

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

CINTHIA SOLEDAD ARELLANO ROJAS

CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS E NÍVEIS DE
POLUIÇÃO NA REGIÃO METROPOLITANA DE
LIMA - PERÚ

São Paulo
2013

CINTHIA SOLEDAD ARELLANO ROJAS

CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS E NÍVEIS DE
POLUIÇÃO NA REGIÃO METROPOLITANA DE
LIMA - PERÚ

Dissertação apresentada ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Meteorologia.

Área de Concentração: Meteorologia

Orientador: Prof. Dr. Edmilson Dias de Freitas

São Paulo

2013

*A mis padres Isaac y Gloria,
ellos son el pilar fundamental de todo lo que soy,
por todo su incondicional apoyo y cariño que saben
brindarme es la inspiración y el motor de mi vida.
Este trabajo está dedicado con todo mi amor para
ellos.*

Agradecimientos

Primeramente quiero agradecer al Dr. Edmilson Dias de Freitas por la orientación, por tomarse el tiempo de leer este trabajo, por los comentarios y sugerencias para mejorarlo y por la paciencia con el idioma. Igualmente, hago extenso este agradecimiento a todos los profesores del Instituto de Astronomía, Geofísica y Ciencias Atmosféricas de la Universidad de São Paulo quienes de alguna u otra forma contribuyeron a mi formación académica en esta nueva etapa.

También quiero agradecer a mis amigos Rosita, René, Marta y Olimpio, que de alguna forma colaboraron conmigo para la realización de este trabajo.

Al personal técnico, Sebastian, Jean, Djalma, Samuel y a todos mis amigos del IAG por la compañía y la amistad durante estos dos años. Agradesco a la Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) por el apoyo financiero durante la maestría, así como, al Servicio Nacional de Meteorología del Perú por proporcionar los datos necesarios para el trabajo final.

Por último, la realización de este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo y comprensión constante de mis seres queridos, que apesar de estar lejos, siempre me dieron fuerzas para seguir adelante.

A todos, sinceramente Muchas gracias!!!

*¡No es grato morir, señor, si en la vida nada se
deja y si en la muerte nada es posible, sino sobre
lo que pudo dejarse en la vida!.*

Cesar Vallejo

Resumo

Arellano Rojas, C. S. **Condições meteorológicas e níveis de poluição na Região Metropolitana de Lima - Perú.** 2013, São Paulo, 142 p. Dissertação de Mestrado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.

Este trabalho teve como objetivo investigar o transporte de ozônio associado aos padrões de circulação na Região Metropolitana de Lima (RML). Essa análise foi realizada através da modelagem numérica utilizando o modelo de mesoescala Weather Research and Forecasting/Chemistry (WRF/Chem), um modelo online que representa o acoplamento simultâneo da meteorologia com a química. Também, foi utilizada a base de dados observacionais coletados pela rede operacional do *Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú*. Foram definidos dois períodos a serem estudados. O primeiro estudo, realizado para o período entre 22 e 28 de janeiro de 2012, foi escolhido em função das condições favoráveis à formação de ozônio observadas e o segundo, realizado para o período entre 05 e 11 de julho de 2012, em função da presença de nebulosidade quase permanente cobrindo grande parte da RML, representando condições desfavoráveis à formação de ozônio. Inicialmente o modelo foi avaliado com dados observacionais de superfície para ambos os períodos de estudo mostrando resultados razoáveis estatisticamente. As concentrações de ozônio medidas nas cinco estações de monitoramento de qualidade do ar, localizadas na zona sul, centro e leste da RML apresentaram valores máximos de até 60 ppb para o ano 2012, estando os resultados obtidos com o modelo bem próximos desse valor, porém, com um antecipação em cerca de duas horas dos horários de máxima. Nas simulações foi possível verificar a presença da brisa marítima nos dois

períodos de estudo. Além disso, como esperado, observou-se que a topografia teve influência significativa na intensidade dos ventos perto da região montanhosa. No primeiro período o vento apresentou-se intenso o suficiente para deslocar a pluma de ozônio formada sobre a parte central da RML para longas distâncias a nordeste da RML. Por outro lado, durante a noite verificou-se a presença da brisa terrestre, porém, com magnitudes menores. No segundo período a brisa marítima apresentou-se menos intensa em comparação a janeiro, mas mesmo assim foi suficiente para deslocar a pluma até a parte nordeste de Lima, especificamente sobre as províncias de Canta e Huarochiri. Entretanto, diferentemente do primeiro período, a brisa terrestre apresentou-se com intensidade suficiente para possibilitar o retorno da pluma de ozônio até a RML, que possivelmente favorece a ocorrência de picos noturnos sobre a região durante a madrugada, os quais foram observados nas estações de monitoramento de qualidade do ar. Os resultados obtidos mostram que, apesar da grande influência exercida pela topografia acentuada da Cordilheira dos Andes, circulações de brisa marítima, associadas com a atividade na região urbana de Lima, podem ter papel significativo sobre o processo de dispersão de poluentes na região.

Palavras-chave: Química da Atmosfera, Poluição Urbana, WRF/Chem

Abstract

Arellano Rojas, C. S. **Atmospheric conditions associated with pollution levels in the Lima Metropolitan Region - Perú.** 2013, São Paulo, 142 p. Master Dissertation, Institute of Astronomy, Geophysics and Atmospheric Sciences of the University of São Paulo.

This work aimed at studying the ozone transport associated with circulation patterns in Lima Metropolitan Region (LMR). The study was performed by using numerical modeling with the Weather Research and Forecasting/Chemistry (WRF/Chem) mesoscale/air quality model which is an online coupled meteorology and chemistry model. Moreover, we made use of observational data collected by *Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú*. Two study periods were defined. The first one corresponds to the period from 22 to 28 January of 2012, which was selected because favorable ozone formation conditions were observed, whereas the second one corresponds to the period from 05 to 11 July of the same year, which was selected because of the permanent overcast conditions that cover great part of LMR and provide unfavorable conditions for ozone formation. The initial validation of the model was performed by using surface observed data for both of the study periods showing statistically reasonable results. Ozone concentrations measured in five air quality monitoring stations, located in the southern, central and eastern part of LMR, showed maximum values up to 60 ppb for 2012, which are very close to the results obtained with the model up to about two hours in anticipation of the time of maximum. The simulations verified the presence of sea breeze in both study periods. Apart from that, as expected, it was observed that the topography influenced the intensity of winds near to the mountainous region. During the first

period, the wind was intense enough to move the ozone plume, which was initially formed over the central part of the LMR, far away from the LMR itself towards the northeast. On the other hand, during the night, the presence of the land breeze was verified, although weak magnitudes were observed. In the second period, the sea breeze became less intense compared to January, but it still managed to move the ozone plume to the north-east of Lima, specifically over the provinces of Canta and Huarochiri. In contrast to the first study period, in this period the land breeze was observed to be intense enough to make the ozone plume to return to the LMR which could favor the presence of ozone peaks in the early morning, which were observed in the air quality monitoring stations. The results we obtained, show that despite the great influence of the accentuated topography of the Andes, sea breeze circulations, associated with urban activity in Lima, may have a significant role in the process of air pollutants dispersion in the region.

Keywords: Atmospheric Chemistry, Urban Pollution, WRF/Chem

Sumário

Resumo	vi
Abstract	viii
Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas	xviii
1 Introdução	19
1.1 Características climáticas de circulação de grande escala	23
1.2 Circulações locais	24
1.2.1 Efeitos pelo terreno	24
1.2.2 Brisas	25
1.2.3 Efeitos Urbanos	26
1.3 Poluição do ar	27
1.3.1 Regimes determinados pelo NO_x e COV	28
1.3.2 Formação de ozônio na troposfera	29
1.4 Enfoque e objetivos deste trabalho	32
2 Material e métodos	33
2.1 Descrição do Modelo	33
2.1.1 Parametrizações do WRF/Chem	34
2.1.2 Aninhamento de grade	38
2.2 Região de estudo e dados observados	38
2.2.1 Estudos de caso	40
2.2.2 Configuração do modelo	52

2.2.3	Inventário de emissões	56
2.2.4	Emissões consideradas no WRF/Chem	58
2.3	Parâmetros estatísticos	61
3	Resultados	63
3.1	Validação do modelo WRF	63
3.1.1	Caso de janeiro de 2012	64
3.1.2	Caso de julho de 2012	81
3.2	Papel das circulações locais sobre a dispersão dos poluentes	95
3.2.1	Caso de janeiro de 2012	95
3.2.2	Caso de julho de 2012	115
4	Conclusões e perspectivas	133
4.1	Sugestões para trabalhos futuros	137
	Apêndice	138
	Referências Bibliográficas	139

Lista de Figuras

1.1	Crescimento da área urbana de Lima (Fonte: <i>Instituto Nacional de Estadística e Informática</i> (INEI))	21
1.2	Frota veicular aproximada para Lima Metropolitana (Barra vermelha) e nacional (barra azul) desde o ano 2000 até 2011, os dados foram fornecidos pelo ministério de transportes e comunicações.	21
1.3	Isopletas de ozônio em relação as concentrações de NO_x e COV (fonte: Seinfeld e Pandis (2006)).	28
2.1	Exemplos de aninhamento de grades permitidos no WRF. Fonte: A Description of the Advanced Research WRF Version 3 (Skamarock et al. 2008).	38
2.2	a)Localização das estações da rede de monitoramento de qualidade do ar e topografia da região e b) Principais vias de transporte da Região Lima Metropolitana (Direita), fornecidos pela PROTRANSPORTE (PROTRANSPORTE, 2005). O domínio mostrado é a grade aninhada mais interna do modelo que é de 3 km.	39
2.3	Perfil médio mensal da a)temperatura ambiente e b)razão de mistura.	41
2.4	Boxplot para a altura da base (cor azul) e topo (cor vermelho) da camada de inversão térmica.	42
2.5	Mapas sinóticas na superfície para as 00Z (19 hora local) do dia 22 até 27 de janeiro (Fonte: http://www.cptec.inpe.br/).	43
2.6	Mapas sinóticos em 850 mb para as 00Z (19 hora local) do dia 22 até o dia 27 de janeiro (Fonte: http://www.cptec.inpe.br/).	44

2.7	Imagens do satélite GOES 12 para o período entre os dias 22 e 27 de janeiro 2012.	45
2.8	METAR para o mês de Janeiro de 2012. Em (a): altura das nuvens, sendo a cor azul relativa às nuvens baixas e a cor vermelha às nuvens médias. Em (b): porcentagem de nebulosidade, sendo CAVOK: 0/8, FEW: 1-2/8, SCT: 3-4/8, BKN: 5-7/8, OVC: 8/8.	46
2.9	Mapas sinóticos na superfície para as 00Z (19 hora local) do dia 05 até 10 de julho (Fonte: http://www.cptec.inpe.br/).	48
2.10	Mapas sinóticos em 850 mb para as 00Z (19 hora local) do dia 05 ao dia 10 de julho (Fonte: http://www.cptec.inpe.br/).	49
2.11	Imagens no canal Infravermelho do satélite GOES 12 para o período entre os dias 5 e 10 de julho de 2012.	50
2.12	METAR para o mês de Julho de 2012. Em (a): altura das nuvens, sendo a cor azul relativa às nuvens baixas e a cor vermelha às nuvens médias. Em (b): porcentagem de nebulosidade, sendo CAVOK: 0/8, FEW: 1-2/8, SCT: 3-4/8, BKN: 5-7/8, OVC: 8/8.	51
2.13	Domínios para o modelo com espaçamento de grade de 27 km, 9 km, y 3 km com 500x430, 354x354 e 198x198 pontos, respectivamente, centrados na latitude -12 e longitude -77.	52
2.14	51 níveis verticais do modelo usados nas simulações, dos quais 15 níveis encontram-se abaixo de 1 km.	55
2.15	a) Imagem das luzes noturnas, fornecidas pelo sensor <i>Operational Lixan System</i> (OLS) do programa de satélite <i>Defense Meteorological Satellite Program</i> (DMSP) e b) Emissões simuladas pelo modelo WRF/Chem no terceiro domínio (espaçamento de grade de 3 km). . .	60
2.16	Ciclo diurno das emissões sobre Lima, fonte (Lents et al., 2004) . (Final report: Lima Vehicle Activity Study, 2004)	60

3.1	Comparação da temperatura observada (azul) e simulada (vermelha) para a estação de a) Campo de Marte, b) Santa Anita, c) Aeropuerto, d) Punta Lobos, e) Agua Azul, f) Ancon, g) Von Humbolt, h) San Borja e i) Villa María del Triunfo para o período de 22 a 28 de janeiro de 2012	65
3.2	Comparação da umidade relativa observada (azul) e simulada (vermelha) para o período de 22 a 28 de janeiro de 2012	66
3.3	Rosa dos ventos observada (estação-O) e simulada (estação-S), para o período de simulação entre 22 e 28 de janeiro 2012.	68
3.4	Radiação solar observada e simulada na estação de Von Humbolt . . .	69
3.5	Santa Anita: Esta estação está localizada sobre um edifício de dois andares e perto de uma estação de serviços de combustível	72
3.6	San Borja: Esta estação está localizada num campo esportivo circundado por ruas muito movimentadas e edifícios baixos	72
3.7	Campo de Marte: Esta estação está localizada na esquina de um parque e em frente existe um edifício alto	73
3.8	Villa María del Triunfo: Esta estação está localizada no meio de um parque próximo à montanhas baixas	73
3.9	Ate: Esta estação está localizada entre uma montanha e a avenida principal que une Lima com o centro do país	74
3.10	Comparação da concentração de ozônio entre os dados simulados e observados nas quatro estações de monitoramento de qualidade do ar a) AS, b) SB, c) CM e d) VM.	75
3.11	Concentração média de ozônio [ppb] das quatro estações de qualidade do ar, simulada (vermelho) e observada (azul).	75
3.12	Média horária da concentração de ozônio simulado para o período entre 23 e 28 de janeiro.	77
3.13	Concentração de NO_x para as cinco estações de monitoramento de qualidade do ar Ate, CM, SA, SB e VM, entre 23 e 28 de janeiro de 2012.	78
3.14	Concentrações médias de NO_x observada (azul) e simulada (vermelha). 79	

3.15 Média horária das concentrações de NO_x (ppb) simuladas para o período de 23 a 28 de janeiro de 2012.	80
3.16 Comparação entre a temperatura observada (azul) e simulada (vermelha) para o período de 05 a 11 de julho de 2012	83
3.17 Comparação entre a umidade relativa observada (azul) e simulada (vermelha) para o período de 05 a 11 de julho de 2012	84
3.18 Rosa dos vento observada (estação-O) e simulada (estação-S), para o período de 05 a 11 de julho 2012.	85
3.19 Comparação dos dados observados com os simulados das concentrações de ozônio nas quatro estações de monitoramento de qualidade do ar.	89
3.20 Concentração média de ozônio [ppb] das quatro estações de qualidade do ar, simulada (vermelho) e observada (azul)	89
3.21 Média horária da concentração de ozônio simulada para o período de 06 a 11 de julho de 2012.	91
3.22 Concentrações de NO_x nas cinco estações de monitoramento Ate, CM, SA, SB e VM.	92
3.23 Concentrações médias observadas nas cinco estações(azul) e simuladas pelo modelo(vermelho).	92
3.24 Média horária da distribuição espacial das concentrações de NO_x (ppb) para o período entre 06 e 11 de janeiro.	94
3.25 Evolução do campo do vento ($m.s^{-1}$) e pressão reduzida ao nível do mar (hPa) durante o período analisado. Em (a) 00 Z do dia 22/01/12, em (b) 12 Z do dia 22/01/12, em (c) 00 Z do dia 23/01/12, em (d) 12 Z do dia 23/01/12, em (e) 00 Z do dia 24/01/12, em (f) 12 Z do dia 24/01/12, em (g) 00 Z do dia 25/01/12, em (h) 12 Z do dia 25/01/12, em (i) 00 Z do dia 26/01/12, em (j) 12 Z do dia 26/01/12, em (k) 00 Z do dia 27/01/12 e em (l) 12 Z do dia 27/01/12.	97
3.26 Campo de vento no primeiro nível do modelo acima da superfície para o horário a) 4 HL e b) 12 HL.	99

- 3.27 Perfil vertical da projeção do vento na direção perpendicular a linha de costa em Lima (vento de brisa) para a longitude de 77° W e latitude 12° S para o caso de janeiro (a altura encontra-se em metros e a barra de cores indica a intensidade de vento em $m.s^{-1}$). 100
- 3.28 Evolução temporal da concentração de NO_x e do campo do vento ($m.s^{-1}$) no primeiro nível do modelo. 103
- 3.29 Evolução temporal das concentrações de O_3 e do campo do vento ($m.s^{-1}$) ao primeiro nível do modelo. 109
- 3.30 Perfil vertical da velocidade w para a longitude de $76,95^\circ$ W e latitude de $11,95^\circ$ S para o caso de janeiro. (a barra de cores indica a magnitude em $m.s^{-1}$). 113
- 3.31 Perfil vertical da concentração de ozônio e altura da camada limite planetária (CLP) para a longitude de $76,95^\circ$ W e latitude de $11,95^\circ$ S para o caso de janeiro. A barra de cores indica a concentração (em ppb) e a linha vermelha pontilhada representa a altura da CLP (em metros). 114
- 3.32 Evolução do campo do vento ($m.s^{-1}$) e pressão reduzida ao nível do mar (hPa) durante o período analisado. Em (a) 00 Z do dia 05/07/12, em (b) 12 Z do dia 05/07/12, em (c) 00 Z do dia 06/07/12, em (d) 12 Z do dia 06/07/12, em (e) 00 Z do dia 07/07/12, em (f) 12 Z do dia 07/07/12, em (g) 00 Z do dia 08/07/12, em (h) 12 Z do dia 08/07/12, em (i) 00 Z do dia 09/07/12, em (j) 12 Z do dia 09/07/12, em (k) 00 Z do dia 10/07/12 e em (l) 12 Z do dia 10/07/12. 116
- 3.33 Campo de ventos no primeiro nível do modelo acima da superfície para o horário a) 4 HL e b) 12 HL. 118
- 3.34 Perfil vertical da projeção do vento na direção perpendicular à linha de costa em Lima (vento de brisa) para a longitude de 77° W e latitude 12° S para o caso de julho. A barra de cores indica a intensidade do vento em $m.s^{-1}$ 119
- 3.35 Evolução temporal da concentração de NO_x (ppb) e do campo do vento ($m.s^{-1}$) ao primeiro nível do modelo. 122

- 3.36 Evolução temporal da concentração de O_3 (ppb) e do campo do vento ($m.s^{-1}$) ao primeiro nível do modelo. 127
- 3.37 Perfil vertical de w ($m.s^{-1}$) para a longitude de $76,95^\circ$ W e latitude de $11,95^\circ$ S para o caso de julho. A barra de cores indica a intensidade em $m.s^{-1}$). 131
- 3.38 Perfil vertical da concentração de ozônio e a altura da camada limite planetária para a longitude de 76.95 W e latitude de 11.95 S para o caso de julho. A barra de cores indica a concentração (em ppb) e a linha vermelha pontilhada representa a altura da CLP (em metros). . 132

Lista de Tabelas

2.1	Localização geográfica das estações meteorológicas. Variáveis medidas são: Temperatura, umidade relativa, direção e velocidade do vento.	40
2.2	Localização geográfica das estações de monitoramento de qualidade do ar. Variáveis medidas são: NO_x , SO_2 , O_3 .	40
2.3	Resumo das parametrizações utilizadas nas simulações.	54
2.4	Fatores de emissão de CO , HC , NO_x , MP , SO_x , FC (Fator de Consumo), Composição para cada tipo de veículo.	57
2.5	Inventário de emissões de Lima Metropolitana (Expressado em 1000Ton/ano)	58
3.1	Parâmetros referentes à acurácia e precisão da temperatura simulada no período de 22 a 28 de janeiro de 2012.	70
3.2	Parâmetros referentes à acurácia e precisão da umidade relativa simulada no período de 22 a 28 de janeiro de 2012.	71
3.3	Parâmetros referentes à acurácia e precisão da temperatura simulada no período de 05 a 11 de julho de 2012.	86
3.4	Parâmetros referentes à acurácia e precisão da umidade relativa simulada no período de 05 a 11 de julho de 2012.	87
1	Tipos de veículos utilizados nas emissões.	138

Capítulo 1

Introdução

Na atualidade as grandes cidades Metropolitanas representam as maiores fontes de poluentes atmosféricos, já que estas se encontram em contínuo crescimento tanto populacional como territorial, os quais resultam em grande desenvolvimento urbano, industrial e automotor. Conseqüentemente são emitidas grandes quantidades de poluentes para a atmosfera, principalmente gerados pela queima de combustíveis, o que constitui um importante problema ambiental na qualidade do ar. Sob condições meteorológicas favoráveis de alta temperatura, alta umidade e ventos fracos que frequentemente ocorrem durante o verão, podem ser observados altos níveis de concentrações de ozônio a partir de uma complexa distribuição de fontes antropogênicas e biogênicas.

As circulações atmosféricas desempenham um papel importante sobre a qualidade do ar de uma área urbana, pois condicionam as condições meteorológicas locais. Além disso, a compreensão da relação da concentração dos poluentes com as circulações pré existentes, tanto na escala sinótica quanto local, é considerada crucial para a previsão de cenários de poluição do ar.

Para isso, é essencial a representação adequada, tanto em superfície quanto em altitude, de campos meteorológicos, como vento, temperatura e umidade, além de outros parâmetros importantes relacionados à turbulência atmosférica. São esses aspectos que determinam o transporte, horizontal e vertical, e em seguida, as condições de dispersão. É importante ressaltar que, além das condições meteorológicas, a qualidade do ar depende também das características locais, como a topografia, a

tipologia das fontes de poluentes atmosféricos, a quantidade de poluentes emitidos na região e a distribuição espacial das fontes emissoras de poluentes.

Embora seja verdade que uma ampliação da rede de observação meteorológica e de qualidade do ar seja de extrema importância, é necessário ressaltar que a implantação e operação dessas estações de monitoramento contínuo envolvem alto custo. Por outro lado, a falta de observações pode gerar uma grande dificuldade no diagnóstico real da qualidade do ar em uma determinada região. Nesse contexto, a utilização de modelos de qualidade do ar permite avaliar: as emissões de poluentes provenientes de diferentes tipos de fontes que podem ser analisadas de acordo com o impacto das concentrações geradas por essas fontes na superfície; as concentrações em torno de uma grande região e; diferentes cenários de concentrações que podem ser previstos, possibilitando a avaliação da eficiência de diferentes estratégias de controle de emissão e o impacto da implantação de novas fontes em uma determinada área. Além disso, esta ferramenta pode prover embasamento aos critérios de eventuais necessidades de redimensionamento da rede de monitoramento existente por parte dos órgãos ambientais responsáveis.

No caso da Região Metropolitana de Lima (RML) que está localizada no litoral central do Perú na região de latitude tropical (próximo aos 12° S e 77° W), no período de 1993 e 2007 houve um aumento na população de aproximadamente 2 milhões de habitantes, segundo o *Instituto Nacional de Estadística e Informática* (2007). Assim, também como na expansão da área urbana (Figura 1.1). Conseqüentemente pode-se ver um aumento na quantidade total de veículos em Lima, no período de 2000 até 2011, chegando a marca de 1 036 850 veículos no ano 2011 (Figura 1.2) que corresponde a 63% do total do país, segundo o estudo da *Superintendência Nacional de Registros Públicos* (SUNARP). Assim, a taxa média de crescimento anual para o município de Lima neste período foi 3,68%, enquanto a taxa de crescimento nacional no mesmo período foi 4,40%.

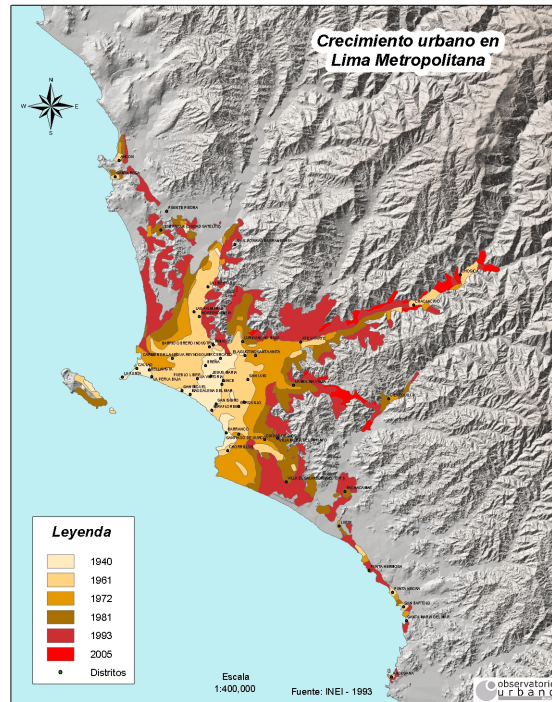


Figura 1.1: Crescimento da área urbana de Lima (Fonte: *Instituto Nacional de Estadística e Informática* (INEI))

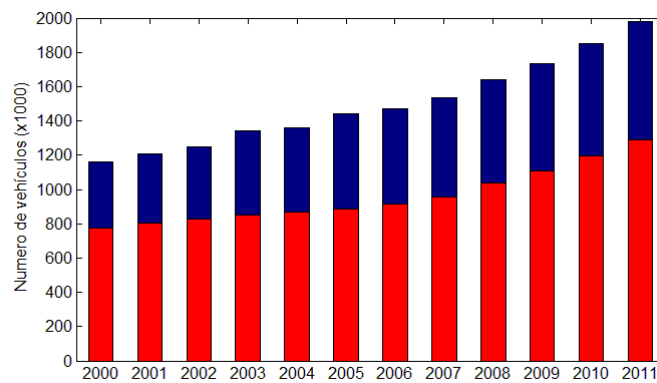


Figura 1.2: Frota veicular aproximada para Lima Metropolitana (Barra vermelha) e nacional (barra azul) desde o ano 2000 até 2011, os dados foram fornecidos pelo ministério de transportes e comunicações.

Considerando o ano de 2005 como ano-base, verificou-se que os veículos automotores são responsáveis por 97% das emissões de monóxido de carbono (CO), 97% de hidrocarbonetos (HC), 96% de óxidos de nitrogênio (NO_X), 40% de material

particulado (MP) e 42% de óxidos de enxofre (SO_X). Portanto, no caso de Lima, os veículos automotores são as principais fontes de poluição do ar, seguidos por processos industriais, queima de resíduos, movimentação e estocagem de combustíveis.

Yutaka e Taniyama (2002) fizeram medidas da concentração de NO_2 sobre a RML usando amostradores passivos. As concentrações foram monitoradas em dois diferentes períodos do ano; para o período úmido (julho) a concentração média foi de 17,1 ppb e para o período seco (janeiro) a concentração média foi de 15,3 ppb. Portanto, as concentrações de NO_2 não apresentaram grandes diferenças nas diferentes estações.

A cidade recebe alta radiação solar durante os meses de verão, o que leva a uma alta atividade fotoquímica favorecendo a produção de ozônio. No entanto, no inverno há pouca radiação solar incidente devido à presença da alta nebulosidade na região, além disso, Enfield (1981) mostrou que particularmente em Lima, uma inversão térmica esta sempre presente, desde os 950 hPa até 850 hPa entre os meses de maio até novembro aproximadamente. Durante uma inversão de temperatura o ar mais frio na parte inferior da camada não se mistura com o ar mais quente acima da mesma, desta forma, a inversão serve como uma forte tampa para conter poluentes na camada superficial da troposfera impedindo a dispersão de poluentes (Seinfeld e Pandis, 2006).

Outro fator muito importante na dispersão de poluentes é o efeito da ilha de calor urbana (ICU). Segundo Freitas (2003), a interação entre a brisa marítima e a ilha de calor intensifica as zonas de convergência no centro da área urbana, podendo ocasionar a recirculação de poluentes nessa região. Em função das circulações geradas pela ilha de calor, a penetração da corrente de brisa marítima no interior da cidade é atrasada por algumas horas e, desta forma, os poluentes permanecem concentrados sobre a área urbana até a passagem da frente de brisa marítima (Cenedese e Monti, 2003; Freitas et al., 2007). A superfície urbana, em particular, afeta os fluxos de calor sensível, calor latente e de momentum, além de afetar a convergência em superfície, altura da camada limite e suas características. Estas mudanças causam um impacto sobre a dispersão de poluentes, iniciação de tempestades, propriedades ópticas da atmosfera e muitos outros processos físicos e químicos no ambiente urbano

(Morris et al., 2001).

Dessa forma, o presente estudo buscou investigar o transporte de contaminantes a longas distâncias, provenientes de diferentes fontes, e os processos verticais de mistura na troposfera. Com o auxílio do modelo Weather Reserch Forecasting with Chemistry (WRF/Chem) descrito em Grell et al. (2005).

1.1 Características climáticas de circulação de grande escala

Um fator geográfico muito importante na América do Sul é a cordilheira dos Andes. Situada ao longo da costa oeste do continente, alcança elevações superiores a 4 km, desde o equador até aproximadamente 40° S, representando um grande obstáculo ao fluxo troposférico.

Como é explicado em Garreaud e Aceituno (2007), a quase ausência da precipitação em grande escala nas grandes áreas de oceanos subtropicais é devida à subsidência na média troposfera. O principal sistema atmosférico e oceânico que tem influência nas condições de tempo e clima do território peruano é o Anticiclone do Pacífico Sul (APS), localizado sobre a bacia sul oriental do oceano Pacífico Sul, com lentos deslocamentos ao longo das estações do ano. Assim, durante o inverno austral o APS está relativamente mais intenso e deslocado para o Equador do que no verão austral, quando o seu centro está localizado em torno de 30° S e 90° W, aproximadamente.

A pressão ao nível do mar sobre o continente é menor que o correspondente valor sobre o oceano adjacente no decorrer do ano, forçando os ventos alísios sobre o atlântico tropical a penetrar no continente na direção Leste-Oeste aproximadamente, até que estes convirjam perto da cordilheira dos Andes. Pelo oeste dos Andes tropical-subtropical (o qual atua como uma efetiva barreira para os fluxos) os ventos de baixos níveis na região do equador promovem ressurgência costeira de águas frias, mantendo uma faixa costeira de temperatura superficial do mar menor e que se estende para o oeste do equador. O aquecimento adiabático do ar acima e as frias temperaturas superficiais do mar resultam numa camada limite marinha

fria e úmida de 500 a 1000 metros de espessura, capturada por uma forte inversão térmica sobre o Pacífico sudeste subtropical (Garreaud et al., 2002).

Uma plataforma muito extensa de nuvens estratocúmulos rasas não precipitantes é tipicamente observada no topo da camada limite marinha. Esta camada de nuvens desempenha um papel importante no clima regional e global pela redução substancial na quantidade de radiação solar que alcança a superfície oceânica (o chamado efeito albedo) e por esfriamento da troposfera inferior, devido à forte emissão de radiação infravermelha para cima, na parte superior das nuvens. As regiões secas visíveis ocorrem sobre a América do Sul tropical-subtropical. A primeira região engloba o lado oeste do continente, uma faixa de 100-300 km de terra entre a linha de costa e a cordilheira dos Andes, desde aproximadamente 30° S até 5° S.

O deserto costeiro do norte do Chile e Peru é principalmente explicado pela forte subsidência de grande escala sobre o oceano Pacífico sudeste subtropical, mas a dinâmica local dos fluxos de baixos níveis poderia estar mantendo o fato de ter uma costa árida (locais com ausência de precipitação) (Abreu e Bannon, 1993). Nessas, os Andes centrais (incluindo o Altiplano) tornam-se uma fronteira verdadeiramente climática entre condições extremadamente áridas no oeste e condições úmidas no leste.

1.2 Circulações locais

As circulações de escala local são caracterizadas por uma escala de tempo de até um dia e de espaço inferior a poucas centenas de quilômetros enquadrando-se na mesoescala, podendo ser originadas por forçantes mecânicas ou térmicas devido aos efeitos geográficos (variabilidade da paisagem e a distribuição de terra e água), como são os efeitos pelo terreno, pela descontinuidade observada nas linhas de costa, cobertura nas regiões de floresta e impactos humanos no caso das cidades.

1.2.1 Efeitos pelo terreno

Sob uma região com topografia irregular como o caso de Lima, limitada a leste por montanhas, o aquecimento diferenciado entre a superfície próximo ao solo e a

atmosfera livre a uma certa distância, na mesma altura, pode desenvolver padrões locais de vento.

Quando as encostas das montanhas são aquecidas pelo sol durante o dia em condições de bom tempo, o ar quente sobe ao longo da encosta como um vento anabático. Ao longo da crista da montanha, onde os ventos se juntam a partir dos dois lados da montanha, o ar sobe acima da crista e se houver umidade suficiente pode criar nuvens cúmulos anabáticas. Associado com estes ventos encosta acima tem-se uma circulação de retorno num nível mais alto incluindo ventos fracos descendo das montanhas.

À noite, quando a encosta das montanhas é esfriada pela emissão de radiação de onda longa, o ar resfriado escoia encosta abaixo como um vento catabático frio devido a sua flutuabilidade (empuxo) negativa. Este fluxo é compensado por uma circulação de retorno por cima com ar fraco subindo.

1.2.2 Brisas

A grande capacidade calorífica dos lagos e oceanos reduz as mudanças de temperatura superficial durante um ciclo diurno para valores próximos a zero. A superfície da terra, no entanto, esquenta e esfria mais dramaticamente por causa da pequena condutividade molecular e capacidade calorífica, impedindo que a temperatura diurna se propague rapidamente desde a superfície até as camadas inferiores do solo (Stull, 1988). Portanto, o continente tende a ser mais quente que o oceano durante o dia e se esfria mais rapidamente pela emissão de radiação infravermelha durante a noite. O resultado do contraste de temperatura causa um gradiente de pressão horizontal na superfície, com variações diurnas nas circulações: brisas marítimas durante o dia e brisas terrestres durante a noite (Wallace e Hobbs, 2006).

Uma brisa marítima é um vento frio que sopra a partir do oceano para a terra (vento *onshore*) durante o dia. Esta circulação ocorre geralmente durante ventos fracos de escala sinótica sob condições de céu claro. Esta brisa é causada pelo contraste de temperatura maior ou igual a 5 °C entre a terra e a água. A velocidade do vento aumenta aproximadamente com a raiz quadrada da diferença de temperatura entre a terra e a água (Wallace e Hobbs, 2006). A frente de brisa marítima geral-

mente avança a velocidades de aproximadamente 87% da velocidade de superfície. No final do dia, a circulação da brisa do mar se dissipa e uma fraca circulação reversa chamada brisa terrestre se forma em resposta ao resfriamento da superfície da terra relativo ao mar.

Um dos fatores que afeta a formação da brisa marítima são os ventos em grande escala. Se o vento geostrófico em escala sinótica sobre a costa é forte e na direção *onshore*, este debilita o gradiente de temperatura e desfavorece o desenvolvimento da brisa marítima. Por outro lado, se o vento geostrófico esta na direção *offshore*, este intensifica o gradiente de temperatura e conseqüentemente favorece o desenvolvimento da brisa marítima. Isto foi mostrado usando um modelo bi-dimensional em um estudo feito por Estoque (1962).

A brisa marítima também interage com a camada limite convectiva, vórtices horizontais e ilha de calor urbana, causando complexas dispersões de poluentes emitidos próximo à costa.

Em regiões como a costa oeste da América, onde há uma maior faixa de montanha a uns poucos quilômetros da costa (como é o caso de Lima que está limitada ao oeste pelo oceano Pacífico e ao leste pela Cordilheira dos Andes), a brisa marítima e os efeitos de terreno aparecem combinados.

1.2.3 Efeitos Urbanos

As grandes cidades diferem das áreas rurais que se encontram nas suas redondezas por possuírem grandes construções que exercem uma forte resistência ao escoamento do ar, menos umidade da terra e vegetação, resultando em redução de evaporação. Apresentam também diferentes características, como o albedo, que são fortemente dependentes da posição do sol e alinhamento dos cânions urbanos formados pelas ruas. Outros aspectos importantes são a diferença de capacidade térmica, as grandes emissões de poluentes e a produção de calor antropogênico. Todos estes efeitos usualmente contribuem para que o centro da cidade seja mais quente que seu entorno, sendo este fenômeno conhecido como ilha de calor urbana.

Dentro dos cânions formados pelas ruas entre grandes construções, o vento pode ser canalizado e acelerado. Além disso, como ventos mais intensos atingem as por-

ções superiores das construções mais altas, estes são deslocados para abaixo, aumentando assim a velocidade dos ventos próxima à base desses edifícios. Atrás de construções individuais há frequentemente uma pequena região de circulação com ventos próximos da base da construção em direção oposta aos fortes ventos vindos da parte superior do edifício, podendo causar transporte inesperado de poluentes desde o nível da rua até a altura das janelas das construções. Em condições de ventos fracos, o aumento da rugosidade associado às dimensões das construções pode em média reduzir a velocidade do vento sobre toda a cidade, permitindo que a concentração de poluentes atinja níveis elevados.

As grandes cidades geram e armazenam muito mais calor, podendo criar camadas de mistura convectivas durante o dia e noite em condições de bom tempo. Esta fonte de calor urbano frequentemente é associada com térmicas mais intensas e correntes ascendentes (*updrafts*) sobre a cidade, com uma fraca recirculação de correntes descendentes (*downdrafts*) sobre as áreas adjacentes. Um efeito prejudicial é que os poluentes podem ser continuamente recirculados na cidade.

1.3 Poluição do ar

O tráfego veicular e a atividade industrial levam a grandes taxas de emissões de poluentes, entre eles o NO_x e compostos orgânicos voláteis (COV), os quais são os principais precursores de ozônio (O_3). A relação destes poluentes com o ozônio é um dos principais desafios aos cientistas preocupados com a poluição do ar em áreas urbanas.

É geralmente conhecido que em algumas condições locais o processo de formação de O_3 é controlado quase totalmente pelas concentrações de NO_x , sendo praticamente independente dos COV . No entanto, em outros casos a produção de O_3 é dependente do aumento na concentração dos COV e se mantém, ou até mesmo diminui, com o aumento de NO_x (Sillman, 2002).

A relação entre O_3 , NO_x e COV é especialmente importante para uma base política ambiental, devido ao perigo que O_3 representa para a saúde. Pela rápida formação de O_3 em condições com altas temperaturas e luz solar, as cidades com

clima quente tem maiores probabilidades de experimentar altas concentrações. Em diferentes áreas urbanas como aquelas localizadas no Japão, União Europeia, México, Brasil, entre outras, tem sido observados episódios de elevadas concentrações de O_3 .

