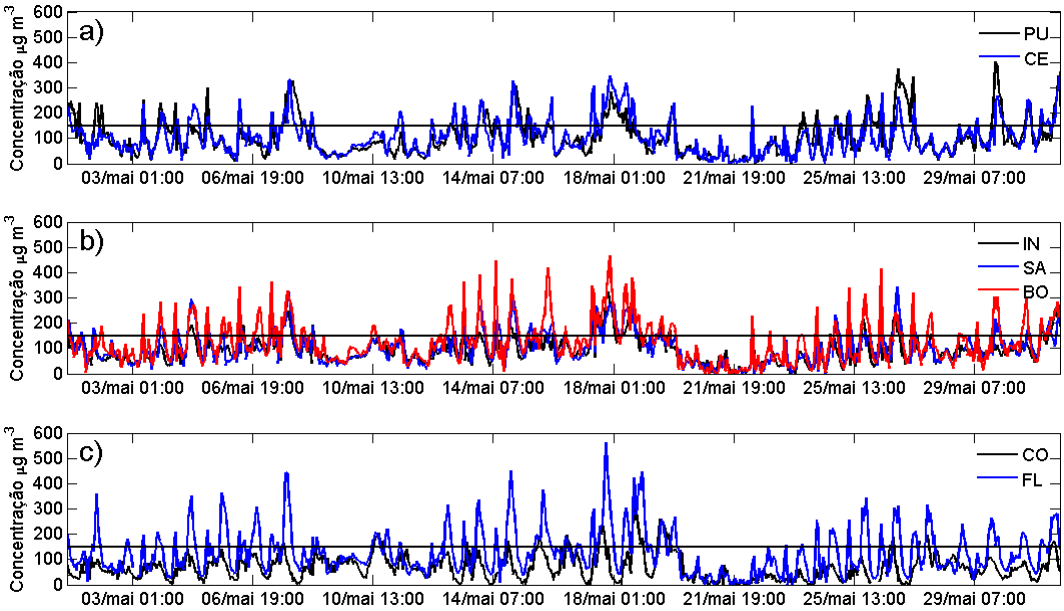


Figura 2.29: Concentração de $MP_{10}$ horária para o mês de maio de 2004 para as estações de a) Pudahuel (PU) e Cerrillos (CE), na zona oeste, b) Independencia (IN), Santiago (SA) e El Bosque (BO), na zona central, e c) Las Condes (CO) e La Florida (FL), na zona leste da Região Metropolitana de Santiago.

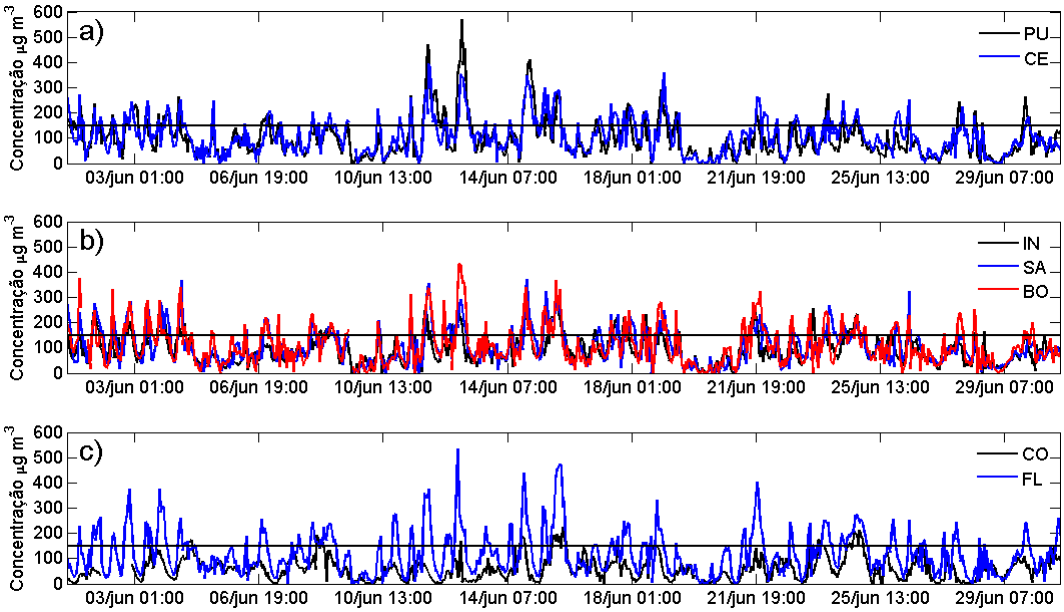


Figura 2.30: Concentração de $MP_{10}$ horária para o mês de junho de 2004 para as estações de a) Pudahuel (PU) e Cerrillos (CE), na zona oeste, b) Independencia (IN), Santiago (SA) e El Bosque (BO), na zona central, e c) Las Condes (CO) e La Florida (FL), na zona leste da Região Metropolitana de Santiago.

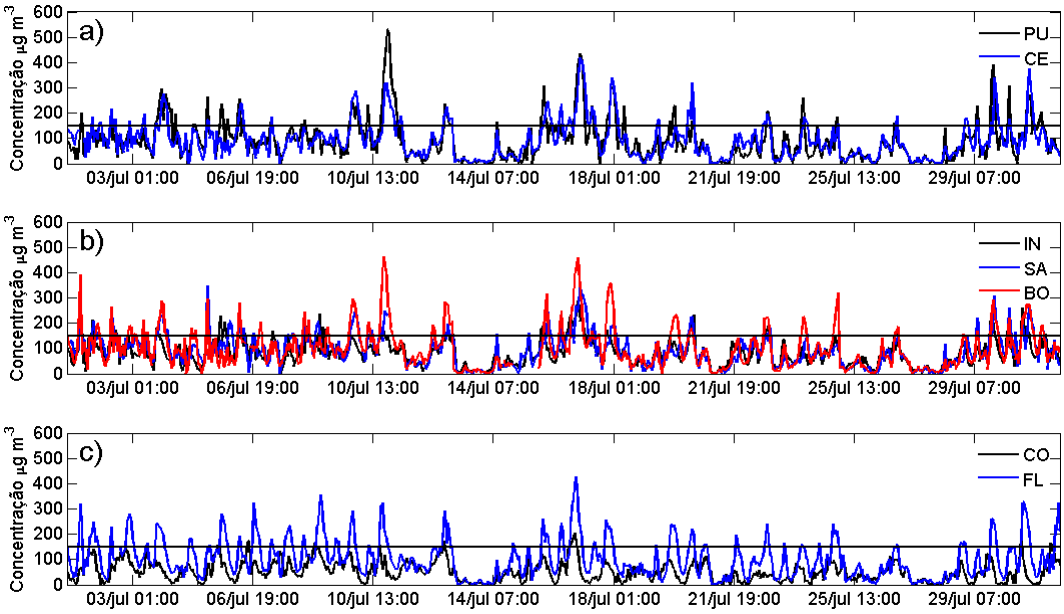


Figura 2.31: Concentração de $MP_{10}$ horária para o mês de julho de 2004 para as estações de a) Pudahuel (PU) e Cerrillos (CE), na zona oeste, b) Independencia (IN), Santiago (SA) e El Bosque (BO), na zona central, e c) Las Condes (CO) e La Florida (FL), na zona leste da Região Metropolitana de Santiago.

Quanto à intensidade do vento registrado para os meses de maio a julho (Figuras 2.32 a 2.34) é possível observar diferenças notáveis entre o que acontece dentro e fora da cidade. Para todo o período, a intensidade do vento é menor devido ao efeito das construções. Máximos na intensidade do vento neste período estão associados à passagem de sistemas frontais na região. Valores neste tipo de evento podem ultrapassar os 8 $ms^{-1}$ fora da cidade, enquanto que dentro dela, dificilmente ultrapassam os 5 $ms^{-1}$. Dentro da cidade, também é possível observar diferenças nas intensidades do vento registrado para o período. A estação de La Platina (PL) foi a que registrou os maiores valores de intensidade do vento dentro dos limites urbanos. Na estação de El Manzano (MA) é possível observar picos maiores de intensidade do vento quando comparada com os registros de El Paico (PA). Esta diferença pode estar associada a efeitos da topografia na localização da estação de MA, mais próxima da cordilheira dos Andes.

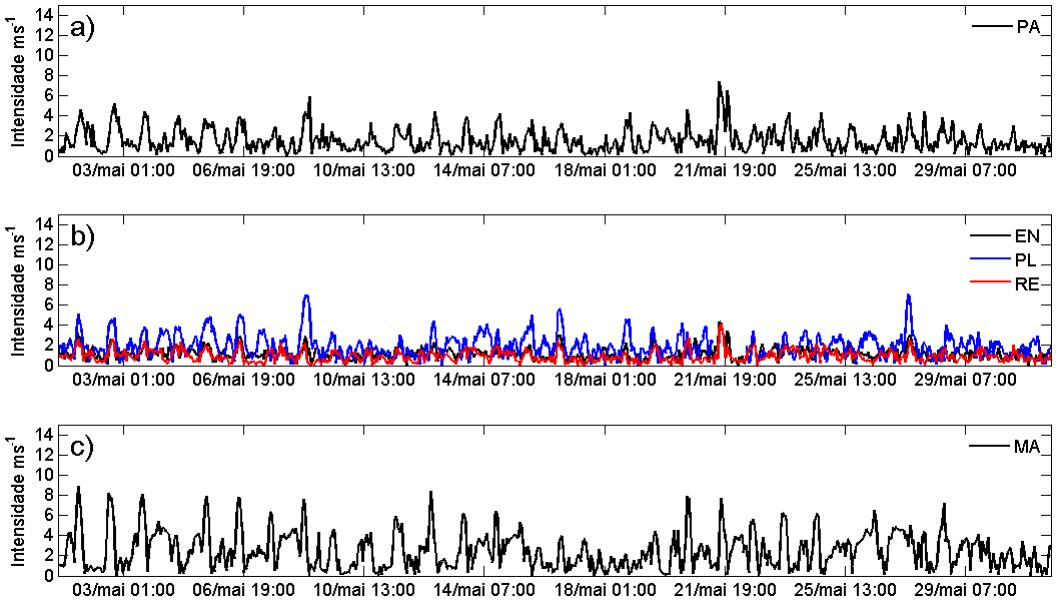


Figura 2.32: Intensidade do vento horário para o mês de maio de 2004 para as estações de a) El Paico (PA), b) Entel (EN), La Platina (PL) e La Reina (RE), e c) El Manzano (MA), na Grande Santiago e arredores.

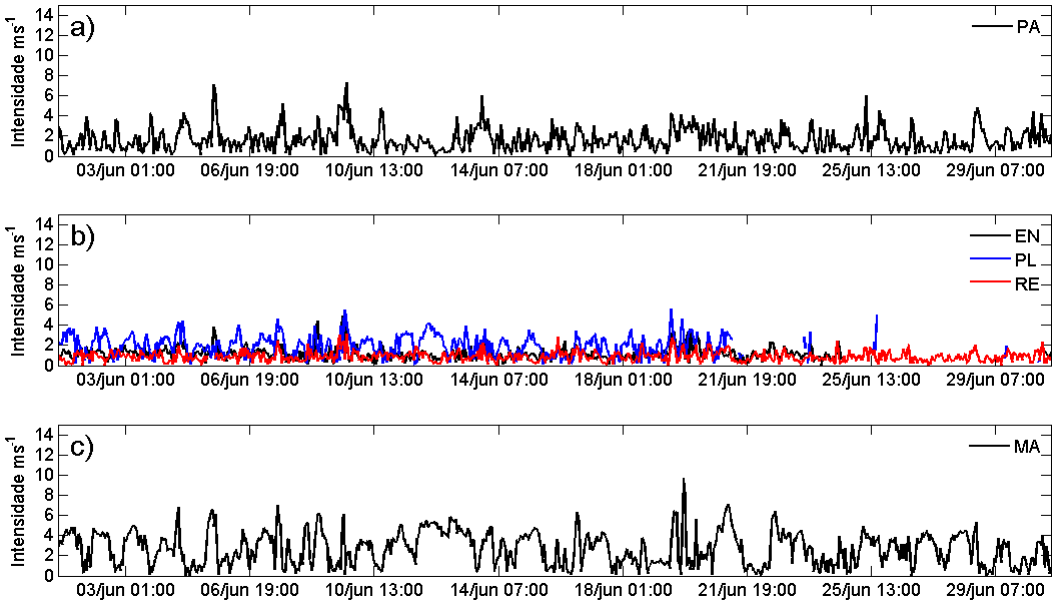


Figura 2.33: Intensidade do vento horário para o mês de junho de 2004 para as estações de a) El Paico (PA), b) Entel (EN), La Platina (PL) e La Reina (RE), e c) El Manzano (MA), na Região Metropolitana de Santiago e arredores.

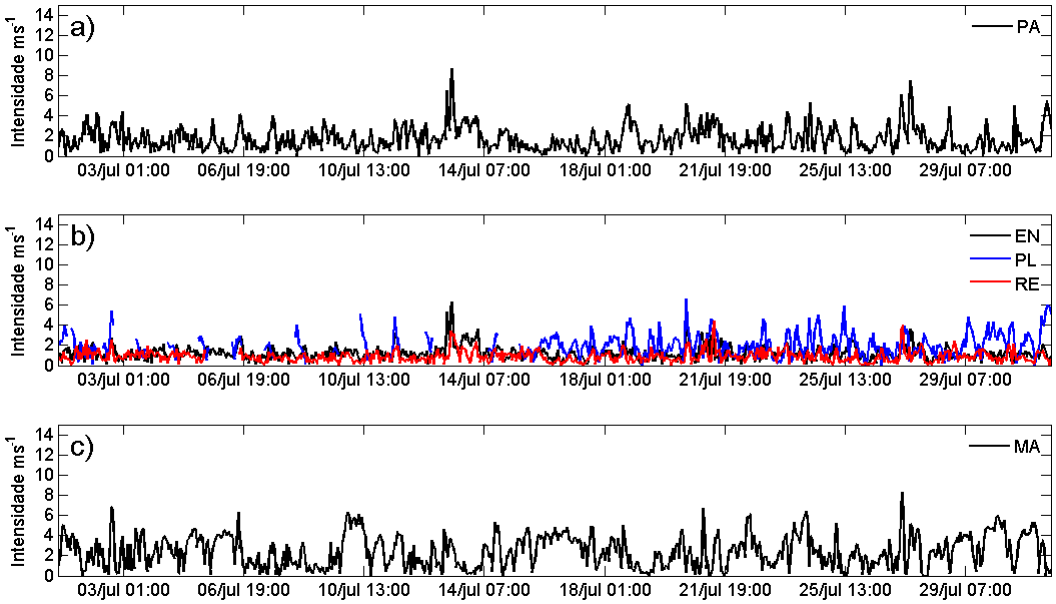


Figura 2.34: Intensidade do vento horário para o mês de julho de 2004 para as estações de a) El Paico (PA), b) Entel (EN), La Platina (PL) e La Reina (RE), e c) El Manzano (MA), na Região Metropolitana de Santiago e arredores.

O aumento das concentrações de material particulado visto nas Figuras 2.29, 2.30 e 2.31 está ligado à diminuição na intensidade do vento no mesmo período. Exemplos deste tipo de evento podem ser vistos nos dias 7, 18 e 27 de maio, 3 e 12 de junho, e 11, 17 e 30 de julho. Dado os efeitos topográficos sobre o vento, a diminuição na intensidade deste não é claramente visível na estação de El Manzano.

A diferença na intensidade do vento entre as estações analisadas fica mais clara ao fazer a comparação entre o que acontece nos dois tipos urbanos mencionados na seção 2.3.1.4. e a região não urbanizada. Na Figura 2.35 a pode ser observado que a intensidade do vento no tipo urbano 1 é menor quando comparada com a intensidade do vento registrada nas estações pertencentes ao tipo urbano 2, salvo em alguns períodos durante o inverno. Ao comparar o que acontece com a intensidade do vento entre o tipo urbano 1 e a região não urbanizada (Figura 2.35.b) e o vento registrado no tipo urbano 2 com relação ao registrado na região não urbanizada (Figura 2.35.c) fica mais claro o efeito desintensificador da cidade sobre a intensidade do vento.

Dados estes antecedentes, o período entre os dias 17 e 19 de maio de 2004 será utilizado para estudar com maior detalhe, mediante a utilização de modelagem numérica da atmosfera, os efeitos de brisas e ilha de calor na região metropolitana de Santiago.

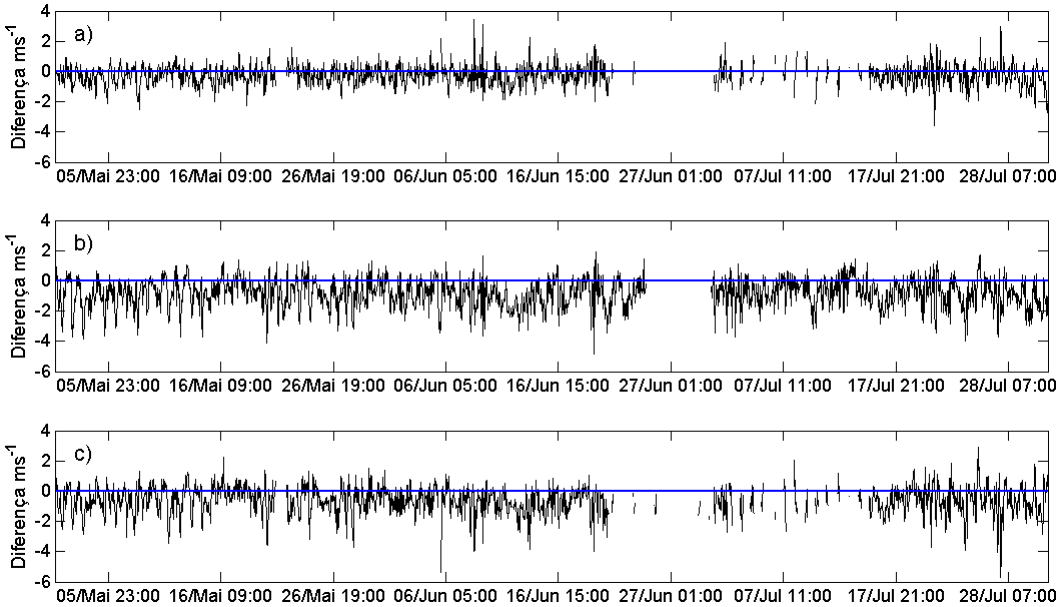


Figura 2.35: Diferença de intensidade do vento entre (a) o tipo urbano 1 e o tipo urbano 2, entre (b) o tipo urbano 1 e a região não urbana, e (c) o tipo urbano 2 e a região não urbana.