1.3.1 Regimes determinados pelo NO_x e COV

A principal característica da relação entre O_3 e seus precursores (NO_x e COV) é geralmente ilustrado por um conjunto de curvas, conhecidos por isopletas. A Figura 1.3 mostra estas isopletas em que pode se observar a taxa de produção de O_3 como uma função das concentrações de NO_x e COV presentes na atmosfera.

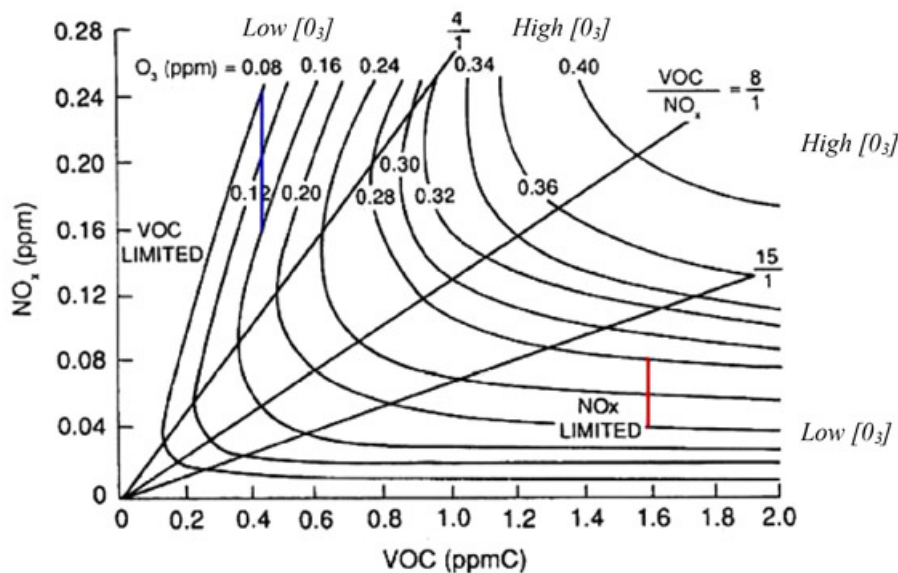


Figura 1.3: Isopletas de ozônio em relação as concentrações de NO_x e COV (fonte: Seinfeld e Pandis (2006)).

As isopletas mostram que a formação de O_3 é um processo altamente não linear em relação ao NO_x e aos COV . Quando se tem pouco NO_x a taxa de produção de O_3 é aumentada com o aumento deste poluente de maneira não linear. Assim, o NO_x aumenta lentamente a taxa de aumento na formação de O_3 e eventualmente alcança um máximo local. Em altas concentrações de NO_x a taxa de formação de O_3 poderia diminuir com o aumento no NO_x .

A linha que representa o máximo local de O_3 divide os dois regimes fotoquímicos diferentes. No regime sensível ao NO_x abaixo da linha do máximo local, ozônio aumenta com o aumento de NO_x e tem mudanças relativamente pequenas em resposta ao aumento de COV . No regime sensível ao COV , ozônio aumenta com o aumento de COV e diminui com o aumento de NO_x (Sillman, 2002).

Portanto, ozônio pode ser reduzido somente por redução de seus precursores, NO_x e COV . A diminuição nas concentrações de COV para diminuir ozônio somente será efetiva se o regime sensitivo ao COV é predominante. A diminuição nas concentrações de NO_x para diminuir o ozônio só será efetiva no regime sensível ao NO_x e pode-se aumentar o ozônio no regime sensível ao COV .

A linha que divide os dois regimes geralmente segue uma linha que representa uma razão constante COV/NO_x , com razões altas de COV/NO_x tem-se o regime sensível ao NO_x e com razões baixas tem-se o regime sensível aos COV (Sillman, 2002; Seinfeld e Pandis, 2006).

A isopleta mostra muitas características da relação $O_3 - NO_x - COV$, mas não fornece um completo entendimento. Outra informação importante a ser considerada é o padrão da evolução da massa de ar que se move a favor do vento a partir da fonte de emissão, como foi mostrado por Jiang e Fast (2004). Nesse trabalho observou-se que altos níveis de concentração de ozônio em Houston foram produzidos em função de uma grande fonte de emissão de COV afastada.

1.3.2 Formação de ozônio na troposfera

O ozônio é produzido diretamente por fotólise de NO_2 que tem como fonte a rápida conversão de NO em NO_2 , o qual é emitido nos processos de queima (Sillman, 2003). O oxigênio atômico, O , rapidamente recombina-se com O_2 para produzir O_3 . Normalmente, esta reação é compensada pela reação de NO com O_3 .





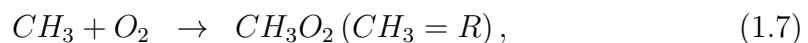
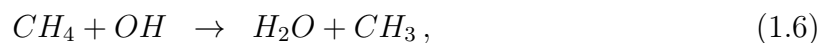
O ciclo de formação ilustrado pelas reações 1.1, 1.2 e 1.3 resultam no equilíbrio entre NO , NO_2 e O_3 com baixa formação de O_3 numa atmosfera em ausência de COV .

Cada uma dessas reações ocorre rapidamente (200 segundos ou menos). Tipicamente, os dois maiores componentes de NO_x (NO e NO_2) se ajustam para estabelecer um estado quase estável entre as reações 1.1 e 1.3.

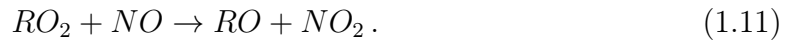
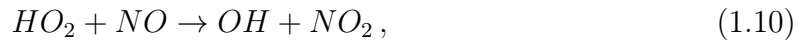
Em presença de COV , que tem como principais fontes de emissão a vegetação de floresta e os processos envolvendo a produção, armazenamento, transporte e queima de combustíveis fósseis, as reações de degradação são, em geral, iniciadas pela reação com o radical hidroxila e levam à formação de radicais intermediários alcóxi (RO_2) e hidroperóxido (HO_2). O radical OH é o principal agente de oxidação dos COV durante o dia e está naturalmente presente na atmosfera sendo a sua principal via de formação a reação de fotólise de ozônio, com a participação de vapor de água.



Desta forma o processo de oxidação dos COV , neste caso exemplificado pelo metano (CH_4), é dado pelas reações:



Estes radicais (RO_2 e HO_2) por sua vez, reagem com NO , convertendo NO a NO_2



Resultando numa alta produção de ozônio. O ozônio formado também é consumido neste caso pela reação com o NO na reação 1.3, mas em razão do grande aumento da conversão do NO para NO_2 há alta formação de ozônio quando a taxa de fotólise do NO_2 atinge o máximo, (Atkinson, 2000).

Os radicais intermediários produzidos das reações de oxidação dos COV não reagem somente convertendo NO a NO_2 , mas também consumindo ozônio, quando em baixa quantidade de NO como mostram as reações:

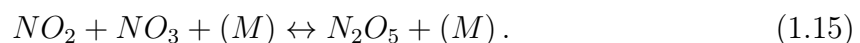


Desta forma, o balanço líquido do ozônio formado é resultado da competição entre as reações e .

Durante a noite o NO_2 é lentamente convertido em NO_3 pela reação com o ozônio:



E este é facilmente fotolisado levando a regeneração do NO_2 . No entanto, durante a noite este processo não ocorre e o NO_3 é formado, estabelecendo um equilíbrio entre NO_3 e N_2O_5 , como mostra a reação:



Ao nascer do dia novamente o radical NO_3 é rapidamente removido através da sua fotólise. À noite a principal fonte de remoção é a conversão a ácido nítrico (HNO_3) na reação com a água:



Além disso, o NO_3 reage com os COV à noite, principalmente com os alcenos e os compostos orgânicos contendo enxofre, podendo formar diversos produtos.

1.4 Enfoque e objetivos deste trabalho

O presente estudo tem como objetivo investigar o transporte atmosférico associado às concentrações de poluentes na Região Metropolitana de Lima (RML) - Peru, em mesoescala.

Como objetivos específicos pode-se citar:

- Validação dos resultados obtidos através do uso de dados experimentais coletados.
- Verificação da sensibilidade dos modelos às variações nas condições iniciais das concentrações dos poluentes precursores.
- Verificar como a cobertura de nuvens, presente em boa parte do ano em Lima, pode afetar as circulações locais e, conseqüentemente, o processo de dispersão de poluentes.

No capítulo 2 serão apresentados os dados utilizados e a metodologia para realização deste trabalho. No capítulo 3 serão mostrados os resultados e no quarto capítulo as conclusões do trabalho.

Capítulo 2

Material e métodos

Este capítulo está dividido em três seções. Na primeira sessão faz-se uma breve descrição da ferramenta de modelagem utilizada para as simulações, o modelo *Weather Research and Forecasting/Chemistry* (WRF/Chem). Na segunda seção são apresentados a área de estudo, os dados meteorológicos observados, o inventário de emissões utilizado para a inicialização e avaliação do modelo e escolha dos períodos a serem estudados. Finalmente, na terceira seção são apresentados os índices estatísticos utilizados para a avaliação dos resultados.

2.1 Descrição do Modelo

De maneira geral, cada vez mais os sistemas de modelagem de qualidade do ar consideram uma variedade de acoplamento de processos físicos e químicos, assim como o transporte, deposição, emissões, transporte químico, interação de aerossóis, fotólise, e radiação.

O modelo WRF é o mais recente sistema numérico de previsão do tempo em mesoescala designado para tempos de previsão curtos ou longos. É de domínio público, sendo disponibilizado gratuitamente no endereço eletrônico:

http : //www.mmm.ncar.edu/wrf/users/. Trata-se de um modelo não hidrostático, que se baseia na conservação de massa, com diferentes eleições de parâmetros físicos adequados para um amplo espectro de aplicações através da escolha de diferentes escalas, desde metros até centenas de quilômetros. Os pacotes físicos consistem

na microfísica, parametrização de cúmulos, camada limite planetária (CLP), modelo de superfície de solo (MSS), radiação de onda longa e curta (Skamarock et al., 2008).

O WRF/Chem, como todos os outros modelos fotoquímicos, resolve a equação da dispersão dos poluentes atmosféricos representando os fenômenos físicos e as reações fotoquímicas que afetam as espécies químicas presentes na atmosfera e que condicionam a distribuição espacial e temporal de suas concentrações. Este modelo é um modelo online e representa o acoplamento com a química, tendo sido desenvolvido por diversas instituições, sendo elas: *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), *National Center for Environmental Prediction* (NCEP), *Forecast Systems Laboratory* (FSL), *Air Force Weather Agency* (AFWA), *Naval Research Laboratory*, *Federal Aviation Administration* e do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA).

Grell et al. (2005) o descreve com maiores detalhes, mas de modo resumido o modelo permite simular a química e os aerossóis em diferentes escalas e obter um retorno (*feedback*) entre os diferentes processos. Ao contrário dos modelos *off-line*, a componente de qualidade do ar do modelo e a componente meteorológica usam o mesmo esquema de transporte, a mesma grade, os mesmos esquemas físicos de transporte em sub-grade, mesmo passo de tempo de transporte e mistura na vertical (Grell e Baklanov, 2011).

2.1.1 Parametrizações do WRF/Chem

A seguir será dada uma breve descrição das parametrizações físicas segundo Skamarock et al. (2008) e dos módulos que descrevem os processos químicos existentes no WRF/CHEM segundo Grell et al. (2005). Mais informações sobre o modelo estão disponíveis no seguinte endereço eletrônico: <http://ruc.noaa.gov/wrf/WG11/>

- **Parametrizações Físicas:**

Microfísica

Os esquemas de parametrização de microfísica resolvem os processos de condensação e evaporação no ar. Na versão 3.1.1 do WRF, estão disponíveis nove esquemas,

sendo neste trabalho utilizado o esquema Purdue Lin (Chen e Sun, 2002) por ser um esquema indicado para o uso em pesquisas. Inclui seis classes de hidrometeoros (vapor d'água, água de nuvem, chuva, gelo de nuvem, neve e granizo). Este esquema inclui ajustes de saturação e sedimentação de gelo.

Parametrização Cúmulus

Estes esquemas são responsáveis pelos efeitos sub-grade de nuvens convectivas e/ou rasas. De modo geral, os esquemas procuram representar os fluxos verticais devido aos movimentos ascendentes e descendentes dentro das nuvens e os movimentos compensatórios que ocorrem fora das nuvens. Eles operam somente nas colunas individuais onde o esquema é acionado e fornecem perfis de aquecimento e umidade. A parametrização cúmulus é, teoricamente, válida em tamanhos de grade superiores a 10 km (não menores do que 5 km), onde eles são necessários para liberar calor latente numa escala de tempo realística na coluna convectiva. Os esquemas disponíveis na versão 3.1.1 do modelo são quatro, sendo que neste trabalho foi utilizando o esquema Grell-3D, Este esquema tem muito em comum com Grell-Devenyi (Grell e Devenyi, 2002), sendo baseado numa abordagem média de conjunto. Permitem efeitos de subsidência nas colunas adjacentes, o que torna o modelo mais adequado para uso em grades menores que 10 km. Quando utilizado em grades maiores que 10 km, a subsidência ocorre dentro da mesma coluna de grade que as correntes ascendentes.

Camada Superficial

Esquemas de camada superficial resolvem o atrito e os fluxos de calor, de quantidade de movimento e de vapor d'água na camada junto ao solo. Os esquemas de parametrização de camada superficial fornecem informações de estabilidade, e não de tendências. Três esquemas estão disponíveis, dos quais foi utilizada a teoria da Similaridade (MM5), esta utiliza diversas funções de estabilidade para calcular os coeficientes superficiais de troca de calor, umidade e momentum. Por suas características, este esquema deve ser processado em conjunto com os esquemas de camada limite planetária MRF (Medium Range Forecast Model) ou YSU (Yonsey Univer-

sity).

Esquema de superfície

Estes esquemas resolvem as trocas de calor e de água no interior do solo. Estes modelos utilizam as informações atmosféricas do esquema de camada superficial, a forçante radiativa do esquema de radiação e a forçante de precipitação dos esquemas de microfísica e convecção juntamente com informações das variáveis do estado da terra e propriedades terra-superfície para estimar fluxos de calor e umidade sobre pontos de grade no continente e sobre o mar/gelo. Não há interação horizontal entre pontos de grade vizinhos, portanto, pode-se considerar que há um modelo de coluna unidimensional em cada ponto de grade do WRF. Quatro esquemas estão disponíveis, dos quais o esquema Noah LSM sucede o esquema de Chen e Dudhia (2001). É um modelo de quatro camadas de temperatura do solo e umidade, que inclui a umidade do dossel e previsão de cobertura por neve. É um esquema mais sofisticado que inclui evapotranspiração, drenagem de solo, *runoff*, categorias de vegetação, fração mensal de vegetação e textura de solo. O esquema fornece os fluxos de calor sensível e latente para o esquema de camada limite planetária, prevê gelo no solo, efeitos de cobertura de neve e considera propriedades de emissividade.

Esquema de camada limite planetária

A camada limite planetária é responsável pelos fluxos verticais sub-grade devido aos transportes turbulentos em toda a coluna atmosférica, não somente na camada limite. Os fluxos na superfície são fornecidos pelos esquemas de camada superficial e solo-superfície. O esquema de camada limite determina os perfis de fluxo dentro da camada limite, que é bem misturada, e a camada estável, e então fornece as tendências atmosféricas de temperatura, umidade (incluindo nuvens) e momentum horizontal em toda a coluna atmosférica. Quatro esquemas disponíveis, dos quais o esquema Yonsei University (YSU), considerado a próxima geração do esquema MRF, complementa o anterior com um tratamento explícito da camada de entranhamento no topo da camada limite planetária (Hong et al., 2006).

Radiação Atmosférica

Os esquemas de radiação resolvem as trocas radiativas de onda longa (infravermelho) e de onda curta (visível e comprimentos de onda espectrais vizinhos), levando em conta os processos de absorção, reflexão e espalhamento na atmosfera e superfícies. Dentro da atmosfera, a radiação responde às distribuições de nuvens e vapor d'água, assim como às concentrações de gases como o dióxido de carbono e ozônio. Todos os esquemas de radiação do WRF são uni-dimensionais, assim, cada coluna é tratada independentemente. As opções para onda longa são três, das quais neste trabalho foi utilizado o Rapid Radiative Transfer Model (RRTM). Tal opção é similar ao esquema utilizado no modelo MM5 e baseia-se em Mlawer et al. (1997). O esquema usa tabelas Pré-determinadas para representar processos de onda longa devido ao vapor d'água, ozônio, CO_2 , considerando também a profundidade ótica da nuvem. Para as ondas curtas será utilizado Goddard descrito em Chou et al. (1998). Possui 11 bandas espectrais e considera componentes de radiação difusa e direta. Perfis climatológicos são considerados para o ozônio.

• Módulos Químicos do WRF/Chem

Os pacotes químicos dentro do WRF/Chem consistem dos seguintes componentes:

Deposição seca acoplada com o esquema solo-vegetação;

Quatro tipos para o tratamento de emissões biogênicas;

Três tipos de emissões antropogênicas;

Vários tipos para o tratamento dos mecanismos fase-gás;

Três esquemas diferentes para o tratamento da fotólise;

Quatro tipos diferentes para o tratamento do aerossol;

Efeito direto e indireto dos aerossóis;

Uma opção para o transporte passivos dos gases traço (gases do efeito estufa);

Uma opção de traçador de transporte no qual o mecanismo químico, deposição seca, etc, tem sido desligados;

Um modelo de elevação de pluma para tratar de emissões de incêndios florestais.

2.1.2 Aninhamento de grade

O WRF permite simular o pacote químico com múltiplos domínios aninhados usando a mesma metodologia que é usada para o tratamento da meteorologia.

A versão 3.1.1 do WRF suporta o aninhamento horizontal de grades. As grades aninhadas devem ser retangulares e alinhadas com a grade original (Figura 2.1). Embora similar ao utilizado em outros modelos de mesoescala, no WRF, as grades aninhadas podem ser movidas ao longo do processamento. O WRF permite também que o fluxo das simulações com grades aninhadas ocorra em uma (*one-way*) ou duas direções (*two-way*). Os tipos *one-way* ou *two-way* indicam o método pelo qual as grades interagem entre si. No modo *1-way* os resultados da grade maior são utilizados como condição de contorno para a grade aninhada. No modo *two-way*, o fluxo é similar, porém, os pontos da grade maior que estão dentro da grade aninhada têm seus valores alterados para aqueles obtidos pela grade aninhada. A Figura 2.1.a mostra um exemplo de configuração de aninhamento em relação à grade Arakawa-C.

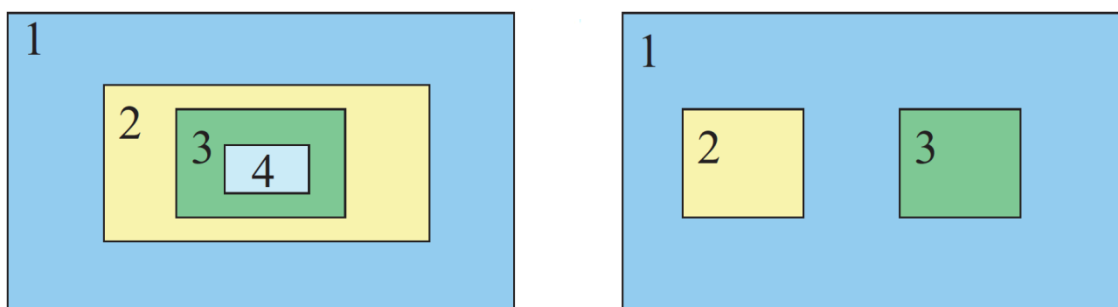


Figura 2.1: Exemplos de aninhamento de grades permitidos no WRF. Fonte: A Description of the Advanced Research WRF Version 3 (Skamarock et al. 2008).

2.2 Região de estudo e dados observados

Como na maioria das grandes cidades, além das estações meteorológicas (Tabela 2.1), Lima tem uma rede de monitoramento de qualidade do ar em superfície que mede continuamente as concentrações de ozônio, NO_x , SO_2 e material particulado (Tabela 2.2), todas elas administradas pelo *Servicio Nacional de Meteorología y Hidrología del Perú* (SENAMHI). As localizações das estações de monitoramento

das variáveis meteorológicas e de qualidade do ar são mostradas na Figura 2.2, junto com o mapa das principais avenidas e ruas da zona urbana de Lima.

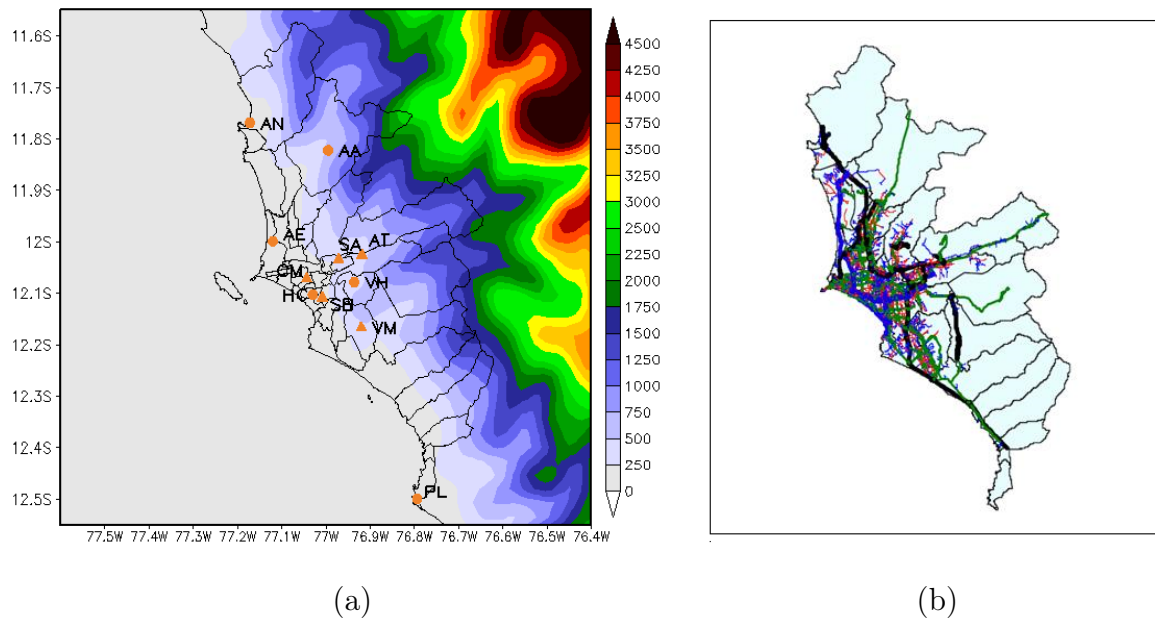


Figura 2.2: a) Localização das estações da rede de monitoramento de qualidade do ar e topografia da região e b) Principais vias de transporte da Região Lima Metropolitana (Direita), fornecidos pela PROTRANSPORTE (PROTRANSPORTE, 2005). O domínio mostrado é a grade aninhada mais interna do modelo que é de 3 km.

Tabela 2.1: Localização geográfica das estações meteorológicas. Variáveis medidas são: Temperatura, umidade relativa, direção e velocidade do vento.

Estação Meteorológica	Latitude	Longitude	Altitude	Nome
Ancon	11°46'11"	77°10'20"	9m	AN
Agua Azul	11°49'26.2"	76°59'42"	344m	AA
Aeropuerto	12°1'27.26"	77°6'39"	13m	AE
Santa Anita	12°02'3.48"	76°58'17.2"	276m	SA
Campo de Marte	12°04'14.5"	77°02'35.5"	110m	CM
Hospital Central FAP	12°06'13.4"	77°01'47"	158m	HC
Von Humbolt	12°4'55"	76°56'21"	510m	VH
Ponta Lobos	12°30'1.3"	76°47'37.3"	92m	PL

Tabela 2.2: Localização geográfica das estações de monitoramento de qualidade do ar. Variáveis medidas são: NO_x , SO_2 , O_3 .

Estação Qualidade do ar	Latitude	Longitude	Altitude	Nome
Campo de Marte	12°04'14.5"	77°02'35.5"	110msnm	CM
Ate	12°01'34"	76°55'07"	362msnm	AT
San Borja	12°06'31.06"	77°00'27.96"	136msnm	SB
Santa Anita	12°02'3.48"	76°58'17.2"	276msnm	SA
Villa Maria del Triunfo	12°09'59"	76°55'12"	292msnm	VM

Dados da atmosfera superior também serão utilizados nesse trabalho e são obtidos por meio de radiossondagens realizadas às 12UTC (07:00 horário local). Esses dados da atmosfera superior são obtidos através do seguinte endereço eletrônico: [HTTP://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html](http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html)

2.2.1 Estudos de caso

Para a escolha dos estudos de caso foi verificada a sazonalidade da temperatura e da umidade relativa troposférica na vertical, através das informações fornecidas pelas

radiossondas lançadas às 12Z (07:00 HL) na estação do aeroporto, no período de 1992-2005 e 2010/10 - 2012.

Na Figura 2.3.a, b é apresentada uma média do perfil vertical da temperatura e do perfil vertical da umidade relativa, respectivamente. Através dessa figura é possível verificar que tanto a temperatura quanto a umidade relativa apresentam um ciclo anual bem definido.

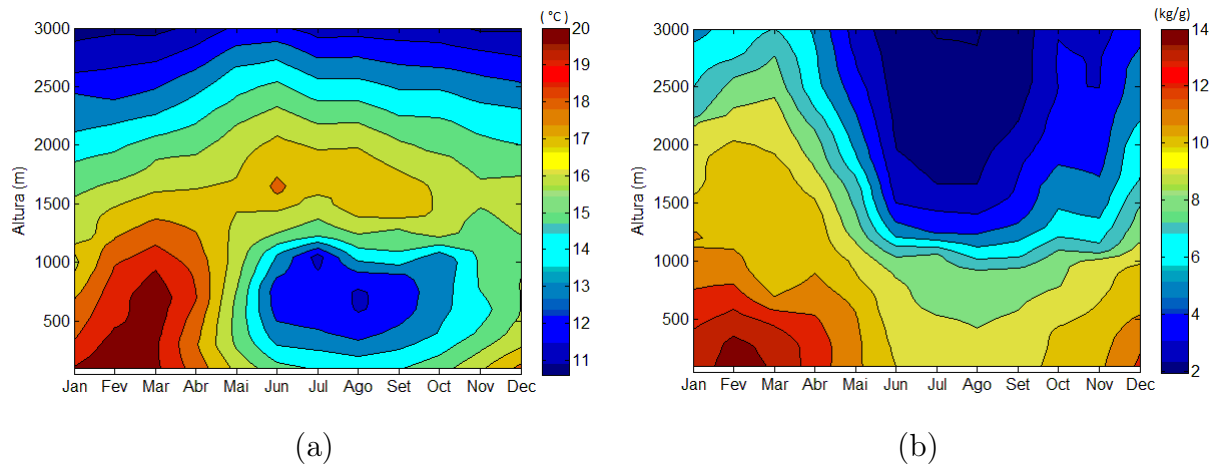


Figura 2.3: Perfil médio mensal da a) temperatura ambiente e b) razão de mistura.

A temperatura (Figura 2.3.a), durante os meses de verão (dezembro a março), apresenta um comportamento tal que os valores vão diminuindo com a altura sem apresentar fortes inversões térmicas. Já nos meses que vão de março a novembro a temperatura apresenta valores que diminuem até a altura de 1200 m de altitude, a partir dessa altitude é observada uma camada de inversão térmica, que apresenta valores baixos de razão de mistura (Figura 2.3.b). Esta característica do perfil vertical de temperatura e razão de mistura também foi observada por Enfield (1981).

Para uma melhor visualização calculou-se um "boxplot" da altura da base da camada de inversão térmica e o topo da inversão média mensal desde 1992 até 2012, mostrados na Figura 2.4. Nesta figura a cor azul representa a base da camada de inversão e a cor vermelha o topo da camada. A diferença da temperatura entre a base e o topo da camada de inversão para os meses de verão é de 2 graus e para os meses de inverno é de 6 graus aproximadamente. Para a razão de mistura a diferença no verão é de 2g/kg e no inverno é de 6g/kg aproximadamente.

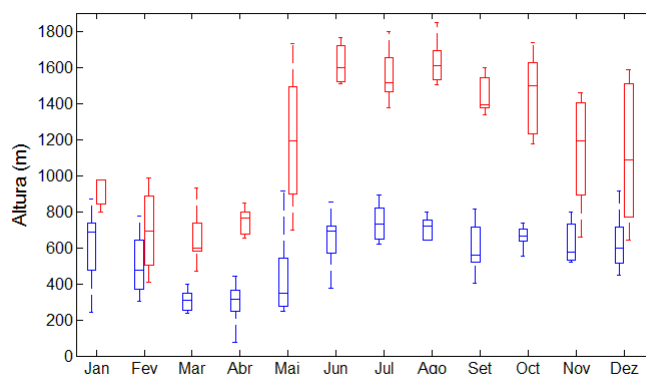


Figura 2.4: Boxplot para a altura da base (cor azul) e topo (cor vermelho) da camada de inversão térmica.

Portanto, segundo a breve revisão das variáveis no perfil pode se dizer que os meses favoráveis para a produção de ozônio são os meses de verão, por terem, além de maior incidência de radiação solar, uma fraca camada de inversão (diferença de temperatura de 2 graus) e maior umidade. Por outro lado, os meses de inverno apresentam as condições menos favoráveis a produção de ozônio.

Com isso, escolheu-se para análise um período no verão e outro no inverno por meio de simulações com o WRF/Chem. Além das considerações apresentadas acima, deve-se considerar a disponibilidade dos dados, tanto de qualidade de ar (cinco estações em funcionamento a partir de 2010 até hoje) quanto de dados meteorológicos. Deste modo, os estudos de caso foram realizados para janeiro (de 22 a 28) e julho (de 5 a 11) de 2012.

Estudo de caso para o verão

O período escolhido para análise no verão foi de 22 a 28 de janeiro de 2012 conforme descrito anteriormente. Uma breve descrição das condições meteorológicas e da composição da atmosfera para este período será dada a seguir.

Na RML a estação de verão é caracterizada como a estação mais seca do ano. Nas análises de cartas sinóticas na superfície nota-se que para os dias 23 e 24 o predomínio de áreas de baixa pressão entre a Bolívia, Paraguai, Argentina, Uruguai e Rio Grande do Sul. Estes sistemas de baixa pressão aceleram o transporte de

calor e umidade da faixa norte do continente para altitudes mais altas. No dia 25 observa-se um ciclone extratropical sobre o Oceano Pacífico com centro de baixa pressão igual a 987 hPa em 55° S e 98° W, Já no dia 26 um sistema frontal atua sobre o Pacífico ao sul de 35° S. No dia 27 sistemas frontais podem ser vistos ao sul de 40° S no Pacífico e ao sul de 48° S no Atlântico. A Alta Subtropical do Pacífico Sul (ASPS) está bastante extensa com valores variantes entre 1020 e 1028 hPa centrado no primeiro dia por volta de 42° S e 93° W com pequenos deslocamentos diários até 32° S e 58° W no dia 27. A zona de Convergência Intertropical (ZCIT) oscila em torno de 5° N e 1° N no Pacífico e entre 4° N e 2° N no Atlântico durante todo o período.

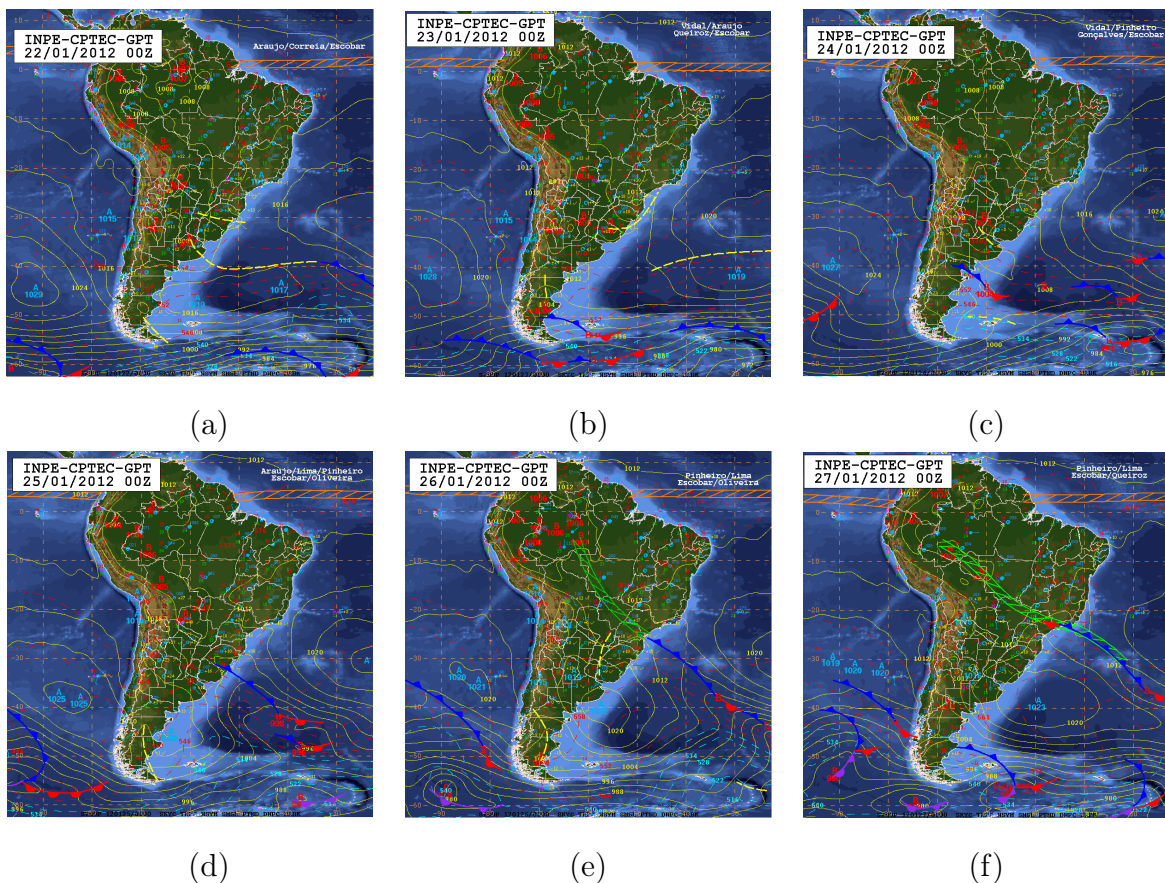


Figura 2.5: Mapas sinóticos na superfície para as 00Z (19 hora local) do dia 22 até 27 de janeiro (Fonte: <http://www.cptec.inpe.br/>).

No nível 850 hPa, nota-se a predominância do escoamento anticiclônico da Alta Subtropical na faixa leste e nordeste do Brasil, com fluxo de nordeste e de leste

nessas regiões. Este padrão advecta calor e umidade que, associada à divergência em altitude, intensifica a instabilidade no interior do continente. Sobre o interior do Brasil nota-se o estabelecimento de um canal de umidade associado ao fluxo alinhado noroeste/sudeste, provocado pelo padrão do escoamento da Alta subtropical e de um cavado frontal no oceano. Este canal caracteriza a zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e transporta calor e umidade da Amazônia para o Centro- Oeste e Sudeste do Brasil. Ainda no dia 27, ao sul de 40° S no oceano Pacífico, continente e oceano Atlântico, verifica-se cavados em uma área de ventos significativos e gradiente de geopotencial que são reflexos dos sistemas em altitude e dos sistemas frontais presentes sobre os oceanos.

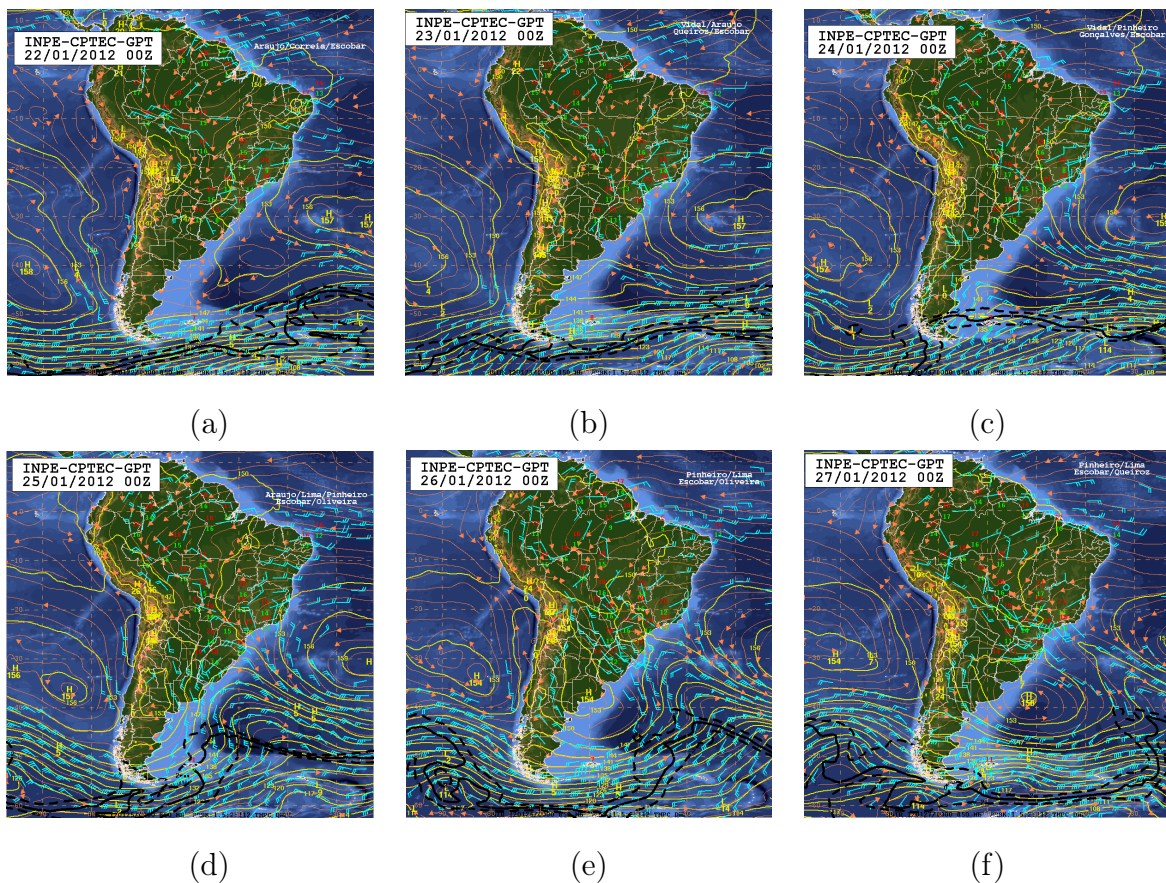


Figura 2.6: Mapas sinóticos em 850 mb para as 00Z (19 hora local) do dia 22 até o dia 27 de janeiro (Fonte: <http://www.cptec.inpe.br/>).

Portanto, segundo a análise sinótica, a região encontra-se fracamente influenciada pela ASPS, e por ser este um dos fatores que influenciam a subsidência sobre a

região de estudo tem-se uma camada de inversão bem fraca. Nas imagens de satélite é possível observar que Lima encontra-se com um céu quase limpo. No entanto, na direção leste tem-se um acúmulo de nuvens que não passam completamente para o lado oeste em virtude da barreira formada pela cordilheira dos Andes, não permitindo que as nuvens cheguem sobre Lima. Entretanto, em altitudes maiores tem-se a chegada de umidade oriunda da Amazônia, contribuindo para que o mês de janeiro apresente, frequentemente, nuvens altas.

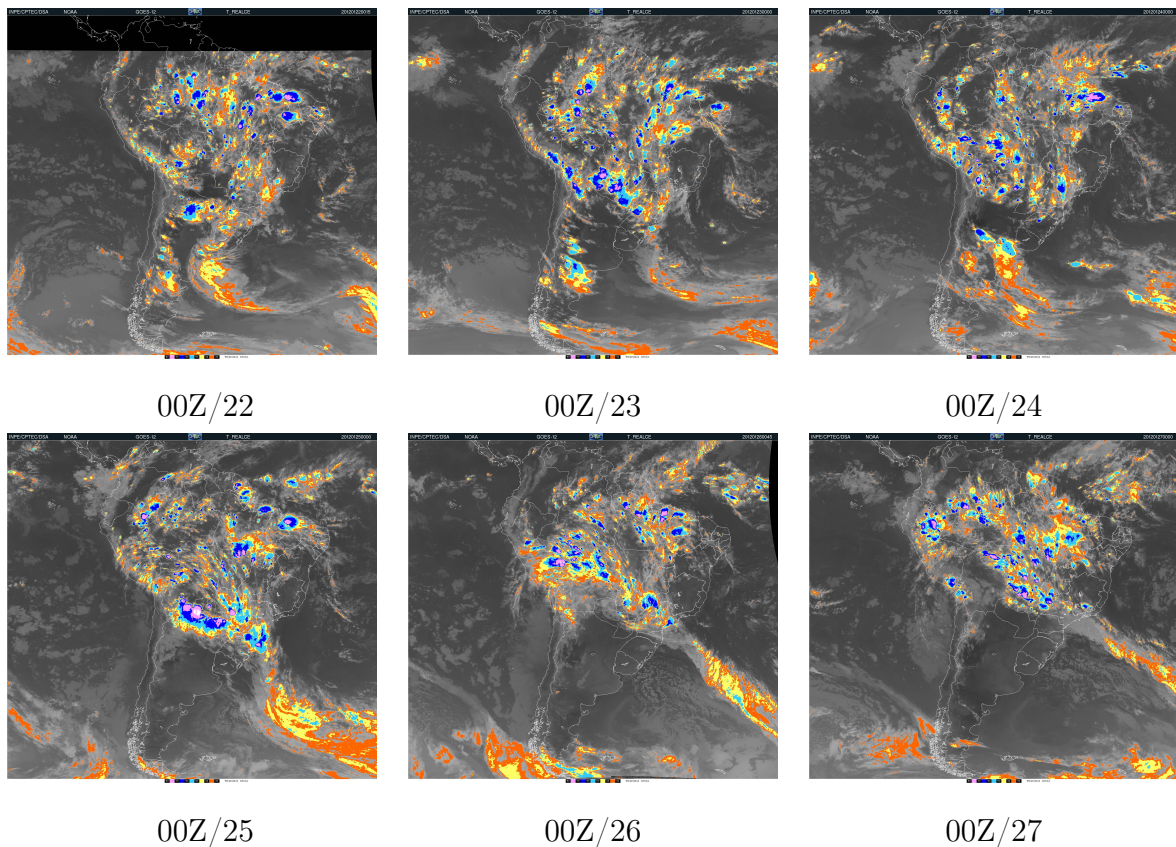
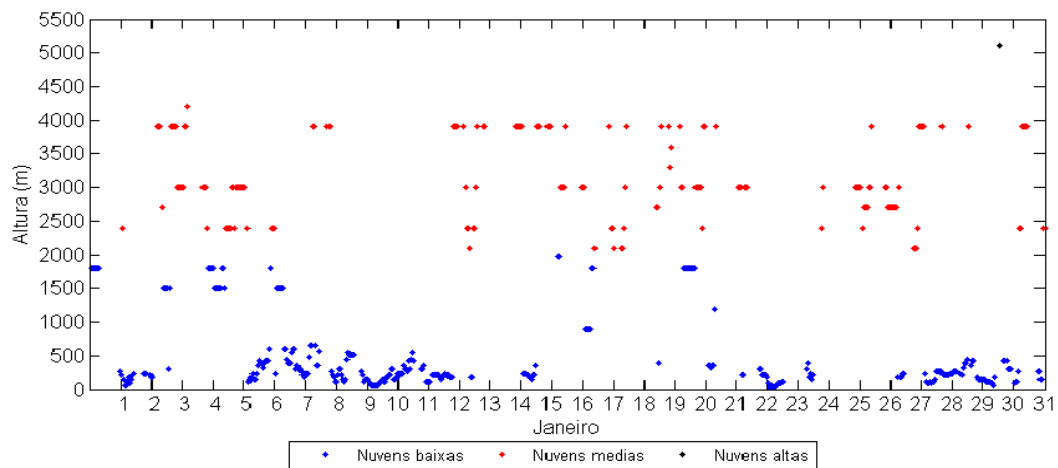


Figura 2.7: Imagens do satélite GOES 12 para o período entre os dias 22 e 27 de janeiro 2012.

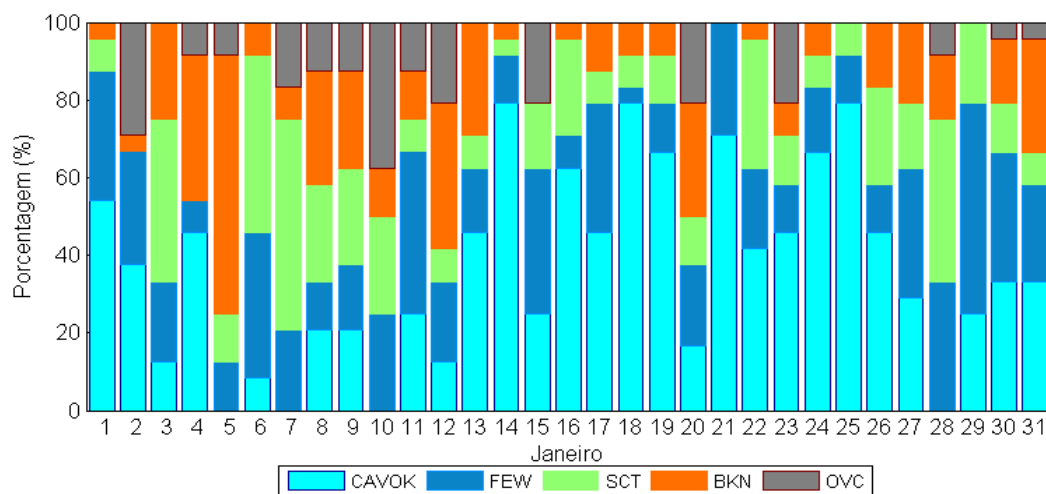
Para a melhor descrição da região de estudo, foram analisadas as condições da atmosfera em termos da cobertura de nuvens. A quantidade ou fração de nuvens foi calculada considerando os dados do aeroporto de Lima, disponíveis através de códigos METAR (As nuvens são classificadas com base na quantidade de octais do céu que eles cobrem) o qual considera que CAVOK apresenta um céu limpo de nuvens, FEW apresenta baixa nebulosidade (1-2 oitavos), SCT apresenta nebulosidade

sidade dispersa (3-4 oitavos), BKN apresenta nuvens fragmentadas (5-7 oitavos) e OCV apresenta céu totalmente coberto de nuvens.

Neste período observou-se que a altura das nuvens encontrava-se abaixo dos 500 metros (Figura 2.8) e observa-se que em termos percentuais o céu apresenta pouca quantidade de nuvens ou céu quase limpo durante todo o período (Figura 2.8.b).



(a)



(b)

Figura 2.8: METAR para o mês de Janeiro de 2012. Em (a): altura das nuvens, sendo a cor azul relativa às nuvens baixas e a cor vermelha às nuvens médias. Em (b): porcentagem de nebulosidade, sendo CAVOK: 0/8, FEW: 1-2/8, SCT: 3-4/8, BKN: 5-7/8, OVC: 8/8.

O valor médio semanal da temperatura superficial do mar (TSM) registrada na estação fixa Callao (latitude 12.04° S) coletados pela rede de laboratórios do

Instituto del Mar del Perú (IMARPE) e a anomalia térmica calculada em base aos valores históricos atualizados correspondentes são 14,91 °C e -1,39 respectivamente para o período de 22 até 28 de janeiro de 2012, (IMARPE, 2012).

Estudo de caso para inverno

O período escolhido para análise no inverno foi de 05 a 11 de julho de 2012. Uma breve descrição das condições meteorológicas e da composição atmosférica para este período será dada a seguir. Na RML a estação de inverno é caracterizada como a estação mais úmida do ano.

Na RML o inverno é caracterizado como a estação mais úmida do ano. Nas análises das cartas sinóticas, em superfície, nota-se que durante o período a ASPS está bastante ampla e atua com valores variando entre 1028 e 1041 hPa, centrada no primeiro dia por volta de 38° S e 101° W, com pequenos deslocamentos até 43° S e 94° W. Nos dias 7 e 8 existe uma frente fria ao sudeste do continente. Um cavado atua no sul do continente. Dois sistemas frontais atuam no Pacífico ao sul de 40° S. O dia 9 a ASPS se deslocou mais a sul e encontra-se centrada em 43° S e 94° W. Nos dias 10 e 11 a ASPS desloca-se até 40° S e 97° W com núcleo de 1041 hPa. Neste período a ZCIT oscila entre 9° N e 5° N no Pacífico e entre 11° N e 5° N no Atlântico.

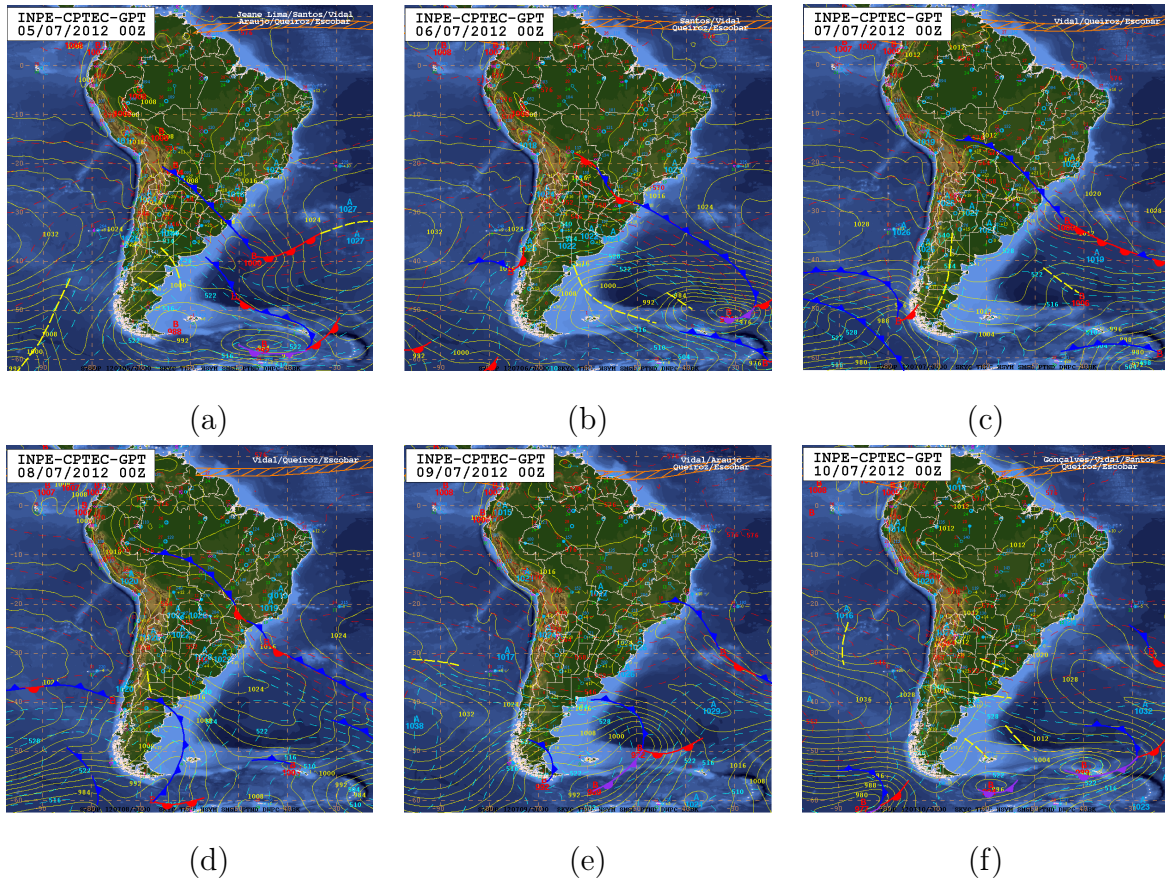


Figura 2.9: Mapas sinóticos na superfície para as 00Z (19 hora local) do dia 05 até 10 de julho (Fonte: <http://www.cptec.inpe.br/>).

No nível de 850 hPa nos dias 5 e 6 observa-se intenso escoamento de quadrante norte, associado ao Jato de Baixos Níveis (JBN) e a ASAS em superfície. O fluxo deste jato advecta ar relativamente mais quente e úmido e contribui para o desenvolvimento de instabilidade também provocada pela aproximação de um sistema frontal que atua em superfície na retaguarda destas áreas. Nos dias 6 e 7 observa-se um vórtice ciclônico bem ao noroeste. Ventos intensos de quadrante leste penetram pelas regiões Nordeste e Norte do Brasil e convergem devido a barreira orográfica provocada pelos Andes para Bolívia, Paraguai, Mato Grosso do Sul e Sul do Brasil levando ar relativamente mais quente e úmido para estas áreas. No dia 8 a maior influência do escoamento de leste comentado anteriormente é para a faixa leste do Nordeste, promovendo muitas nuvens e chuva isolada nesta área. Nos dias 9 e 10 observa-se um sistema similar aos dias 5 e 6.

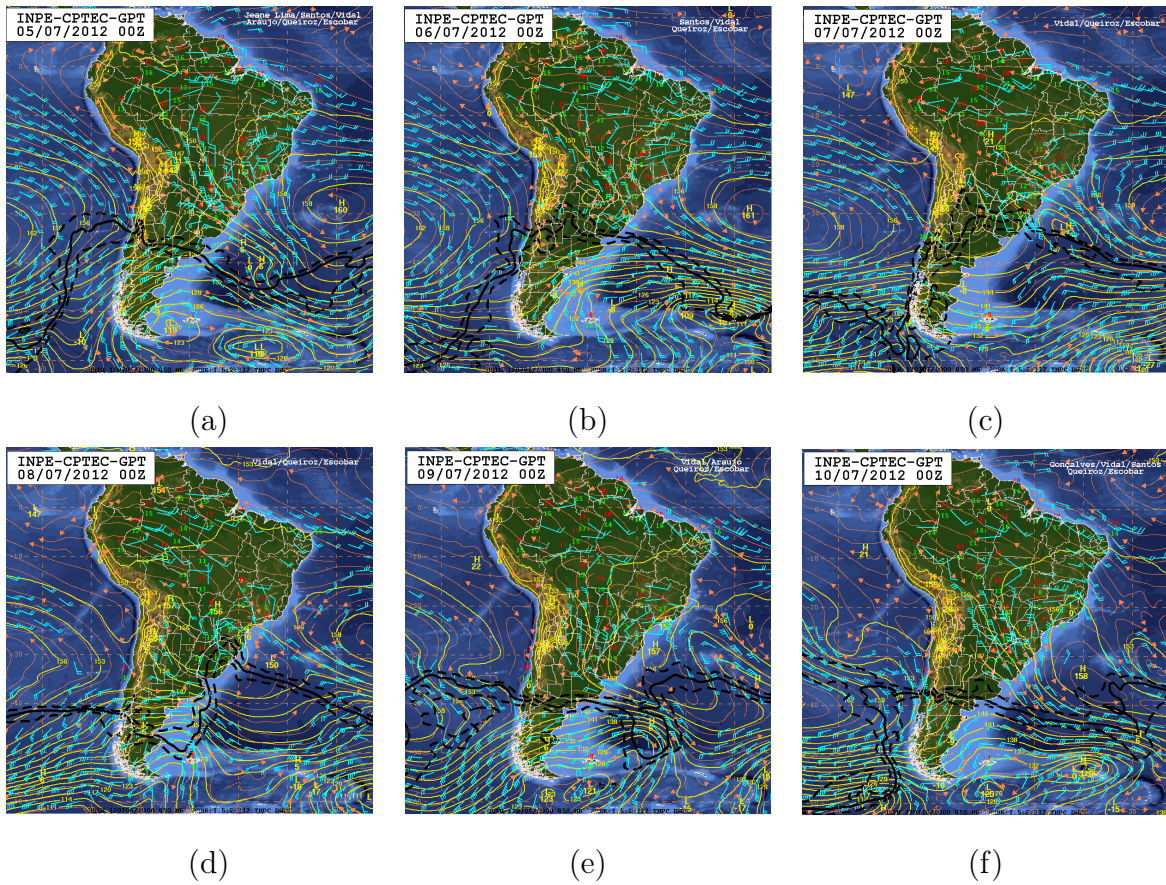


Figura 2.10: Mapas sinóticos em 850 mb para as 00Z (19 hora local) do dia 05 ao dia 10 de julho (Fonte: <http://www.cptec.inpe.br/>).

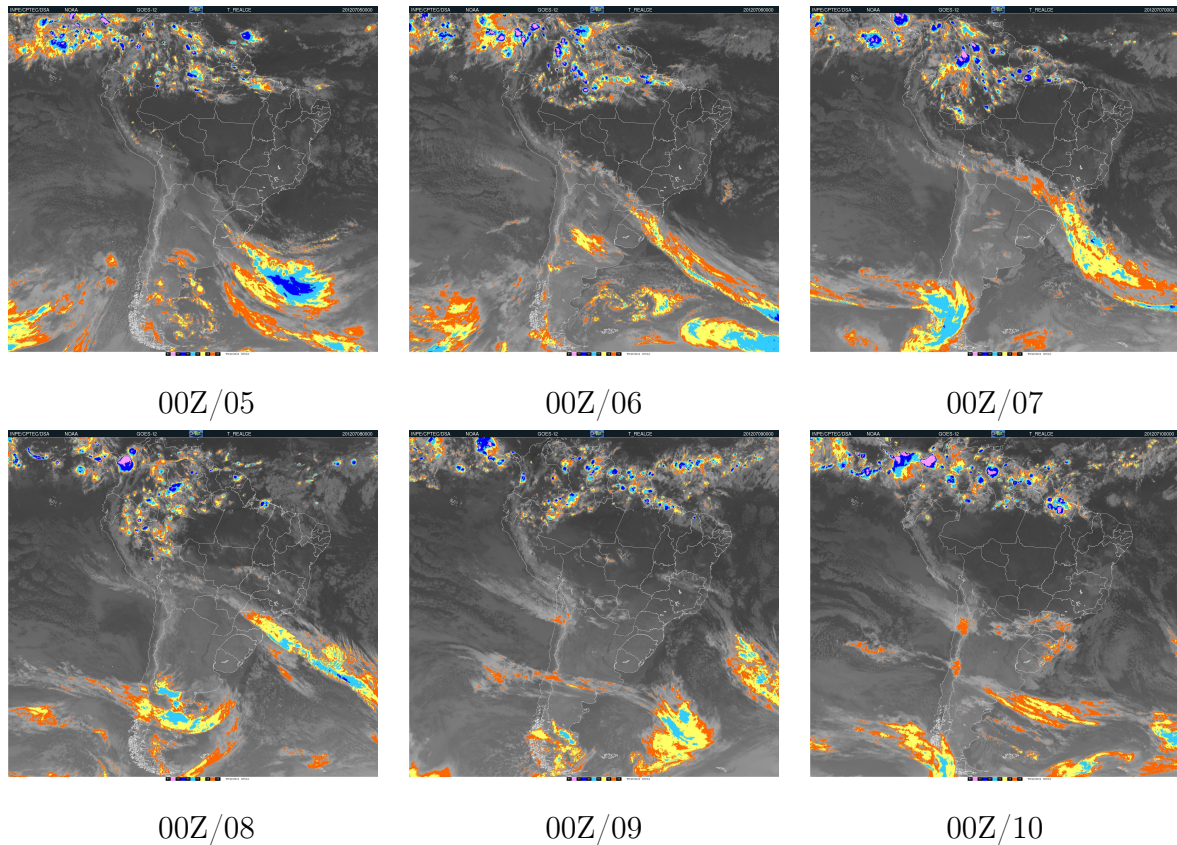
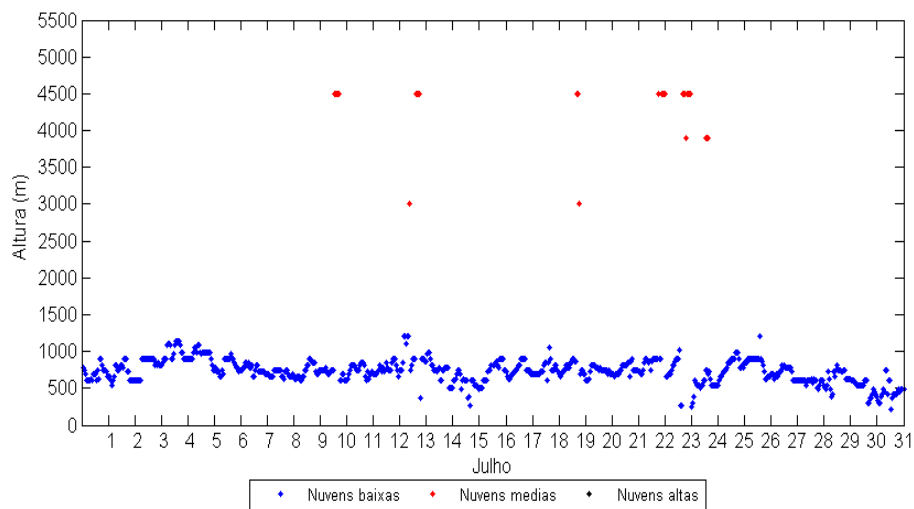
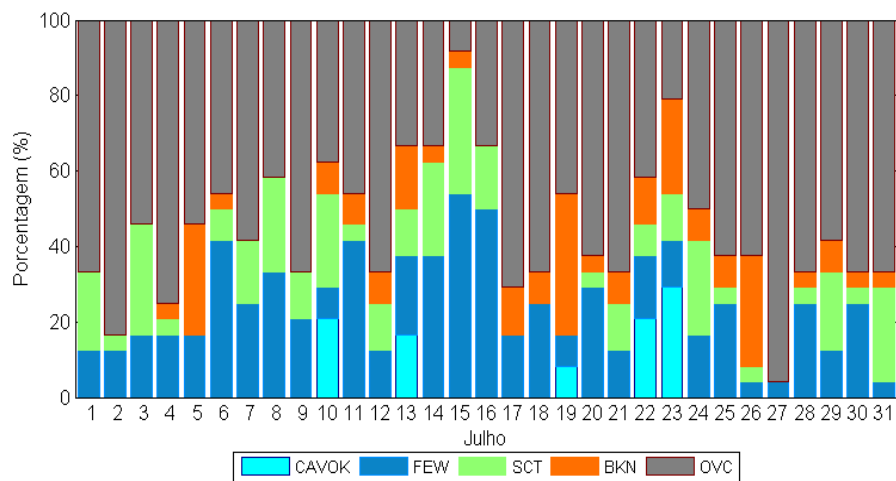


Figura 2.11: Imagens no canal Infravermelho do satélite GOES 12 para o período entre os dias 5 e 10 de julho de 2012.

Portanto, segundo a análise sinótica, a região encontra-se com uma maior influência da ASPS neste período, em comparação ao período de janeiro. Conseqüentemente, uma camada de inversão mais alta e intensa esteve presente, o que possivelmente favoreceu a presença de nebulosidade ocasionando a diminuição da radiação incidente sobre a superfície. Da mesma forma que calculado para janeiro, foi obtida a frequência e altura das nuvens, a nebulosidade em médios e altos níveis em quantidades bem menores, como uma consequência da ausência de massas úmidas vindas da Amazônia. O céu quase totalmente coberto com maior presença de nuvens baixas estratiformes (abaixo dos 500 metros sobre o mar), conforme pode ser visto na 2.12.a. Neste período quase 60% dos dias estiveram totalmente coberto por nuvens, conforme verifica-se na 2.12.b.



(a)



(b)

Figura 2.12: METAR para o mês de Julho de 2012. Em (a): altura das nuvens, sendo a cor azul relativa às nuvens baixas e a cor vermelha às nuvens médias. Em (b): porcentagem de nebulosidade, sendo CAVOK: 0/8, FEW: 1-2/8, SCT: 3-4/8, BKN: 5-7/8, OVC: 8/8.

Para o caso de julho (do dia 5 ao dia 11) o valor médio semanal da TSM foi de 18,09 °C registrada na estação fixa Callao e a anomalia térmica calculada em base aos valores históricos atualizados foi de +1,99 °C. Este último período correspondeu a semana mais quente do mês (IMARPE, 2012).

2.2.2 Configuração do modelo

O modelo WRF/Chem foi configurado para integrações sobre três grades aninhadas. A primeira grade ou grade "mãe" foi configurada com 500x430 pontos nas direções xy e apresenta 27 km de espaçamento de grade, a segunda grade foi configurada com 355x355 pontos nas direções xy e apresenta 9 km de espaçamento de grade e a terceira grade foi configurada com 199x199 pontos na direção xy e apresenta 3 km de espaçamento de grade. As três grades utilizadas no modelo WRF/Chem ou os três domínios utilizados podem ser vistos na Figura 2.13.

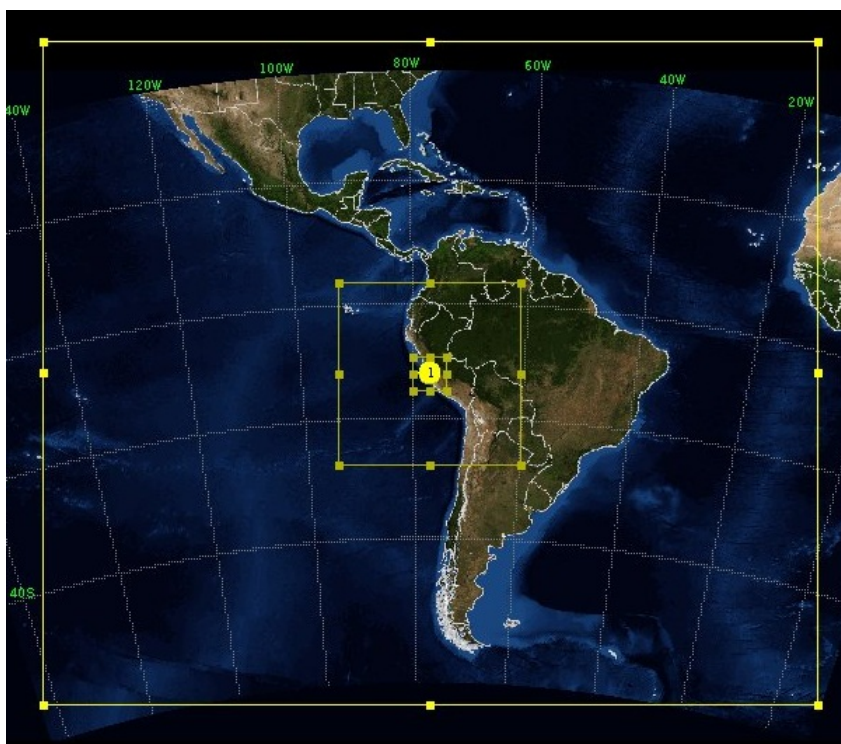


Figura 2.13: Domínios para o modelo com espaçamento de grade de 27 km, 9 km, y 3 km com 500x430, 354x354 e 198x198 pontos, respectivamente, centrados na latitude -12 e longitude -77.

O modelo tem a capacidade de rodar química com múltiplos domínios aninhados usando a mesma metodologia que é usada para quantidades meteorológicas (Skamarock et al., 2008). Primeiro, as condições laterais para o domínio menor são interpolados a partir do prognóstico do domínio maior. A seguir, segundo caminho do aninhamento é opcional conseguido por substituição da solução da grade fina na

grade maior para esses nodos que foi perdido dentro do domínio aninhado fino.

Optou-se pelo aninhamento de grades em uma direção (*one way*) para eliminar os erros de conservação de massa, isto é, o domínio da grade "mãe" não depende da solução da grade de menor domínio (não existe um *feedback* entre as grades).

Aerossóis e espécies de gases-traço reativos têm tempos de vida típicos de vários dias ou menos. Para as espécies de interesse e também para a escala de interesse em modelagem da qualidade do ar de mesoescala, o transporte, a transformação, e os processos de remoção que determinam a distribuição das espécies apresentam escala de tempo que são menores que a escala de tempo do erro de conservação de massa, segundo Fast et al. (2006) a limitada extensão de domínios de mesoescala implica ventilação (entrada e saída) variando de uns poucos dias para talvez umas poucas semanas. Outro fator que também contribui para a inconsistência através das grades aninhadas está na evolução química não-linear. Por esses motivos optou-se pelo aninhamento de grades em uma direção.

Como descrito no item 2.1.1 o WRF/Chem apresenta várias parametrizações físicas e químicas que devem ser escolhidas de acordo com o objetivo que se deseja alcançar. As parametrizações utilizadas no presente trabalho são apresentadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Resumo das parametrizações utilizadas nas simulações.

Processos Atmosféricos	Opções de WRF-Chem
Radiação de onda longa	RRTM
Radiação de onda curta	Goddard
Land Superficial	Model Noah LSM
Camada superficial	Monin-Obukov
Camada Limite	YSU
Cumulus clouds	Grell-Devenvi
Ativação de aerossol	Ativado
Microfísica de nuvens	Lin et al scheme
Química Gase-gas	RADM2
Química de aerossóis	MADE/SORGAM
Fotólise	Madronich

As parametrizações foram escolhidas com base na literatura existente, e no caso da camada limite planetária realizou-se testes de sensibilidade para a escolha da parametrização que melhor representara a camada limite. Os resultados indicaram que o esquema YSU foi o que melhor representou a altura da camada limite (resultados não mostrados).

Neste trabalho se utilizou o mecanismo químico de fase-gás RADM2 (The second generation Regional Acid Deposition Model), este mecanismo químico atmosféricos foi desenvolvido por Stockwell et al. (1990). O mecanismo RADM2 é um compromisso entre detalhes químicos, precisão de previsão química e disponibilidade de recurso computacional. Este é muito usado para modelos atmosféricos para previsão de concentração de oxidantes e outros poluentes. O mecanismo químico RADM2 assim como seu antecessor RADM1, é altamente não-linear, considerando ozônio, sulfato, ácido nítrico e as concentrações de peróxido de hidrogênio como funções complicadas de NO_x e de concentrações de hidrocarbonetos não-metanos. O RADM2, apresenta melhorias em relação à RADM1, como a inclusão de três classes de alcanos de cadeia grande, tratamento detalhado da química dos compostos aromáticos, duas

classes de alcenos de cadeia longa, tratamento de cetonas e espécies dicarbonílicas como classes distintas dos aldeídos, a inclusão do isopreno como espécie explícita e tratamento detalhado das reações do radical peroxi. O mecanismo possui 156 reações que ocorrem entre 63 espécies químicas. Conta com três espécies constantes, 14 espécies inorgânicas estáveis e quatro espécies inorgânicas intermediárias de vida curta. Os compostos orgânicos são representadas por 26 espécies intermediárias de vida curta. Os *COV* são agrupados em espécies *lumped* de acordo com características estruturais das moléculas, baseado na reatividade e magnitude de emissões. Os compostos orgânicos são agrupados em 15 classes reativas de espécies orgânicas, mais informações do mecanismo encontra-se em (Stockwell et al., 1990).

Para uma representação mais realista da camada limite planetária, o modelo WRF-CHEM foi configurado com 51 níveis em coordenada ETA na vertical, dos quais 15 encontram-se abaixo de 1 km e o nível mais baixo encontra-se em aproximadamente 10 m.

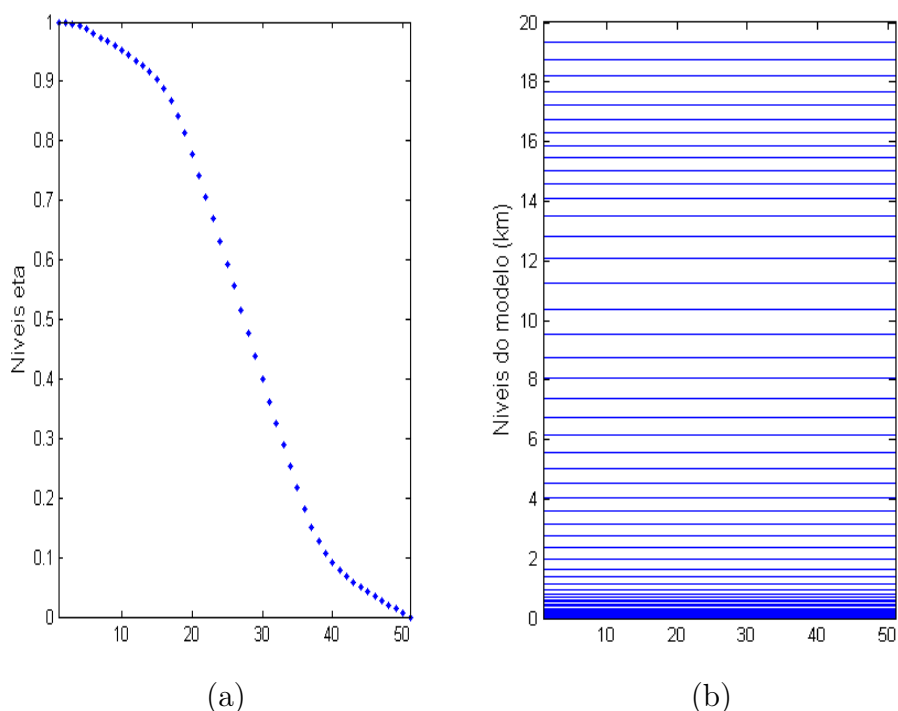


Figura 2.14: 51 níveis verticais do modelo usados nas simulações, dos quais 15 níveis encontram-se abaixo de 1 km.

Condições meteorológicas iniciais e de fronteira são fornecidas a cada 6 horas ao WRF/Chem e foram obtidas do *National Centre for Environmental Prediction* (NCEP) e da análise do modelo global FNL com 1° de resolução horizontal e 26 níveis na vertical, desde 1000 mb até 10 mb. Maiores informações sobre os dados utilizados para as condições iniciais e de fronteira do modelo podem ser obtidos em: <http://www.dss.ucar.edu/dsszone/ds083.2>.

A topografia na última grade (a de maior resolução) foi alterada para uma resolução de 90 m, a fim de ter-se uma melhor representação das elevações do terreno.

Embora a maioria dos conjuntos de dados não contenham dados de TSM, durante o processo verificou-se que a TSM nas saídas do modelo estavam levemente elevadas, exigindo uma atualização da TSM nos dados de entrada. A fonte de dados da TSM foi o NCEP Real-Time SST archives do site <ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/sst>.

2.2.3 Inventário de emissões

O inventário de emissões representa, provavelmente, a maior fonte de incerteza em previsões de transporte e concentração de poluentes. Para este trabalho foram utilizados os dados de estudo realizado pela prefeitura de Lima intitulado de *Estudio de Línea Base Ambiental COSAC I*. Este estudo teve como principal objetivo implementar uma nova via de transporte para reduzir o tráfego veicular e com isso diminuir a concentração das emissões veiculares.

Foram considerados para o inventário de emissões os fatores de emissão obtidos para 19 categorias de veículos, sendo a classificação feita pelo tipo de combustível. Esta divisão em 19 categorias teve como finalidade melhorar a análise comparativa de níveis de emissão para cada tipo de veículo (Tabela 2.4). Na Tabela 2.4 são apresentados os tipos de veículos com os respectivos fatores de emissão para o Monóxido de Carbono (CO), Hidrocarbonetos (HC), Óxidos de Nitrogênio (NO_x), Material Particulado (MP), Óxidos de Enxofre (SO_x), além do Fator de Consumo (FC) [gramas de combustível por quilômetro] e da distribuição da composição de cada tipo de veículo por toda a região de estudo.

Os fatores de emissão dependem da velocidade. A velocidade foi obtida diretamente do modelo de transporte. Maiores detalhes podem ser obtidos em PRO-

TRANSPORTE (2005). Na Tabela 2.5 é apresentado o inventário total de emissões para a cidade de Lima gerado por fontes veiculares para o ano de 2005.

Tabela 2.4: Fatores de emissão de CO , HC , NO_x , MP , SO_x , FC (Fator de Consumo), Composição para cada tipo de veículo.