# 3. Estudo Numérico

O período definido na seção 2.4 será estudado nesta seção, mediante modelagem numérica, a fim de entender com maior detalhe as características das circulações locais que se formam na região central do Chile. Foi realizada uma atualização do arquivo de uso de solo para as regiões urbanas localizadas no Chile central a fim de avaliar, de forma mais realística, as influências que estas exercem sobre a atmosfera. Também será descrito o modelo numérico utilizado, as parametrizações mais importantes utilizadas no desenvolvimento deste trabalho, as configurações das simulações realizadas, assim como os resultados obtidos nos experimentos numéricos.

## 3.1 Atualização do arquivo de uso de solo para a Região Central do Chile

A base de dados original sobre a ocupação e uso de solo na região central do Chile fornecida pelo *U.S. Geological Survey* (USGS), mais precisamente sobre as áreas urbanas da Grande Valparaíso (Figura 3.1.a) e Grande Santiago (Figura 3.1.b), não reflete a condição atual da ocupação de solo urbano nessa região.

Mediante a utilização de imagens do satélite CBERS-2 (*China-Brazil Earth Resources Satellite*), criou-se um arquivo atualizado de uso de solo urbano com resolução de 500 m. A criação deste arquivo foi feita no Sistema de Informações Geográficas (SIG) SPRING[4] (CÂMARA, et al., 1996), desenvolvido pela Divisão de Processamento de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DPI-INPE) do Brasil.

As imagens utilizadas na classificação foram obtidas do Catálogo de Imagens da DPI-INPE e correspondentes ao sensor CCD (Câmera Imageadora de Alta Resolução) nas bandas 2, 3 e 4.

[4] http://www.dpi.inpe.br/spring/

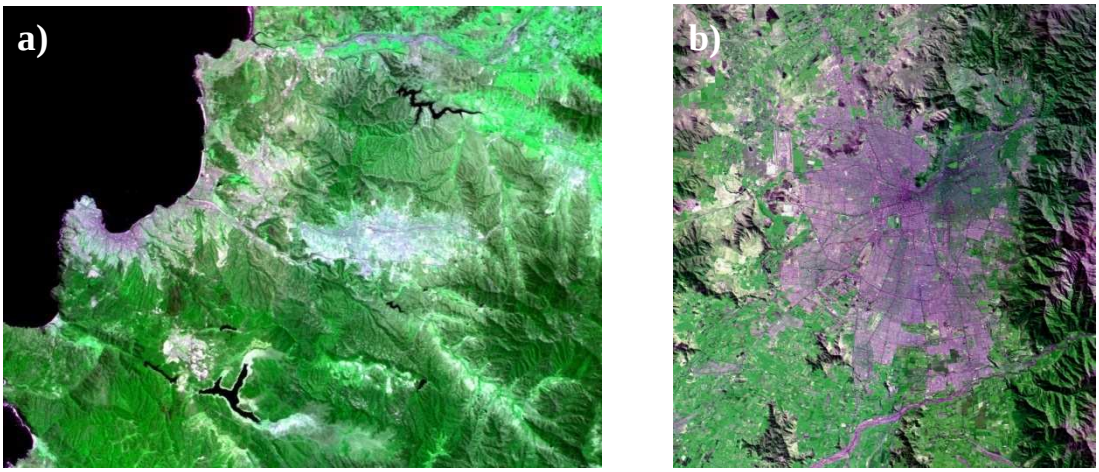


Figura 3.1: Composição das bandas 2, 3 e 4 do sensor CCD do satélite CBERS-2 mostrando as áreas urbanas da a) Grande Valparaíso e b) Grande Santiago.

### 3.1.1 Processo de classificação de imagens

O método utilizado neste processo foi o de classificação supervisionada por regiões com o classificador Bhattacharya, no qual regiões homogêneas foram identificadas mediante o algoritmo de segmentação conhecido como *crescimento por regiões.* Adquiriram-se amostras de treinamento baseando-se na composição das imagens correspondentes às três bandas mencionadas anteriormente. Estas amostras correspondem a características similares de uso de solo entre as regiões determinadas no processo de segmentação.

O classificador Bhattacharya utiliza as amostras de treinamento adquiridas para estimar a função densidade de probabilidade (FDP) para as diversas classes, avaliando a distância de Bhattacharya para cada região segundo a classe candidata. A região avaliada é atribuída à classe cuja distância for menor.

### 3.1.2 Resultados do processo de classificação

Consideraram-se na classificação do uso de solo urbano dois tipos diferentes dentro das cidades. O tipo urbano 1 representa uma maior concentração de construções de maior altura, enquanto o tipo urbano 2 representa construções de pequeno e médio porte.

Na Figura 3.2.a observa-se o arquivo obtido mediante a classificação de imagens do CBERS-2 com resolução espacial de 500 m. O tipo de solo urbano 1 foi identificado somente na parte central da Grande Santiago (GS). A Figura 3.2.b mostra, para fins de comparação, o arquivo original de uso de solo utilizado no modelo, cuja resolução espacial é de 1 km.

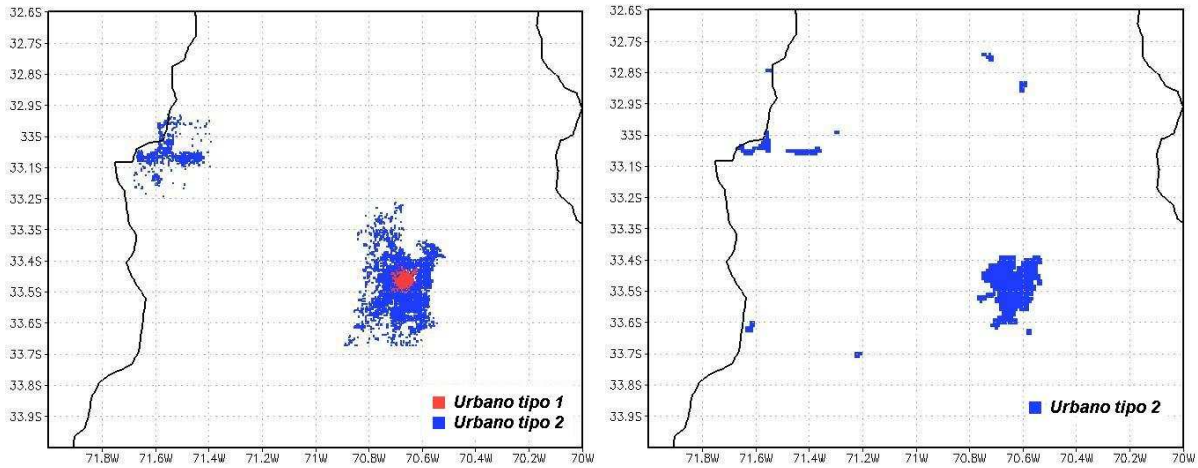


Figura 3.2: Uso de solo urbano obtido da classificação com o (a) SPRING, com resolução de 500 m, e (b) do arquivo original do USGS, com resolução espacial de 1 km. Em azul indica-se o tipo de solo urbano 2 e em vermelho o tipo de solo urbano 1 (muito urbanizado).

É possível notar diferenças significativas entre os dois arquivos, mas as principais estão relacionados com a extensão da mancha urbana e a inclusão de um novo tipo de uso de solo mais urbanizado na parte central da Grande Santiago.

Na elaboração do novo arquivo de uso de solo a ser considerado nas simulações com o modelo, foi feita uma superposição de ambos os arquivos de uso de solo mostrados na Figura 3.2, obtendo-se como resultado o uso de solo urbano mostrado na Figura 3.3. Este arquivo tem resolução espacial de 1 km.

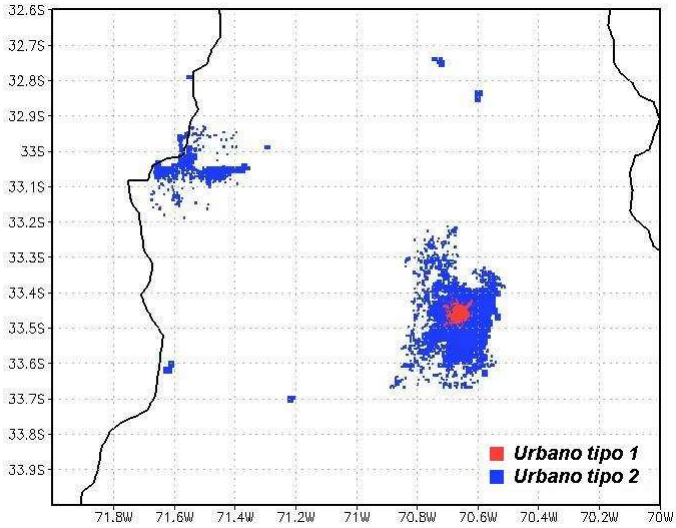


Figura 3.3: Tipos de uso de solo urbano a serem utilizados nas simulações com o BRAMS para a região central do Chile. Em azul indica-se o tipo de solo urbano 2 e em vermelho o tipo de solo urbano 1 (muito urbanizado).

## 3.2 Descrição do modelo numérico

O modelo utilizado neste trabalho corresponde à versão 2.0 do *Brazilian Regional Atmospheric Modeling System* (BRAMS), o qual é baseado no RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*; COTTON et al., 2003). Este modelo tem como base o conjunto completo de equações que governam a evolução do estado atmosférico, incluindo parametrizações dos diversos processos físicos presentes nestas equações. Dado o esquema de grades múltiplas disponível no modelo, é possível resolver as equações de forma simultânea para as diferentes grades utilizadas. Grades de maior resolução são utilizadas para estudar com maior detalhe fenômenos atmosféricos de escalas pequenas, como são as circulações termicamente induzidas ou as forçadas pela topografia, como é o caso do presente trabalho em que são simulados os efeitos de ilha de calor urbana numa região sob forte influência da topografia. Grades de menor resolução servem para modelar fenômenos atmosféricos de grande escala, os quais podem interagir com os sistemas de escalas menores (mesoescala) e, também, para fornecer as condições iniciais e de contorno para as grades de maior resolução.

Para a condição de fronteira inferior, o BRAMS representa os processos de interação entre a atmosfera e a superfície mediante a utilização do LEAF-3 (*Land Ecosystem-Atmosphere*

*Feedback model*, WALKO et al., 2000) para áreas cobertas por vegetação, água ou solo nu. O *Town Energy Budget* (TEB; MASSON, 2000; FREITAS, 2003; FREITAS, et al., 2007) é utilizado na representação dos processos de interações entre as áreas urbanizadas e a atmosfera. Alguns aspectos sobre estes módulos dentro do BRAMS serão apresentados a seguir.

### 3.2.1 Land Ecosystem-Atmosphere Feedback Model 3

O LEAF-3 é uma representação das características da superfície tais como vegetação, solo, neve, lagos e oceanos e da influência de uns sobre os outros e sobre a atmosfera. Inclui equações prognósticas para temperatura do solo e umidade para várias camadas, temperatura da vegetação e água superficial, incluindo orvalho e precipitação interceptada, massa da cobertura de neve e energia térmica para múltiplas camadas, assim como também contém equações para a temperatura e razão de mistura do vapor d'água no dossel. Os termos de troca nestas equações prognósticas incluem trocas turbulentas, condução do calor, difusão de água e percolação em camadas de solo e neve, transferências radiativas de onda longa e curta, transpiração e precipitação. Os fluxos de calor latente para a evaporação do solo, da água interceptada pela vegetação e da transpiração das plantas são calculados separadamente.

O LEAF-3 permite a subdivisão de cada célula de grade em diferentes tipos de superfície em cada célula (*patches*). Esses *patches* (Figura 3.4) têm a finalidade de representar de melhor forma variações nas características da superfície (tipo de solo, umidade, inclinação, tipo de vegetação, corpos de água). Cada tipo de *patch* tem sua própria vegetação, ar do dossel e camadas de solo e neve e interage com a coluna de ar acima. As equações prognósticas são evoluídas para cada componente ou *patch* na célula de grade.

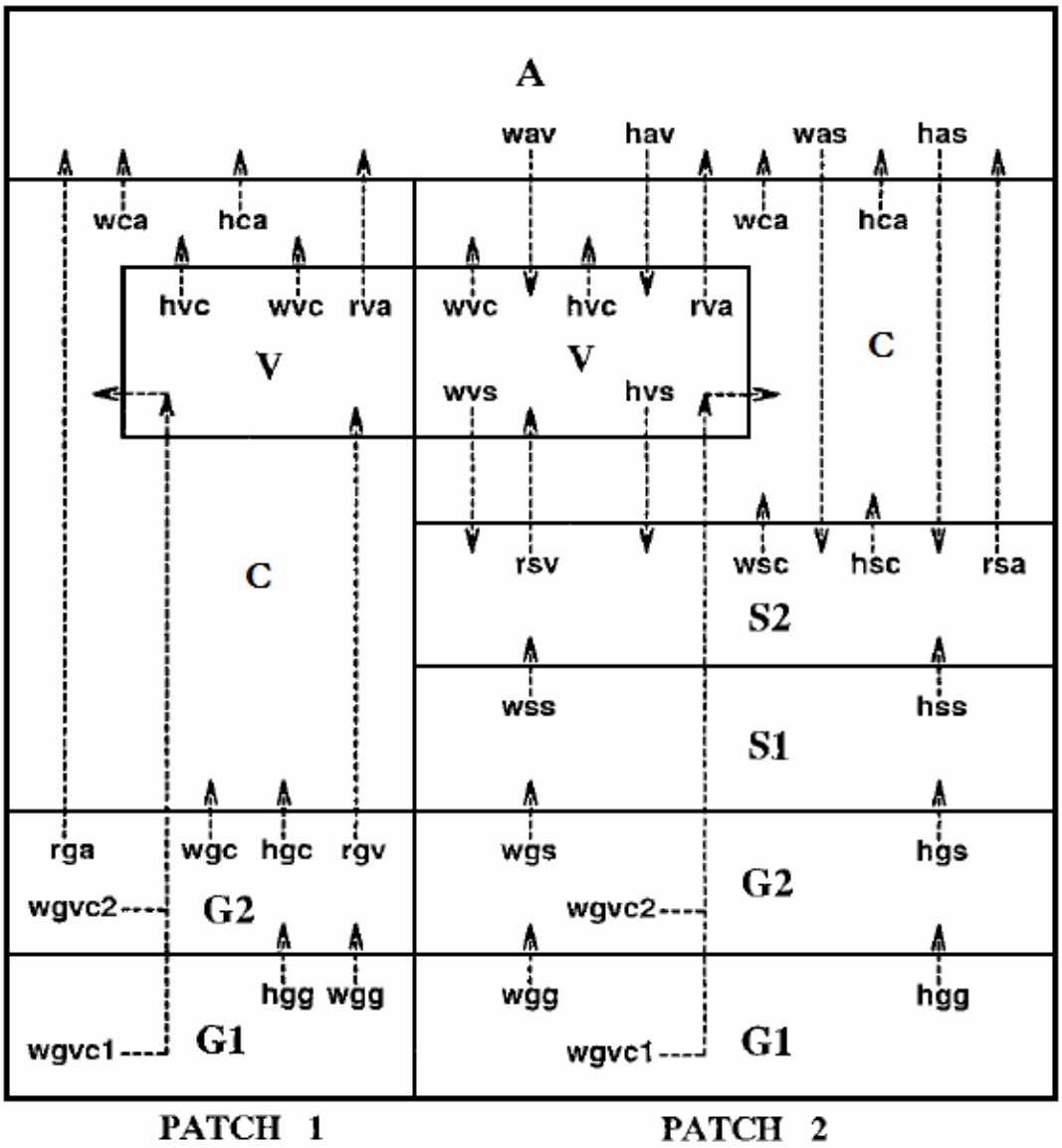


Figura 3.4: Esquema da transferência de calor e umidade entre os elementos no LEAF-3 e uma célula de grade com dois *patches*, onde A indica a atmosfera, C o ar no dossel, V a vegetação, S indica neve e o solo está indicado pela letra G. Somente um dos *patches* contém neve. As setas indicam os sentidos dos fluxos, a primeira letra do texto que acompanha as setas indica a que está associado o fluxo (transferência de calor [h], transferência de água [w] ou transferência radiativa de onda longa [r]); a segunda e terceira letra indicam a fonte e receptor, respectivamente. Fonte: WALKO et al. (2000).

Na definição dos parâmetros da vegetação o LEAF-3 utiliza o BATS (*Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme*; DICKINSON et al., 1986) e os parâmetros fornecidos pelo *National Aeronautics and Space Administration/Land Data Assimilation Systems*

(NASA/LDAS)[5]. Os parâmetros de vegetação adotados no BATS incluem índice de área foliar, comprimento de raízes, altura do plano de deslocamento, rugosidade, albedo e emissividade.

### 3.2.2 Town Energy Budget (TEB)

Na versão do modelo BRAMS que foi utilizada neste estudo, o esquema TEB funciona como uma sub-rotina do LEAF-3, e, portanto, é acionado somente para as células de grade que são reconhecidas como áreas urbanas. Esta parametrização urbana tem como objetivo simular os fluxos turbulentos, bem como as interações dinâmicas e termodinâmicas que surgem entre a atmosfera e as cidades.