Categorias	CO	HC	NO_x	MP	SO_x	FC	Composição
<i>VEHLIVSC + E</i>	39,434	3,180	1,592		0,074	118,754	0,082
<i>VEHLIVSC - E</i>	9,772	2,404	1,597		0,054	87,180	0,033
<i>VEHLIVCC</i>	4,026	0,412	0,721		0,058	93,104	0,058
<i>VEHLIVDIESEL</i>	2,676	0,824	1,379	0,339	0,726	89,409	0,078
<i>TAXSC + E</i>	47,600	3,741	1,560		0,088	142,469	0,079
<i>TAXSC - E</i>	11,427	2,804	1,597		0,057	92,180	0,032
<i>TAXCC</i>	4,548	0,503	0,842		0,058	93,104	0,056
<i>TAXSCGLP</i>	6,975	2,956	1,808				0,075
<i>TAXDIESEL</i>	3,224	1,003	1,528	0,395	0,750	92,409	0,028
<i>CAMLIVGASOL</i>	43,499	5,594	0,589		0,074	119,902	0,057
<i>CAMLIVDIESEL</i>	2,858	0,882	1,478	0,425	0,846	104,248	0,051
<i>MICROBUS</i>	3,319	1,145	1,827	0,483	3,611	444,660	0,093
<i>BUSS/CONTROL</i>	11,637	4,055	17,804	2,947	6,680	822,600	0,025
<i>BUSC/CONTROL</i>	4,655	2,896	8,081	1,201	3,666	451,459	0,010
<i>MINIBUS</i>	6,982	1,668	10,677	1,096	1,996	245,798	0,149
<i>CAM < 16T</i>	7,913	1,890	15,471	2,510	1,162	143,074	0,040
<i>CAM > 16T</i>	9,310	5,503	42,318	3,240	2,528	311,320	0,014
<i>MOTO2T</i>	21,140	13,320	0,036		0,022	34,864	0,010
<i>MOTO4T</i>	37,620	3,490	0,090		0,024	37,980	0,030

Tabela 2.5: Inventário de emissões de Lima Metropolitana (Expressado em 1000Ton/ano)

Categoria	<i>CO</i>	<i>SO_x</i>	<i>NO_x</i>	<i>COV</i>	<i>PM₁₀</i>	<i>PM_{2.5}</i>	<i>CO₂</i>	pb
Veiculos Leves	36,204	529	3,694	3,879	274	248	619,066	149
Taxis	39,948	487	3,798	4,559	249	249	683,255	151
Camionetas	19,939	435	1,852	3,129	219	219	336,983	84
Onibus	8,387	4,79	13,614	2,525	1,586	1,456	1 853,521	0
Camionhões	3,356	755	9,0959	1,072	893	820	328,288	0
Motocicletas	30,057	18	153	3,061	2	1	58,507	35
Total	137,891	7,022	32,170	18,225	3,271	2,993	3 879,620	419

2.2.4 Emissões consideradas no WRF/Chem

Para a realização deste trabalho, foram consideradas apenas as emissões veiculares como fontes de poluição antropogênica. Esta consideração deve-se ao fato de que as emissões veiculares representam aproximadamente 86% e as industriais representam 14%, segundo o inventário de emissões realizado durante o ano de 2001 pelo *Consejo Nacional del Ambiente do Perú*.

Para a inicialização do modelo é necessário fornecer as emissões distribuídas tanto espacial como temporalmente. Seguiu-se a metodologia proposta por Martins et al. (2008) a qual é baseada em duas considerações importantes: 1) a distribuição espacial de veículos e a área urbana estejam correlacionadas e; 2) baseia-se no comportamento espaço temporal da frota. A partir dessas duas considerações os autores desenvolveram uma parametrização que estima o numero de veículos em cada ponto de grade do modelo. A parametrização proposta utiliza imagens de satélite noturnas, fornecidas pelo sensor *Operational Linexan System* (OLS) do programa de satélites *Defense Metereological Satellite Program* (DMSP). Admite-se que as luzes noturnas sejam essencialmente aglomerados urbanos ou vias de grande circulação de veículos, tais como rodovias. Deste modo, distribuição espacial da densidade da luz pode ser equacionada em função da distribuição espacial de veículos.

A parametrização proposta por (Martins et al., 2008) obedece a seguinte equação

matemática para o fluxo de emissão $E(i, j, k)$:

$$E(i, j, k) = \sigma_n E F_{k,n} A_n C_1 10^{C_2 x N_n(i,j)} + f_n(i, j) \quad (2.1)$$

Nesta equação, $E F_{k,n}$ representa o fator de emissão associado à espécie k para o veículo do tipo n , A_n é a atividade veicular, $N_n(i, j)$ é a intensidade de luzes noturnas dos pontos de coordenadas (i, j) , $f_n(i, j)$ é uma função de correção de fundo (por exemplo, para áreas não urbanas nesta versão preliminar do inventário) e C_1 e C_2 são constantes ajustáveis em função dos aspectos regionais.

Dessa forma, maiores valores de luminosidade representam maior urbanização e, portanto, maior número de veículos. A quantidade de veículos em cada ponto de grade é então fracionada de acordo com a Tabela 2.4, que depende das características do uso de combustível pela frota considerada na simulação. A frota considerada é referente ao ano de 2003 e foi elaborada pela Direção Geral de Gestão - Estatística (OGPP). Na Figura 2.15 é possível visualizar a imagem de satélite com as luzes noturnas (Fig. 2.15.a) e também as emissões calculadas a partir do WRF/Chem pela terceira grade (Fig. 2.15.b).

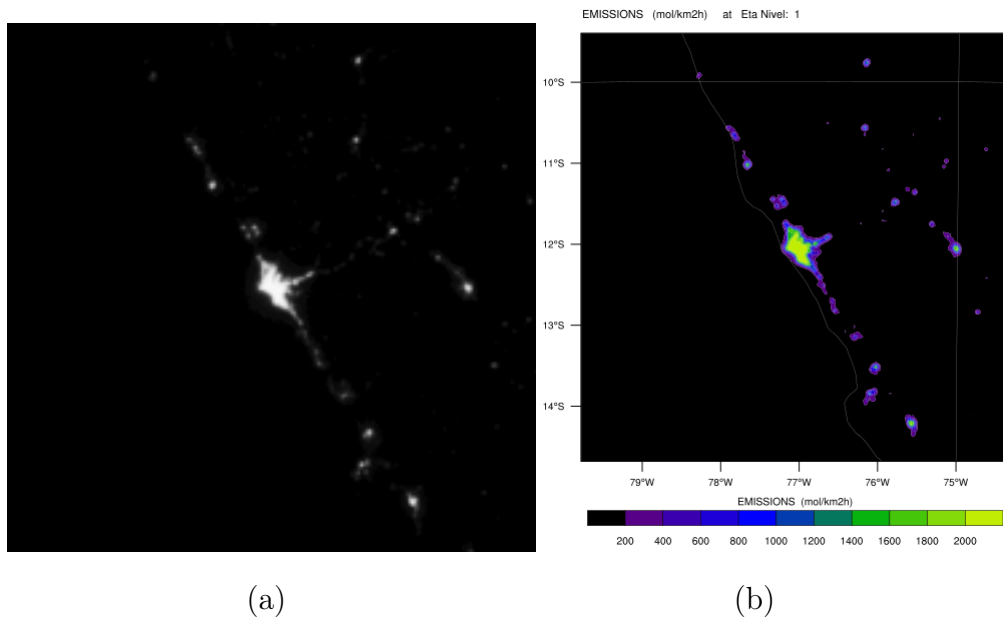


Figura 2.15: a) Imagem das luzes noturnas, fornecidas pelo sensor *Operational Linescan System* (OLS) do programa de satélite *Defense Meteorological Satellite Program* (DMSP) e b) Emissões simuladas pelo modelo WRF/Chem no terceiro domínio (espaçamento de grade de 3 km).

Para a distribuição temporal (Figura 2.16) estiveram disponíveis os dados de uma campanha de medidas realizadas no ano 2003, de 1 a 12 de dezembro, por um grupo de cientistas de diferentes institutos. Detalhes encontram-se em *Final report: Lima Vehicle Activity Study, 2004*.

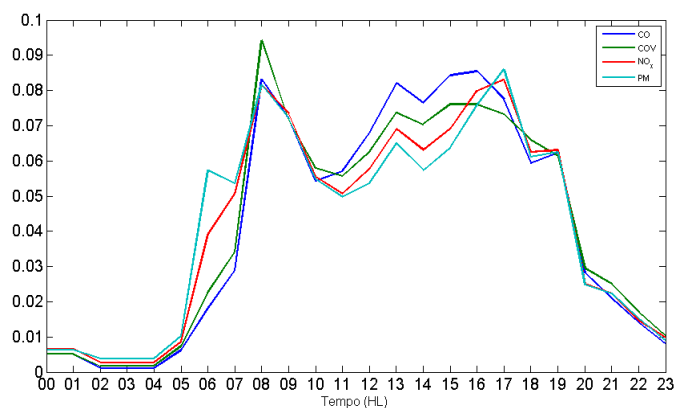


Figura 2.16: Ciclo diurno das emissões sobre Lima, fonte (Lents et al., 2004) . (Final report: Lima Vehicle Activity Study, 2004)

2.3 Parâmetros estatísticos

Para a análise dos resultados foram utilizados alguns índices estatísticos. Maiores detalhes sobre esses índices estatísticos podem ser encontrados em Wilks (1995). São eles:

- (a) Desvio padrão (σ), mostra o quanto de variação ou "dispersão" existe em relação à média. Um baixo desvio padrão indica que os dados tendem a estar próximos da média enquanto que um desvio padrão alto indica que os dados estão espalhados por uma gama de valores.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.2)$$

- (b) Coeficiente de correlação de Pearson (r): é dado pela razão entre a covariância existente entre duas variáveis e o produto dos seus desvios padrão. O coeficiente de correlação indica se uma variável tem relação linear com a outra variável. O parâmetro r pode variar entre os valores -1 e 1, sendo que $r = 1$ indica uma correlação perfeita entre as variáveis.

$$r_{xy} = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2^{1/2} \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2^{1/2}} \quad (2.3)$$

- (c) Raiz do erro médio quadrático ($RMSE$): é definido como a raiz quadrada da diferença entre a média dos dados observados e a média das simulações. Se o $RMSE$ é alto indica que existe uma grande discrepância entre os dados simulados e observados.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_k - o_k)^2} \quad (2.4)$$

- (d) Raiz do erro médio quadrático com remoção do desvio médio: Esse parâmetro está descrito em Pielke (2002) e avalia a habilidade da simulação. É a raiz do erro médio quadrático após a remoção do desvio médio.

$$RMSE_{rdm} = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(y_i - \bar{y})(o_i - \bar{o})]^2 \right\}^{1/2} \quad (2.5)$$

(e) Índice de Concordância (Elbir, 2003): esse índice varia entre 0 e 1, sendo que as variáveis estão em concordância se $d = 1$.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|y_i - o| + |o_i - o|)^2} \quad (2.6)$$

Segundo Pielke (2002) a habilidade da simulação em representar a observação é demonstrada considerando as seguintes condições:

A. $\sigma \simeq \sigma_{obs}$

B. $RMSE < \sigma_{obs}$

C. $RMSE_{rdm} < \sigma_{obs}$

Capítulo 3

Resultados

Este capítulo será dividido em duas partes: na primeira parte será apresentada a validação do modelo WRF/Chem, isto é, as comparações qualitativas e quantitativas (análise de índices estatísticos descritos no capítulo anterior) das variáveis meteorológicas (temperatura, umidade relativa e ventos) e dos poluentes (O_3 e NO_x) simulados com os dados observados. Na segunda parte serão apresentadas as análises relativas às circulações locais e a influência destas no transporte de O_3 e NO_x para ambos os casos de estudo.

3.1 Validação do modelo WRF

A avaliação aplicada a cada variável meteorológica mostrou que o modelo reproduziu os dados observados satisfatoriamente. É importante ressaltar que as comparações realizadas neste trabalho referem-se ao primeiro nível do domínio menor do modelo (grade de maior resolução, com espaçamento de 3 km), enquanto que as observações em quase todas as estações geralmente são realizadas próximas de 2 metros de altura, com exceção à estação de Santa Anita (SA) que encontra-se localizada num telhado de um prédio de dois andares. Portanto, algumas diferenças observadas na comparação podem ser atribuídas a este fator.

3.1.1 Caso de janeiro de 2012

Avaliação da representação meteorológica

- **Análise qualitativa**

As Figuras 3.1 e 3.2 apresentam as series temporais de temperatura e umidade relativa respectivamente para as nove estações utilizadas nesta comparação. As linhas em azul representam as observações e as vermelhas as simulações.

No caso dos perfis de temperatura, em geral, observa-se uma boa concordância entre os valores simulados e observados para quase todas as estações meteorológicas. As estações melhor representadas pelo modelo são Campo de Marte e Aeroporto. No entanto, os valores obtidos das simulações para a estação de Água Azul, Von Humbolt, San Borja e Villa María visualmente apresentam, em geral, maiores discrepâncias entre os valores simulados e observados. Portanto, as simulações não reproduziram eficientemente as temperaturas máximas e as mínimas. Por outro lado, a estação Punta Lobos e Ancon são as estações que se encontram localizadas nos extremos Sul e Norte da RML, respectivamente, sendo que a estação Punta Lobos apresentam as menores temperaturas e mesmo assim o modelo conseguiu reproduzi-la relativamente bem.

No caso da umidade relativa, em geral, o modelo simula relativamente bem a variabilidade diurna em quase todas as estações durante os dias de simulação, no entanto as fases mínimas e máximas não são bem representadas pelo modelo. Por outro lado, as estações Von Humbolt e Villa Maria apresentam maior divergência entre valores observados e simulados de umidade relativa.

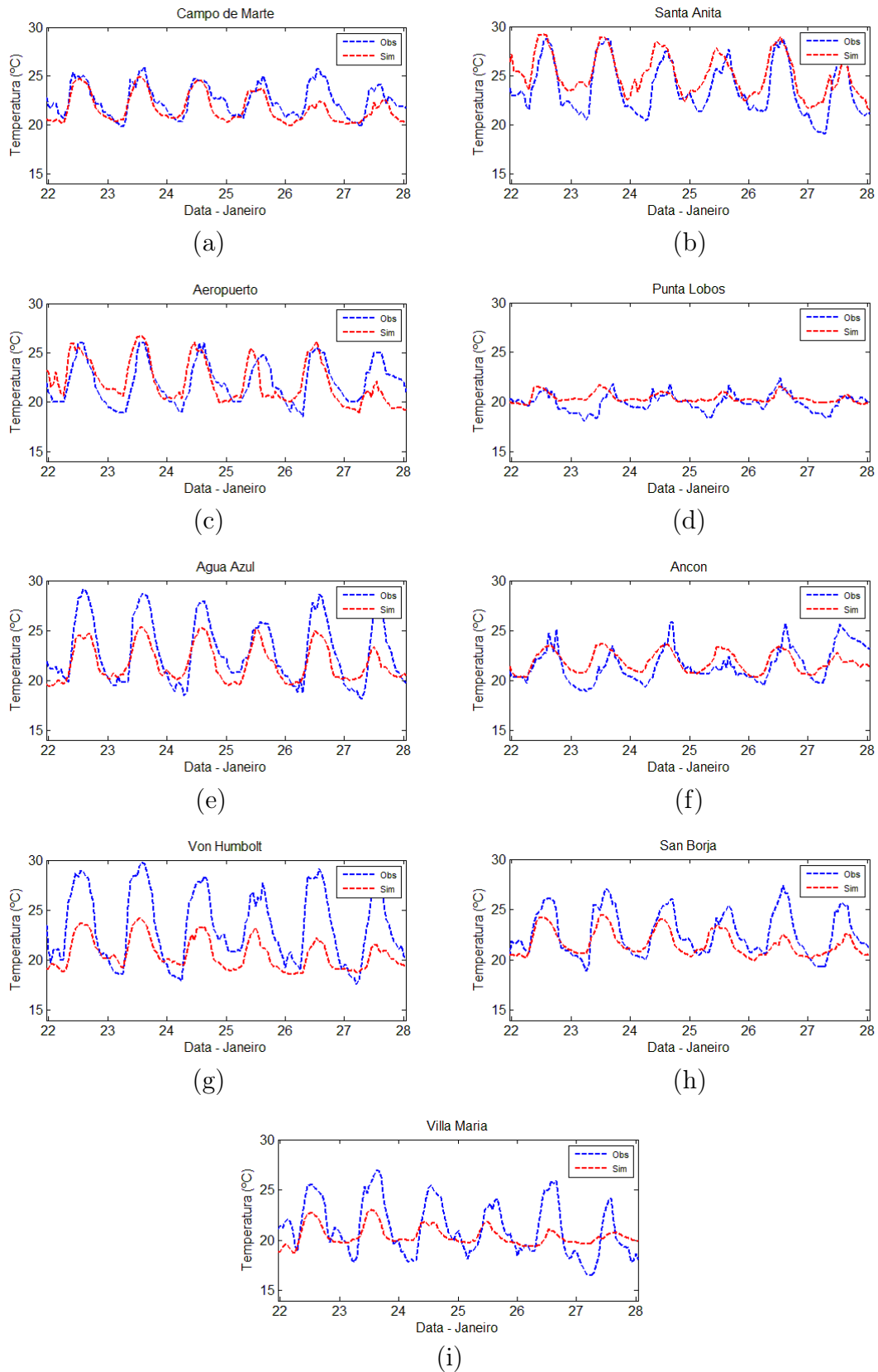


Figura 3.1: Comparação da temperatura observada (azul) e simulada (vermelha) para a estação de a) Campo de Marte, b) Santa Anita, c) Aeropuerto, d) Punta Lobos, e) Agua Azul, f) Ancon, g) Von Humbolt, h) San Borja e i) Villa María del Triunfo para o período de 22 a 28 de janeiro de 2012

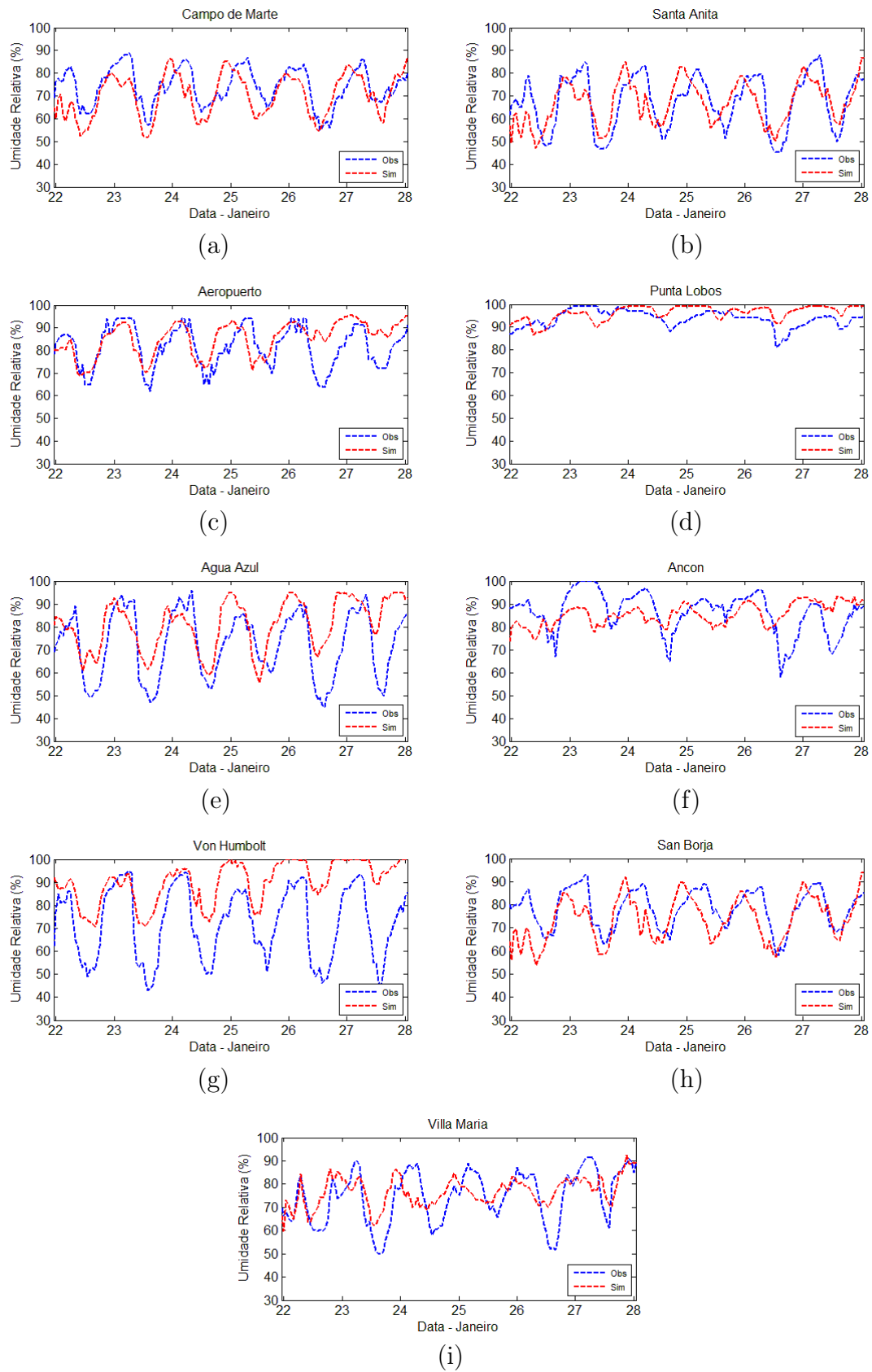


Figura 3.2: Comparação da umidade relativa observada (azul) e simulada (vermelha) para o período de 22 a 28 de janeiro de 2012

Um aspecto muito importante no processo de transporte de poluentes é o campo do vento. Para análise desta variável foram feitos os diagramas do tipo "Rosa dos Ventos" para cada estação (Figura 3.3), que resume a informação sobre o vento em um determinado lugar durante um período de tempo. Na estação Campo de Marte observa-se ventos predominantes de sudoeste com magnitudes entre 0 e 3 $m.s^{-1}$. No entanto, o vento simulado nessa estação apresentou-se predominantemente de oeste, com magnitudes muito variáveis e maiores que as magnitudes observadas, com os valores simulados indo de 0 a 6 $m.s^{-1}$. Na estação Santa Anita o vento predominante é de SSO (sul-sudoeste) com magnitudes que vão de 0 a 3 $m.s^{-1}$. Nos dados simulados para esta estação tem-se o vento predominantemente de sudoeste com magnitudes que vão de 0 até 7 m/s aproximadamente. Na estação do Aeroporto o vento predominante é de oeste, com magnitudes que variam entre 0 e 7 $m.s^{-1}$. Os dados simulados para esta estação em termos de direção concordam com os dados observados, no entanto, a magnitude varia entre 0 e 8 $m.s^{-1}$, aproximadamente. Na estação Ponta Lobos localizada mais ao sul da RML, observa-se que o vento não apresenta claramente uma direção predominante, com magnitudes que variam de 0 a 7 $m.s^{-1}$. Os dados simulados para esta estação mostram ventos predominantes de oeste, com magnitudes que variam de 0 a 7 $m.s^{-1}$, aproximadamente. Na estação Agua Azul observa-se vento predominante de sudoeste, com magnitudes que variam de 0 a 6 $m.s^{-1}$. Já os dados simulados mostram ventos predominantes de sudoeste, com magnitudes que vão de 0 a 7 $m.s^{-1}$. Na estação de Ancon observa-se que o vento predominante é de sul, com magnitudes que vão de 0 a 4 $m.s^{-1}$. Os dados simulados para esta estação mostram predominância de ventos de sul com magnitudes que variam de 0 a 4 $m.s^{-1}$.

Em geral, observa-se uma boa concordância entre os ventos observados e simulados, sendo que na maioria das estações a predominância dos ventos observados e simulados é de sudoeste. No entanto, o modelo superestima a magnitude da velocidade do vento, sendo que as estações que apresentaram maiores discrepâncias entre os valores simulados e observados foram as estações de Campo de Marte, possivelmente relacionada à presença de edifícios construídos no entorno da estação, e Ponta Lobos, possivelmente relacionada à distância do centro da RML até a estação.

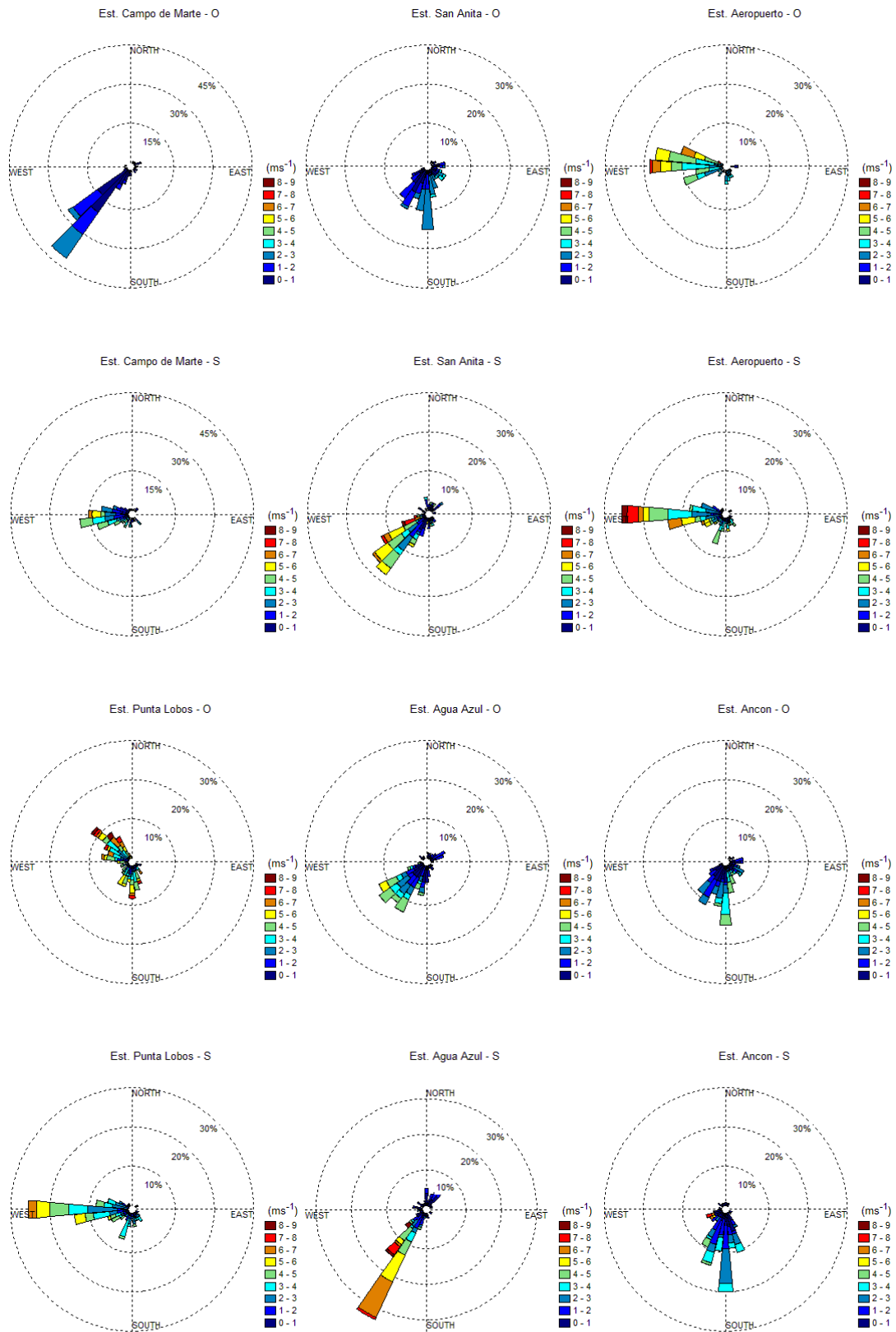


Figura 3.3: Rosa dos ventos observada (estação-O) e simulada (estação-S), para o período de simulação entre 22 e 28 de janeiro 2012.

A radiação solar produzida pelo modelo foi comparada com os dados observados da estação meteorológica Von Humbolt (VH). Pode-se observar na Figura 3.4 que o modelo conseguiu representar razoavelmente a variação diurna dos dados observados, mas apresenta uma deficiência em representar os valores máximos.

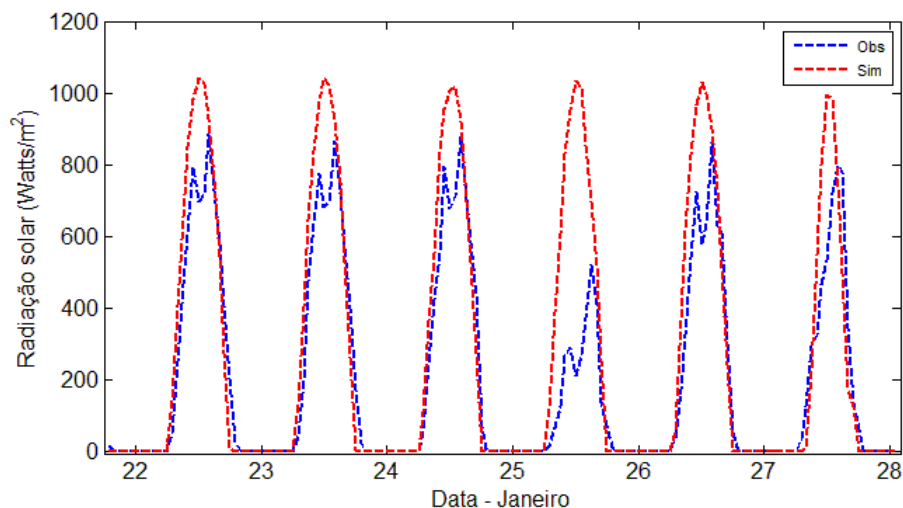


Figura 3.4: Radiação solar observada e simulada na estação de Von Humbolt

- **Análise quantitativa**

Além das comparações qualitativas vistas anteriormente, foram realizados alguns testes estatísticos para esta avaliação. Os índices usados foram aqueles descritos no capítulo anterior.

Os resultados dos testes aplicados às séries de temperatura e umidade relativa simuladas pelo modelo WRF/Chem, para quantificação dos erros das simulações para o caso de janeiro de 2012, são apresentados nas Tabelas 3.1 e 3.2, respectivamente.

Para a temperatura (Tabela 3.1), as correlações obtidas na maioria das estações são em geral maiores que 0,7, no entanto nas estações localizadas nos extremos da RML as correlações são menores que este valor. Os desvios padrões dos dados simulados para toda a série foram menores que os desvios padrão dos valores observados, reforçando a boa habilidade das simulações em reproduzir as observações.

Para a umidade relativa, as correlações obtidas são em geral inferiores às obtidas para a temperatura, mostrando que em termos de fase as simulações para temperatura são melhores. Os desvios padrão dos dados simulados na maioria das estações foram menores que os desvios padrão dos valores observados, o que reforça a boa habilidade das simulações em reproduzir as observações.

Tabela 3.1: Parâmetros referentes à acurácia e precisão da temperatura simulada no período de 22 a 28 de janeiro de 2012.

Estação	EM	RMSE	$RMSE_{rdm}$	R	σ_o	σ_s	d
CM	0,92	1,41	1,06	0,76	1,62	1,43	0,82
SA	-1,36	1,97	1,43	0,84	2,61	2,09	0,84
SP	-0,01	1,87	1,86	0,63	2,10	2,16	0,79
PL	-0,41	0,92	0,82	0,43	0,90	0,48	0,60
AZ	1,31	2,20	1,76	0,87	3,12	1,82	0,82
AN	-0,26	1,42	1,39	0,55	1,67	1,00	0,70
VH	2,85	3,72	2,38	0,84	3,52	1,55	0,71
SB	1,04	1,79	1,46	0,77	2,17	1,22	0,76
VM	0,85	2,23	2,06	0,72	2,62	0,94	0,65

Em geral as condições que expressam a acurácia e a habilidade (*skill*) da simulação foram satisfeitas para todo o período do primeiro estudo de caso. Os desvios padrão da simulação para a maioria das estações foram menores que os desvios padrão dos valores observados, o que reforça a boa habilidade das simulações em reproduzir as observações da temperatura e umidade. Portanto, os resultados dos testes aplicados indicam que as simulações são consistentes com as observações.

Avaliação das variáveis de qualidade do ar

A base de dados de concentração de ozônio medidos nas cinco estações de monitoramento de qualidade do ar na RML não apresentaram valores altos que ultrapasassem 60 ppb. Os resultados da simulação só foram comparados com quatro estações, devido a problemas nos dados da estação de Ate.

Tabela 3.2: Parâmetros referentes à acurácia e precisão da umidade relativa simulada no período de 22 a 28 de janeiro de 2012.

Estação	EM	REMQ	$RMSE_{rdm}$	R	σ_o	σ_s	d
CM	3,34	9,12	8,49	0,56	8,71	9,35	0,73
SA	0,21	9,51	9,51	0,62	11,78	9,61	0,78
SP	-3,68	8,82	8,02	0,57	9,34	7,63	0,75
PL	-2,79	5,08	4,24	0,41	4,34	3,33	0,65
AZ	-8,67	14,41	11,50	0,61	14,34	10,87	0,72
AN	1,28	10,34	10,25	-0,01	8,84	5,07	0,35
VH	-18,14	21,56	11,64	0,68	15,70	9,03	0,70
SB	4,41	9,71	8,64	0,54	8,25	9,61	0,72
VM	-2,44	10,16	9,8	0,49	11,16	6,90	0,66

Nas Figuras 3.10 é apresentada a comparação das concentrações de ozônio simulado (linha vermelha) e observado (linha azul) para cada estação de monitoramento de qualidade do ar. Em geral, o modelo representa reativamente bem o ciclo diurno, apesar de ter diferenças significativas no horário que atinge o valor máximo. No caso da estação de Santa Anita a valor simulado superestima o valor observado para todos os dias de simulação, no entanto, os valores mínimos são bem representados, deve-se levar em consideração a localização da estação (ver o local da estação na Figura 3.5). A concentração de ozônio observada na estação de San Borja (ver o local na Figura 3.6) não superou os 20 ppb, no entanto, o modelo estimou valores mais altos apresentando picos de aproximadamente 30 ppb nos dias 25 e 27 de janeiro. Na estação Campo de Marte (ver local na Figura 3.7) também apresentou uma leve superestimação dos valores observados e apresentou picos maiores a 30 ppb no dia 25 e 27 de janeiro. Na estação Villa Maria (ver local na Figura 3.8) o modelo subestimou os valores observados durante os dias 23, 24, 25 e 26, mas no dia 27 mostrou um aumento de 10 ppb a mais do valor observado.



Figura 3.5: Santa Anita: Esta estação está localizada sobre um edifício de dois andares e perto de uma estação de serviços de combustível



Figura 3.6: San Borja: Esta estação está localizada num campo esportivo circundado por ruas muito movimentadas e edifícios baixos



Figura 3.7: Campo de Marte: Esta estação está localizada na esquina de um parque e em frente existe um edifício alto



Figura 3.8: Villa María del Triunfo: Esta estação está localizada no meio de um parque próximo à montanhas baixas



Figura 3.9: Ate: Esta estação está localizada entre uma montanha e a avenida principal que une Lima com o centro do país

Na Figura 3.11 apresenta-se a média horária da concentração de ozônio nas quatro estações (SA, CM, SB e VM), sendo que a linha azul representa as concentrações observadas e a linha vermelha representa as concentrações simuladas de ozônio. Em média observa-se que o modelo representa relativamente bem a variação diurna, apesar de superestimar as concentrações observadas. Observa-se também que o modelo apresenta deficiência na hora de representar o horário que o ozônio atinge o valor máximo, neste caso o modelo adianta o pico máximo em quase duas horas. Por outro lado, durante as horas da noite para os dias 23 e 24 o modelo representa bem os valores mínimos de concentração, no entanto, a partir do dia 25 apresenta-se um acúmulo de ozônio que se mantém durante os próximos dias de simulação. Este aspecto pode ser explicado pelas condições de fronteira.

Uma característica muito importante que apresenta o ozônio neste período de janeiro em todas as estações é que não se observam picos durante a noite. Isso pode ser um indicativo de que o ozônio no verão seja formado em Lima e não tenha sido transportado de algum outro lugar, especialmente de níveis mais altos da atmosfera, sendo totalmente consumido durante o período noturno.

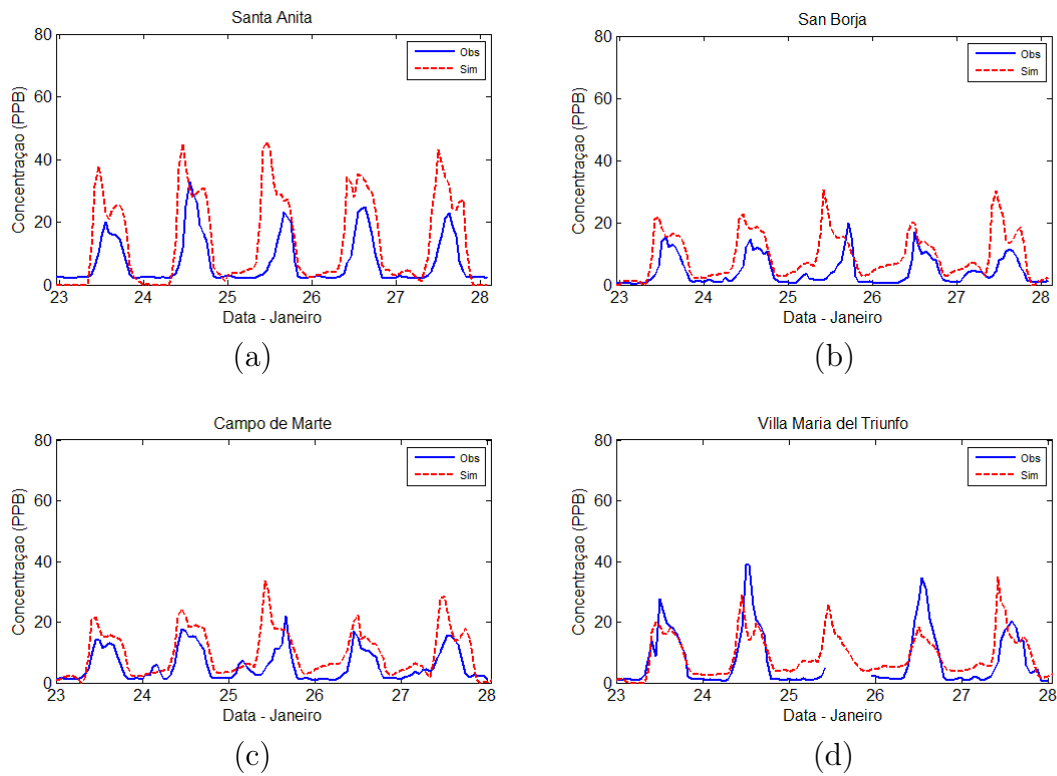


Figura 3.10: Comparação da concentração de ozônio entre os dados simulados e observados nas quatro estações de monitoramento de qualidade do ar a) AS, b) SB, c) CM e d) VM.

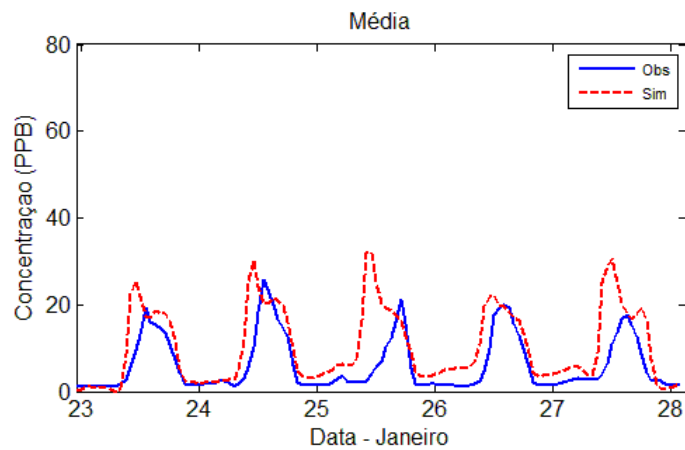


Figura 3.11: Concentração média de ozônio [ppb] das quatro estações de qualidade do ar, simulada (vermelho) e observada (azul).