O TEB é um esquema construído considerando uma aproximação de cânion formado pela conjunção de duas faces de paredes de prédios e uma rua. Dada a complexidade existente na superfície da cidade, o balanço de energia é calculado considerando três partes: telhados, paredes e ruas. Os efeitos da orientação para as paredes e ruas são mediados. É possível incluir ao balanço de energia os efeitos da neve (quando presente) nas ruas e telhados. Podem ser consideradas várias camadas para cada elemento (geralmente 3 camadas para o telhado, parede e rua) no tratamento dos fluxos de condução para/de o interior das construções (Figura 3.5).

Para a representação das regiões urbanas, o esquema TEB faz as seguintes considerações:

1. Os prédios têm a mesma altura e largura;
2. Os prédios estão localizados ao longo de ruas idênticas. O comprimento das ruas é considerado muito maior que a largura.
3. Qualquer orientação de rua é possível e todas existem com a mesma probabilidade.

Paredes ensolaradas ou sombreadas são tratadas em conjunto uma vez que estas são idênticas para todos os processos físicos, com exceção da radiação solar direta.

[5] http://ldas.gsfc.nasa.gov

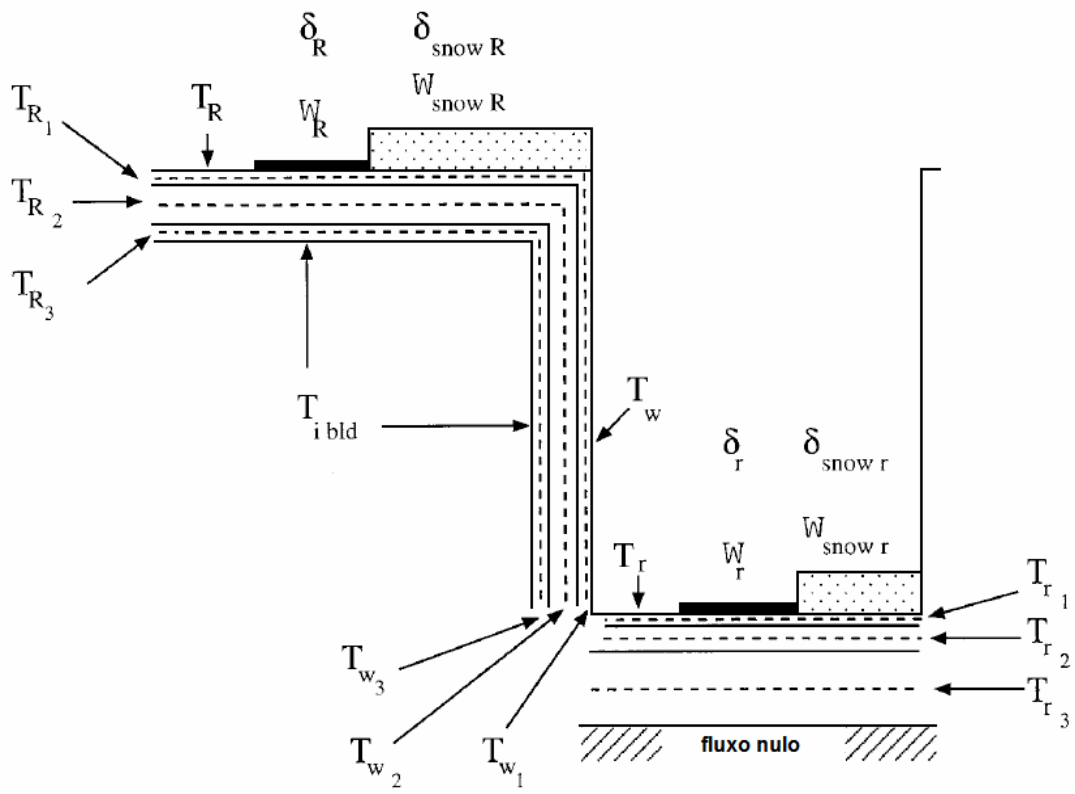


Figura 3.5: Cânion formado por dois prédios considerando 3 camadas para cada elemento. $T_r$, $T_w$ e $T_R$ indicam temperaturas para as camadas da rua, paredes e telhados. $W_r$ e $W_R$ indicam o conteúdo de água na superfície e telhados e $W_{snow\ r}$ e $W_{snow\ R}$ o conteúdo de água na superfície e telhados. $\delta_R$ e $\delta_r$ correspondem as frações de água para os telhados e as ruas, $\delta_{snow\ R}$ e $\delta_{snow\ r}$ ás frações de neve para os telhados e as ruas. $T_{i\ bld}$ é a temperatura interna dos prédios. Adaptada de MASSON (2000).

Devido à atividade humana nas cidades, calor e umidade de origem antropogênica são liberados para atmosfera. As principais fontes antropogênicas associadas aos centros urbanos derivam-se da atividade comercial e domiciliar e da combustão veicular e industrial.

A temperatura interna dos prédios é independente da temperatura externa e se assume para esta um valor constante. O calor é conduzido através das paredes e telhados para a atmosfera. Os fluxos de calor e umidade associados à combustão são especificados pelo usuário dependendo da região de estudo. Os fluxos associados ao tráfico veicular modificarão o balanço de ar dentro do cânion, enquanto que os fluxos associados à atividade industrial influenciarão a atmosfera diretamente.

### 3.3 Metodologia

A fim de avaliar as características das circulações que se formam na região central do Chile foram realizados dois experimentos com o modelo BRAMS para o período entre as 00 UTC do dia 17 de maio e as 00 UTC do dia 19 de maio de 2004. A simulação controle (simulação com cidades; SCC) consiste numa representação realista, considerando as características das regiões urbanas localizadas no Chile central e sua interação com a atmosfera mediante a utilização do TEB. Na simulação sem cidades (SSC), estas regiões foram substituídas pelo tipo de vegetação característico do entorno, a fim de poder avaliar o impacto, principalmente da Grande Santiago, nas variáveis meteorológicas.

Nas simulações utilizaram-se três grades aninhadas (Figura 3.6) abrangendo grande parte da América do Sul (grade 1), e a região central do Chile (grades 2 e 3). A grade 1, centrada em 35,00ºS – 70,00ºW, tem espaçamento de grade horizontal homogêneo de 64 km. A grade 2, com espaçamento de 16 km entre cada ponto de grade, está centrada em 33,54ºS – 71,00ºW. A grade de maior resolução (G3), com espaçamento horizontal de 4 km, está centrada em 33,35ºS – 71,50ºW.

A condição sinótica do período será analisada utilizando a grade de menor resolução. As outras grades servirão para estudar as circulações de mesoescala que se formam sobre a região central do Chile.

Os arquivos de topografia do USGS (*U.S. Geological Survey*), com resolução espacial de 1 km, foram utilizados sem nenhum tipo de modificação para ambas as simulações. Estes arquivos podem ser obtidos na página[6] do BRAMS do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). A informação meteorológica fornecida para condição inicial e de fronteira lateral para as simulações foi obtida do *Global Forecasting System* (GFS) com

[6] http://brams.cptec.inpe.br

resolução espacial de 1º x 1º. Para a temperatura da superfície do mar foram utilizados valores semanais para o período simulado.

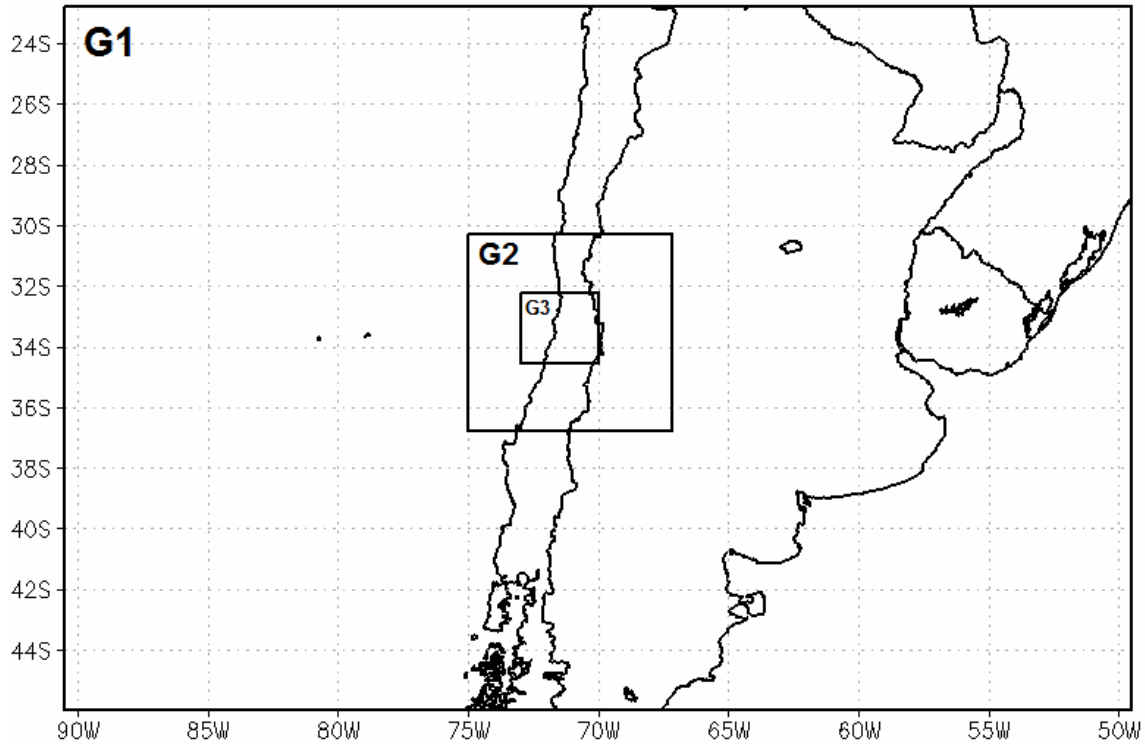


Figura 3.6: Grades utilizadas nas simulações com o modelo BRAMS. G1 corresponde à grade com espaçamento horizontal de 64 km, a grade G2 tem espaçamento de 16 km e a grade G3 tem espaçamento horizontal de 4 km.

Na Tabela 3.1 podem ser observadas algumas das variáveis e parametrizações em comum utilizadas nas simulações.

Dentro das considerações feitas para as regiões urbanas temos:

- a temperatura mínima interna das construções foi considerada igual a 12 ºC;
- o número de camadas que constituem a parede e o telhado das construções, assim como a rua, é igual a três;
- foram considerados dois tipos de uso de solo urbano.

Tabela 3.1: Opções disponíveis no BRAMS, utilizadas neste estudo.

| VARIÁVEL | OPÇÃO UTILIZADA |
|---|---|
| Número de pontos para nudging nas fronteiras laterais | 5 |
| Escala de tempo para nudging nas fronteiras laterais | 3600 s |
| Escala de tempo para nudging no topo do domínio | 1800 s |
| Nudging central | 10800 s |
| Condição de fronteira lateral | Klemp e Wilhelmson (1978) |
| Frequência da atualização na tendência de radiação | 1800 s |
| Parametrização de radiação de onda curta/longa | Chen e Cotton (1983) |
| Número camadas do solo | 4 |
| Profundidade camadas solo | -2,0 m , -1,50 m , -0,25 m , -0,05 m |
| Grau de saturação das camadas de solo | 0,65 , 0,59 , 0,57 , 0,50 |
| Parametrização de turbulência | Deformação anisotrópica (Smagorinsky, 1963) baseada nas modificações das formulações de Lilly (1962) e Hill (1974). |

Alguns dos parâmetros utilizados dentro do esquema TEB para diferenciar os tipos de solos urbanos na simulação com cidades são listados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Valores de alguns parâmetros utilizados dentro do TEB para a simulação com cidades.

| VARIÁVEL | TIPO URBANO 1 | TIPO URBANO 2 |
|---|---|---|
| Comprimento de rugosidade | 3 m | 0,5 m |
| Fração ocupada por prédios em cada grade | 0,5 | 0,7 |
| Altura das construções | 50 m | 5 m |
| Taxa vertical/horizontal das construções | 4,4 | 2,4 |
| Valor máximo de calor sensível associado à fonte veicular | 90 W $m^2$ | 60 W $m^2$ |
| Valor máximo de calor latente associado à fonte veicular | 10 W $m^2$ | 5 W $m^2$ |
| Valor máximo de calor sensível associado à fonte industrial | 10 W $m^2$ | 14 W $m^2$ |
| Valor máximo de calor latente associado à fonte industrial | 30 W $m^2$ | 50 W $m^2$ |

## 3.4 Resultados

Os resultados serão apresentados começando por uma análise das condições sinóticas atuantes no período. Em seguida, uma análise das algumas variáveis meteorológicas sobre a região central do Chile será apresentada com maior detalhamento.

### 3.4.1 Análise sinótica

O campo de pressão reduzida ao nível do mar, assim como o campo de vento obtido para o nível de 33,4 m para o período entre 00 UTC do dia 17 de maio de 2004 e 00 UTC do dia 19 de maio de 2004 é mostrado na Figura 3.7.

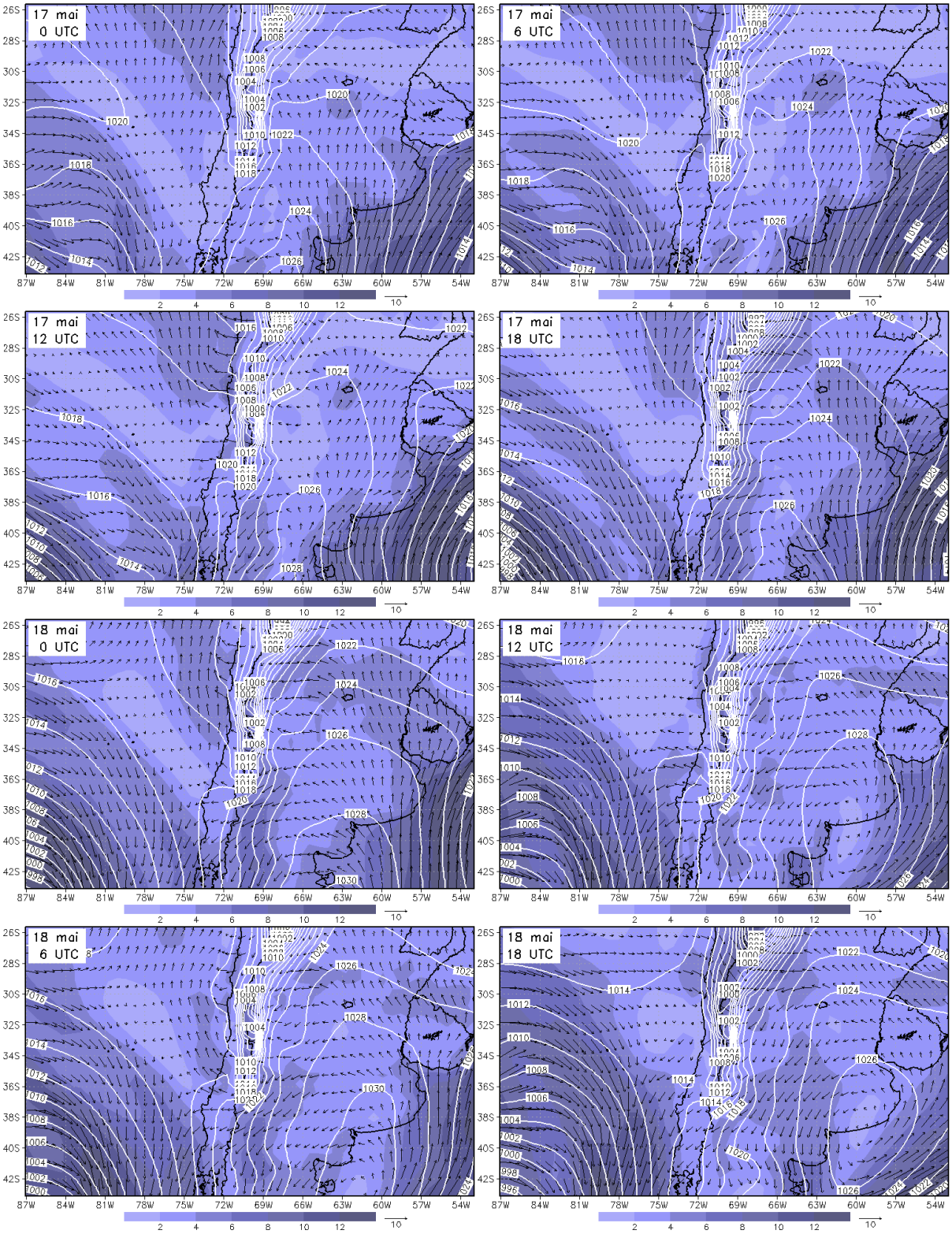


Figura 3.7: Pressão reduzida ao nível do mar (linhas brancas) em hPa, intensidade do vento em $ms^{-1}$ (escala em cores) e vetor vento em $ms^{-1}$ para o primeiro nível do modelo (33,4 m), para o período entre 00 UTC do 17 de maio e 00 UTC do 19 de maio de 2004. Datas e horários nas figuras correspondentes.

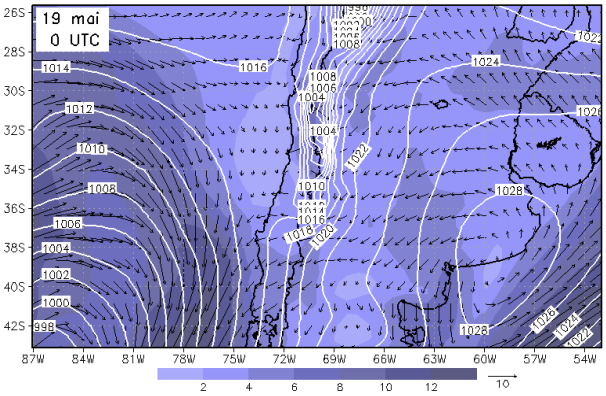


Figura 3.7: Continuação.