Na Figura 3.12, apresenta-se a média horária espacial das concentrações simuladas pelo modelo. Nesta figura pode-se observar que às 19 HL as maiores con-

centrações de ozônio encontram-se ao nordeste da RML, com valores mais elevados quase fora da RML, sobre a província de Canta e norte de Huarochiri. Com o passar das horas e com a ausência da radiação solar a concentração diminui até os valores mínimos, como se observa nas horas da noite até às 07 HL. Às 10 HL o ozônio já se encontra em formação e localizado, cobrindo toda a RML, com máximos valores na parte central da RML, especificamente sobre o distrito de Ate e Santa Anita. Já às 13 HL a pluma encontra-se deslocada mais para nordeste, com máximos valores sobre as zonas norte e leste de Lima. Nas horas da tarde, 16 HL, a pluma encontra-se com menores valores de concentração e ainda mais a nordeste.

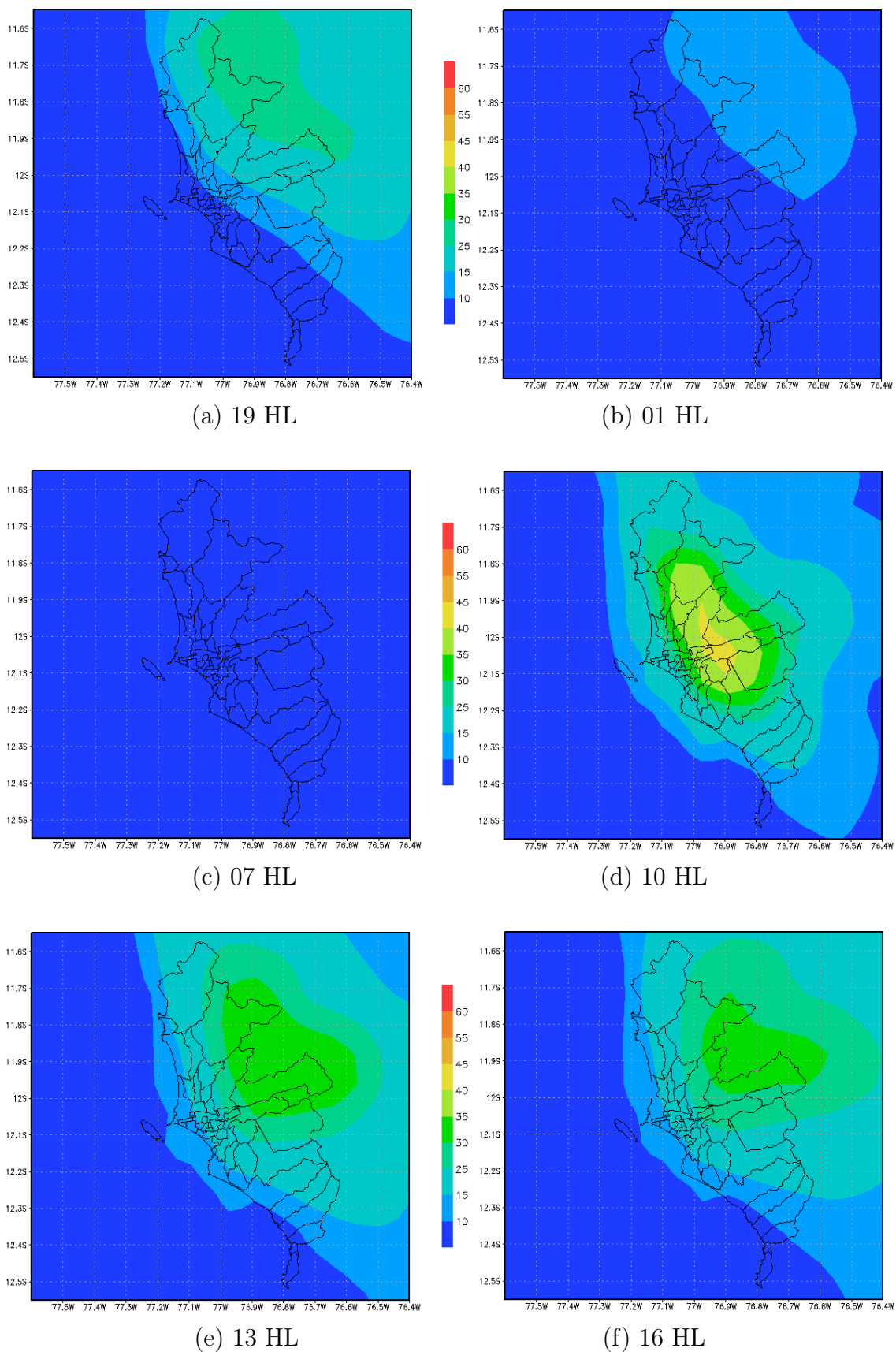


Figura 3.12: Média horária da concentração de ozônio simulado para o período entre 23 e 28 de janeiro.

Na Figura 3.13 apresenta-se as concentrações observadas de NO_x para as cinco estações de monitoramento de qualidade do ar, observa-se que a estação de Ate e SA são em geral as que apresentam maior concentração em comparação às outras. Isso pode ser explicado pela localização das estações, as quais se encontram localizadas perto da rodoviária principal (Carretera Central) por onde passam muitos veículos pesados (Figura 3.9 e 3.5).

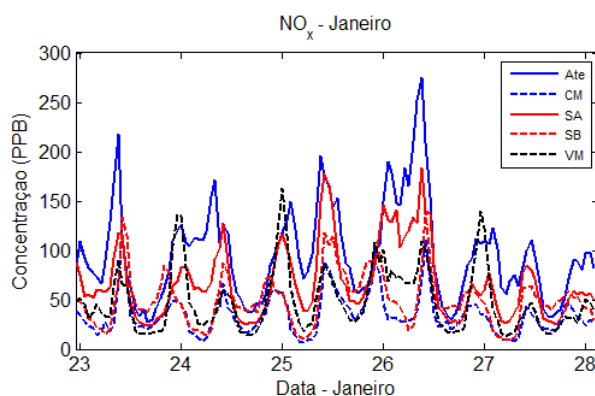


Figura 3.13: Concentração de NO_x para as cinco estações de monitoramento de qualidade do ar Ate, CM, SA, SB e VM, entre 23 e 28 de janeiro de 2012.

A simulação dos poluentes atmosféricos apresenta grandes incertezas devido a diversos fatores, o principal é o inventário de emissões e a distribuição espacial e temporal destas sobre a região estudada. Neste trabalho, como já foi explicado no capítulo anterior, a distribuição foi feita através das imagens de luzes, o que já introduz uma grande incerteza. Além disso, o NO_x é um poluente que encontra-se localizado sobre as áreas com maior fluxo de veículos. Portanto, para este poluente a comparação ponto a ponto das estações não apresentou resultados muito bons. Em função disso, optou-se por mostrar a comparação das concentrações médias das cinco estações de qualidade do ar com as concentrações obtidas pelo modelo (Figura 3.14), nesta figura observa-se que em média o modelo subestima as concentrações observadas, no entanto, no dia 27 o modelo apresenta superestimativa. Por outro lado, observa-se que o modelo tem boa concordância no ciclo diurno e apresenta-se em fase com os picos máximos de concentração, correspondente às 07-08 HL e 19-20 HL respectivamente.

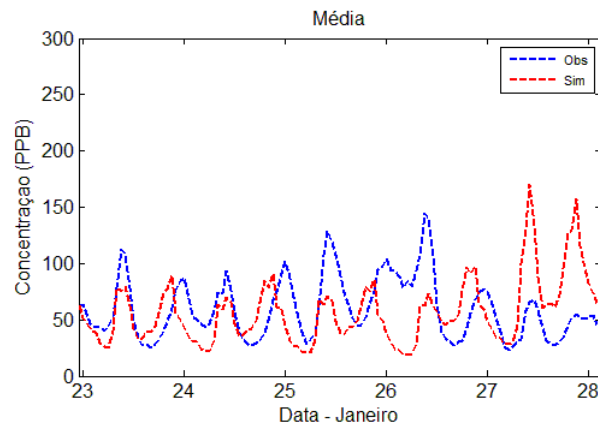


Figura 3.14: Concentrações médias de NO_x observada (azul) e simulada (vermelha).

Na Figura 3.15, apresenta-se a média horária espacial dos dados simulados. Observa-se que às 19 HL a máxima concentração de NO_x localiza-se na porção central da RML com picos de até 130 ppb sobre a porção de Lima-norte, que coincide com a presença de uma rodovia principal que conecta a RML com outras cidades do norte do Perú (Panamericana norte), onde em geral o fluxo veicular é de ônibus interprovinciais e veículos pesados. No decorrer das horas a concentração vai diminuindo e ficando centrada sobre zona norte e leste de Lima, mais especificamente sobre os distritos de Comas e Ate, respectivamente. A partir das 07 HL onde a presença de fluxo veicular é maior, a pluma das concentrações de NO_x localiza-se bem no centro da RML, próximo à linha de costa, com os máximos valores localizados sobre a zona central, parte da zona leste, parte da zona norte de Lima e Callao, no decorrer das horas, aproximadamente às 10 HL, a pluma encontra-se mais dispersa cobrindo uma área maior e com as concentrações mais altas deslocadas mais ao leste, especificamente sobre os distritos de Ate, Comas, San Juan de Lurigancho (pertencentes à zona norte de Lima) e zona central de Lima. Próximo ao meio dia o modelo apresenta valores baixos com uma pluma pequena sobre o limite dos distritos Carabayllo e San Juan de Lurigancho. Durante as primeiras horas da tarde a pluma começa a se desenvolver nas porções da zona norte e leste de Lima até alcançar máximos valores às 19 HL quando é observado novamente o maior fluxo de veículos sobre a RML.

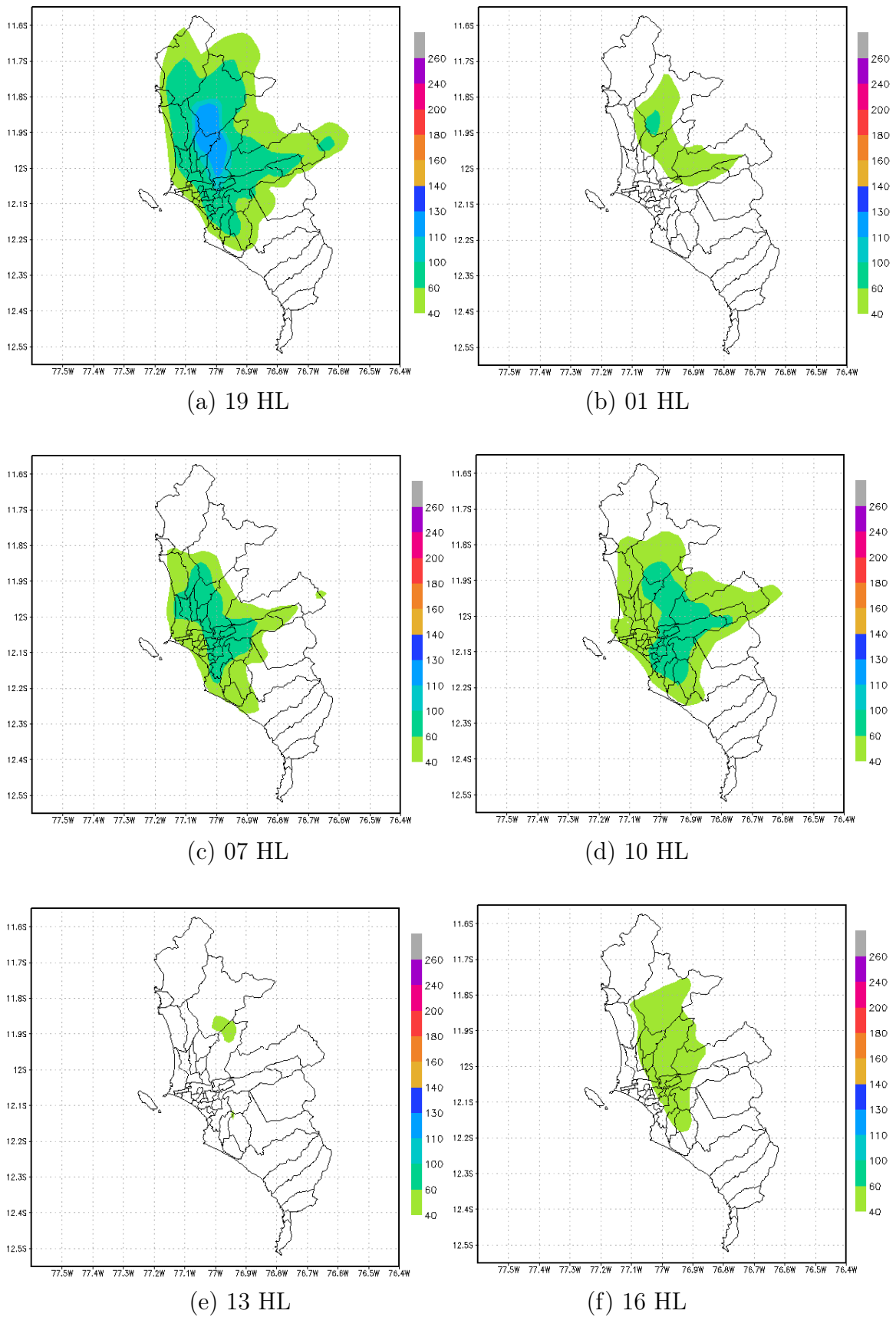


Figura 3.15: Média horária das concentrações de NO_x (ppb) simuladas para o período de 23 a 28 de janeiro de 2012.

3.1.2 Caso de julho de 2012

Neste segundo caso de julho 2012 repetiu-se o procedimento de validação realizado para a simulação de janeiro de 2012.

Avaliação da representação meteorológica

- **Análise qualitativa**

No caso dos perfis da temperatura (Figura 3.16), na maioria das estações observa-se uma boa concordância entre os valores simulados e observados. Em geral, o modelo representa relativamente bem os valores máximos e subestima os valores mínimos. No entanto, a estação Punta Lobos, que está localizada bem ao sul da RML, é a estação que apresenta temperaturas menores em comparação às outras estações e, mesmo assim, o modelo foi capaz de representar relativamente bem a temperatura.

No caso da umidade relativa (Figura 3.17), em geral a variação diurna é bem representada, bem como, os mínimos valores são bem simulados pelo modelo. No entanto, o modelo tem dificuldades em representar os valores máximos, possivelmente em resposta à dificuldade na representação das temperaturas mínimas, mencionadas anteriormente. Os valores obtidos das simulações para a estação Agua Azul visualmente apresentam maiores discrepâncias entre os valores simulados e observados nas estações.

Para a análise do vento neste período, também foram confeccionadas as rosas de vento, (Figura 3.18). Na estação Agua Azul observam-se ventos fracos com magnitudes que variam entre 0 e 4 $m.s^{-1}$ e com direção predominante de sudoeste. Nesta estação o modelo mostra magnitudes um pouco maiores em comparação ao observado, mas na direção predominante a representação foi melhor. Na estação Punta Lobos o vento é mais intenso com magnitudes muito variáveis que vão desde 0 até 8 $m.s^{-1}$, nesta estação o modelo representa bem a magnitude do vento. Por outro lado, em relação à direção o modelo mostra um deslocamento de fase de aproximadamente 30° referente aos dados observados, os quais são predominantes de NW-N. A estação Santa Anita apresentou ventos fracos que variam entre 0 e 3 $m.s^{-1}$, no

entanto, o modelo superestimou as magnitudes com valores máximos chegando a 5 m.s^{-1} , aproximadamente. No caso da direção o modelo não representou bem os valores observados, sendo que o vento predominante observado é de SSE e o simulado é de SW-S. A estação do Aeroporto, que se encontra localizada mais perto do litoral, é a estação que foi mais bem representada pelo modelo em termos da magnitude, a qual varia entre 0 e 8 m.s^{-1} . Quanto à direção, ventos predominantes de NW-W. Na estação Hospital Fap observa-se ventos fracos com magnitudes inferiores a 3 m.s^{-1} , sendo que para esta estação o modelo superestima as magnitudes da velocidade chegando a ter máximos de 5 m.s^{-1} aproximadamente. Por outro lado, em termos da direção do vento o modelo apresenta deslocamento de fase de aproximadamente 30° , isto é, o vento observado é predominantemente de SW e o modelo de W. Na estação Von Humbolt observa-se ventos muito variantes que vão de 0 até 6 m.s^{-1} nesta estação o modelo representa bem a magnitude da velocidade, mas na direção ele apresenta um deslocamento de fase de aproximadamente 30° , sendo que na estação se observa ventos predominantes de SW e o modelo mostra ventos de W.

Em geral, para este período o modelo superestima a magnitude dos ventos e apresenta deficiência em algumas estações para representar bem a direção, mas mesmo assim, considerando que o vento é um parâmetro muito variável, pode se dizer que o modelo apresenta uma boa concordância com os dados observados.

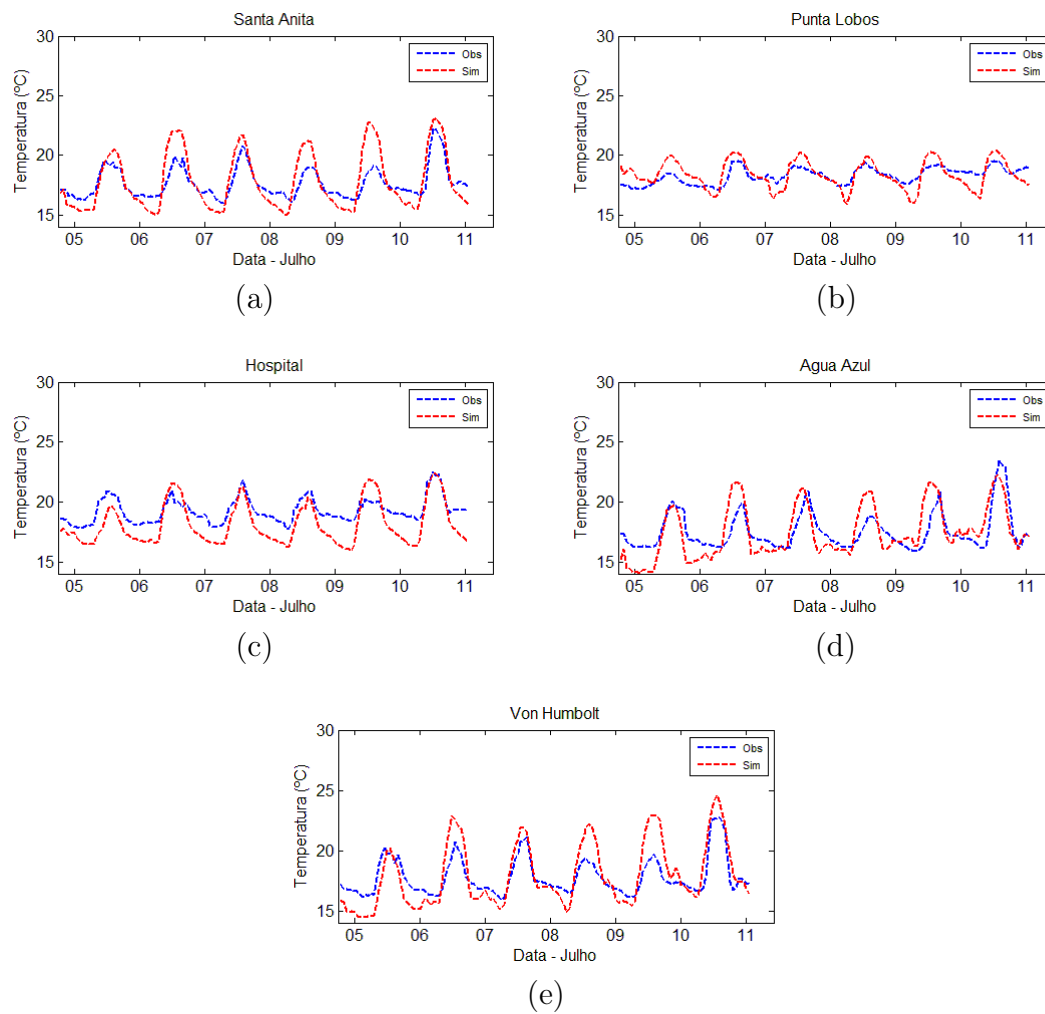


Figura 3.16: Comparação entre a temperatura observada (azul) e simulada (vermelha) para o período de 05 a 11 de julho de 2012

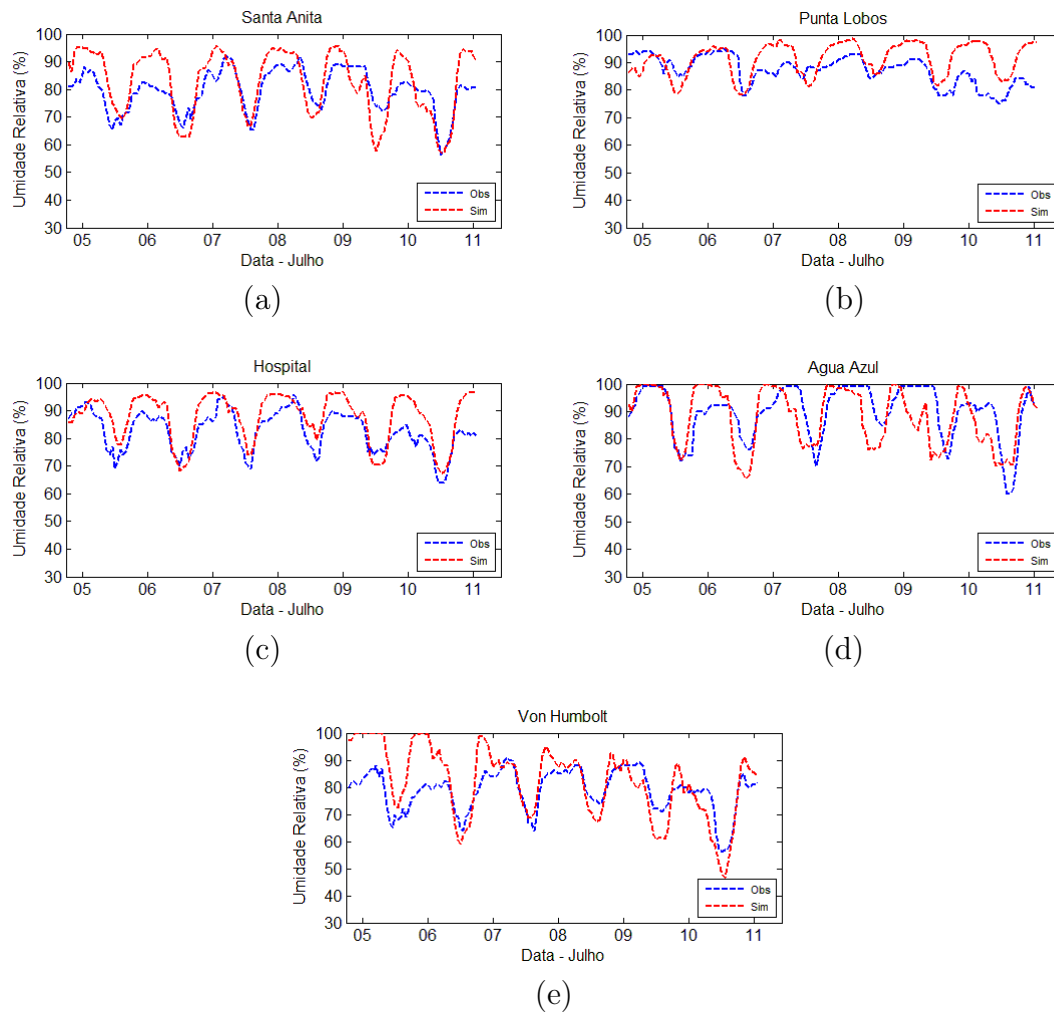


Figura 3.17: Comparação entre a umidade relativa observada (azul) e simulada (vermelha) para o período de 05 a 11 de julho de 2012

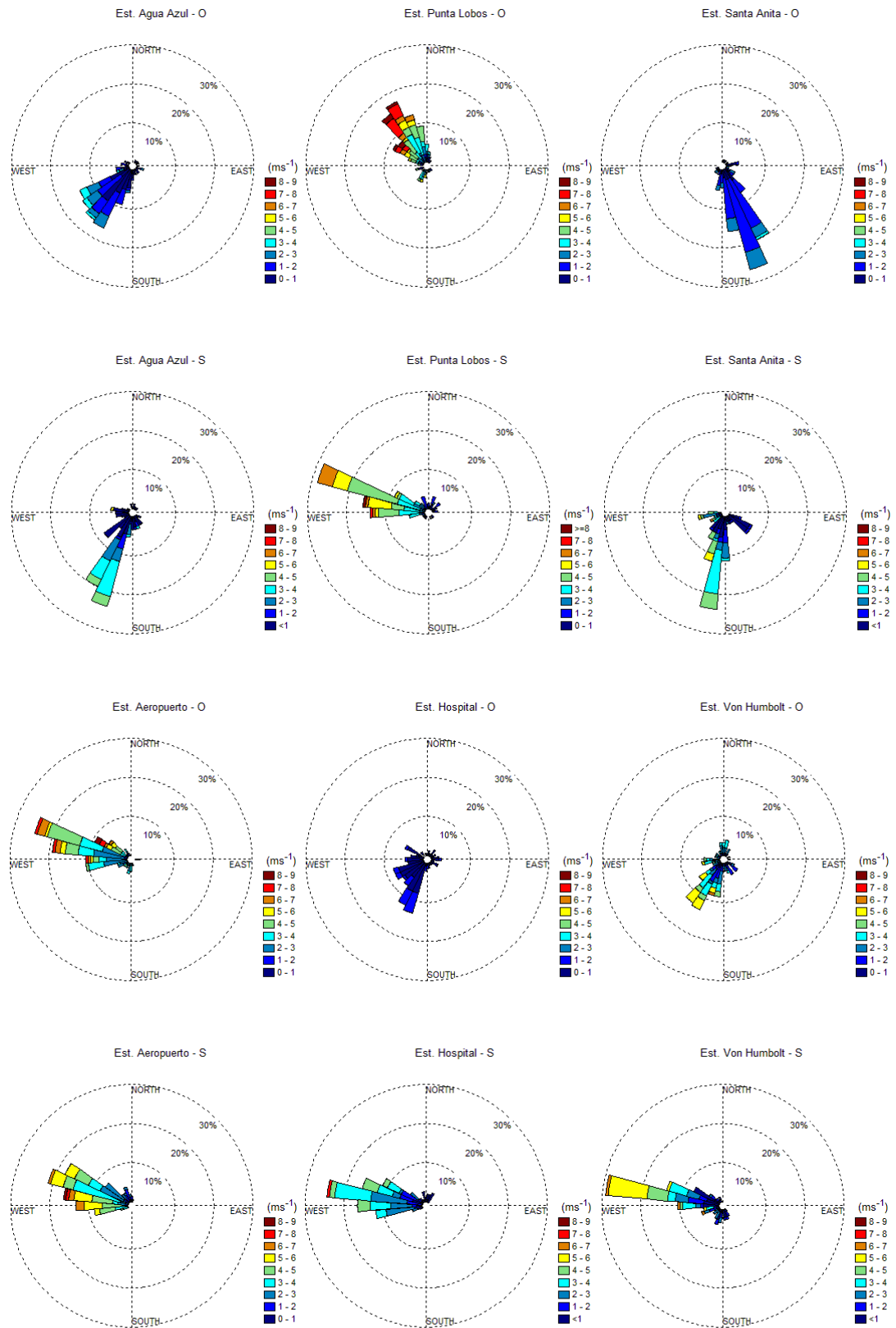


Figura 3.18: Rosa dos vento observada (estação-O) e simulada (estação-S), para o período de 05 a 11 de julho 2012.

- **Análise quantitativas**

Os resultados dos testes aplicados à temperatura e umidade relativa simuladas pelo modelo WRF/Chem, são apresentadas nas Tabelas 3.3 e 3.4, respectivamente, para o período de 05 a 11 de julho de 2012.

As correlações obtidas para a temperatura na maioria das estações são em geral maiores que 0,7. No entanto, a estação Punta Lobos é a que apresenta uma menor correlação. No caso da umidade relativa a correlação observada na maioria das estações é menor que a correlação obtida para a temperatura, mostrando que em termos de fase, as simulações para a temperatura são melhores. A estação Punta Lobos é a estação que apresenta correlações menores que 0,7 tanto para a temperatura quanto para a umidade relativa.

Tabela 3.3: Parâmetros referentes à acurácia e precisão da temperatura simulada no período de 05 a 11 de julho de 2012.

Estação	EM	RMSE	$RMSE_{r,dm}$	R	σ_o	σ_s	d
SA	-0,16	1,39	1,38	0,88	1,31	2,39	0,86
PL	-0,10	0,89	0,89	0,65	0,65	1,14	0,73
AZ	0,05	1,50	1,50	0,73	1,57	2,17	0,82
HP	1,11	1,48	0,98	0,87	1,03	1,73	0,79
VH	-0,16	1,48	1,46	0,88	1,53	2,62	0,87

Avaliação das variáveis de qualidade do ar

Para este período os resultados da simulação foram comparados com quatro estações de monitoramento de qualidade do ar, CM, Ate, SB e VM, devido à falta de dados na estação SA. Além disso, será analisado o período a partir do dia 06 até o dia 11 de julho para eliminar o efeito de *spin-up* da parte química do modelo. No caso da concentração de ozônio medido para o inverno, a base de dados apresentou concentrações menores que 60 ppb.

Na Figura 3.19 apresenta-se a comparação das concentrações de ozônio simulado (linha vermelha) e observado (linha azul) para cada estação de monitoramento

Tabela 3.4: Parâmetros referentes à acurácia e precisão da umidade relativa simulada no período de 05 a 11 de julho de 2012.

Estação	EM	RMSE	$RMSE_{r, dm}$	R	σ_o	σ_s	d
SA	-3,15	8,01	7,3	0,78	7,56	11,48	0,83
PL	-4,31	7,90	6,62	0,28	5,15	5,81	0,62
AZ	1,57	9,15	9,01	0,60	9,36	10,51	0,77
HP	-5,19	7,25	5,06	0,81	7,19	8,55	0,83
VH	-3,26	9,56	8,90	0,75	7,67	13,05	0,79

de qualidade do ar. Na estação CM observa-se que o ozônio medido nessa estação apresenta dois picos bem marcados no ciclo diurno durante todo o período, o primeiro é aproximadamente às 06 HL e um segundo entre às 13 e às 15 HL para todos os dias. Para esta estação o modelo não conseguiu representar bem esses picos, mostrando apenas um pico próximo do meio dia para todo o período de simulação. Na estação SB observou-se concentrações mais baixas do que em CM, mas também observa-se dois picos, o primeiro entre 05 e 06 HL e o segundo entre 13 e 15 HL, o modelo não conseguiu simular estes dois picos, mostrando apenas o segundo pico. Na estação de Ate as concentrações observadas de ozônio são baixas, com o segundo pico mais alto do que o primeiro para todos os dias. Nesta estação o modelo também não conseguiu representar o primeiro pico e o segundo encontra-se em deslocamento de fase com os dados observados. Na estação VM o comportamento de ozônio observado é bastante diferente em comparação às outras estações. Nesta estação, a partir do dia 08 de julho, observa-se a concentração de ozônio quase constante durante as horas diurnas e noturnas, isto é, não apresenta grandes diferenças entre as concentrações entre as horas de dia e noite. Para esta estação o modelo também não conseguiu representar bem o ciclo de ozônio.

Em geral o modelo foi deficiente para representar o comportamento diurno de ozônio durante este período de inverno, fazendo uma variação no dia similar às simulações feitas para o caso de janeiro.

Por outro lado, pode-se dizer que as estações, CM e SB, que se encontram

localizadas na zona central de Lima apresentaram variações diurnas bem similares e a estação Ate que se encontra localizada na zona leste de Lima apresentou o segundo pico maior que o primeiro, quase acompanhando um ciclo comum de um dia de verão. Na estação VM, que está localizada na zona sul de Lima, a variação do ciclo diurno foi totalmente diferente das outras estações, sendo que os dias 6 e 7 apresentaram os dois picos, e os dias 8 e 9 apresenta concentrações quase constantes durante todo o dia, até que no dia 10 os resultados são similares aos das demais estações.

Na Figura 3.20, apresenta-se a média horária das quatro estações (CM, SB, At e VM). Nesta figura observa-se que em média, para os dias 6 e 7 o ozônio observado mostra os dois picos bem marcados, sendo o segundo de maior magnitude. No dia 8 o ozônio apresentou um ciclo quase contínuo, mas nos dias 9 e 10 já se apresentam novamente os dois picos, das 06 HL e das 15 HL aproximadamente. Por outro lado, em média o modelo não conseguiu acompanhar o comportamento das concentrações observadas. No entanto, em termos das magnitudes o modelo conseguiu fornecer valores próximos aos das concentrações observadas, isto é, os máximos valores observados nas estações variam entre 20 e 30 ppb e o modelo conseguiu fornecer valores dentro desta faixa. Durante horários noturnos o modelo subestima os dados observados.

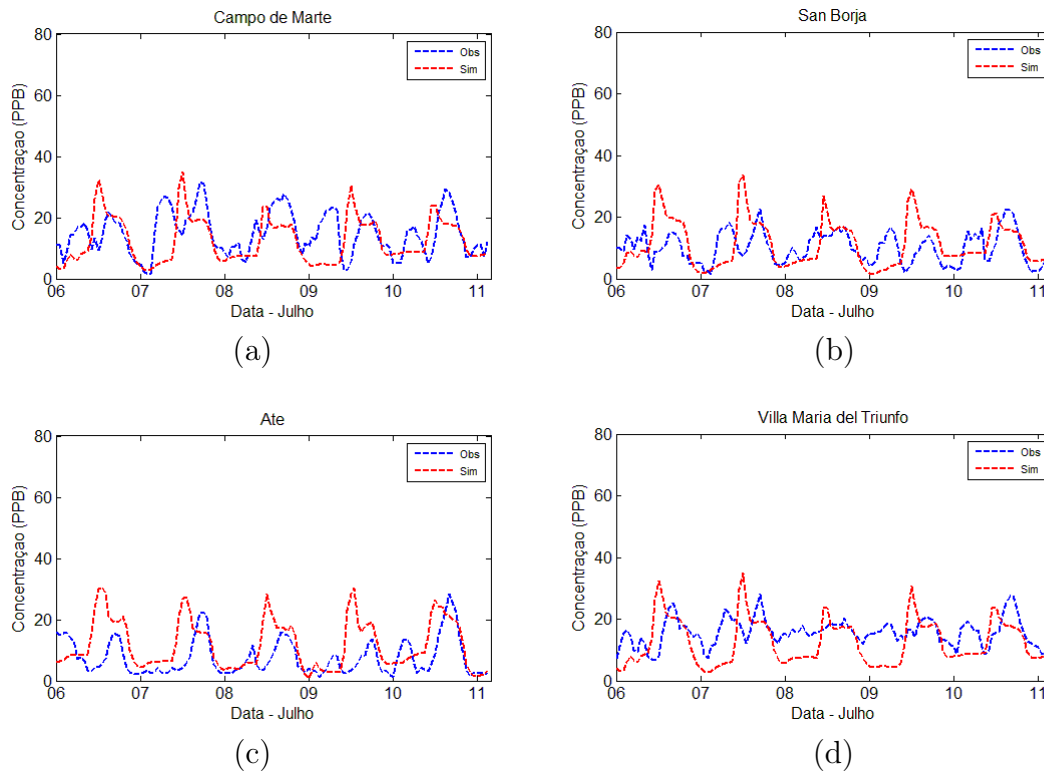


Figura 3.19: Comparação dos dados observados com os simulados das concentrações de ozônio nas quatro estações de monitoramento de qualidade do ar.

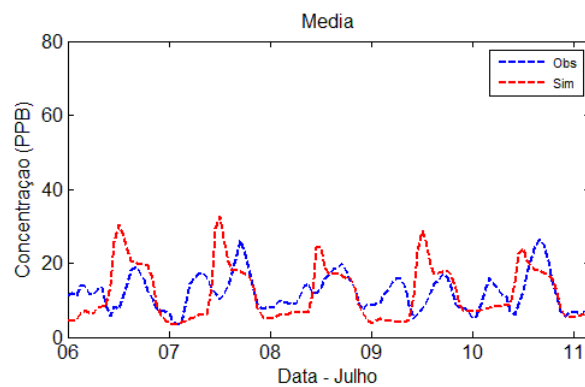


Figura 3.20: Concentração média de ozônio [ppb] das quatro estações de qualidade do ar, simulada (vermelho) e observada (azul)

Na Figura 3.21 apresenta-se a média horária da distribuição espacial das concentrações de ozônio. Nesta figura observa-se que para às 19 HL a pluma de concentração de ozônio localiza-se bem ao nordeste da RML, especificamente nos limites

com a província de Canta e Huarochiri com concentrações de 15 ppb aproximadamente. A partir das 10 HL observa-se a presença da pluma de ozônio alongada para o norte, com concentrações mais altas sobre os distritos de Ate e Santa Anita, localizadas na zona leste de Lima. Já às 13 HL observa-se que a pluma encontra-se mais espalhada e deslocada mais ao nordeste cobrindo grande parte da zona leste e norte de Lima, com a mancha com concentrações maiores que 40 ppb cobrindo uma maior área. Nas primeiras horas da tarde (16 HL) a pluma encontra-se mais para nordeste cobrindo as províncias de Canta e Huarochiri, com os máximos valores sobre o distrito de Lurigancho.