Durante o dia 17 é possível observar uma região com ventos fracos próximo do litoral da região central do Chile (entre 33ºS e 35ºS) associado a uma região de pouco gradiente barométrico que se prolonga desde o nordeste do Pacífico. Desde o norte do Chile é possível identificar ventos de características ciclônicas devido ao deslocamento de um cavado (baixa costeira) que não ultrapassa os 32º de latitude sul. Para o dia 18, tem-se um incremento na intensidade do vento até 8 $ms^{-1}$ devido à projeção de uma crista associada a um anticiclone localizado no sul da Argentina e parte do oceano Atlântico. Uma frente fria, que vem se deslocando desde o sudoeste, muda a componente do vento para norte na região central do Chile a partir das 18 UTC do dia 18. O vento, a partir deste horário, volta a se apresentar com intensidades que não ultrapassam os 4 $ms^{-1}$ frente ao litoral central e na região central do Chile.

Esta condição de fraco vento de escala sinótica incrementa as possibilidades de geração e detecção da ilha de calor na Grande Santiago.

Fazendo a diferença do campo de pressão reduzida ao nível do mar e a intensidade do vento da SCC com a SSC (Figura 3.8) observa-se que o campo de pressão apresenta diferenças de máximas da ordem de $\pm 20$ Pa ($\pm 0{,}2$ hPa) nas regiões de ventos mais intensos observados na Figura 3.7. A intensidade do vento também apresenta diferenças, as quais apresentam maiores valores acompanhando a frente que se desloca em direção à costa chilena.

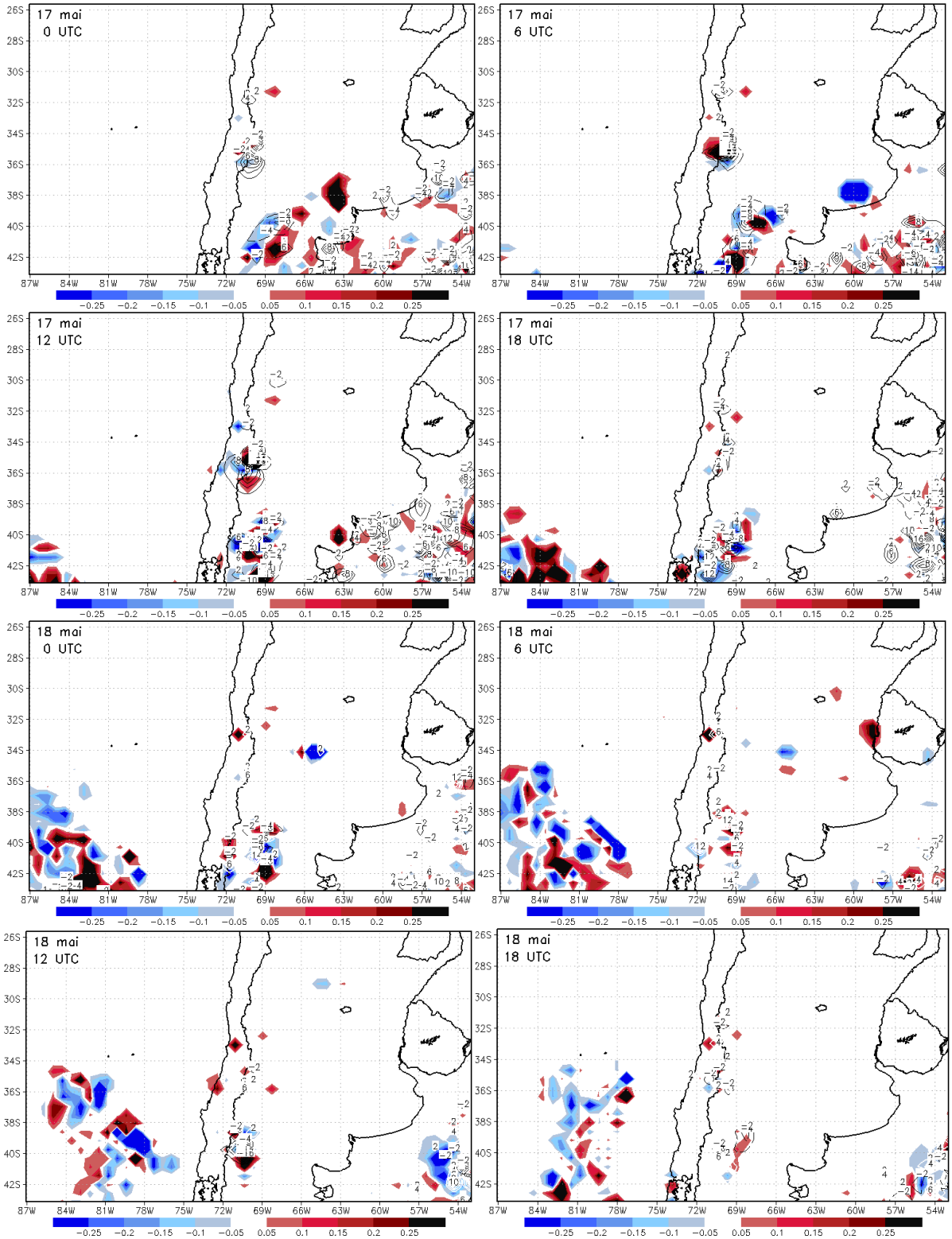


Figura 3.8: Diferença de pressão reduzida ao nível do mar (linhas pretas) em Pa, intensidade do vento (escala em cores) em $ms^{-1}$ e vetor vento em $ms^{-1}$ para o primeiro nível do modelo (33,4 m), para o período entre 00 UTC do 17 de maio e 00 UTC do 19 de maio de 2004. Datas e horários nas figuras correspondentes.

### 3.4.2 Temperatura do ar, vento e umidade relativa

A análise destas variáveis foi realizada com os resultados obtidos a partir da grade de maior resolução. Na Figura 3.9 é mostrada a localização dos tipos urbanos utilizados nesta grade. O circulo que envolve a Grande Santiago (GS) e o retângulo que envolve a Grande Valparaíso (GV) serão utilizados como referência nas figuras que apresentam os resultados tanto da simulação com cidades (SCC) quanto da simulação sem cidade (SSC).

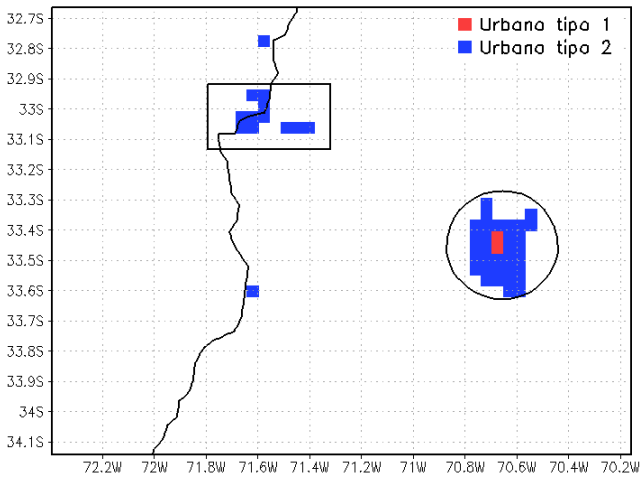


Figura 3.9: Tipos de solo urbano considerados na simulação com cidades. Em vermelho o tipo urbano 1 (mais urbanizado) e em azul o tipo urbano 2 (menos urbanizado).

A Figura 3.10 mostra o campo horizontal de temperatura do ar para o nível de 33,4 m. No domínio simulado, os valores maiores de temperatura são encontrados coincidentes com a localização dos vales presentes na região central do Chile.

Entre 00 UTC e 10 UTC do dia 17 pode ser observada uma diminuição da temperatura no vale onde se encontra localizada a Grande Santiago. A contar das 15 UTC do mesmo dia, o aquecimento domina no vale, atingindo o maior valor em torno das 20 UTC. Este ciclo se repete no segundo dia, sendo observado o mínimo de temperatura próximo das 05 UTC. O valor mínimo para todo o período analisado é superior a 16 ºC no centro da GS. O máximo valor de temperatura, registrado próximo das 21 UTC, não ultrapassa os 22 ºC para ambos os dias na Grande Santiago.

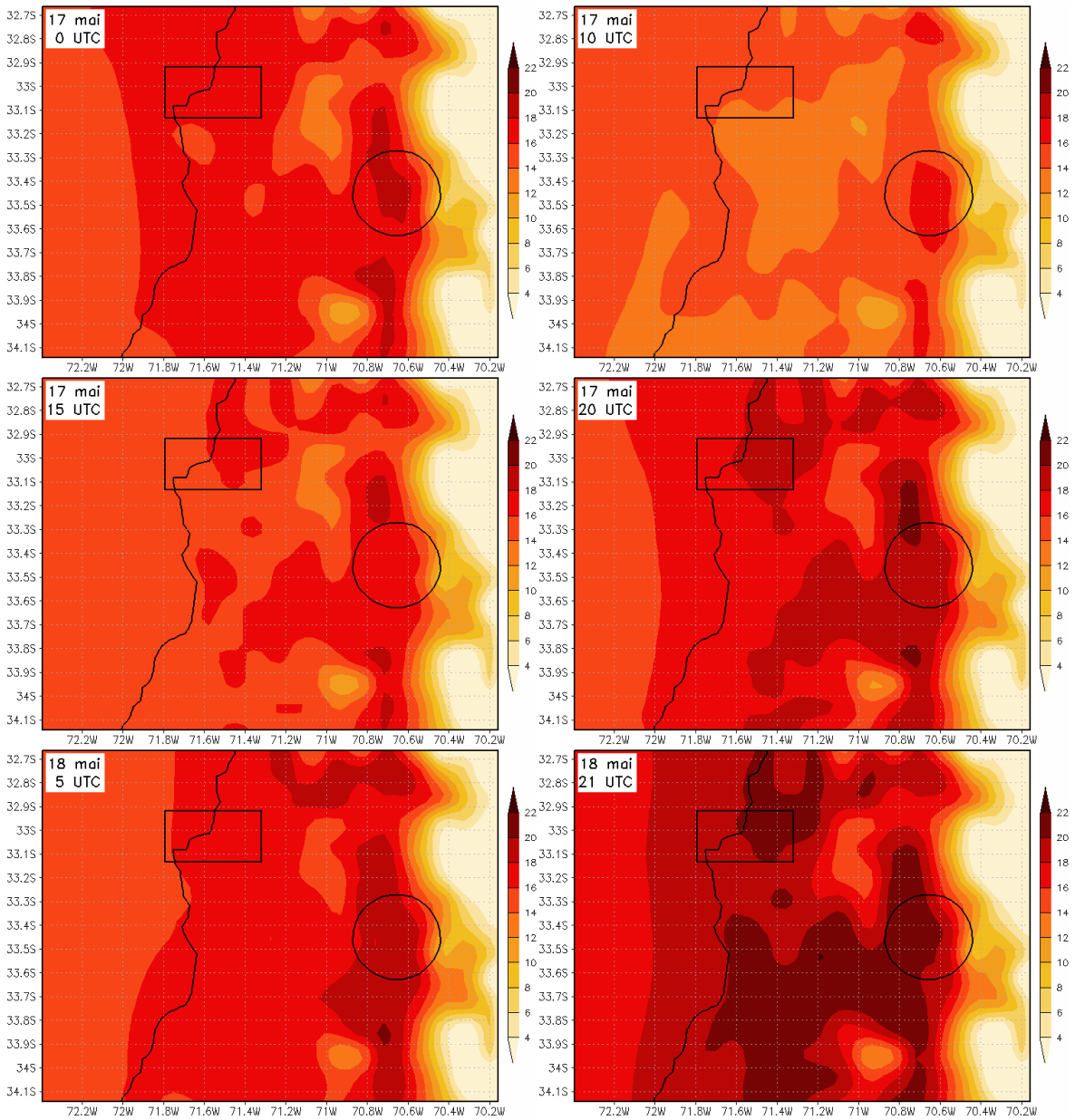


Figura 3.10: Temperatura do ar em 33,4 m para a simulação com cidades. Círculo e retângulo indica a localização da Grande Santiago e Grande Valparaíso respectivamente. Escala de cores indica valores de temperatura em ºC. Datas e horários nas figuras correspondentes.

A temperatura na localização da Grande Valparaíso não apresenta grandes variações ao longo do período simulado devido a sua maior proximidade ao oceano. Na parte mais interior da GV pode ser identificado um incremento maior na temperatura que o observado no setor mais próximo da linha de costa, atingindo valores máximos entre 20 ºC e 22 ºC no interior da

Grande Valparaíso, enquanto que as temperaturas são menores em até 2 ºC no setor mais próximo do mar. Estes valores são observados às 20 UTC do dia 17.

O incremento na extensão dos valores máximos de temperatura que é observado no segundo dia com relação ao dia 17 é, provavelmente, devido à aproximação da frente que se desloca desde o sudoeste já que, como visto na Figura 3.7, após as 18 UTC se produz uma rotação no vento trazendo mais ar quente da região norte.

O comportamento do campo de vento horizontal e o campo de umidade relativa correspondentes à SCC são apresentados na Figura 3.11.

Nas primeiras horas da manhã e no período noturno é possível observar um leve aumento da umidade relativa, principalmente no setor mais próximo da costa e no oceano, que diminui rapidamente com o aquecimento diurno, atingindo valores no interior do continente que não ultrapassam os 40 %. Por volta das 14 e 16 UTC é possível identificar um aumento de aproximadamente 10 %. Este aumento pode estar associado à brisa marítima dado que no segundo dia, em que se apresentaram intensidades menores de vento desde o oceano, não foi possível observar tal acontecimento. Após as 18 UTC, tanto na parte mais interior do continente quanto na parte mais próxima da costa, a umidade relativa diminui.

Quanto ao comportamento do vento, é possível observar que, durante o período noturno para ambos os dias simulados, o vento tem orientação dominante em direção ao oceano, caracterizando uma brisa terrestre. Os valores máximos associados ao vetor vento horizontal em 33,4 m sobre a superfície são observados entre 06 e 09 UTC. Após este período, o vento começa a perder intensidade no sentido do oceano até girar em direção ao continente por volta das 14 e 15 UTC. A brisa marítima atinge sua maior intensidade entre as 18 e 19 UTC para este período.

No segundo dia, a brisa marítima não se manifesta claramente, isto é, não é evidente um giro na direção do vento e sua propagação para o interior do continente; somente se apresenta

como uma diminuição da intensidade do vento durante o dia todo. No setor do litoral, ventos perpendiculares à linha de costa são evidentes durante o período de maior intensidade da brisa marítima.

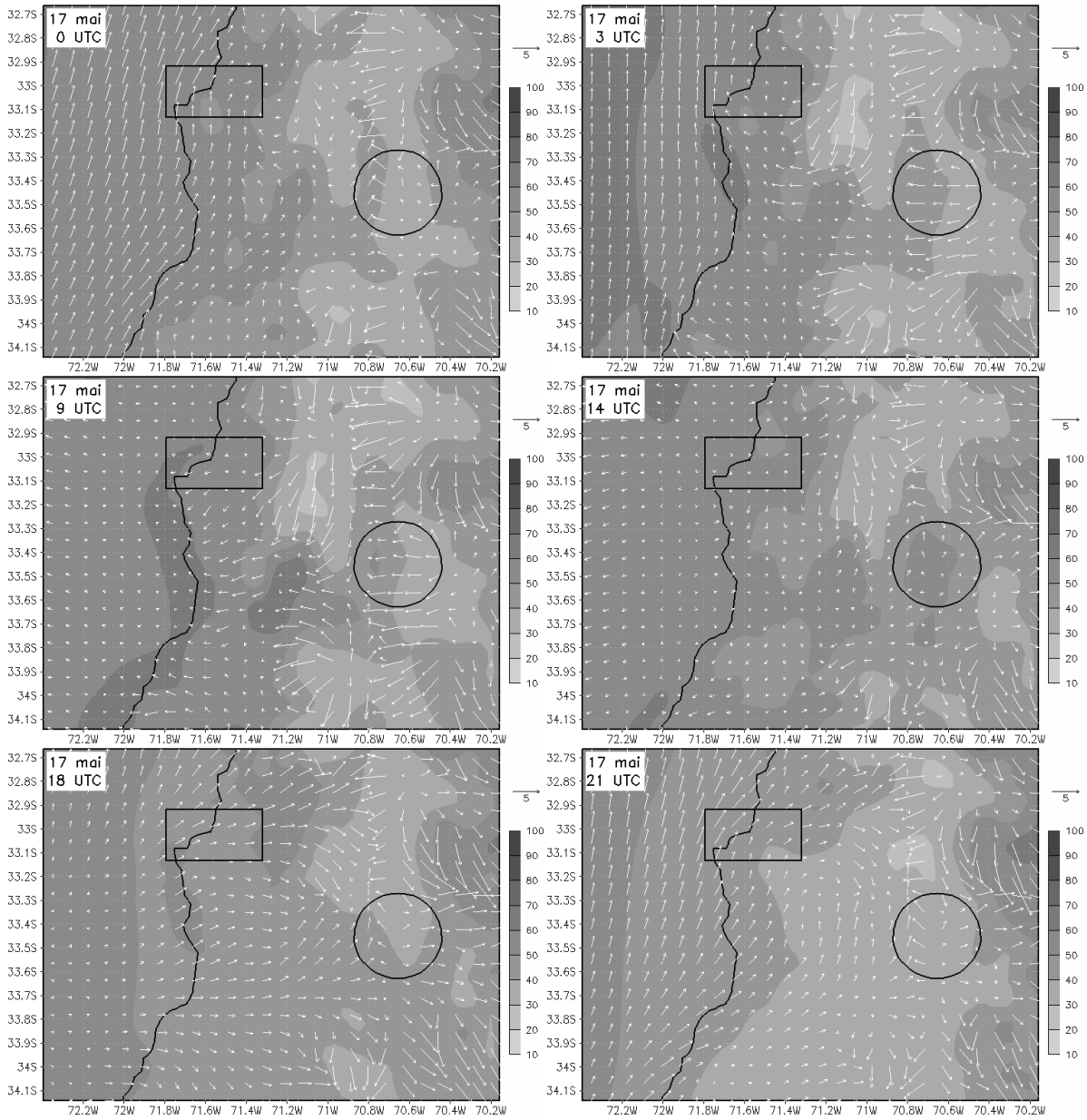


Figura 3.11: Umidade relativa (em cinza) e vento horizontal (setas) no nível de 33,4 m para a simulação com cidades. Círculo e retângulo indica a localização da Grande Santiago e Grande Valparaíso respectivamente. A escala em tons de cinza indica valores de umidade relativa em porcentagem. Vento em $ms^{-1}$. Datas e horários nas figuras correspondentes.

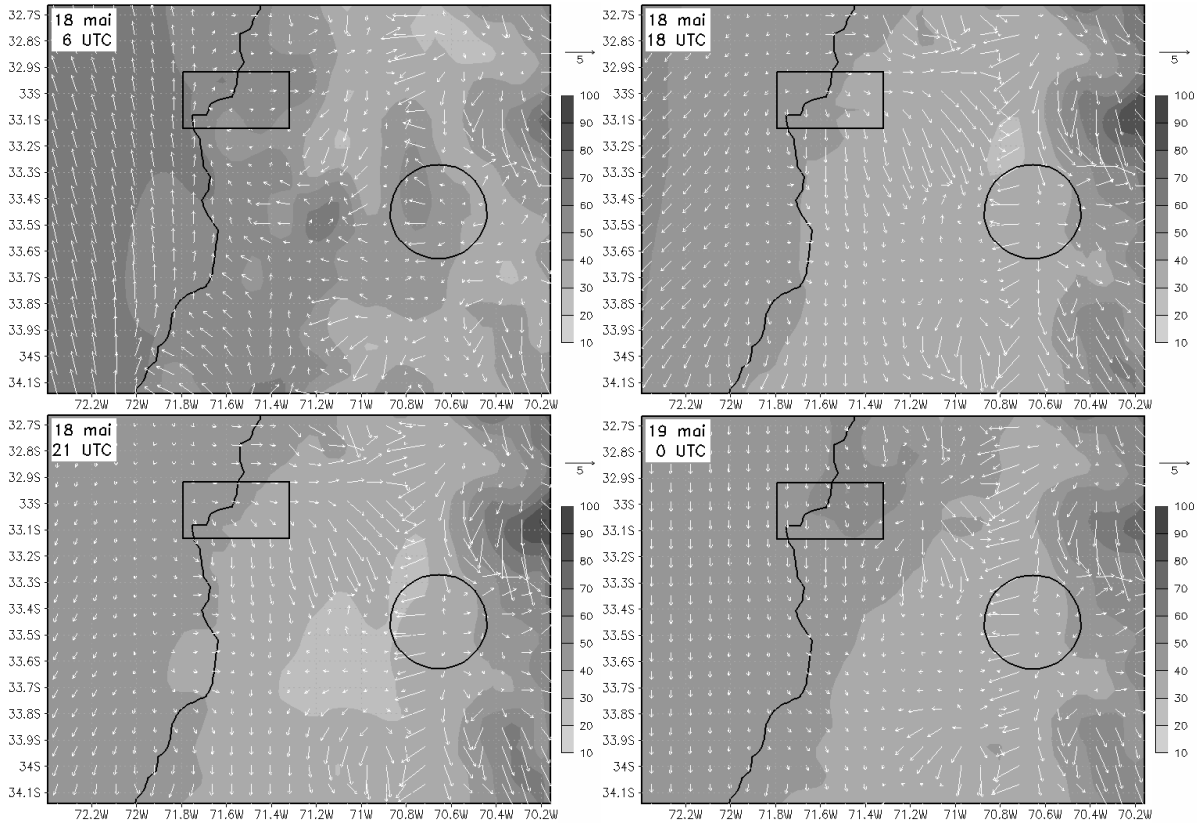


Figura 3.11: Continuação.

Para ambos os dias a brisa marítima perde sua intensidade e começa a se tornar uma brisa terrestre entre 21 e 22 UTC.

As variações que acontecem com o vento ficam um pouco mais claras ao observar o que acontece na vertical (Figura 3.12). No dia 17, durante a madrugada é identificável nos primeiros 600 m da atmosfera uma marcada componente de vento leste, associada à brisa terrestre. Após o período de máxima intensidade, que acontece próximo das 10 UTC, observa-se uma constante diminuição do vento até que este apresente um giro em direção ao continente no horário das 15 UTC. Igualmente ao observado na Figura 3.11, o vento associado à brisa marítima atinge sua máxima intensidade às 18 UTC. A partir deste horário é possível observar uma constante diminuição na intensidade do vento.

Durante a madrugada do dia 18, a brisa terrestre apresenta-se com maior intensidade, provocando um atraso na entrada da brisa marítima no continente, que somente pode ser verificada através da diminuição da intensidade do vento nos níveis mais baixos da atmosfera.

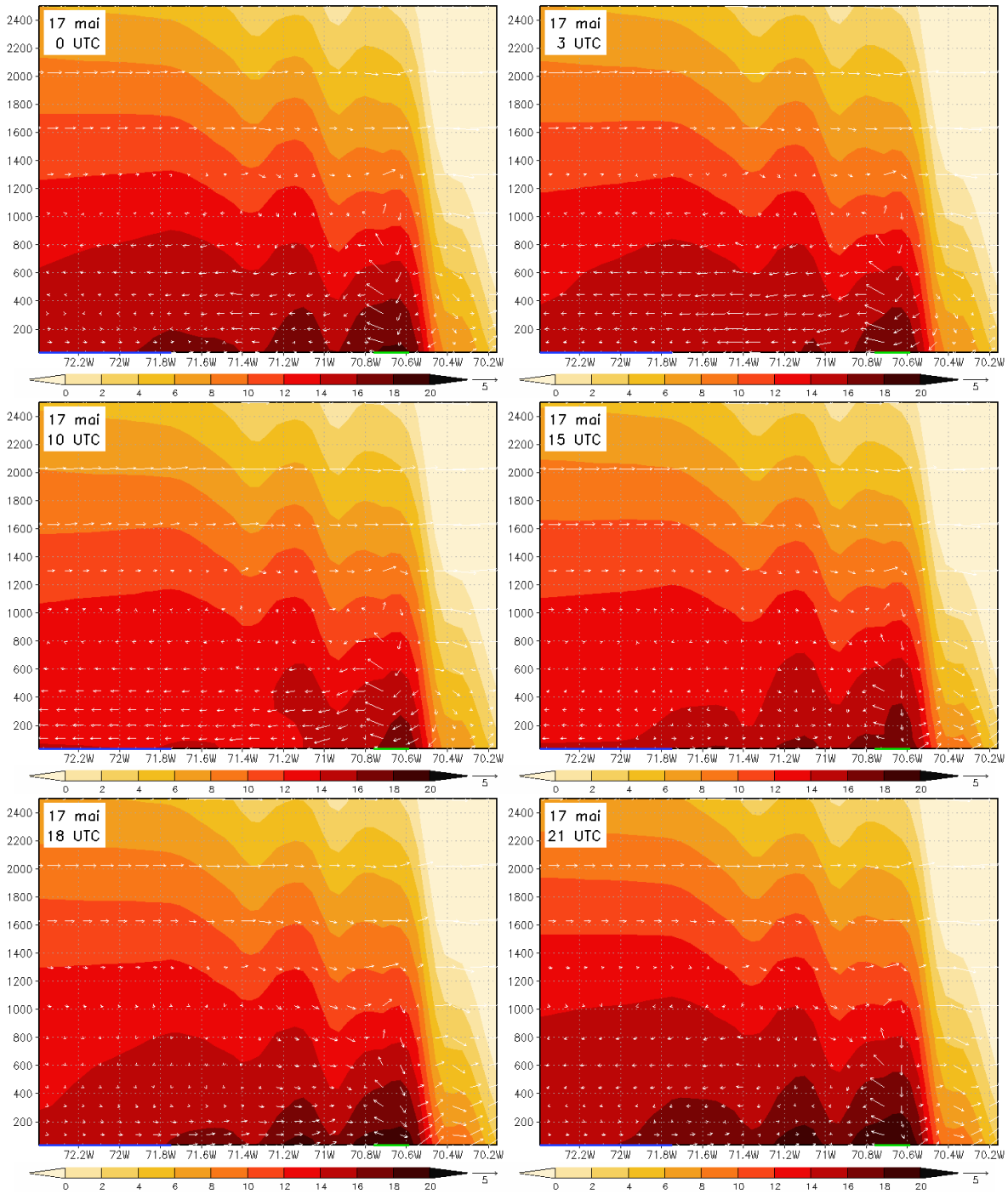


Figura 3.12: Corte vertical na latitude 33,442ºS para a simulação com cidades. Setas indicam o vetor vento composto por *u* [$ms^{-1}$] e *w* [$10^{-1}$ $ms^{-1}$]. Em cores, a temperatura do ar em ºC. A linha azul nas figuras indica o oceano e, em verde, a localização da Grande Santiago. Datas e horários nas correspondentes figuras.

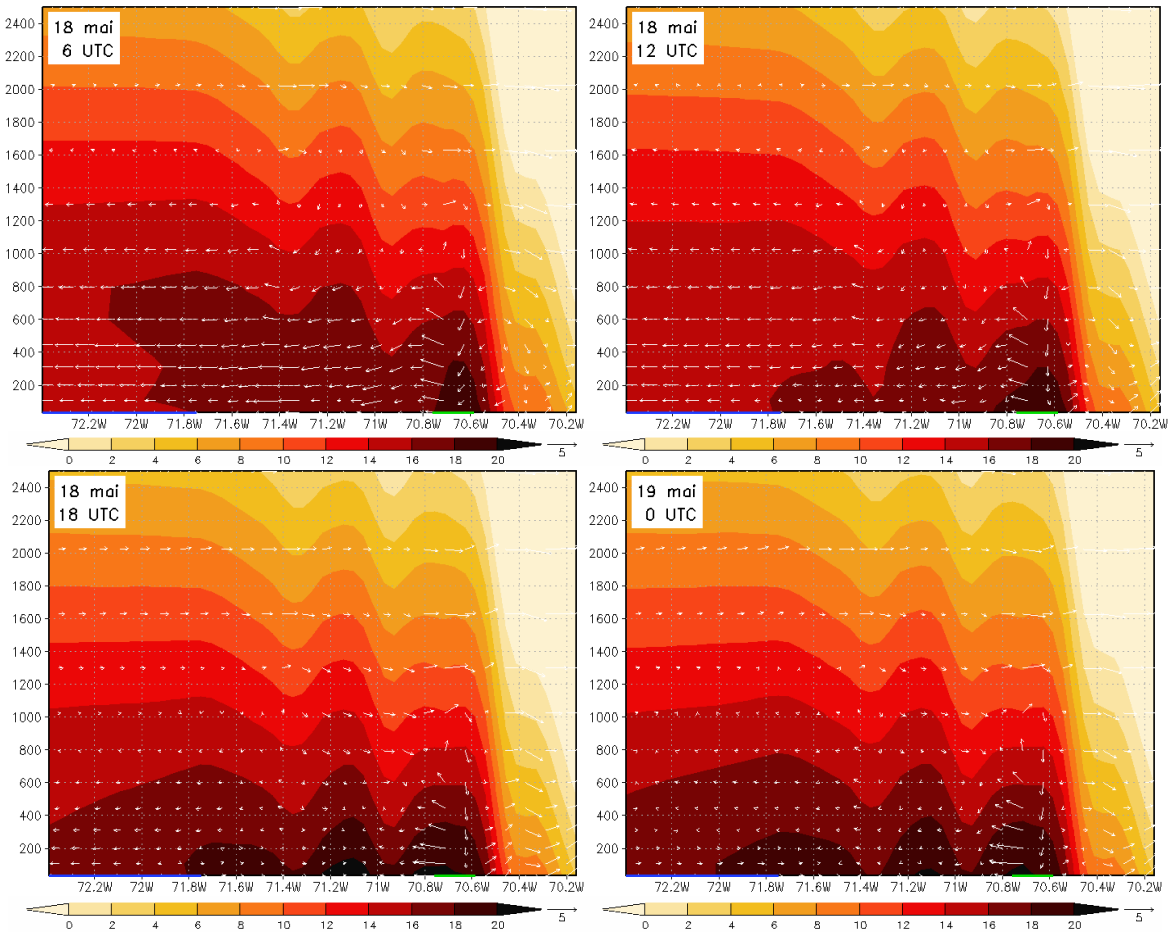


Figura 3.12: Continuação.

É possível observar uma circulação fechada sobre a localização da Grande Santiago (simbolizada pela linha verde na Figura 3.12) durante todo o período estudado. A maior intensidade do vento subsidente se observa entre as 15 – 16 UTC e 21 – 22 UTC do dia 17, e entre as 10 – 16 UTC e 21 – 23 UTC do dia 18 no setor mais ao leste da GS.

Na Figura 3.13 é mostrada a temperatura e o vento na vertical para a latitude onde se localiza a Grande Valparaíso. O maior aquecimento, similar com o acontecido na latitude da GS, está associado à presença de vales. No dia 17, o período de maior intensidade da brisa terrestre é observado às 07 UTC. Após o mínimo de temperatura registrado na GV, a brisa marítima começa atuar, produzindo-se a inversão do vento de leste para oeste às 14 UTC. A máxima intensidade de vento, associado à brisa marítima, acontece às 19 UTC reduzindo a sua intensidade até se tornar novamente brisa terrestre após as 00 UTC do dia 18. Durante o

dia 18 o comportamento do ciclo associado à brisa marítima é similar ao dia anterior, mas a intensidade de vento observado é menor.

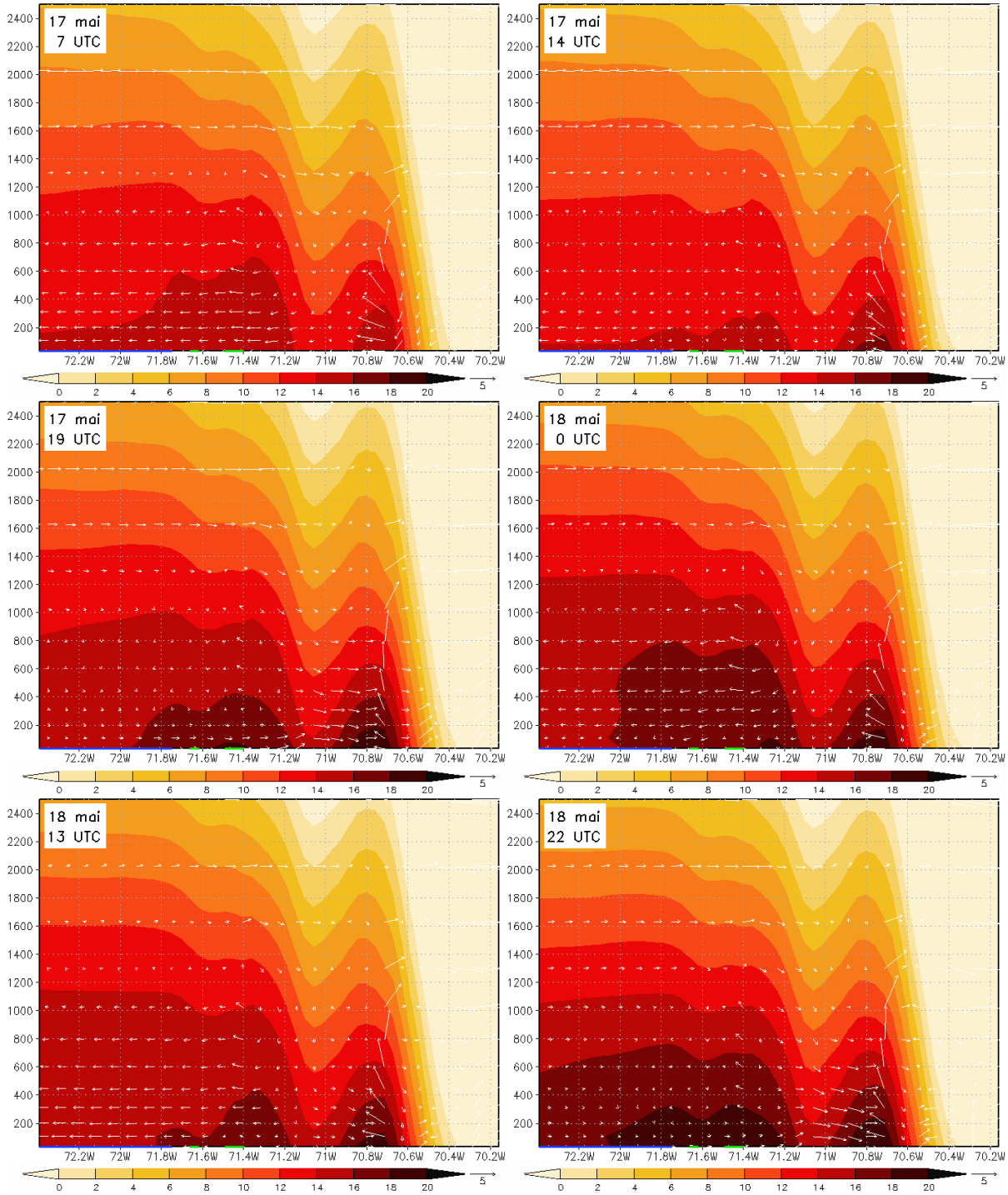


Figura 3.13: Corte vertical na latitude 33,062ºS para a simulação com cidades. Setas indicam o vetor vento composto por *u* [$ms^{-1}$] e *w* [$10^{-1}$ $ms^{-1}$]. Em cores, a temperatura do ar em ºC. A linha azul nas figuras indica o oceano e, em verde, a localização da Grande Valparaíso. Datas e horários nas correspondentes figuras.