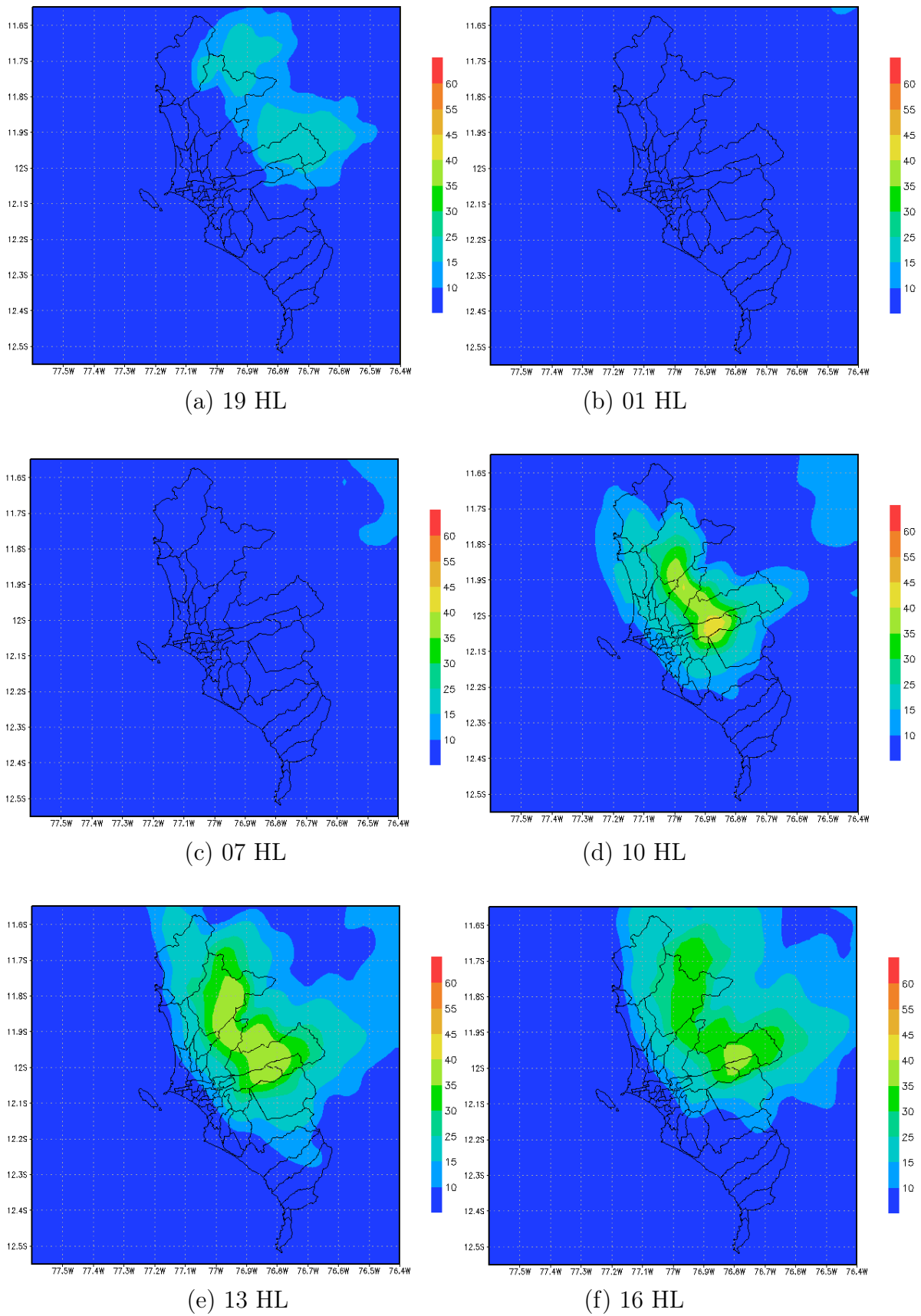


Figura 3.21: Média horária da concentração de ozônio simulada para o período de 06 a 11 de julho de 2012.

A Figura 3.22 apresenta as concentrações de NO_x observadas nas cinco estações de monitoramento. Observa-se que as estações de Ate e SA são as que apresentam maiores concentrações, no entanto, as concentrações durante este período são inferiores às concentrações durante o período de janeiro. Como já foi dito anteriormente, no caso de NO_x é realizada uma comparação entre as concentrações médias observadas e simuladas pelo modelo (Figura 3.23). Em média o modelo não acompanhou a variação diurna do NO_x observado, mas ainda assim o modelo mostra dois picos bem definidos às 07 HL e 19 HL, aproximadamente, os quais também são observados nos valores médios observados, porém, com menor magnitude. Por outro lado, o modelo, em geral, subestima a concentração observada entre os horários dos picos de NO_x .

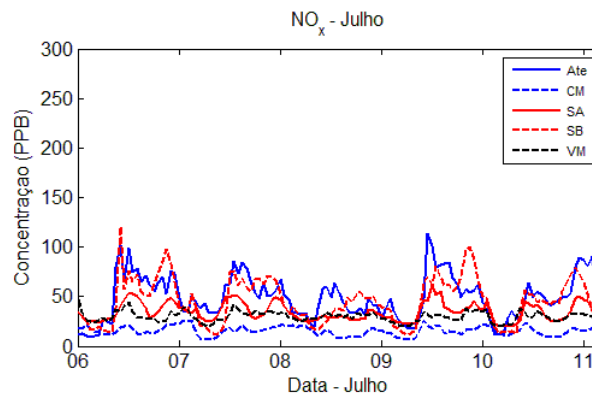


Figura 3.22: Concentrações de NO_x nas cinco estações de monitoramento Ate, CM, SA, SB e VM.

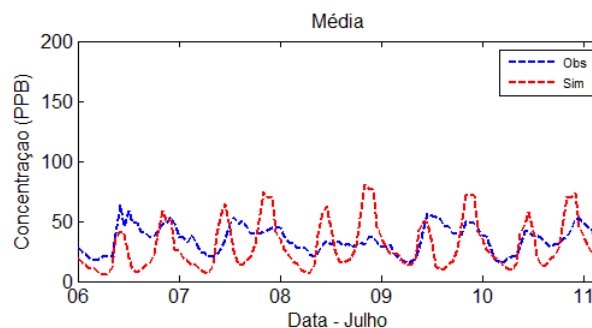


Figura 3.23: Concentrações médias observadas nas cinco estações (azul) e simuladas pelo modelo (vermelho).

Na Figura 3.24 apresenta-se a média horária espacial de NO_x . Nesta figura observa-se que às 19 HL a pluma de NO_x encontra-se cobrindo grande parte da RML, com as maiores concentrações nas zonas leste e norte de Lima que superam os 100 ppb, aproximadamente, nos distritos de Ate e San Juan de Lurigancho, respectivamente. Durante a noite, às 01 HL, as concentrações são inferiores e centradas na localização onde horas antes (19 HL) foram simuladas as máximas concentrações. Às 07 HL, quando o fluxo veicular é alto, as concentrações de NO_x chegam a ter os valores mais altos sobre a porção central da RML. Nas horas seguintes as concentrações vão diminuindo e durante às 10 HL os picos mais altos encontram-se no limite da porção central e zona sul de Lima, e outro pico sobre a zona leste de Lima (distrito de Ate). Perto do meio dia o modelo mostra as concentrações com valores mínimos e no início da tarde novamente começa a se emitir NO_x por toda a área urbana com maiores concentrações na parte central da RML.

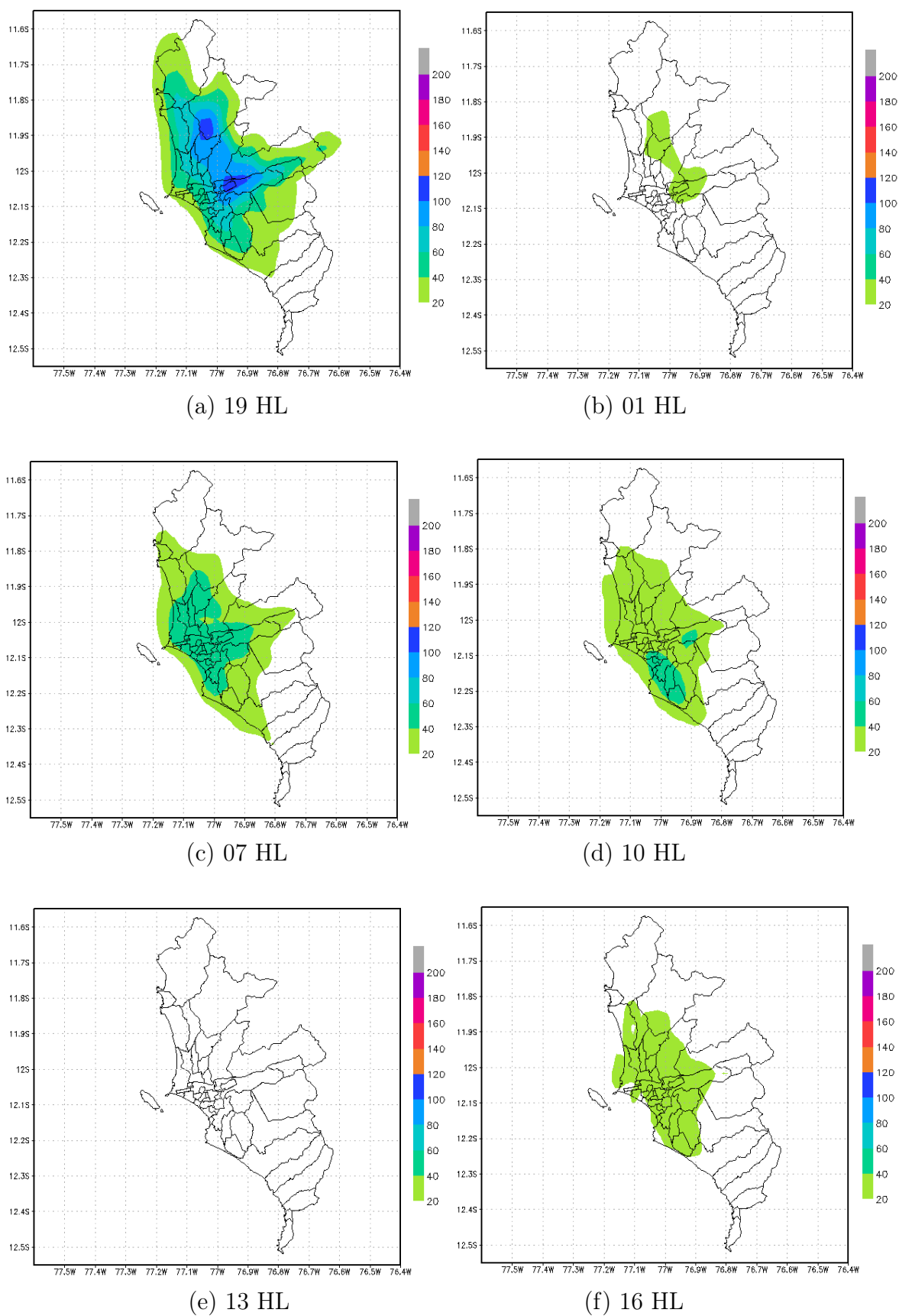


Figura 3.24: Média horária da distribuição espacial das concentrações de NO_x (ppb) para o período entre 06 e 11 de janeiro.

3.2 Papel das circulações locais sobre a dispersão dos poluentes

Nesta seção é apresentada a análise da circulação dos ventos, com o objetivo de verificar o papel de diferentes forçantes sobre a intensidade e propagação de brisa marítima, fator determinante na dispersão de poluentes sobre a RML. A primeira forçante considerada foi a circulação de grande escala. A segunda forçante é a topografia complexa da região, que pode gerar circulação de tipo vale-montanha, principalmente nas porções a leste da RML pela presença da Cordilheira dos Andes.

3.2.1 Caso de janeiro de 2012

- **Análise da circulação de grande escala e seu papel sobre a intensidade e propagação da brisa marítima**

Nesta seção será analisada a circulação de grande escala e o comportamento da brisa marítima durante o período de simulação, de 22 a 28 de janeiro de 2012. Para isso, foram analisadas as simulações no primeiro domínio do modelo com 27 km de espaçamento de grade, sendo utilizados 500 pontos na direção zonal, 430 na direção meridional e 51 níveis verticais.

Na Figura 3.25 apresenta-se a evolução do campo de ventos ($m.s^{-1}$) e da pressão reduzida ao nível do mar nos horários das 19 HL (00 Z) e 07 HL (12 Z). Observa-se que em geral a ASPS encontra-se centrada em 45° S e 93° W. No entanto, apresenta pequenos deslocamentos ao norte às 07 HL durante todos os dias. A ASPS encontra-se influenciando a direção e a intensidade dos ventos de sul ao longo do litoral. Por outro lado, especificamente sobre Lima, observa-se que os ventos durante a noite, em geral, são mais intensos e com movimento ciclônico. No entanto, às 07 HL os ventos são mais fracos e, possivelmente, sejam um sinal de presença de nebulosidade na costa de Lima.

Em geral, durante a noite e perto da linha de costa, observam-se ventos saindo do continente relacionados à brisa terrestre e durante o dia observa-se ventos entrando no continente que correspondem ao padrão de ventos de brisa marítima. A

mudança na direção dos ventos pode ser explicada pelo gradiente de temperatura entre a terra e oceano, isto é, durante o dia a radiação aquece a terra e o oceano. Em função da alta capacidade calorífica do oceano, tem-se que a terra apresenta maiores temperaturas do que o oceano, gerando desta maneira um gradiente de temperatura.

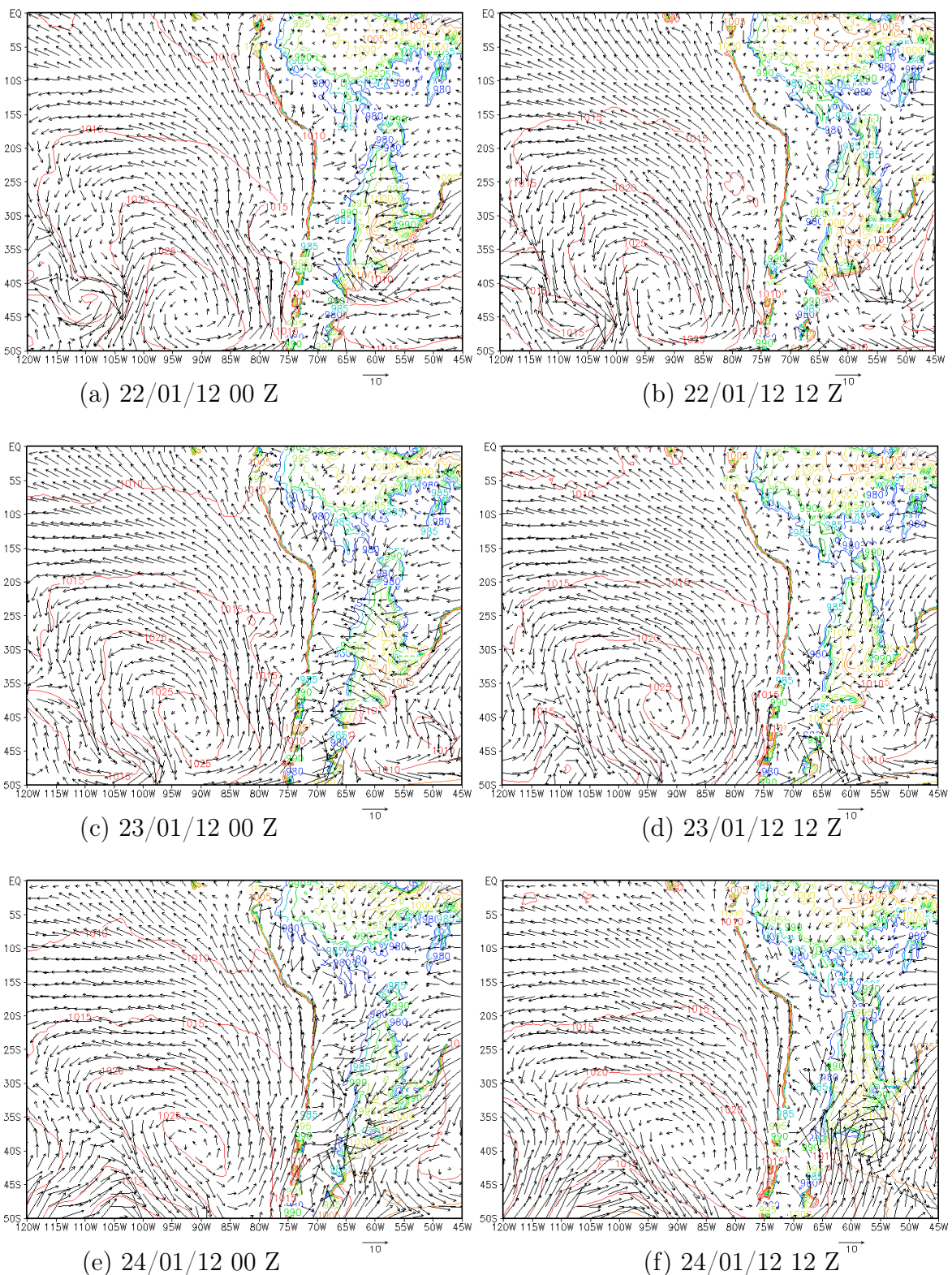


Figura 3.25: Evolução do campo do vento ($m.s^{-1}$) e pressão reduzida ao nível do mar (hPa) durante o período analisado. Em (a) 00 Z do dia 22/01/12, em (b) 12 Z do dia 22/01/12, em (c) 00 Z do dia 23/01/12, em (d) 12 Z do dia 23/01/12, em (e) 00 Z do dia 24/01/12, em (f) 12 Z do dia 24/01/12, em (g) 00 Z do dia 25/01/12, em (h) 12 Z do dia 25/01/12, em (i) 00 Z do dia 26/01/12, em (j) 12 Z do dia 26/01/12, em (k) 00 Z do dia 27/01/12 e em (l) 12 Z do dia 27/01/12.

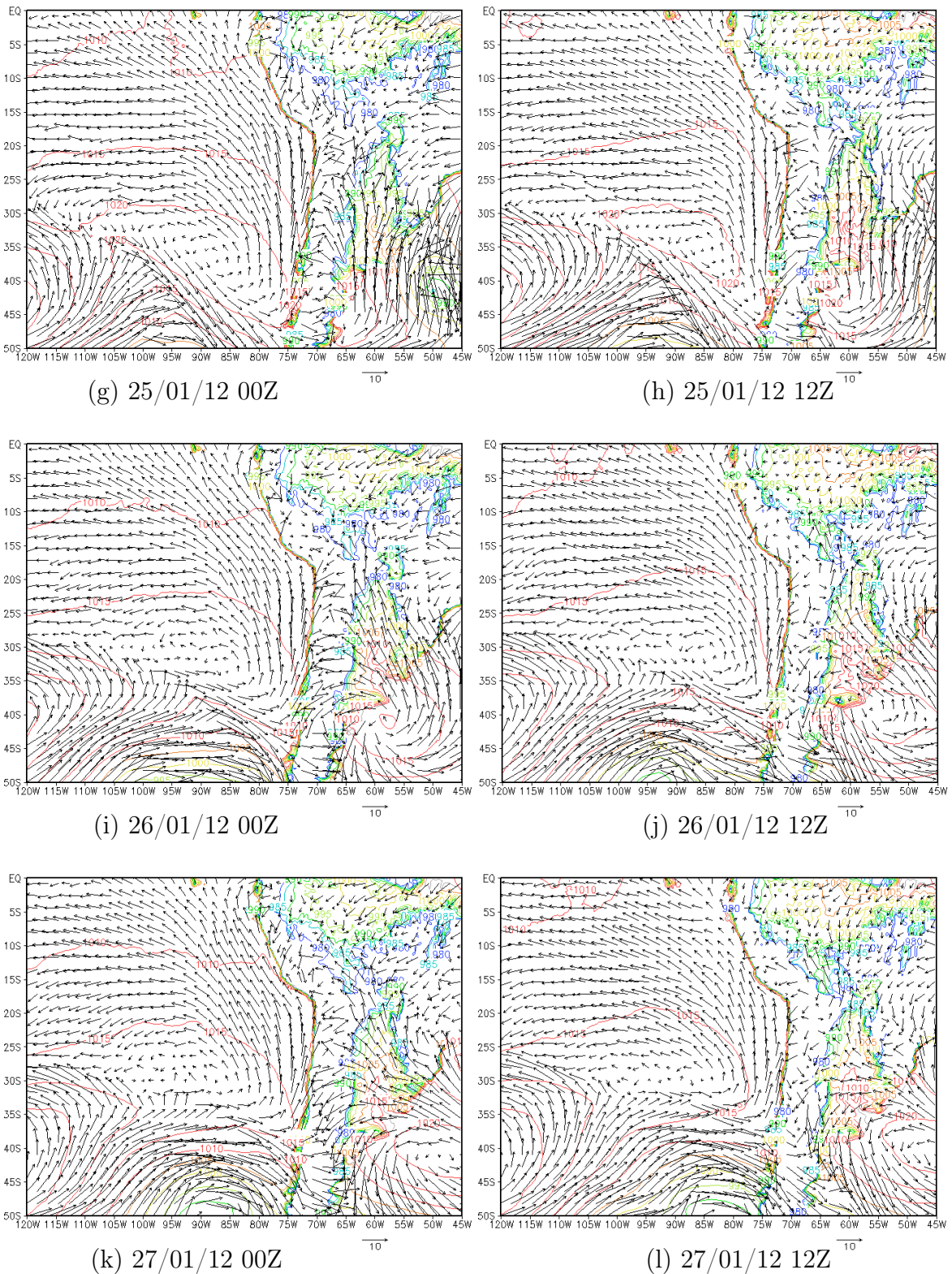


Figura 3.25: Continuação

- **Circulação dos ventos sobre a topografia**

Na Figura 3.26 apresenta-se o campo de ventos sobre a altura do terreno para às 4 HL e 12 HL. Na Figura 3.26.a verifica-se a formação de uma brisa terrestre no litoral de Lima. Nesta figura, fica também evidenciado o papel da topografia na circulação de brisa. Fica clara a presença da frente da brisa, porém, a brisa terrestre não é intensa sobre quase toda a RML. Entretanto, próximo à faixa litorânea aumenta em intensidade e consegue penetrar no oceano.

Por volta do meio dia (Figura 3.26.b) a circulação de brisa marítima já é evidente sobre o continente bem próximo à linha de costa em quase todo o litoral. Lima, por ser uma cidade litorânea, por um lado está sujeita à presença do oceano e por outro tem a presença de montanhas, fazendo com que a circulação de brisa atinja rapidamente o seu centro.

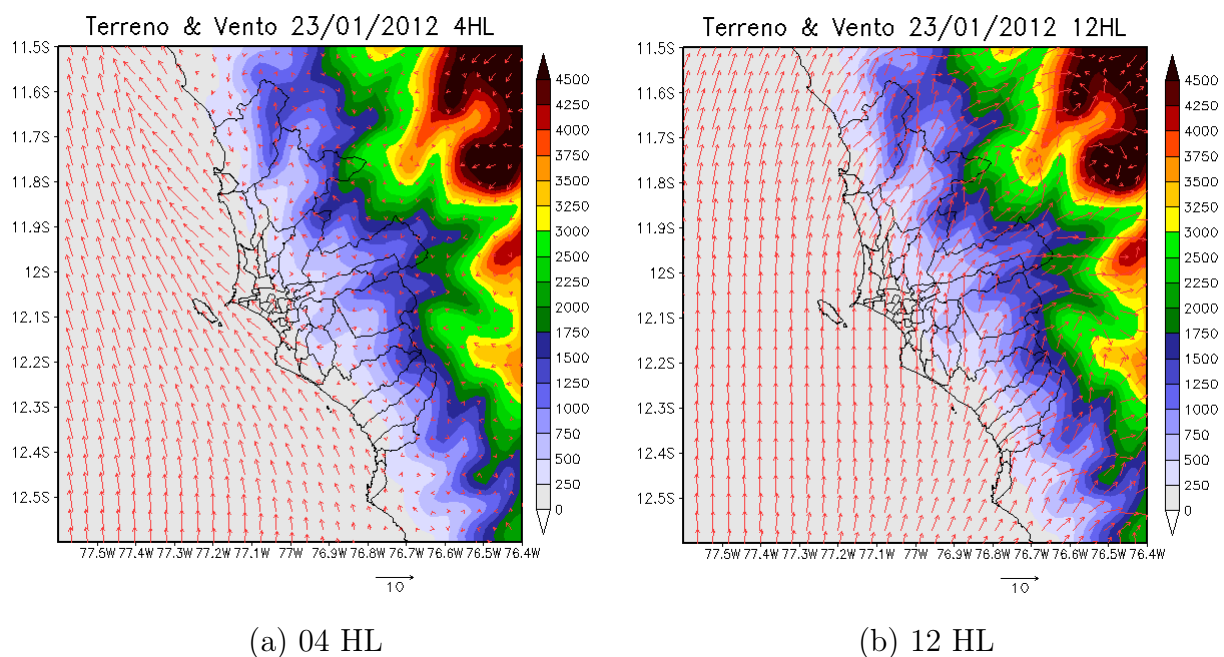


Figura 3.26: Campo de vento no primeiro nível do modelo acima da superfície para o horário a) 4 HL e b) 12 HL.

A Figura 3.27 mostra o perfil vertical, desde a superfície até 3000 metros de altura, do vento de brisa para o ponto de longitude de 77° W e latitude de 12° S, que fica próximo da linha de costa, verifica-se que no primeiro dia a brisa marítima

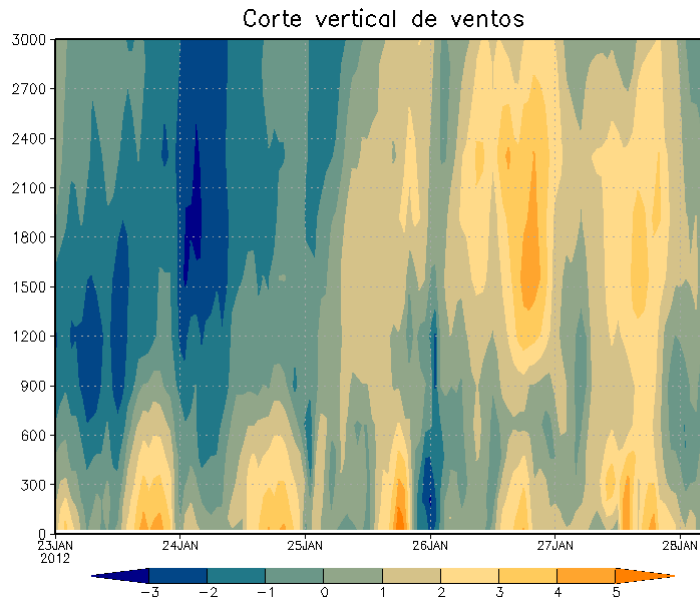


Figura 3.27: Perfil vertical da projeção do vento na direção perpendicular a linha de costa em Lima (vento de brisa) para a longitude de 77° W e latitude 12° S para o caso de janeiro (a altura encontra-se em metros e a barra de cores indica a intensidade de vento em $m.s^{-1}$).

tem início entre 13 Z e 14 Z (8 HL e 9 HL). A intensidade máxima dentro da célula de brisa atinge próximo de $4 m.s^{-1}$ por volta das 19 Z (14 HL). A extensão da circulação com ventos de sudoeste é de aproximadamente 600 m.

Por volta das 01 Z (20 HL) verifica-se a inversão na direção dos ventos dando início à brisa terrestre. Os ventos nas células de brisa terrestre atingem valores máximos de $2 m.s^{-1}$. A extensão vertical é de aproximadamente 600 m.

• O transporte de poluentes pela brisa

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos da simulação realizada para o terceiro domínio do modelo com o espaçamento de grade de 3 km. O objetivo é analisar o transporte de poluentes pelo padrão de ventos, isto é, verificar a extensão de propagação da brisa e sua intensidade, dependendo da situação de grande escala atuante, tendo como referência o posicionamento da região de alta pressão.

No caso dos poluentes, como já foi dito anteriormente, foi considerado um dia como tempo de spin-up. Portanto, o período analisado foi entre os dias 23 e 27 de janeiro de 2012 que corresponde a dias úteis que vão de segunda a sexta-feira. A

análise se inicia com as concentrações de NO_x , sendo este um dos precursores do ozônio.

No dia 23 (Figura 3.28) observa-se que às 4 HL tem-se a brisa terrestre atuando sobre a costa, na parte norte de Lima e numa porção pequena sobre a zona leste observam-se pequenas plumas de NO_x . Já às 8 HL observa-se uma pluma mais intensa e atingindo uma maior área sobre a RML devido ao fato de que nesse horário apresenta-se um dos picos mais altos de quantidade de veículos em circulação. Portanto, a quantidade de emissão de NO_x pela queima de combustível é alta. Também se observa que sobre os distritos de Ate e Santa Anita foram observados valores maiores que 110 ppb. Ao leste observa-se um alongamento da pluma que pode ser explicado pela presença de uma das rodovias principais, a Carretera Central, que conecta Lima com o centro do país. Neste horário é possível verificar frente de brisa penetrando sobre o continente em direção ao nordeste.

No horário das 12 HL observa-se que os ventos sobre o oceano são bem de sul e sobre o continente os ventos de brisa são mais intensos em direção ao nordeste. A pluma de NO_x encontra-se deslocada mais ao nordeste pela influência dos ventos de brisa marítima, estando a área onde foi formada inicialmente essa pluma mais limpa em termos das concentrações de NO_x . No começo da tarde os ventos ainda encontram-se intensos com direção ao nordeste, sendo que sobre a parte central e norte de Lima observa-se a formação da pluma de NO_x . No entanto, às 20 HL observa-se já uma pluma sobre grande parte da RML com concentrações máximas sobre uma parte norte de Lima (distritos de Comas e Puente Piedra) com magnitudes de aproximadamente 160 ppb e ventos mais fracos de sul.

À meia noite do dia 24 os ventos são mais fracos, sendo que na parte central de Lima e Callao os ventos são de sudeste e sobre Lima-leste observam-se ventos em direção ao oeste e sobre esta porção observa-se a pluma de NO_x , mais alongada ao norte na faixa bem próxima ao litoral onde justamente localiza-se outra rodovia principal, a Panamericana Norte, onde circulam veículos pesados. No dia 24 o comportamento é similar ao dia 23, mas no horário das 20 HL observa-se uma pluma com maiores magnitudes na parte de Lima-leste e com ventos menos intensos do que o dia anterior.

No dia 25 (Figura 3.28) verifica-se a pluma das 8 HL um pouco mais ao sul. Isso pode estar relacionado à mudança do padrão de ventos sobre a costa do distrito de Ventanilla onde nos dias anteriores a direção era para nordeste (de sudoeste) e para este dia tem-se ventos vindos de nordeste, o que faz com que os ventos entrando no continente sejam mais calmos sobre Ventanilla. Observa-se também que essa pluma alongada mais ao sul pode estar sendo influenciada pela circulação de veículos pesados. Ao meio dia tem-se menor quantidade de veículos e em função disso menor emissão de NO_x pela queima de combustíveis. No entanto, a pluma encontra-se mais alongada para leste, parecendo estar bem relacionada com a intensidade e direção dos ventos que vão para a mesma direção. Às 16 HL, onde começa a atividade veicular mais intensa, observa-se duas plumas conectadas a pluma menor mais ao leste, podendo esta última estar relacionada ao NO_x emitido às 8 HL e que ficou estancado pelo padrão de ventos calmos e a pluma maior, localizada nas zonas central e norte de Lima, resultado das novas emissões. No pico da noite (20 HL), observa-se a pluma mais alongada para norte com ventos intensos nesta direção.

No dia 26 às 08 HL (Figura 3.28) observa-se um padrão de ventos bem fortes vindos de sul que influenciam o padrão de ventos sobre a porção mais próxima da costa. Mais afastado da costa observa-se os ventos virando para o interior do continente. A pluma de NO_x neste horário ocupa uma área maior da RML tendo dois setores com maiores concentrações, um na porção sul de Lima e outro na parte leste de Lima-leste e Lima-norte. Ao meio dia a pluma encontra-se mais ao norte, mas ainda sobre a região próxima à costa. Isso pode ser explicado pelo padrão de ventos que são mais intensos vindos do sul e não conseguem virar para leste na costa, deixando desta maneira a maior porção da pluma bem mais no litoral. Às 20 HL observa-se uma pluma com maiores concentrações do que os dias anteriores e centrada sobre Lima-norte ocupando três distritos (Comas, Carabayllo e Puente Piedra).

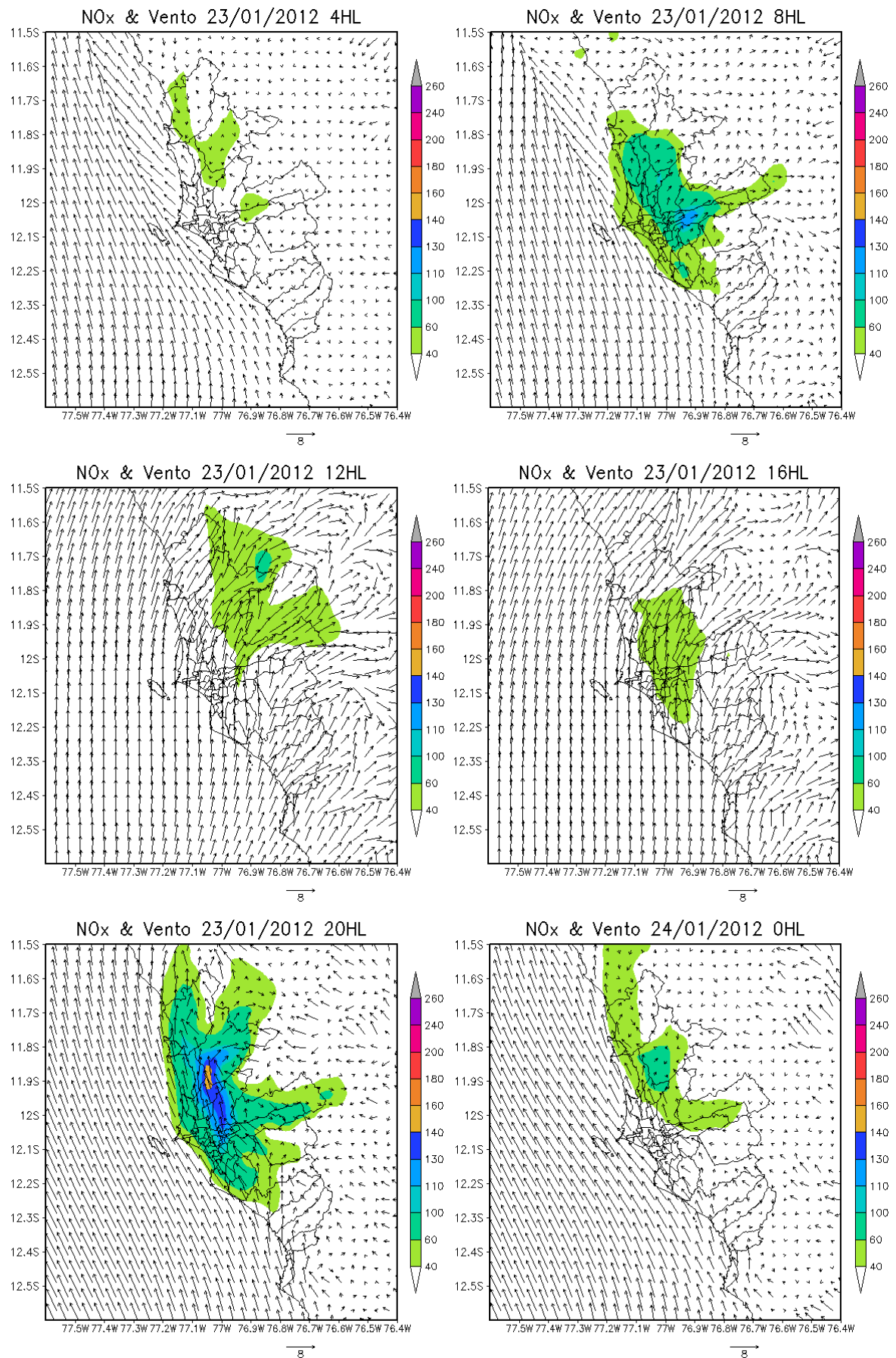


Figura 3.28: Evolução temporal da concentração de NO_x e do campo do vento ($m.s^{-1}$) no primeiro nível do modelo.

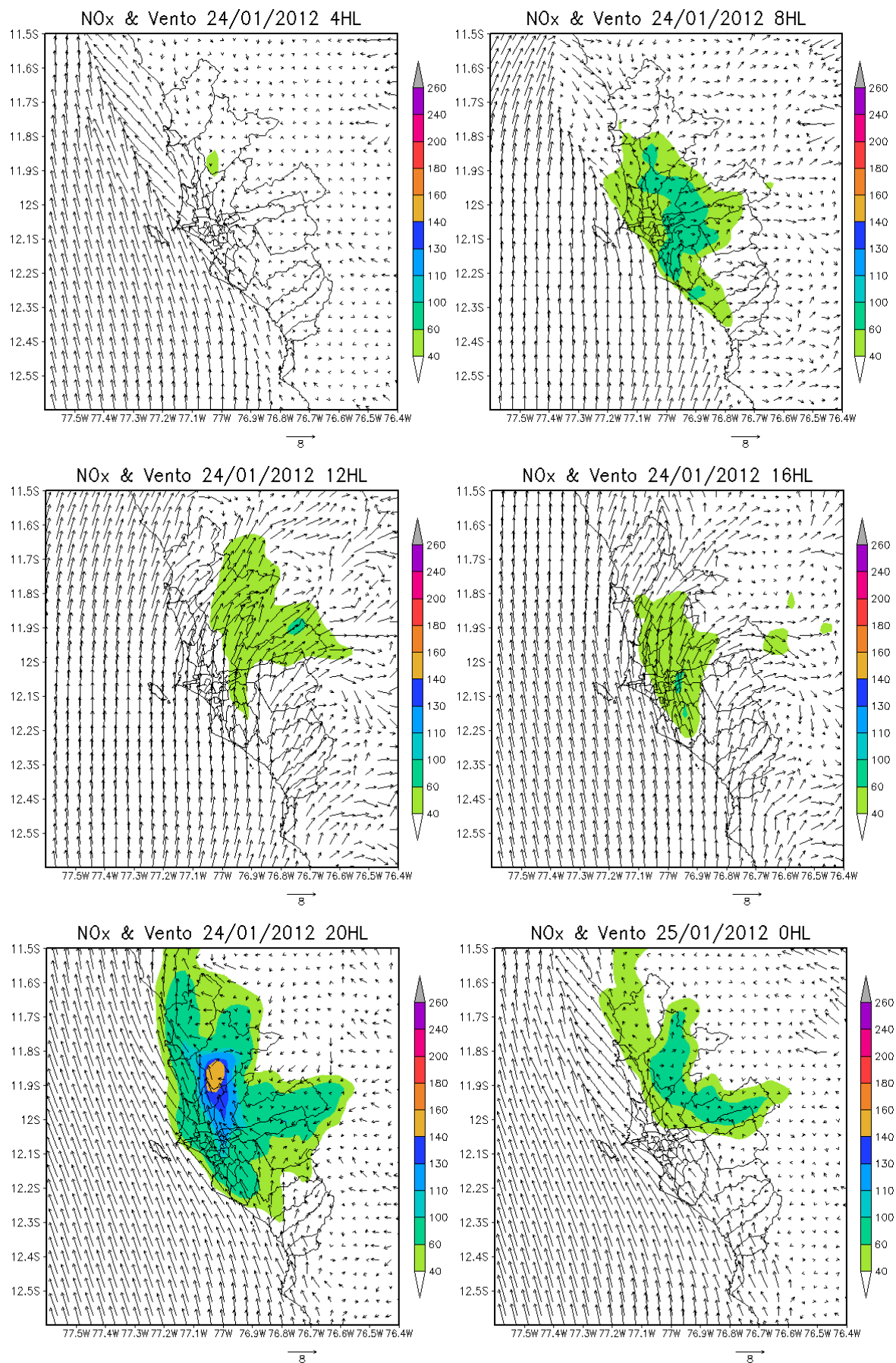


Figura 3.28: Continuação

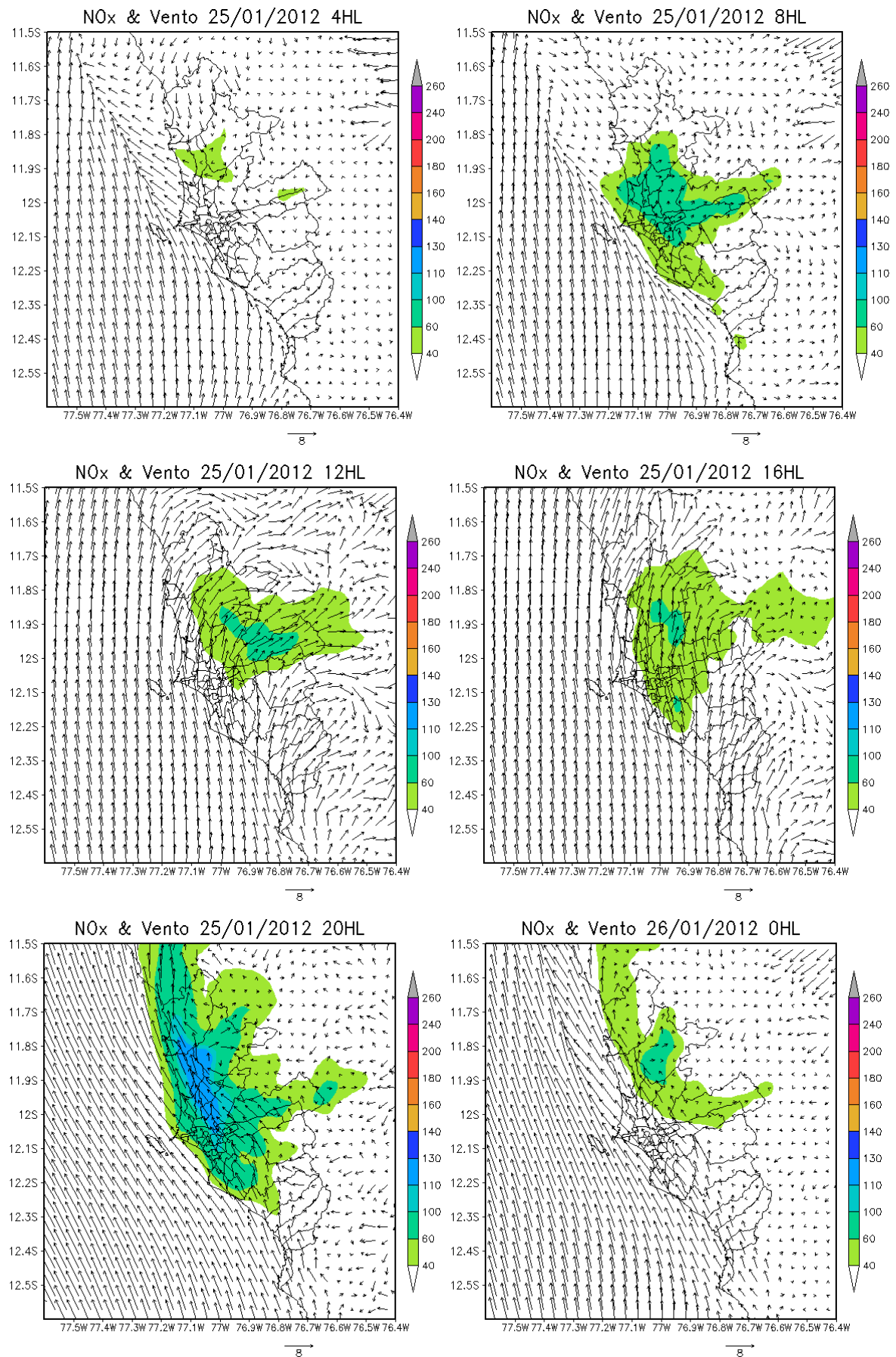


Figura 3.28: Continuação

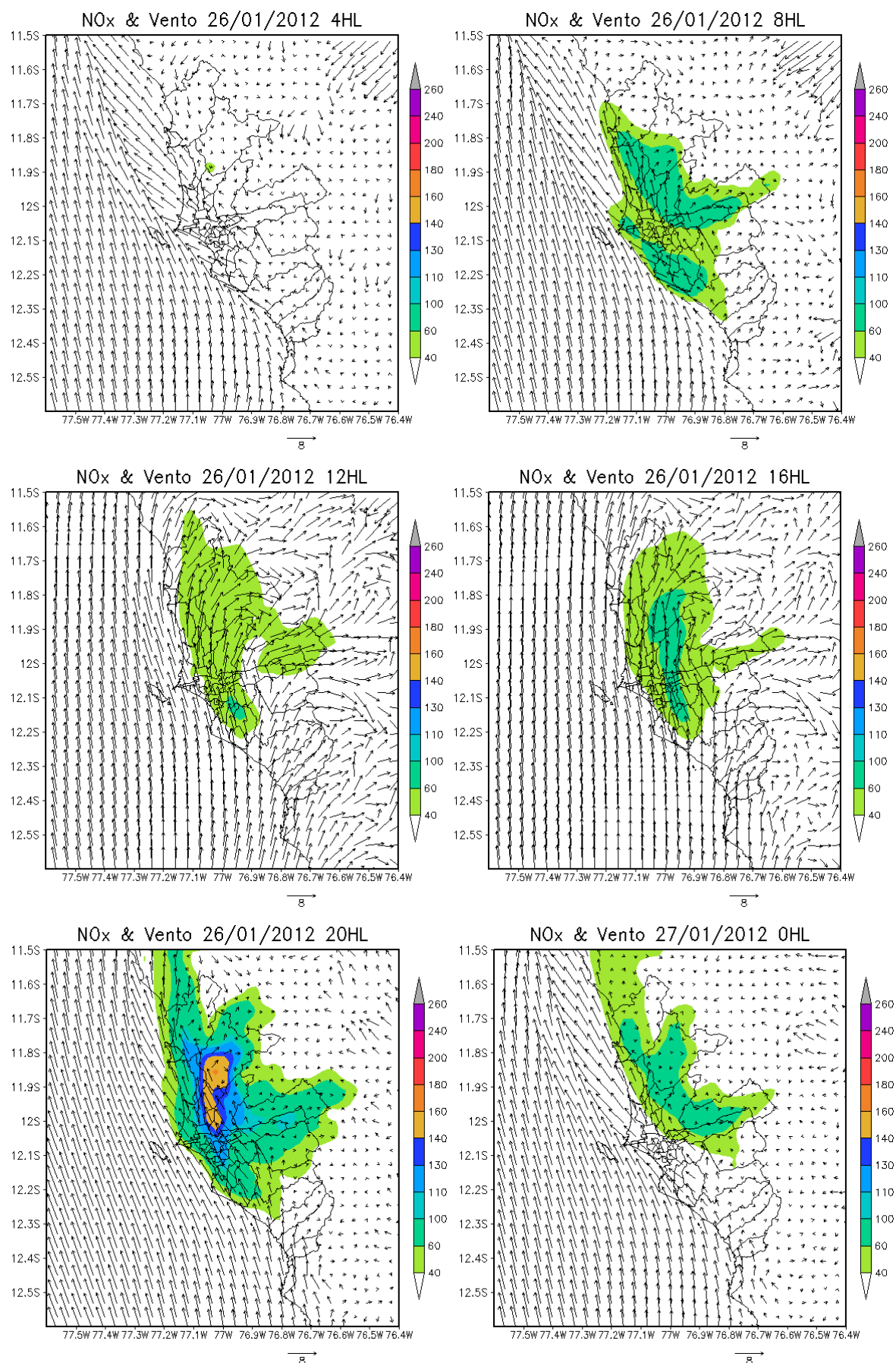


Figura 3.28: Continuação

No dia 23 (Figura 3.29) observa-se que a máxima concentração de ozônio encontra-se próximo ao meio dia, sendo que o padrão de ventos de brisa é intenso e em direção ao nordeste o que poderia explicar a presença de concentrações máximas sobre Lima-norte e um pouco menor sobre Lima-leste e que coincidem com a presença da localização das máximas concentrações de NO_x como foi visto na Figura 3.28. Além disso, considerando os resultados apresentados durante a validação do modelo, os picos máximos são adiantados. Com isso pode se dizer que a pluma foi formada mais no centro da cidade e deslocada pela influência dos ventos de brisa marítima. No começo da tarde a pluma de ozônio desloca-se mais para nordeste, atingindo outras localidades fora da RML como a província de Canta e Huarochiri, onde as concentrações de NO_x são baixas. No horário das 20 HL a pluma de ozônio encontra-se consideravelmente diminuída sobre a porção onde ela foi formada e confinada fora da RML, aproximadamente sobre a província de Canta, em função das reações de consumo do ozônio.

No dia 24 ao meio dia observa-se um padrão de ventos similar do dia anterior, mas a pluma de ozônio encontra-se mais alongada para o sul, sendo que as máximas concentrações são dadas na porção de Lima-norte e Lima-leste, além disso, olhando na Figura 3.28 observa-se que este máximo de ozônio coincide com os máximos de NO_x nesse horário. No horário das 20HL a pluma se encontra praticamente fora da RML e está quase estacionada cobrindo quase toda a província de Canta e parte de Huarochiri, isso pode estar relacionado pelo padrão de ventos fracos sobre essa região.

No dia 25 às 04 HL (Figura 3.29) observa-se que se tem ozônio acumulado do dia anterior fora da RML, especificamente sobre a província de Canta, e no decorrer das horas e com a presença da incidência solar forma-se ozônio sobre a parte central da RML o que junto com o ozônio do dia anterior vai formar uma pluma de grande extensão cobrindo quase toda RML, apresentando os valores máximos sobre Lima-norte e Lima-leste coincidindo com a localização da pluma de NO_x no mesmo horário (ver Figura 3.28), por outro lado o padrão de ventos de brisa atua para influenciar no alongamento, deslocamento e transporte da pluma para nordeste. No horário das 16 HL observa-se que Lima-sul encontra-se quase completamente limpa, no entanto

observa-se a pluma mais alongada com a forma similar da pluma de NO_x e com a concentração máxima bem ao leste. Já no horário das 20 HL observa-se que a pluma encontra-se completamente deslocada para fora da RML, no entanto encontra-se estacionada sobre as províncias de Canta e Huarochiri. Isso pode ser explicado pelo ventos fracos e pela presença de ventos descendo as montanhas.

No dia 26 (Figura 3.29) nas horas da madrugada (4 HL) observa-se também acumulo de ozônio do dia anterior que, junto com o ozônio novo que vai ser formado na RML, forma uma pluma de grande extensão, que pode ser verificada às 12 HL, onde o vento é mais intenso e influencia o deslocamento de ozônio para nordeste. Observa-se também que as concentrações máximas localizam-se sobre Lima-norte e Lima-Leste e no horário das 16 HL o vento esta influenciando o deslocamento mais ao norte, onde altas concentrações sobre Lima-norte podem ser observadas.

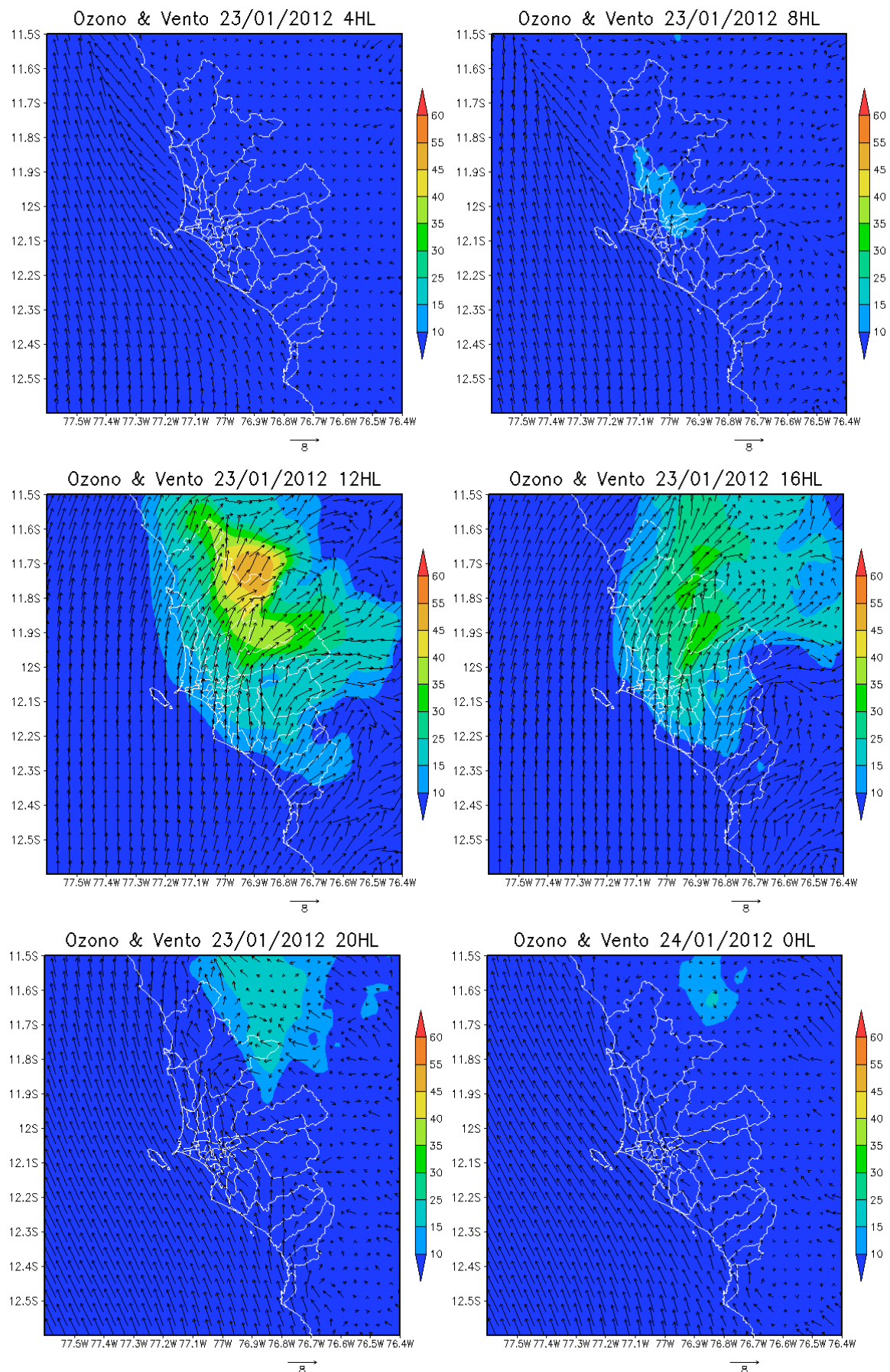


Figura 3.29: Evolução temporal das concentrações de O_3 e do campo do vento ($m.s^{-1}$) ao primeiro nível do modelo.

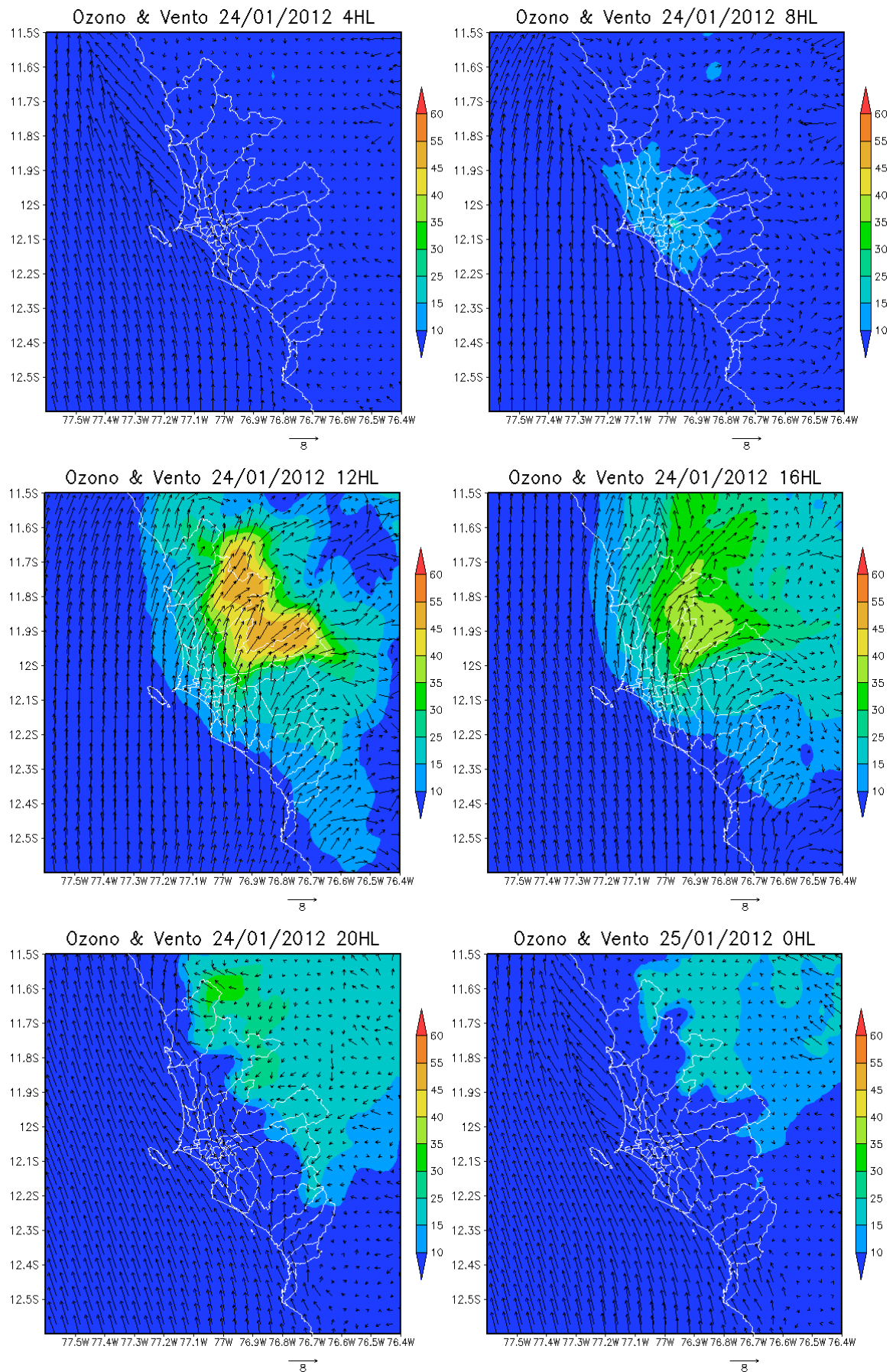


Figura 3.29: Continuação

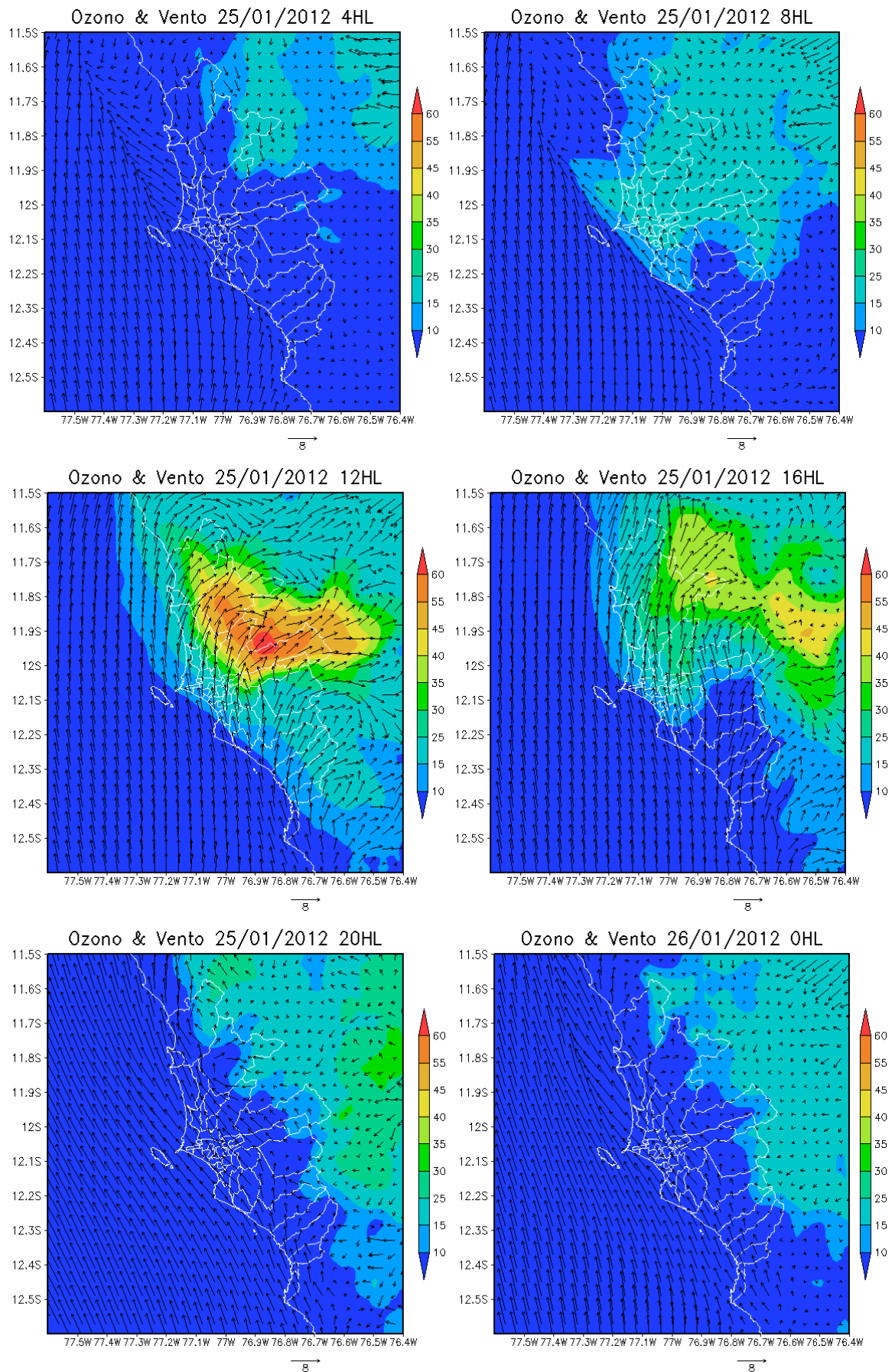


Figura 3.29: Continuação

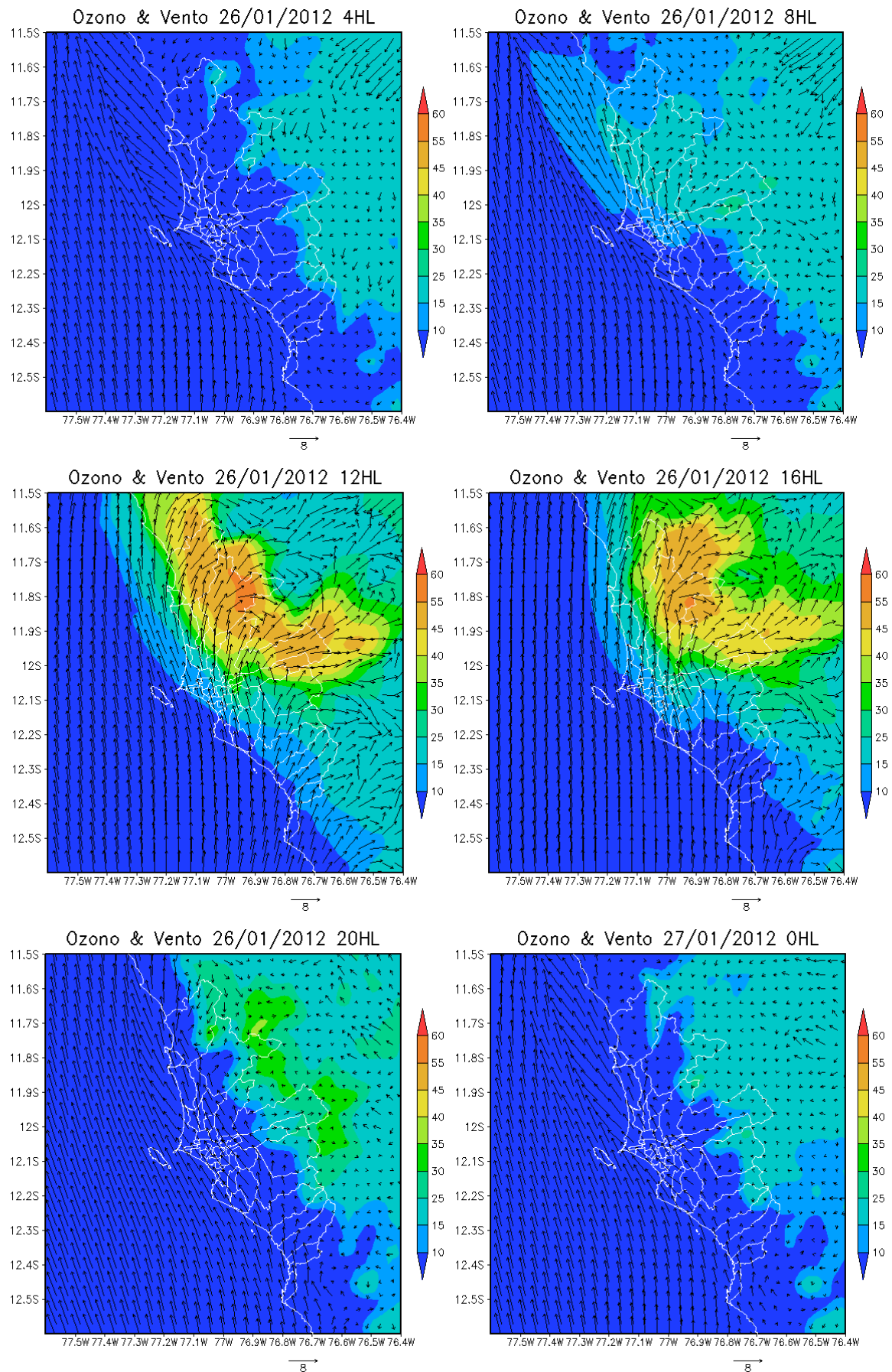


Figura 3.29: Continuação

Segundo a análise feita neste período podemos concluir que o ozônio sobre a RML é formado em grande parte em Lima-norte e Lima-sul. Embora exista um acúmulo fora da região a pluma associada não conseguiu chegar até o centro da RML, em virtude do padrão de ventos atuantes, sendo a direção predominante durante o dia é de sudoeste (Brisa marítima), que os ventos durante a noite são paralelos à costa e que os ventos sobre o continente em direção ao litoral são relativamente fracos.

- **O transporte de poluentes na vertical**

Na Figura 3.30 mostra-se a velocidade vertical (w) para a longitude de $76,95^\circ$ W e latitude de $11,95^\circ$ S. nessa figura observa-se que a partir das 14 Z (9 HL) o movimento na vertical é ascendente, incrementando a intensidade com o decorrer do dia até alcançar valores máximos de $0,3 \text{ m.s}^{-1}$. A extensão dos movimentos ascendente é de aproximadamente 600 m. No entanto, para o dia 25 a extensão chega até os 900 m.

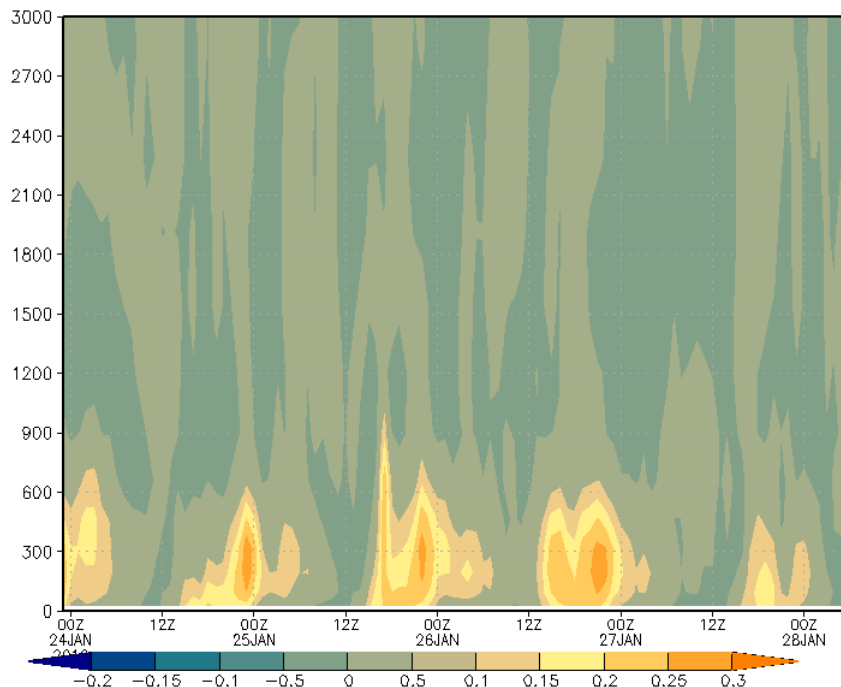


Figura 3.30: Perfil vertical da velocidade w para a longitude de $76,95^\circ$ W e latitude de $11,95^\circ$ S para o caso de janeiro. (a barra de cores indica a magnitude em m.s^{-1}).

A Figura 3.31 mostra o perfil vertical das concentrações de ozônio e a altura da camada limite planetária para a longitude de $76,95^\circ$ W e latitude de $11,95^\circ$ S, observa-se que o dia 24 a altura máxima da camada limite planetária foi de aproximadamente 1000 m e abaixo desta camada encontram-se os valores máximos de ozônio. No dia 25 a altura máxima foi de aproximadamente 1100 m e às 18 Z observa-se uma queda na altura da CLP, sendo observado algum ozônio acima desta camada. No dia 26 a altura máxima da CLP encontra-se abaixo dos 900 m, sendo observado também concentrações relativamente altas acima da CLP. No dia 27 a CLP foi de aproximadamente 800 m e observam-se altas concentrações de ozônio tanto dentro da CLP assim como na atmosfera livre.

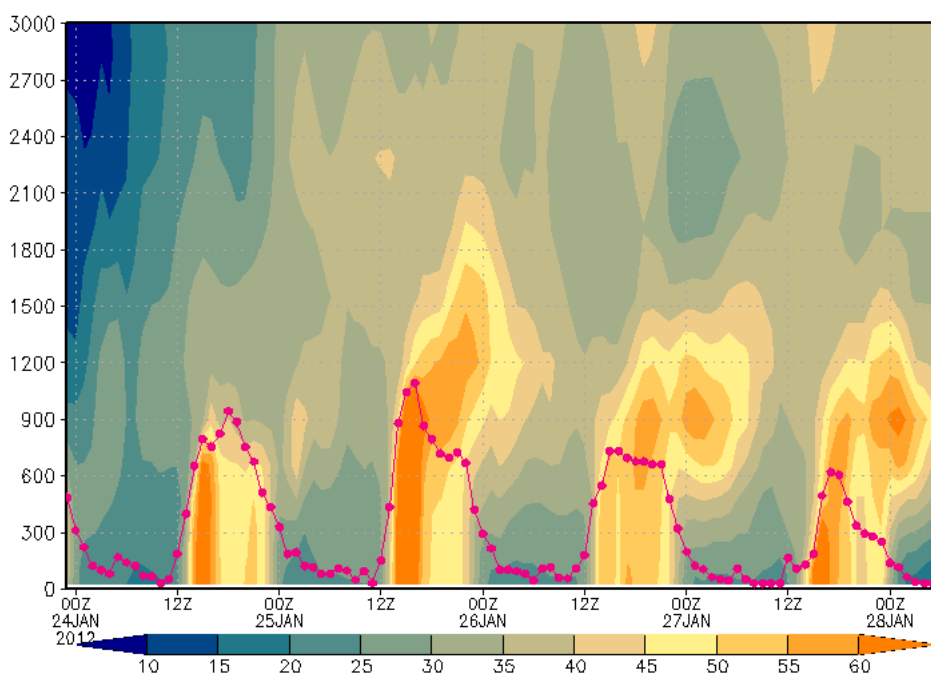


Figura 3.31: Perfil vertical da concentração de ozônio e altura da camada limite planetária (CLP) para a longitude de $76,95^\circ$ W e latitude de $11,95^\circ$ S para o caso de janeiro. A barra de cores indica a concentração (em ppb) e a linha vermelha pontilhada representa a altura da CLP (em metros).

3.2.2 Caso de julho de 2012

- **Análise da circulação de grande escala e seu papel sobre a intensidade e propagação da brisa marítima**

Nesta sessão foi seguido o mesmo procedimento adotado para o caso de janeiro, em que é analisada a situação da circulação em grande escala e o comportamento da brisa marítima durante o período da simulação, entre 05 e 11 de julho de 2012. Também foram analisadas as saídas do primeiro domínio do modelo com espaçamento de grade de 27 km, sendo utilizados 500 pontos na direção zonal e 430 na direção meridional e 51 níveis verticais.

Na Figura 3.32 apresenta-se a evolução do campo de vento ($m.s^{-1}$) e da pressão reduzida ao nível do mar (hPa) nos horários das 19 HL e 07 HL. Nessa figura, em geral, observa-se que o centro da ASPS encontra-se deslocado mais para o norte (aproximadamente 36° S e 102° W) com pequenas variações no decorrer dos dias, além das linhas de alta pressão durante a noite estarem mais próximas da linha de costa durante às 00 Z (19 HL) em comparação às 12 Z (07 HL).

Por outro lado, analisando sobre a região de Lima observa-se que em geral durante as 19 HL os ventos sobre o oceano próximos da costa estão paralelos à linha de costa e são mais intensos do que no verão, embora sobre o continente estes ventos sejam mais fracos e menos organizados. No horário das 07 HL observa-se que os ventos estão um pouco menos intensos próximos à costa, começando a haver penetração sobre o continente. Estes ventos fracos podem ser explicados pela maior nebulosidade sobre Lima durante o período de inverno. Esta nebulosidade em conjunto com a baixa radiação incidente no inverno austral faz que o gradiente de temperatura seja muito menor que durante o verão. No entanto, a presença da nebulosidade pode ser explicada pela maior intensidade da ASPS, promovendo a inversão de subsidência sobre a costa de Lima.

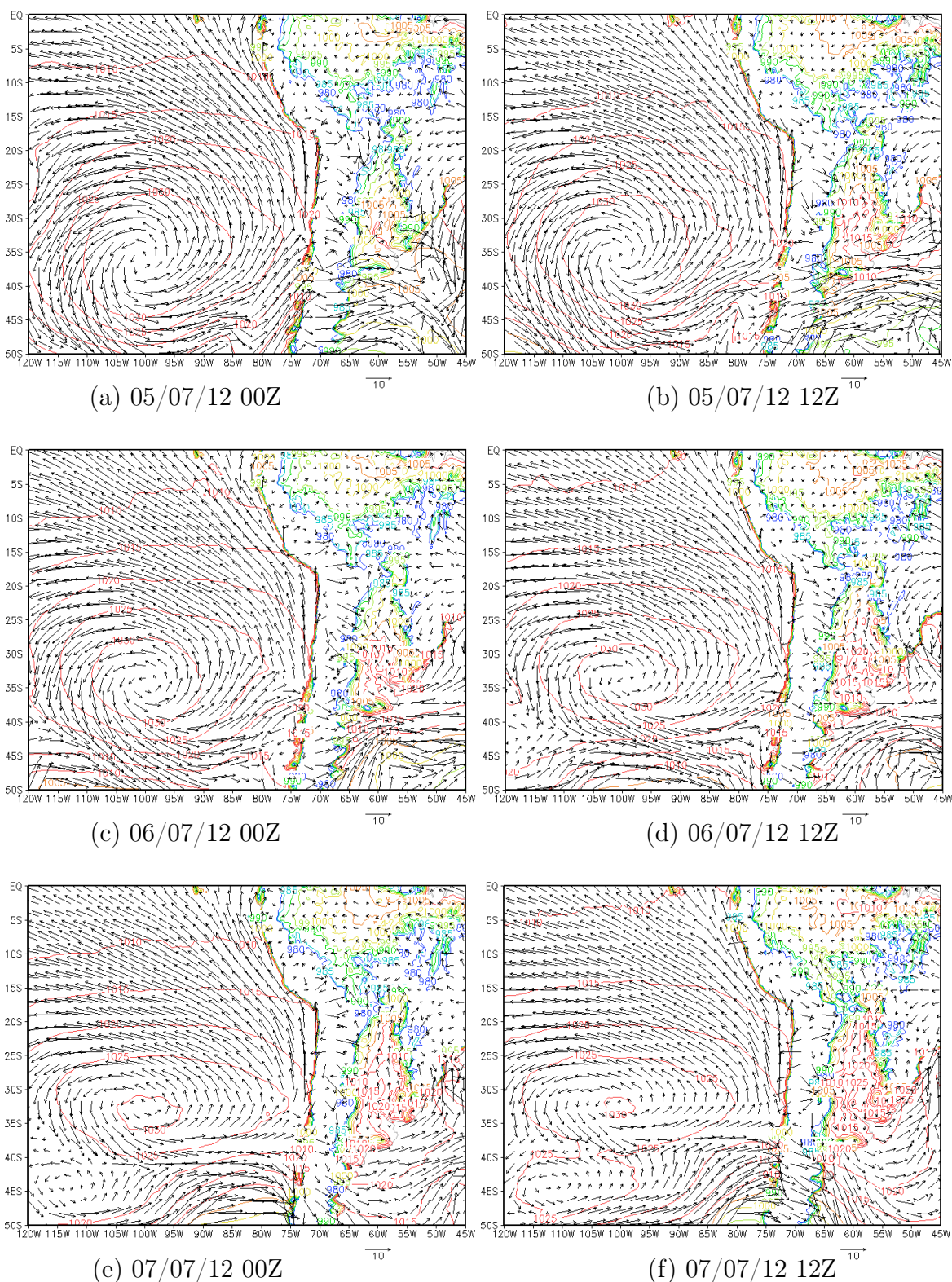


Figura 3.32: Evolução do campo do vento ($m.s^{-1}$) e pressão reduzida ao nível do mar (hPa) durante o período analisado. Em (a) 00 Z do dia 05/07/12, em (b) 12 Z do dia 05/07/12, em (c) 00 Z do dia 06/07/12, em (d) 12 Z do dia 06/07/12, em (e) 00 Z do dia 07/07/12, em (f) 12 Z do dia 07/07/12, em (g) 00 Z do dia 08/07/12, em (h) 12 Z do dia 08/07/12, em (i) 00 Z do dia 09/07/12, em (j) 12 Z do dia 09/07/12, em (k) 00 Z do dia 10/07/12 e em (l) 12 Z do dia 10/07/12.