A circulação fechada que se forma sobre a Grande Santiago também é observada na Figura 3.13 (aproximadamente na longitude 70,7ºW). Já que no interior da região de Valparaíso não existe presença de grandes centros urbanos, a circulação fechada que se gera é devido a efeitos topográficos.

Embora o maior aquecimento do ar sobre o continente observado no segundo dia, a brisa marítima não se apresenta como esperado, isto é, maior intensidade nos ventos e propagação sobre o continente devido ao maior gradiente de temperatura. Este fenômeno pode estar associado aos efeitos da topografia irregular existente sobre a circulação local na região central do Chile, assim como ao período mais prolongado de ventos descendentes sobre o vale central onde se localiza a Grande Santiago.

Na Figura 3.14 é mostrado o campo de divergência do vento horizontal para os períodos de máxima intensidade da subsidência sobre o vale de Santiago. Nessa figura é observada uma faixa meridional na região interior do Chile central associada aos vales longitudinais que se localizam na região de estudo. Sobre a Grande Valparaíso não foram observados valores de divergência (convergência do vento) inferiores (superiores) a $-0{,}3\cdot10^{-3}$ $s^{-1}$ ($0{,}3\cdot10^{-3}$ $s^{-1}$). No dia 18, valores maiores de divergência são observados no vale do Chile central, principalmente sobre a Grande Santiago.

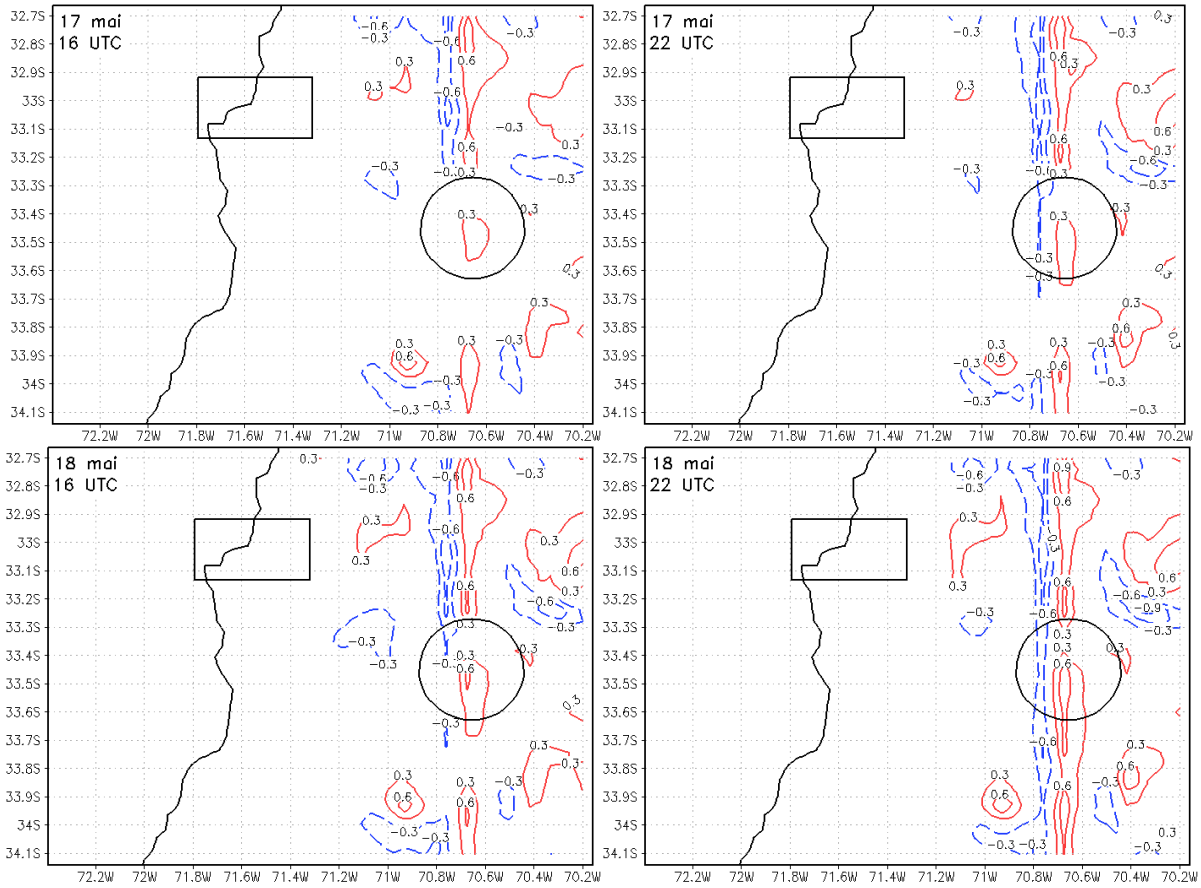


Figura 3.14: Campo de divergência do vento horizontal [$10^{-3}$ $s^{-1}$] a 33,4 m acima da superfície na região central do Chile. As linhas vermelhas indicam divergência; linhas azuis indicam convergência. Datas e horários nas correspondentes figuras.

### 3.4.3 Efeitos na atmosfera associados a grandes cidades na região central do Chile

Um dos efeitos associados à presença das cidades é aquele conhecido como ilha de calor urbana (IC), tal como foi explicado na seção 1.2. Geralmente, as cidades apresentam-se mais quentes quando comparadas com as regiões rurais próximas a estas. A intensidade da ilha de calor urbana (InIC) é uma das maneiras de se representar estas diferenças existentes.

Para o caso da Grande Santiago (Figura 3.15) a InIC é positiva apenas para as primeiras horas da manhã (entre 09 UTC e 08 UTC). O restante do dia, a cidade apresenta-se mais fria, com valores de intensidade inferiores a -1,4 ºC. Um fato importante a ser destacado é que, centros urbanos de menor extensão como a Grande Valparaíso, localizada no litoral da região central do Chile, com quantidade de edificações de grande porte relativamente alta, também apresentam esta característica de ar mais frio acima das mesmas. Dados observacionais no

capítulo 2 mostraram que, na Grande Santiago, este fenômeno onde a InIC é negativa é mais frequente nos meses mais frios, similar ao mostrado pelas simulações.

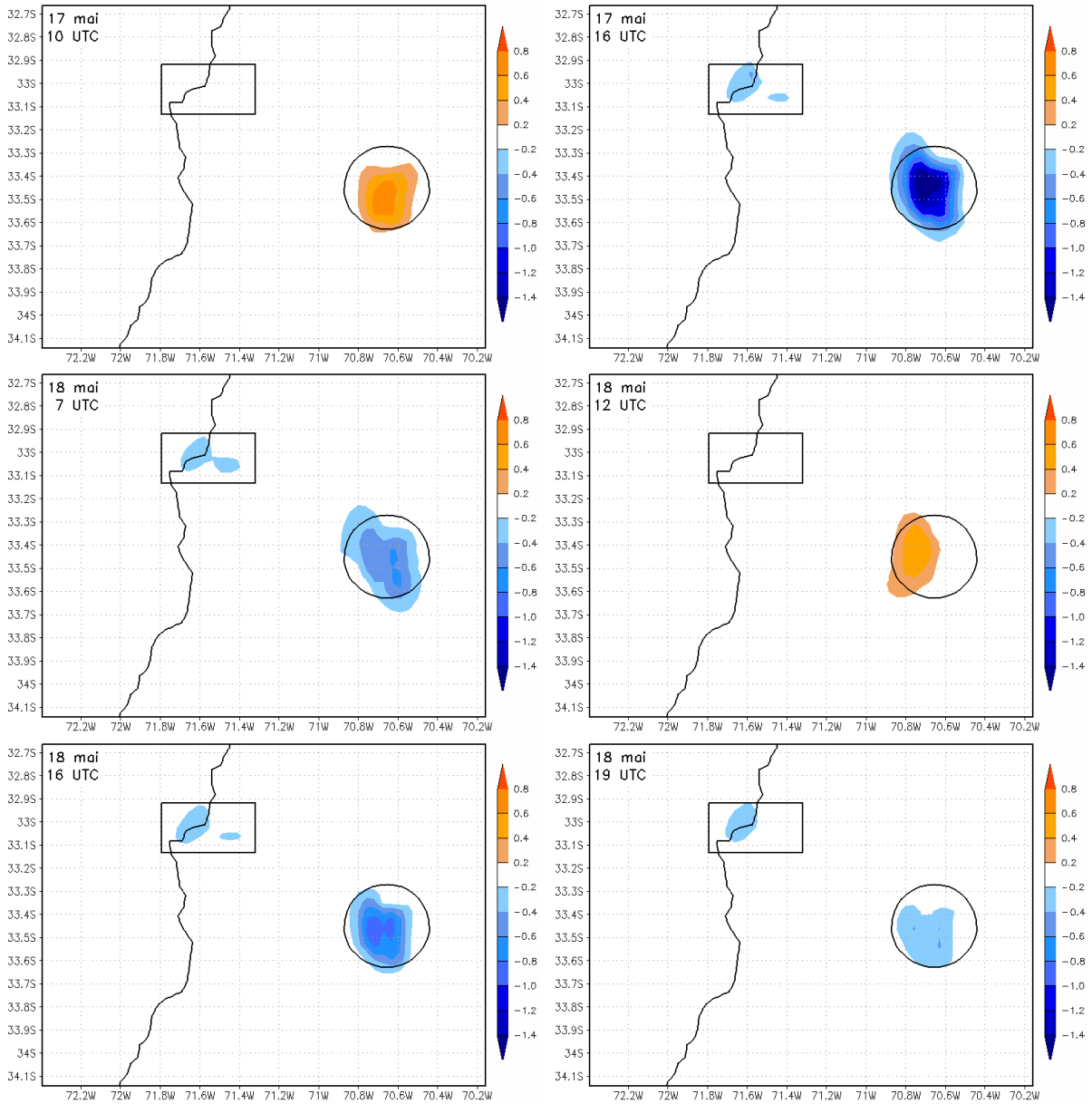


Figura 3.15: Intensidade da ilha de calor urbana na região central do Chile. Escala de cores em ºC. Datas e horários nas figuras correspondentes.

A Figura 3.16 mostra as diferença na magnitude do vento originado em função da presença de cidades na região central do Chile.

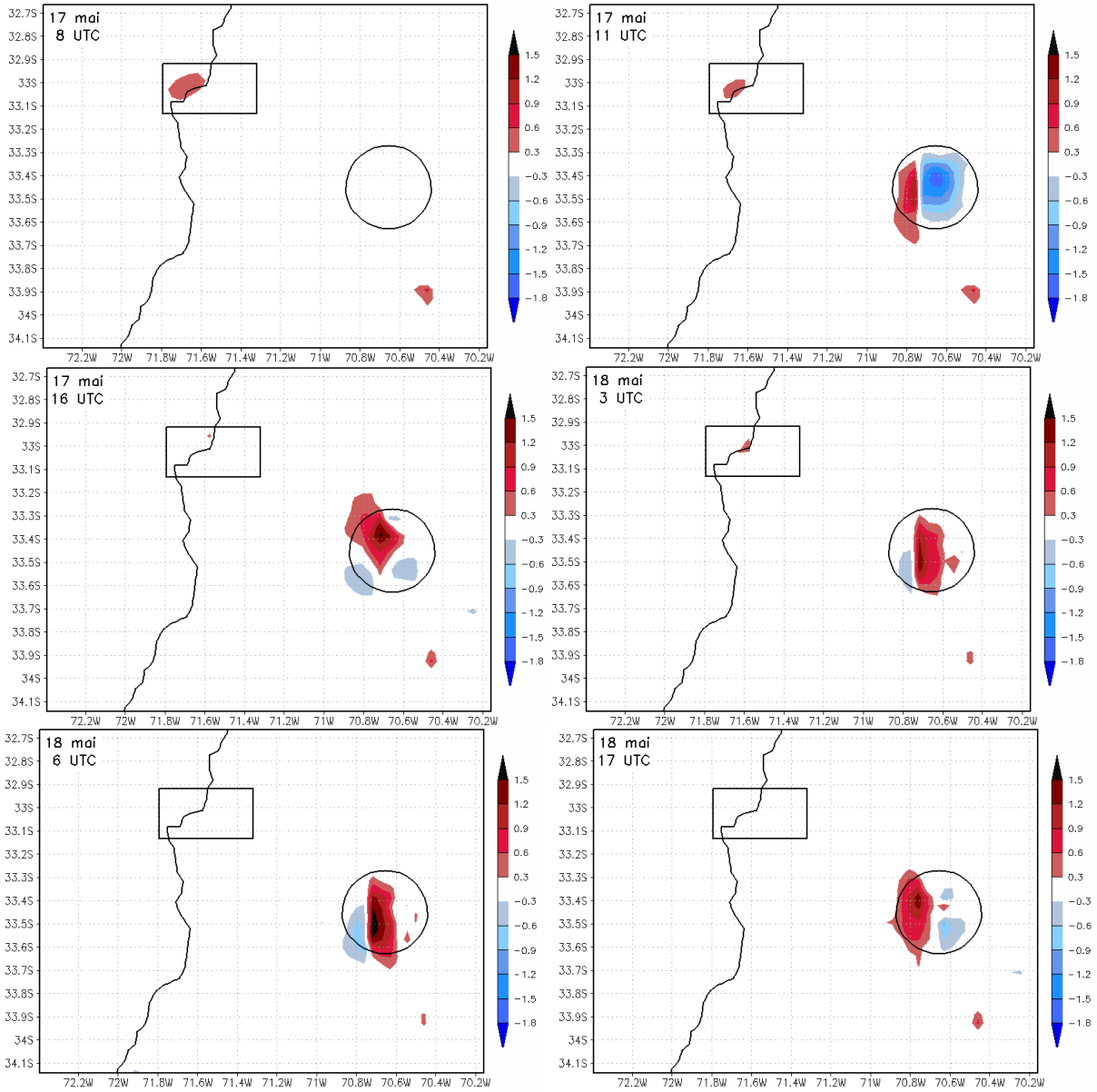


Figura 3.16: Diferença de intensidade do vento horizontal em 33,4 m na região central do Chile devido à presença de cidades. Escala de cores em $ms^{-1}$. Datas e horários nas figuras correspondentes.

No setor litorâneo, na localização da Grande Valparaíso, foram observadas diferenças na intensidade do vento de até 0,6 $ms^{-1}$. Diferenças na intensidade do vento no litoral central do Chile foram minimamente observadas no período noturno do dia 18. O impacto da Grande Valparaíso no vento horizontal é menor que o produzido pela cidade no campo de temperatura.

Durante o período noturno e madrugada do dia 17 não foi possível observar diferenças na intensidade do vento na GS. Com o decorrer do dia esta diferença torna-se menor, aumentando as diferenças na intensidade do vento na Grande Santiago. Um mínimo relativo na diferença de intensidade do vento foi encontrado entre 10 e 12 UTC, e uma diferença máxima na intensidade do vento entre 15 e 17 UTC no dia 17. No dia 18, máximos nas diferenças de intensidade do vento foram encontradas entre 04 e 08 UTC e entre 16 e 19 UTC. O núcleo máximo de diferença do vento é observado neste dia durante o período da manhã sobre a GS. Já durante a tarde, este núcleo se desloca para a parte mais oeste da Grande Santiago. Os períodos com diferenças positivas no vento estão associados a períodos em que a cidade encontra-se mais fria.

O campo de diferenças na divergência do vento horizontal (Figura 3.17) mostra que as cidades na região central do Chile têm tendência, em geral, a aumentar a divergência nos níveis mais próximos à superfície. O padrão que estas diferenças apresentam é muito similar ao observado nas diferenças do campo de vento no mesmo nível.

Na Figura 3.18 são mostradas a diferença entre a simulação com cidades (SCC) e simulação sem cidades (SSC) da umidade relativa e do movimento vertical, *w*, na latitude de 33,442ºS. Ao comparar ambas as simulações pode ser notado que a SCC apresenta, na maior parte do período simulado, valores mais altos de umidade relativa sobre a cidade (indicada pela linha verde nas figuras). A diferença da componente vertical do vento entre as SCC e SSC mostra que a presença da GS incrementa a subsidência do ar no vale.

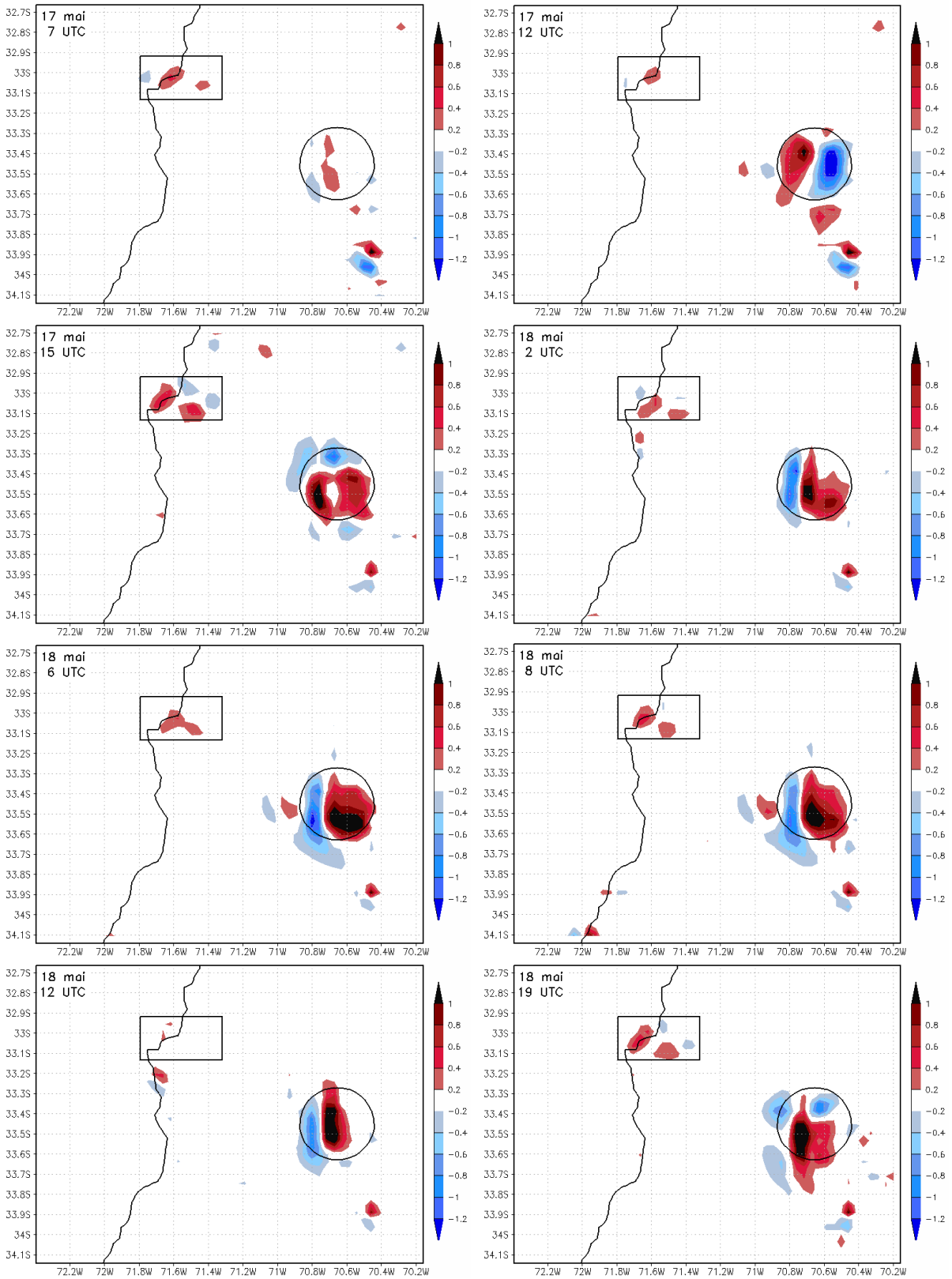


Figura 3.17: Diferença de divergência do vento horizontal entre as simulações com cidades e sem cidades em 33,4 m para os horários de máximas diferenças na região central do Chile. Escala de cores em $10^{-4}$ $s^{-1}$. Datas e horários nas figuras correspondentes.

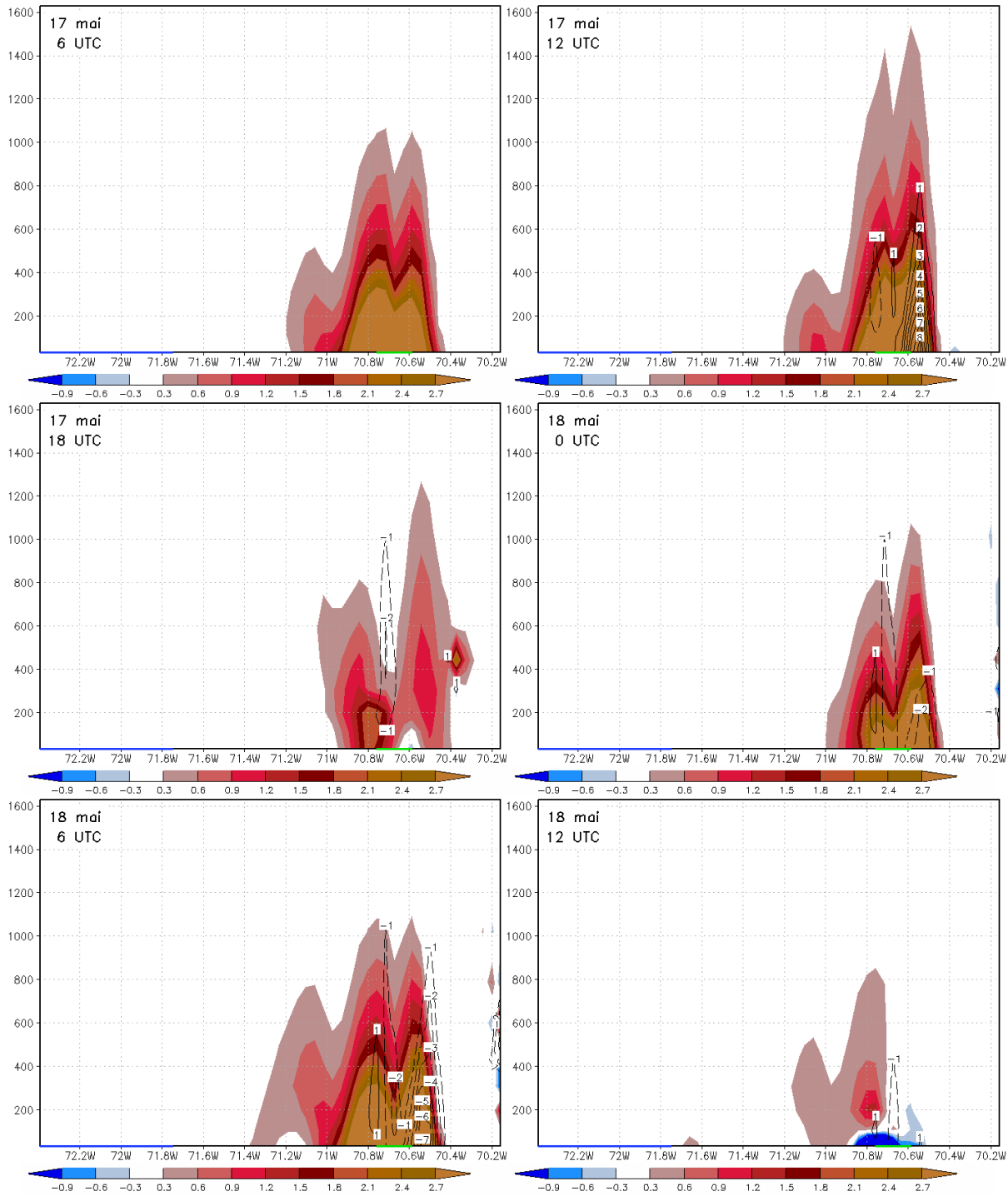


Figura 3.18: Corte vertical na latitude 33,442ºS. Em cores é mostrada a diferença de umidade relativa entre a simulação com cidades e a simulação sem cidades. Escala de cores em porcentagem. Linhas indicam a diferença de *w* em $10^{-2}$ $ms^{-1}$. A linha azul nas figuras indica o oceano e, em verde, a localização da Grande Santiago. Datas e horários correspondentes em cada figura.

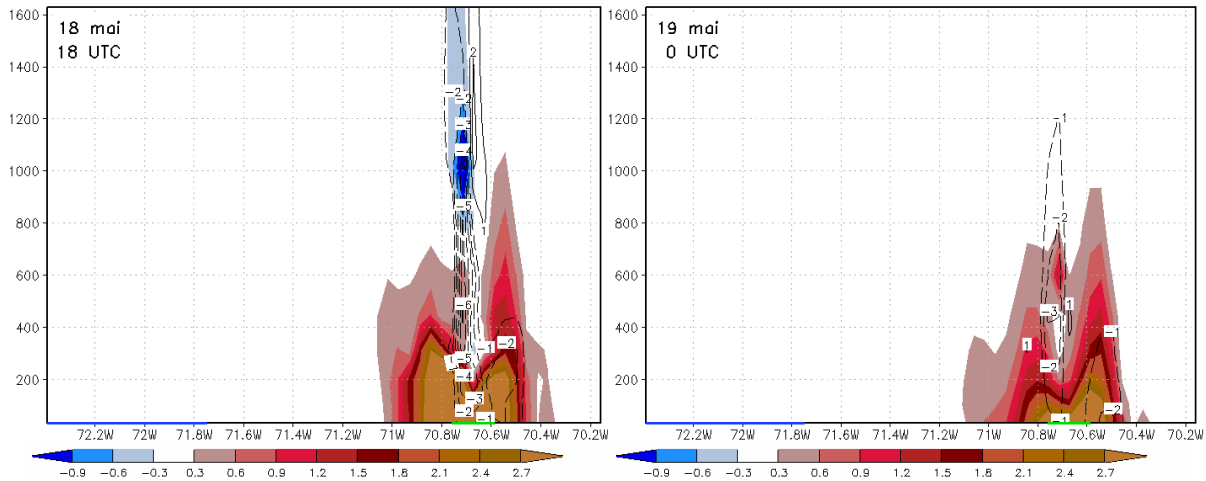


Figura 3.18: Continuação.

A Grande Valparaíso (Figura 3.19) também produz variações na umidade relativa e na intensidade do vento, mas numa proporção menor à da GS. Diferenças encontradas entre estas duas cidades é a altura que atinge a influência de cada uma que, para o caso da GV, não ultrapassa os 400 m. Os valores mais elevados de diferença de umidade relativa são menores que 2%, enquanto que na Grande Santiago, esta diferença entre as simulações atinge valores superiores a 2,7%. O aumento na umidade relativa no interior da região de Valparaíso está associado aos efeitos da Grande Santiago, localizada aproximadamente 50 km mais ao sul no vale central da região do estudo. O comportamento do vento na vertical também é modificado pela presença da Grande Valparaíso no litoral central do Chile, intensificando o movimento descendente sobre a cidade.

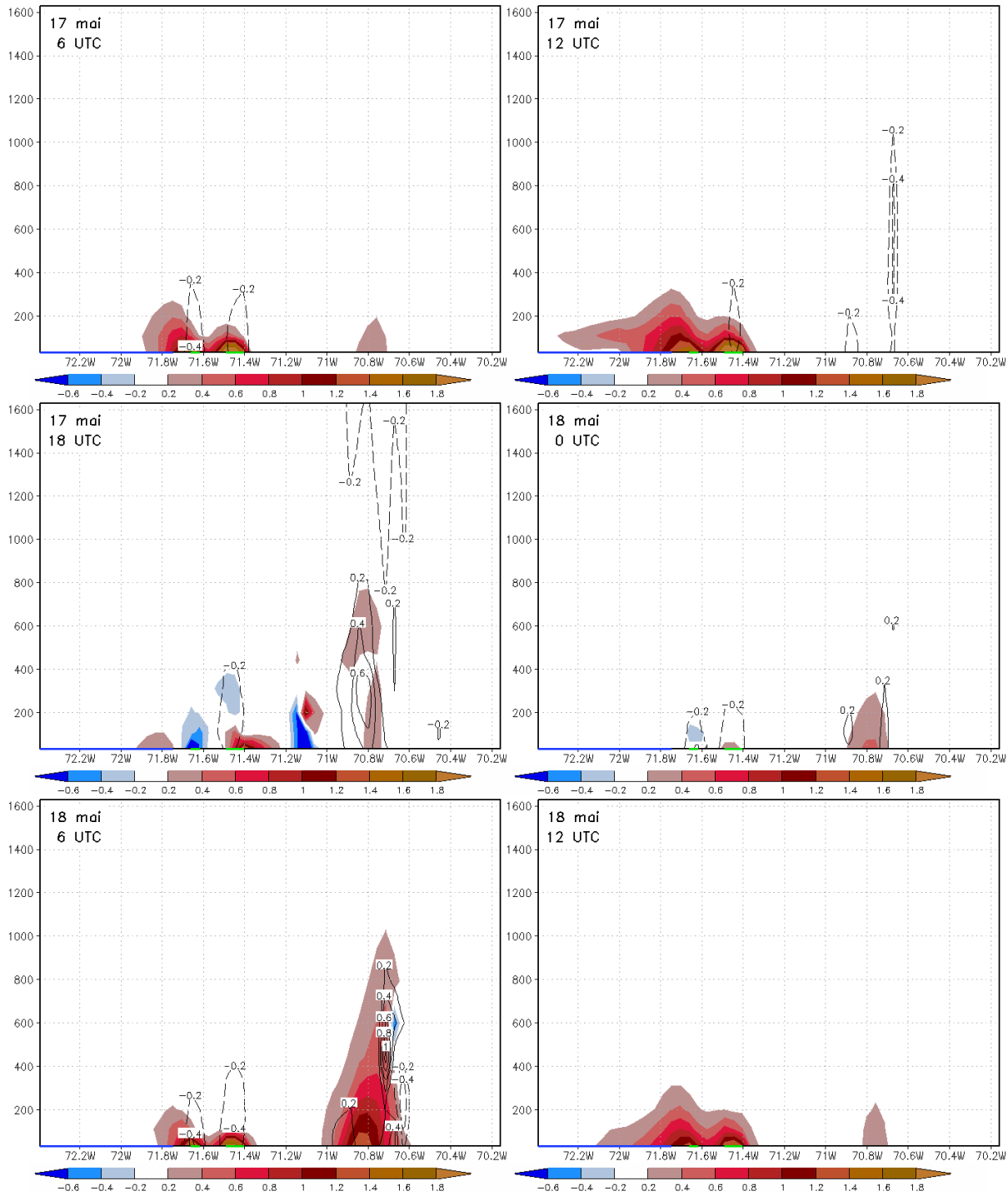


Figura 3.19: Corte vertical na latitude 33,062ºS. Em cores se mostra a diferença de umidade relativa entre a simulação com cidades e a simulação sem cidades. Escala de cores em porcentagem. Linhas indicam a diferença de *w* em $10^{-2}$ $ms^{-1}$. A linha azul nas figuras indica o oceano e, em verde, a localização da Grande Valparaíso. Datas e horários correspondentes em cada figura.

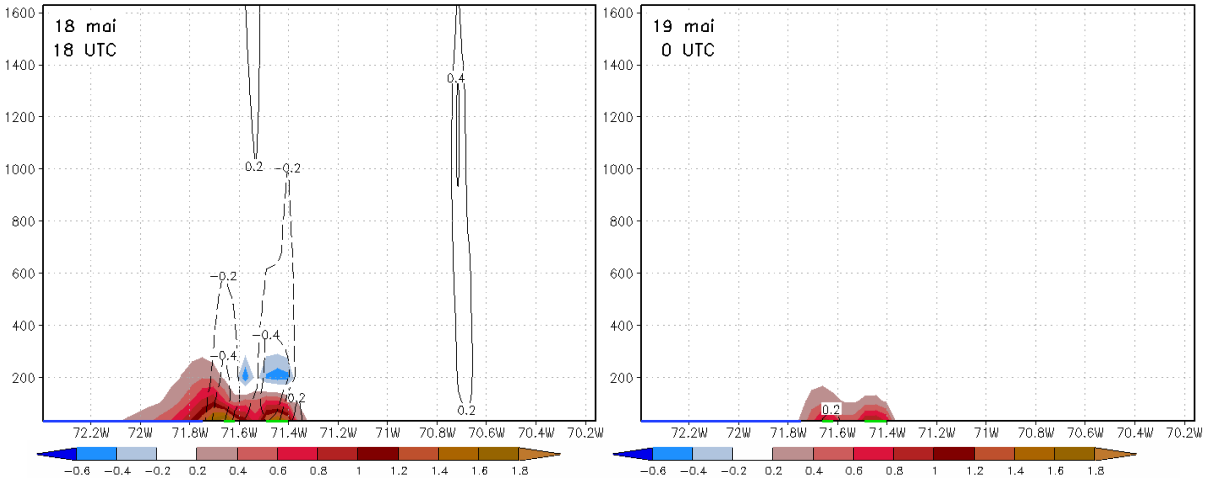


Figura 3.19: Continuação.

# 4. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Neste trabalho foram abordados aspectos importantes relacionados à presença de dois centros urbanos, a Grande Santiago (GS) e a Grande Valparaíso (GV), localizados na região central do Chile. A complexa topografia e a urbanização das cidades presentes modificam o escoamento do ar que, em grande escala, provêm do sudoeste devido à ação do Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul nos meses de verão e nas estações de transição, trazendo consigo ar mais frio e com características marítimas. Durante este mesmo período, e com maior frequência nos meses de verão, a passagem de centros de baixa pressão que se deslocam pelo litoral também modifica a circulação, trazendo para a região central do Chile, ar com características continentais. Na estação chuvosa, sistemas frontais afetam a região central do Chile mudando o regime de ventos para noroeste.

Utilizando informações meteorológicas da Armada do Chile, verificou-se que a amplitude térmica anual é próxima dos 8 ºC e que no litoral central do Chile os valores máximos de temperatura se registram entre os meses de janeiro e abril, sendo os valores mínimos registrados nos meses de inverno. O ciclo diurno médio mensal para as estações do litoral mostrou algumas diferenças significativas. Viña del Mar mostrou maior amplitude no ciclo diurno ao longo do ano. Em média, os valores mínimos de temperatura são registrados entre 09 e 12 UTC e os máximos se registram entre 18 e 21 UTC. A direção do vento ao longo do ano para as estações do litoral central do Chile apresentam um ciclo bem definido, com domínio da componente oeste no verão e mudança para leste no inverno. A intensidade do vento apresenta maiores valores no período de inverno em virtude da passagem de sistemas frontais.

O ciclo diurno médio mensal da direção do vento mostrou que a brisa marítima é mais evidente nos meses mais quentes, registrando-se a mudança do vento de leste para oeste nas estações do litoral por volta das 12 UTC. Os máximos valores de intensidade do vento

associados à brisa marítima são registrados entre 18 e 21 UTC, coincidentemente com o período de máximas temperaturas. A brisa terrestre é observada após as 00 UTC, com intensidade do vento menor que aquela associada à brisa marítima. No inverno, a inversão do vento não é tão evidente, dominando a direção de componente leste. A intensidade do vento médio horário neste período não apresenta variações bruscas.

O ciclo diurno médio mensal de temperatura calculado com dados meteorológicos de estações pertencentes à CONAMA-RM mostrou que os valores máximos de temperatura são atingidos entre 17 e 19 UTC (14 e 16 HL) na Região Metropolitana de Santiago e que mínimos de temperatura são observados entre 11 e 12 UTC (08 e 09 HL) para o verão e entre 10 e 11 UTC (06 e 07 HL) para o inverno. As temperaturas médias horárias apresentam um ciclo diurno mais marcado durante o período de verão. A amplitude térmica durante os meses mais quentes está em torno dos 12 ºC. Para os meses mais frios, a amplitude térmica está em torno dos 7 ºC.

A intensidade da ilha de calor urbana (InIC) na Grande Santiago apresentou-se positiva na maior parte do ano. No inverno, é mais frequente observar valores de InIC negativos, com valores que variam entre -3 ºC e 4 ºC. Observou-se que o centro da cidade é sempre mais quente que a região suburbana, sendo maiores estas diferenças no inverno. Enquanto às diferenças na intensidade média do vento dentro dos limites urbanos, os valores menores foram observados no centro da cidade verificando-se o efeito desintensificador das construções na intensidade do vento.

Da análise da série de material particulado com diâmetro inferior a 10 µm ($MP_{10}$), observou-se que o período entre maio e julho foi o que apresentou maior persistência na quantidade de horas por dia com altos níveis de concentração. O comportamento da concentração de $PM_{10}$ está altamente ligado, no inverno, com a atividade frontal (deposição úmida) e o incremento na intensidade do vento (dispersão).

Simulações realizadas com o BRAMS mostraram uma região de fraco gradiente barométrico e de intensidade de vento baixa próxima do litoral central do Chile, favorável para a detecção de circulações locais para o período entre os dias 17 e 19 de maio de 2004. Valores mínimos de temperatura para este período foram observados entre 05 e 10 UTC, enquanto que os máximos, entre 20 e 21 UTC, com uma amplitude térmica menor no setor mais próximo ao oceano.

A brisa terrestre domina o período noturno com ventos de maior intensidade entre 06 e 10 UTC. Produz-se uma mudança mais generalizada na direção do vento de leste para oeste entre 14 e 15 UTC, gerando um aumento em torno de 10% nos valores de umidade relativa quando a brisa marítima atinge a Grande Santiago. Os maiores valores de intensidade do vento associados à brisa marítima foram observados entre 18 e 19 UTC, perdendo intensidade após as 21 UTC. A aproximação de sistemas frontais na região de estudo não permite uma clara identificação destas circulações.

O campo de divergência do vento horizontal mostrou que circulações sobre a GS não estão associadas exclusivamente à presença da cidade, mas também aos efeitos da orografia presente na região central do Chile.

A InIC mostrou que as cidades se apresentam mais frias na maior parte do período e que o efeito das cidades localizadas na região central do Chile sobre a temperatura é proporcional ao tamanho das mesmas. As cidades também geram um incremento na intensidade do vento nos períodos em que a InIC é negativa. Para a maior parte do período simulado, as cidades na região central do Chile induzem um aumento na umidade relativa e incremento na subsidência do ar sobre estas.

Com este trabalho verifica-se que os efeitos gerados pelas cidades na região central do Chile sobre as variáveis meteorológicas estudadas são proporcionais ao tamanho das áreas

urbanizadas. Também, que a topografia em que essas áreas urbanas se encontram é um fator de extrema importância na geração e manutenção das circulações observadas.

### 4.1 Sugestões para trabalhos futuros

Sendo os efeitos das cidades presentes na região central do Chile bem representados nas simulações com espaçamento horizontal de 4 km, simulações com maior resolução (espaçamento horizontal de 1 km ou menos) poderiam ser feitas para caracterizar melhor os efeitos que centros urbanos de menor tamanho (como por exemplo, a Grande Valparaíso) geram sobre a atmosfera.

Dada a complexidade do terreno na região central do Chile, e tendo visto nos resultados apresentados neste trabalho que este é um fator importante nas circulações que se formam nesta região, experimentos em que não se considere a topografia, assim como outros em que se considere uma fração da topografia real, poderiam ser realizados para determinar a sua influência nas circulações como a brisa marítima e aquelas associadas aos centros urbanos, e, assim, estudar as possíveis interações entre estes três tipos de circulações.

Testes considerando variações na temperatura da água de mar frente ao litoral do Chile central podem ser realizados a fim quantificar o impacto destas mudanças na brisa marítima.

No estudo observacional realizado para o litoral central do Chile foi visto que o verão é o período em que a brisa marítima é mais bem definida. Sendo assim, estudos numéricos para essa época do ano poderiam ser realizados para outras áreas do Chile, permitindo a determinação de possíveis diferenças latitudinais na geração e propagação da frente de brisa.

Modificações nos parâmetros urbanos, tais como as fontes de calor veicular e industrial e as propriedades das construções, além da caracterização das concentrações de poluentes que são emitidos, poderiam ser realizadas para permitir uma melhor caracterização das cidades na região central do Chile, especificamente, na Grande Santiago.

Estudos relacionados com a dispersão de poluentes são de grande interesse devido à quantidade de pessoas concentradas na Grande Santiago, à complexidade vista no escoamento do ar e às interações que ocorrem entre as circulações geradas na região central do Chile.

# Referências Bibliográficas

ACEITUNO, G. P. & ULRIKSEN, U. P. Efecto de isla calórica en Santiago. Resultados Preliminares. **Tralka**. v. 2, n. 1, p. 39-56. 1981.

ATKINSON, B. W. **Meso-scale Atmospheric Circulations**. Londres: Academic Press, 1981. 495p.

CÂMARA, G.; SOUZA, R. C. M. ; FREITAS, U. M. ; GARRIDO, J.. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & Graphics**, p. 395-403, May - Jun. 1996.

CENTRO MARIO MOLINA CHILE. **Evaluación y Propuesta de Rediseño para la Red de Monitoreo Automático de Calidad del Aire de la Región Metropolitana Red MACAM-2**. *Resumo Executivo*. Santiago, 2007. Disponível em: http://www.conama.cl/rm/568/articles-41184_CmmREFinal.pdf (acesso em 10 de fevereiro de 2009).

CHEN, C. & COTTON, W. R. A one dimensional simulation of the stratocumulus capped mixed layer. **Boundary-Layer Meteorology.** v. 25, p. 289-321. 1983.

CONAMA. **Actualización del Inventario de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos en la Región Metropolitana 2005.** Santiago, 2007. Disponível em: <http://www.conama.cl/rm/568/articles-41184_Dictuc0InfREInventario.pdf> (acesso em 27 de janeiro de 2009).

COTTON, W. R.; PIELKE, R. A., SR.; WALKO, R. L.; LISTON, G. E.; TREMBACK, C. J.; JIANG, H.; MCANELLY, R. L.; HARRINGTON, J. Y.; NICHOLLS, M. E.; CARRIO, G. G.; MCFADDEN, J. P. RAMS 2001: Current Status and Future Directions. **Meteorology and Atmospheric Physics.** v. 82, p. 5-29. 2003.

DICKINSON, R. E.; HENDERSON-SELLERS, A.; KENNEDY, P. J.; WILSON, M. F. **Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme for the NCAR Community Climate Model.** *NCAR Technical Note.* Dec. de 1986. 69p.

FREITAS, E. D. **Circulações locais em São Paulo e sua influência sobre a dispersão de poluentes**. São Paulo, 2003. 156p. Tese (Doutorado em Ciências Atmosféricas) - Instituto de Astronomía, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo.

FREITAS, E. D.; ROZOFF, C. M.; COTTON, W. R.; SILVA DIAS, P. L. Interactions of an urban heat island and sea-breeze circulations during winter over the metropolitan area of São Paulo, Brazil. **Boundary-Layer Meteorology**. v. 122, n. 1, p. 43-65. 2007.

FREITAS, E. D.& SILVA DIAS, P. L. Alguns efeitos de áreas urbanas na geração de uma ilha de calor. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v. 20, n. 1, p. 355-366. 2005.

FREITAS, E. D.& SILVA DIAS, P. L. Desenvolvimento da brisa marítima sob diferentes situações de grande escala: um estudo de caso. In. Congresso Brasileiro de Meteorologia, 13, 2004, Fortaleza - CE. **Anais do XIII Congresso de Meteorologia**, 2004.

GARCÍA-CUETO, O. R.; JÁUREGUI-OSTOS, E.; TOUDERT, D.; TEJEDA-MARTINEZ, A. Detection of the urban heat island in Mexicali, B. C., México and its relationship with land use. **Atmósfera**. v. 20, n.2, p.111-131. 2007.

GARREAUD, R. D. & RUTLLANT, J. Coastal Lows along of the Subtropical West Coast of South America: Numerical Simulation of a Typical Case. **Monthly Weather Review**. v. 131, n. 5, p. 891-908. 2003.

GARREAUD, R. D.; RUTLLANT, J.; FUENZALIDA, H. Coastal lows along of the subtropical west coast of South America: mean structure and evolution. **Monthly Weather Review**. v. 130, n. 1, p. 75-88. 2002.

GRAMSCH, E.; CERECEDA-BALIC, F.; OYOLA, P.; VON BAER, D. Examination of pollutions trends in Santiago de Chile with cluster analysis of $PM_{10}$ and Ozone data. **Atmospheric Environment**. v. 40, n. 28, p. 5464-5475, 2006.

HILL, G. E. Factors controlling the size and spacing of cumulus clouds as revealed by numerical experiments. **Journal of the Atmospheric Sciences**. v. 31, n. 3, p. 646-673. 1974.

IHL ,T. M. El problema del esmog de verano en Santiago: generación, dispersión y transporte de ozono. **Revista Geográfica de Chile Terra Australis**. n. 43, p. 93-118. 1998.

INE (Instituto Nacional de Estadísticas). **Censos de población**. 2002. Disponível em: <http://espino.ine.cl/CuadrosCensales/apli_excel.asp>

INE (Instituto Nacional de Estadísticas). **Estadísticas del medio ambiente 2000 – 2004**. Setembro 2005. Disponível em: <http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/estadisticas_medio_ambiente/pdf/anuario2004.zip>

JORGETTI, T.; CAMARGO, R.; JANUÁRIO, C. S.. Caracterização da célula de brisa na região metropolitana de São Paulo através de observações simultâneas. In. Congresso Brasileiro de Meteorologia, 12, 2002, Foz de Iguaçu. **Anais do XII Congresso Brasileiro de Meteorologia,** 2002. p. 2639-2642.

KHAN, S. M. & SIMPSON R. W. Effect of a heat island on the meteorology of a complex urban airshed. **Boundary-Layer Meteorology**. v. 100, n. 3, p. 487-506. 2001.

KLEMP, J. B.; WILHELMSON, R. B. The simulation of three-dimensional convective storm dynamics. **Journal of the Atmospheric Sciences**. v. 35, n. 6, p. 1070-1096. 1978.

LILLY, D. K. On the numerical simulation of buoyant convection. **Tellus XIV**. v. 2, p. 148-172. 1962.

MASSON, V. A Physically-based Scheme for the Urban Energy Budget in Atmospheric Models. **Boundary-Layer Meteorology**. v. 94, n. 3, p. 357-397. 2000.

MINSEGPRES (Ministerio Secretaria General de la Presidencia). **Decreto Supremo Nº59 Norma para $PM_{10}$**. Santiago, 1998. Disponível em: <http://www.conama.cl/rm/568/printer-1182.html> (acesso em 28 de abril de 2009).

MONTÁLVEZ, J. P.; RODRÍGUEZ A.; JIMÉNEZ, J. I. A study of the urban heat island of Granada. **International Journal of Climatology**. v. 20, n. 8, p. 899-911. 2000.

MORRIS, C. J. G. & SIMMONDS, I. Associations between varying magnitudes of the urban heat island and the synoptic climatology in Melbourne, Australia. **International Journal of Climatology**. v. 20, n. 15, p. 1931-1954. 2000.

MUÑOZ, R. C. Diurnal cycle of surface winds over the subtropical southeast Pacific. **Journal of Geophysical Research**. v, 113, D13107. 2008.

OHASHI, Y. & KIDA H. Local circulations developed in the vicinity of both coastal and inland urban areas: A numerical study with a mesoscale atmospheric model. **Journal of Applied Meteorology**. v. 41, n. 1, p. 30-45. 2002.

OKE, T.R. **Boundary Layer Climates**. Segunda edição. Londres e Nova York. Methuen, 1987. 435p.

OKE, T.R.The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects. In: CERMAK, J. E.; DAVENPORT, A. G.; PLATE, E. J.; VIEGAS, D. X. **Wind Climate in Cities**. Netherlands: Kluber Academic Publishers, 1995. p. 81-107.

OLIVEIRA, A. P. & SILVA DIAS P. L. Aspectos Observacionais da Brisa Marítima em São Paulo. In. Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2, 1982, Pelotas. **Anais do II Congresso de Meteorologia**, 1982. p. 129-145.

PIELKE, R.A. & SEGAL, M. Mesoscale circulations forced by differencial terrain heating. In: Ray, P. S. **Mesoscale Meteorology and Forecasting.** Boston: American Meteorological Society, 1986. p. 516-548.

QUINTANILLA, V.; REYES, C.; VERA, V. Causas y efectos de los incendios forestales por parte de la población en la V región de Valparaíso, Chile central. **Revista Geográfica de Chile Terra Australis**. v. 43, p.119-130.1998.

ROMERO, H.; IHL, M., RIVERA, A.; ZALAZAR, P.; AZOCAR, P. Rapid urban growth, land-use changes and air pollution in Santiago, Chile. **Atmospheric Environment**. v. 33, p.4039-4047.1999.

RUTLLANT, J. **On a generation of coastal lows in Central Chile**. Miramare-Trieste, Italia: Centro Internacional de Física Teórica, 1994. 20 p. (Relatorio interno IC/94/164).

RUTLLANT, J.; GARREAUD, R. D. Meteorological air pollution potential for Santiago, Chile: Towards an objective episode forecasting. **Environmental Monitoring and Assessment**. v. 34, n. 3, p. 223-244. 1995.

RUTLLANT, J.; GARREAUD, R. D. Episodes of strong flow down the western slope of the subtropical Andes. **Monthly Weather Review**, v. 132, n.2, p. 611-622. 2004.

RUTLLANT, J.; SALINAS, H. Frecuencia de ocurrencia de una condición meteorológica desfavorable para la difusión de contaminantes atmosféricos en la zona central de Chile. **Tralka**. v. 2, n. 2, p. 147-160. 1982.

SAIDE, P. **Emisiones de monóxido de carbono en Santiago de Chile: Distribución espacial y optimización por modelación inversa**. Santiago, 2008. 252p. Tese (Mestrado em Ciências da Engenharia) - Departamento Ingeniería Mecánica, Universidade do Chile.

SANG, J.; HEPIN, L.; LIU, H.; ZHANG, Z. Observational and numerical studies of wintertime urban boundary layer. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. v. 87, p. 243-258. 2000.

SARRICOLEA P.; ALISTE, E.; CASTRO, P.; ESCOBEDO, C. Análisis de la máxima intensidad de la isla de calor urbana nocturna de la ciudad de Rancagua (Chile) y sus factores explicativos. **Revista de Climatología**. v. 8, p. 71-84. 2008.

SMAGORINSKY, J. General circulation experiments with the primitive equations. 1. The basic experiment. **Monthly Weather Review**. v. 91, n. 3, p. 99-164. 1963.

WALKO, R. L.; BAND, L. E.; BARON, J.; KITTEL, T. G. F.; LAMMERS, R.; LEE, T. J.; OJIMA, D.; PIELKE, R. A.; TAYLOR, C.; TAGUE, C.; TREMBACK, C. J.; VIDALE, P. L. Coupled atmosphere-biosphere-biophysics-hydrology models for environmental modeling. **Journal of Applied Meteorology**, v.39, n.6, p. 931-944. 2000.

YOSHIKADO, H. Numerical study of the daytime urban effect and its interaction with the sea breeze. **Journal of Applied Meteorology**. v. 31, p. 1146-1164. 1992.

YOSHIKADO, H. Interaction of the sea breeze with urban heat islands of diferent sizes and locations. **Journal of Meteorological Society of Japan**. v. 72, p. 139-143. 1994.

# Livros Grátis

( http://www.livrosgratis.com.br )

Milhares de Livros para Download:

Baixar livros de Administração
Baixar livros de Agronomia
Baixar livros de Arquitetura
Baixar livros de Artes
Baixar livros de Astronomia
Baixar livros de Biologia Geral
Baixar livros de Ciência da Computação
Baixar livros de Ciência da Informação
Baixar livros de Ciência Política
Baixar livros de Ciências da Saúde
Baixar livros de Comunicação
Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE
Baixar livros de Defesa civil
Baixar livros de Direito
Baixar livros de Direitos humanos
Baixar livros de Economia
Baixar livros de Economia Doméstica
Baixar livros de Educação
Baixar livros de Educação - Trânsito
Baixar livros de Educação Física
Baixar livros de Engenharia Aeroespacial
Baixar livros de Farmácia
Baixar livros de Filosofia
Baixar livros de Física
Baixar livros de Geociências
Baixar livros de Geografia
Baixar livros de História
Baixar livros de Línguas

Baixar livros de Literatura
Baixar livros de Literatura de Cordel
Baixar livros de Literatura Infantil
Baixar livros de Matemática
Baixar livros de Medicina
Baixar livros de Medicina Veterinária
Baixar livros de Meio Ambiente
Baixar livros de Meteorologia
Baixar Monografias e TCC
Baixar livros Multidisciplinar
Baixar livros de Música
Baixar livros de Psicologia
Baixar livros de Química
Baixar livros de Saúde Coletiva
Baixar livros de Serviço Social
Baixar livros de Sociologia
Baixar livros de Teologia
Baixar livros de Trabalho
Baixar livros de Turismo