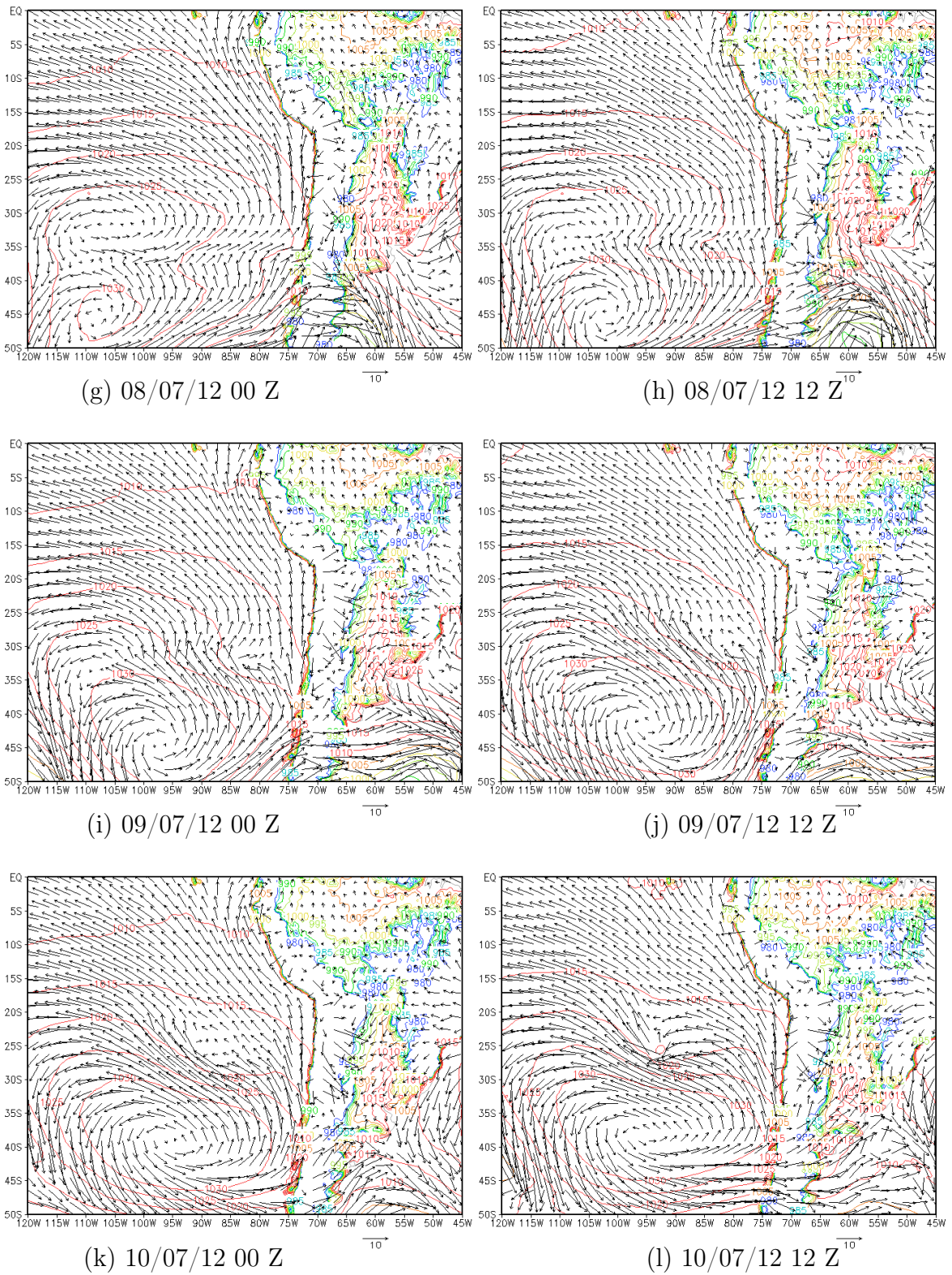


Figura 3.32: Continuação

- **Circulação dos ventos sobre a topografia**

A Figura 3.33 apresenta o campo de ventos para às 4 HL e 12 HL. Na Figura 3.33.a verifica-se a formação de uma brisa terrestre no litoral de Lima com maior intensidade do que em janeiro. Nesta figura fica também evidente o papel da topografia na circulação de brisa. Observam-se ventos fortes de nordeste descendo das montanhas que estão localizadas ao leste de Lima. Fica clara a presença da frente da brisa terrestre mais intensa perto das montanhas, porém, a brisa não é intensa o suficiente perto da faixa litorânea para penetrar no oceano.

Por volta do meio dia (Figura 3.33.b), a circulação de brisa marítima já é evidente sobre o continente bem próximo à linha de costa em quase todo o litoral, bem como perto das montanhas. No entanto, observa-se que a brisa marítima neste período é mais fraca em comparação a janeiro.

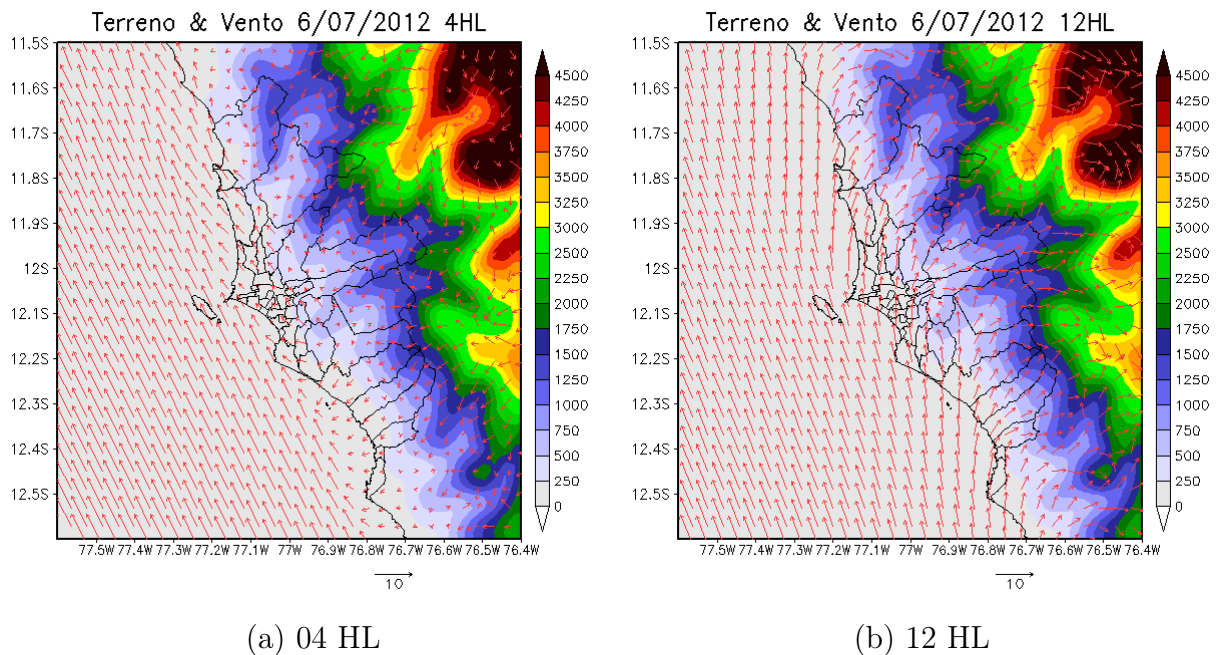


Figura 3.33: Campo de ventos no primeiro nível do modelo acima da superfície para o horário a) 4 HL e b) 12 HL.

A Figura 3.34 mostra o perfil vertical do vento de brisa para o ponto de longitude de 77° W e latitude de 12° S que fica próximo da linha de costa. Verifica-se que no primeiro dia a brisa marítima tem início entre 14 Z e 15 Z (9 HL e 10 HL). Por volta das 20 Z (15 HL) a intensidade máxima dentro da célula de brisa atinge

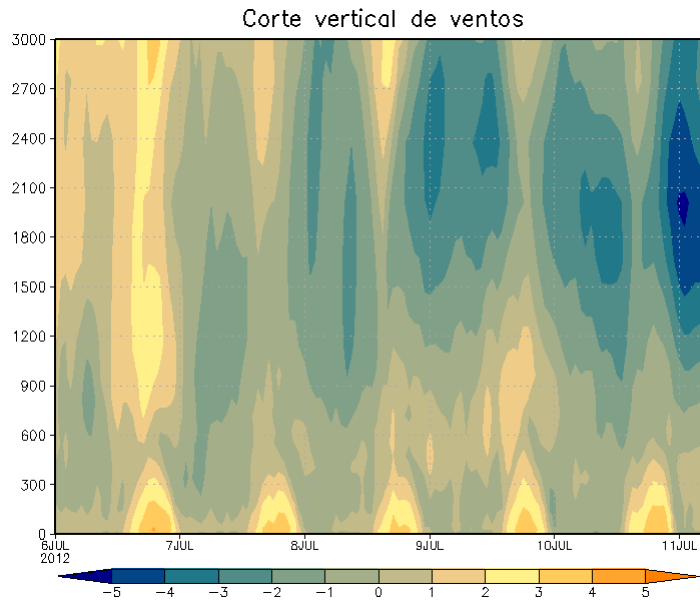


Figura 3.34: Perfil vertical da projeção do vento na direção perpendicular à linha de costa em Lima (vento de brisa) para a longitude de 77° W e latitude 12° S para o caso de julho. A barra de cores indica a intensidade do vento em $m.s^{-1}$

cerca de $4 m.s^{-1}$. A extensão da circulação com ventos entrando no continente é de aproximadamente 400 m. Por volta das 01 Z (20 HL) verifica-se a inversão na direção dos ventos dando início à brisa terrestre. Os ventos nas células de brisa terrestre atingem valores máximos de $3 m.s^{-1}$.

- **O transporte de poluentes pela brisa**

A mesma análise apresentada para o caso de janeiro foi realizada para o caso de julho. A seguir, serão apresentados os resultados obtidos da simulação realizada para o terceiro domínio do modelo com o espaçamento de grade de 3 km. O objetivo é analisar o transporte de poluentes pelo padrão de ventos, isto é, verificar a extensão de propagação da brisa e sua intensidade, dependendo da situação de grande escala atuante em função do posicionamento da região de alta pressão.

Neste caso também foi considerado um dia para eliminar o efeito de *spin-up* para o período de simulação de 06 a 10 de julho de 2012, o que corresponde a dias que vão desde a sexta até a terça-feira.

Na figura 3.35 observa-se o que, em geral, o padrão de ventos sobre o oceano próximo à linha de costa é mais intenso em comparação ao verão, como foi dito anteriormente. No dia 06 no horário das 4 HL observa-se ventos de brisa terrestre sobre o continente e na região mais afastada da linha de costa e mais próximo às montanhas observa-se ventos em direção oceano. Às 08 HL observa-se a mudança do padrão de ventos, agora entrando para o continente com menor intensidade do que o período de verão para o mesmo horário. Por outro lado neste horário encontra-se um dos picos máximos de concentração de NO_x em função da grande queima de combustíveis, com a pluma localizada sobre a grande porção central da RML. No horário das 12 HL o padrão de ventos de brisa é mais intenso e em direção ao nordeste, a pluma de NO_x neste horário é mínima. Isso pode ser explicado pela influência dos ventos na dispersão da pluma, além da menor emissão. Nas primeiras horas da tarde aproximadamente às 16 HL o padrão de vento diminui em intensidade e a pluma de NO_x começa a se formar sobre a região central da RML, especificamente sobre Lima-centro e parte de Lima-norte. Nas horas da noite (20 HL), onde é observado o segundo pico máximo da concentração de NO_x , observa-se a mudança do padrão de ventos perto da linha de costa para noroeste, conseqüentemente, alongando a pluma na mesma direção. Também observa-se que os máximos valores da pluma encontram-se sobre Lima-norte. Por outro lado sobre o continente observa-se que os ventos são mais fracos e na direção contrária (brisa terrestre).

No dia 07 (Figura 3.35), observa-se o padrão de ventos similar ao do dia anterior. No entanto, no horário das 08 HL a área da pluma de NO_x cobre uma área maior da RML. Próximo ao meio dia observa-se que o padrão de vento de brisa marítima é mais intenso e ainda consegue-se ver duas pequenas manchas, uma sobre Lima-norte e outra sobre Lima-centro. Durante a noite (20 HL) observa-se uma pluma com maiores concentrações sobre Lima-norte e Lima-leste. Também observa-se a mudança do padrão de ventos e já à meia noite (0 HL) observa-se a mudança completa do padrão de ventos. No entanto, continua uma pequena pluma no lugar onde se apresentaram as máximas concentrações nos horários de pico.

Nos dias 08 e 09 (Figura 3.35) o padrão se repete. Às 04 HL ventos de sudeste e com intensidade maior que no verão no mesmo horário, mudança de padrão às 08

HL com uma das máximas plumas. Às 12 HL o padrão de ventos intensos de brisa marítima em direção ao continente com uma pequena pluma sobre Lima-centro. Nas primeiras horas da tarde observa-se enfraquecimento dos ventos e formação da pluma sobre Lima-centro e Lima-norte. Às 20 HL observa-se novamente a mudança do padrão do escoamento com ventos fracos. Por outro lado, observa-se a pluma com maiores concentrações às 08 HL cobrindo grande parte da RML.

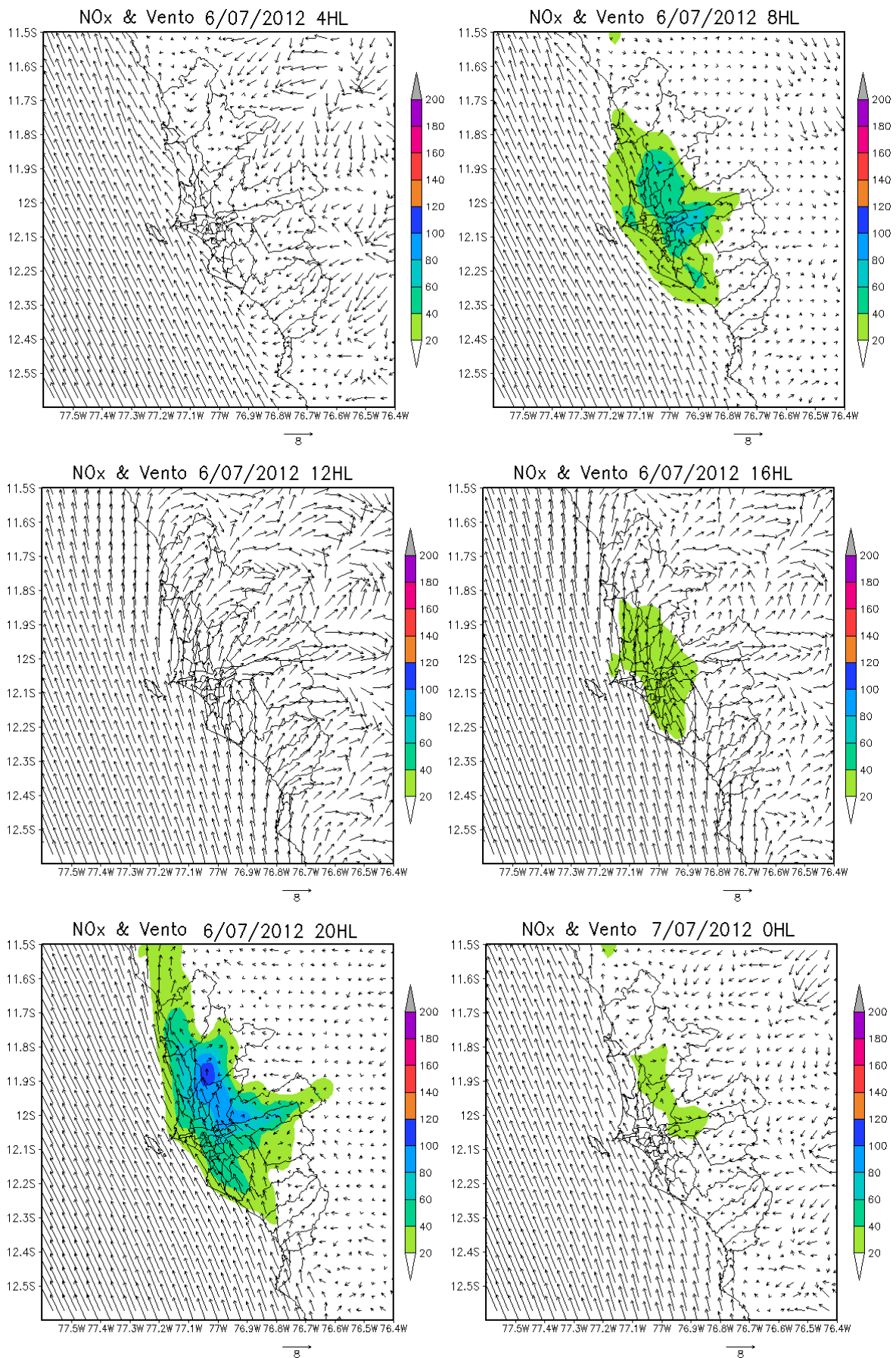


Figura 3.35: Evolução temporal da concentração de NO_x (ppb) e do campo do vento ($m.s^{-1}$) ao primeiro nível do modelo.

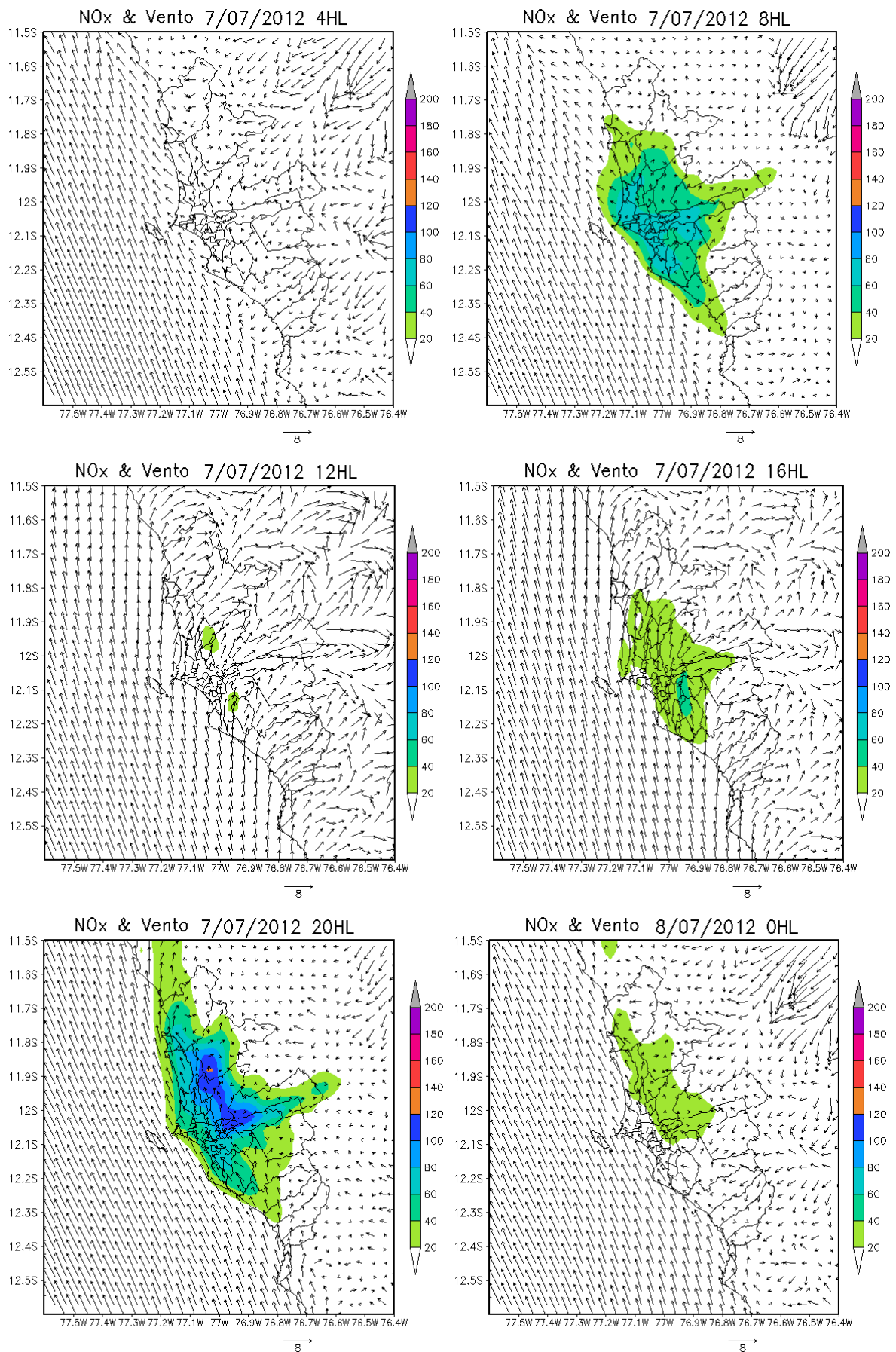


Figura 3.35: Continuação

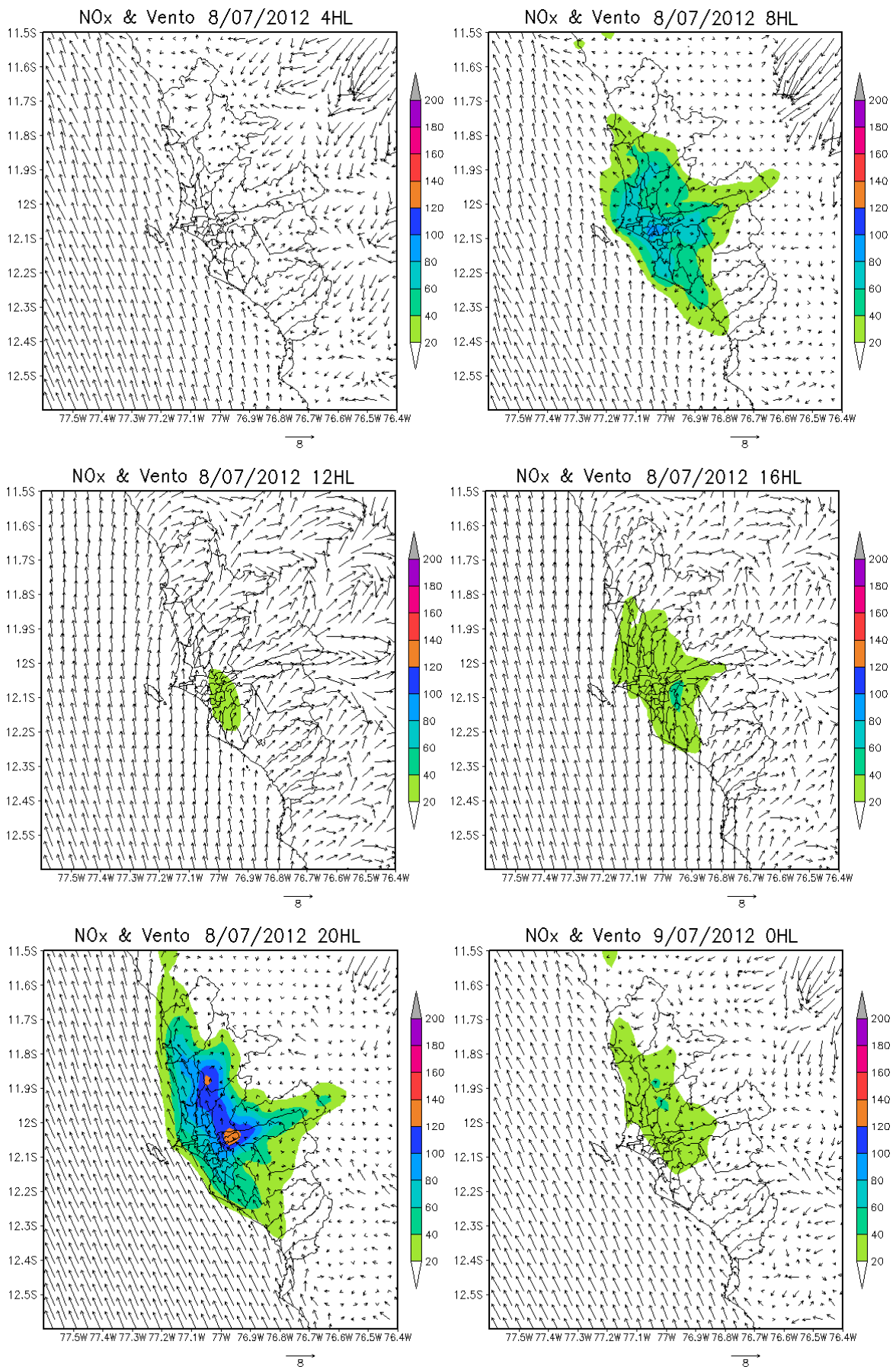


Figura 3.35: Continuação

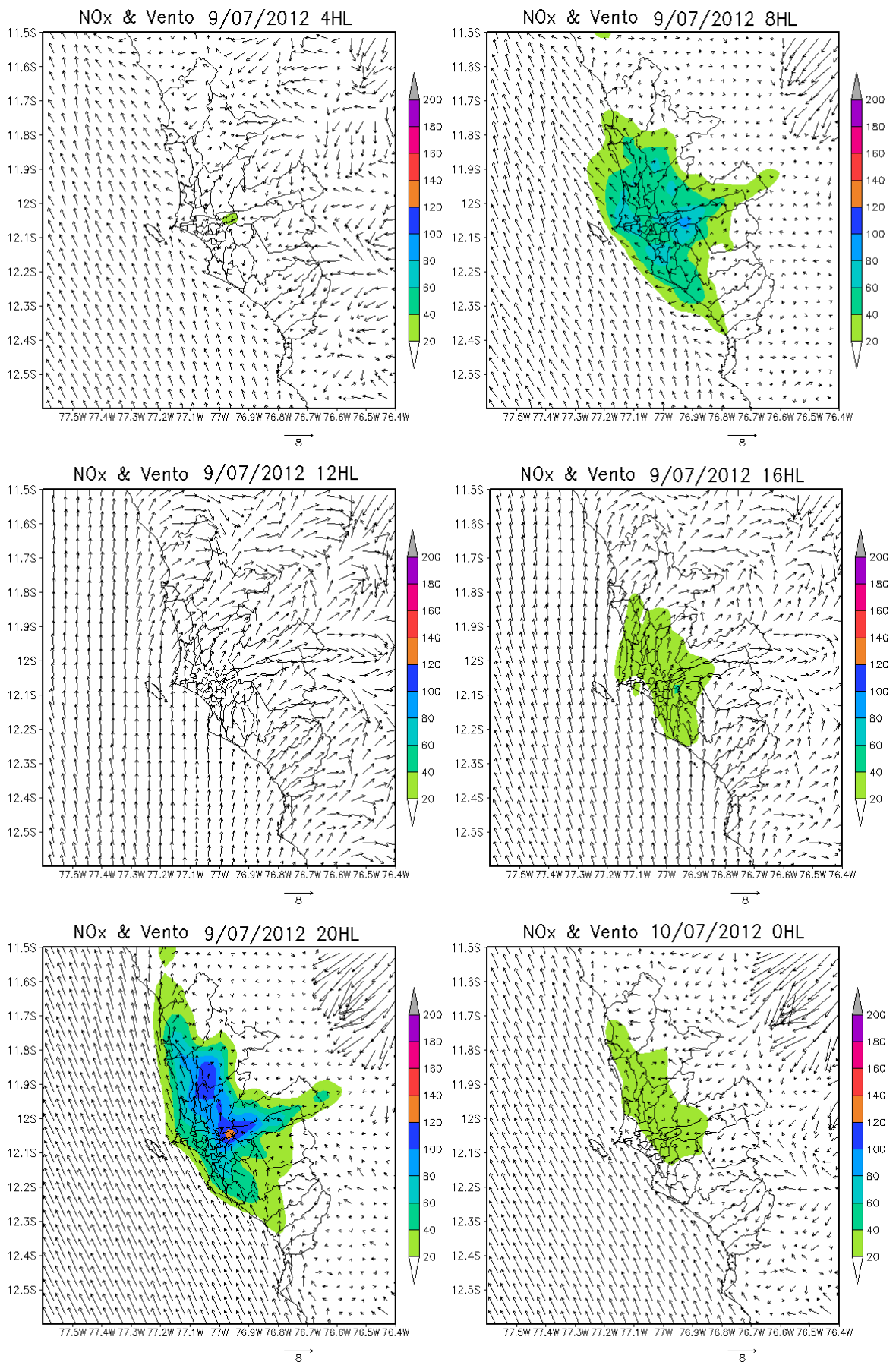


Figura 3.35: Continuação

Para este período as concentrações de ozônio foram, em geral, menores do que no período de janeiro. No dia 06 (Figura 3.36) observa-se que às 08 HL tem-se uma pequena pluma de ozônio localizada fora da RML e sobre a província de Canta. No horário do meio dia, já com a presença da brisa marítima, o padrão de ventos é mais intenso, porém, é menor do que no verão, o que faz com que a pluma se desloque mais devagar, para nordeste, em comparação ao verão. A pluma apresenta valores máximos sobre as zonas norte e leste de Lima. No horário das 16 HL observa-se a pluma mais dissipada para nordeste até encontrar a pluma localizada na província de Canta. Durante a noite (20 HL) observa-se ventos mais fracos e uma pluma localizada nos limites nordeste da RML.

Nos dias 07 e 08 (Figura 3.36) observa-se que a pluma formada ao meio dia é maior do que a pluma do dia anterior, alongada paralelamente à linha de costa e dissipando-se para nordeste, com picos máximos sobre as zonas norte e leste de Lima, onde se encontram localizadas as principais rodovias de fluxo veicular pesado, Panamericana norte e lima-leste (Carretera Central), respectivamente.

No dia 09 (Figura 3.36) observa-se que no meio dia o ozônio apresenta valores mais altos e encontra-se na parte central da RML. Nas horas da noite ainda consegue-se ver ozônio nos limites norte e leste de Lima.

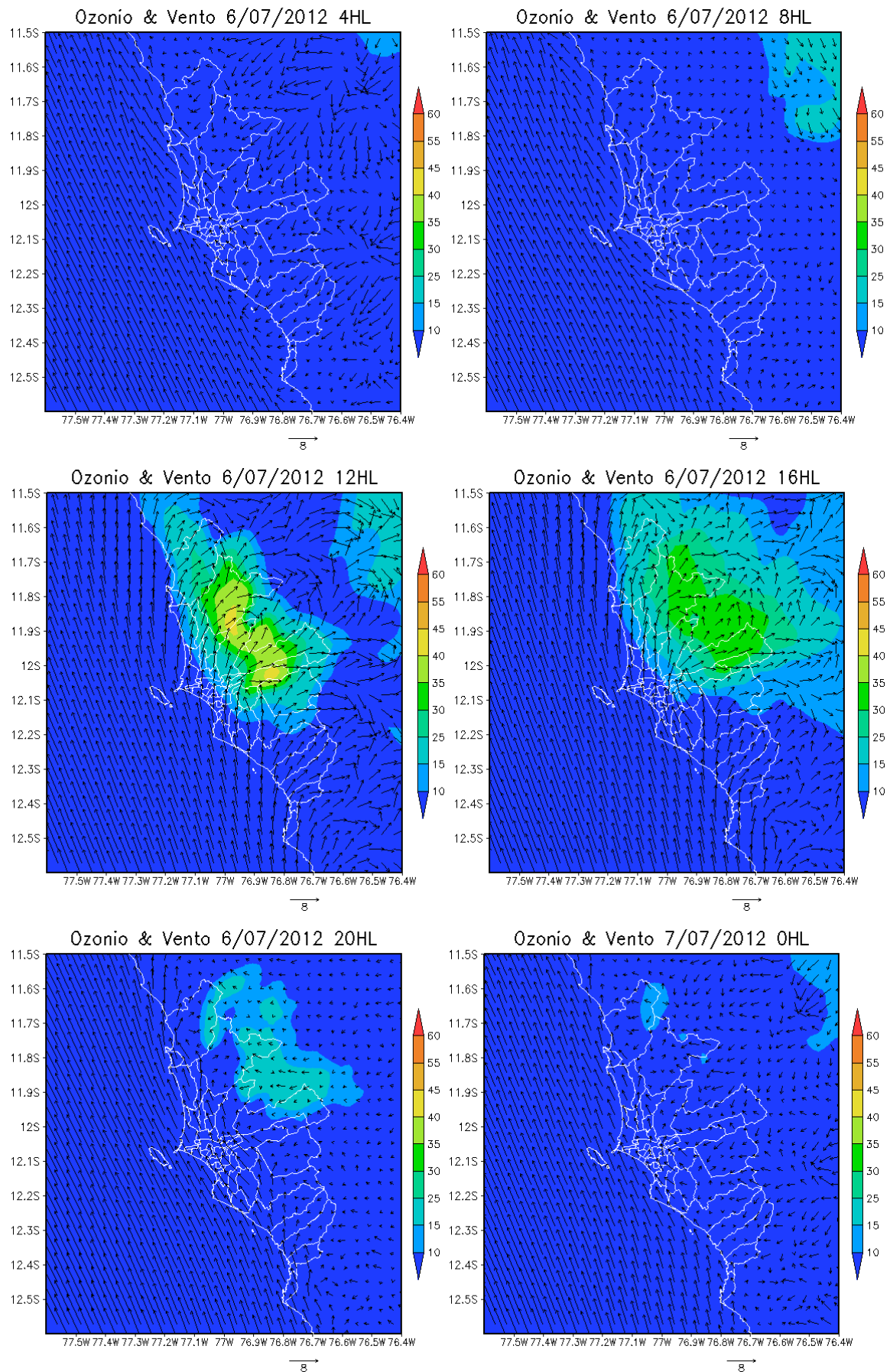


Figura 3.36: Evolução temporal da concentração de O_3 (ppb) e do campo do vento ($m.s^{-1}$) ao primeiro nível do modelo.

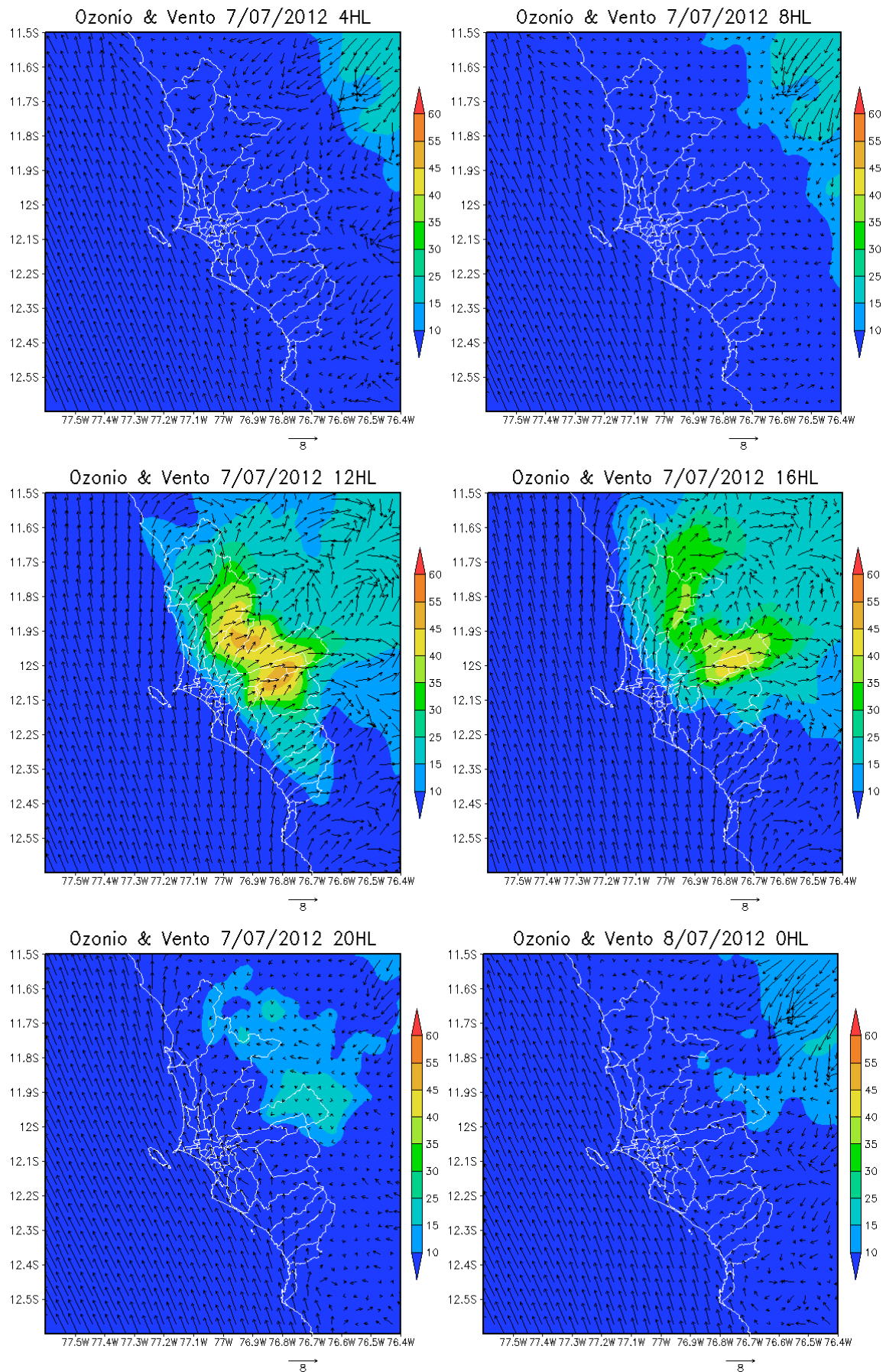


Figura 3.36: Continuação

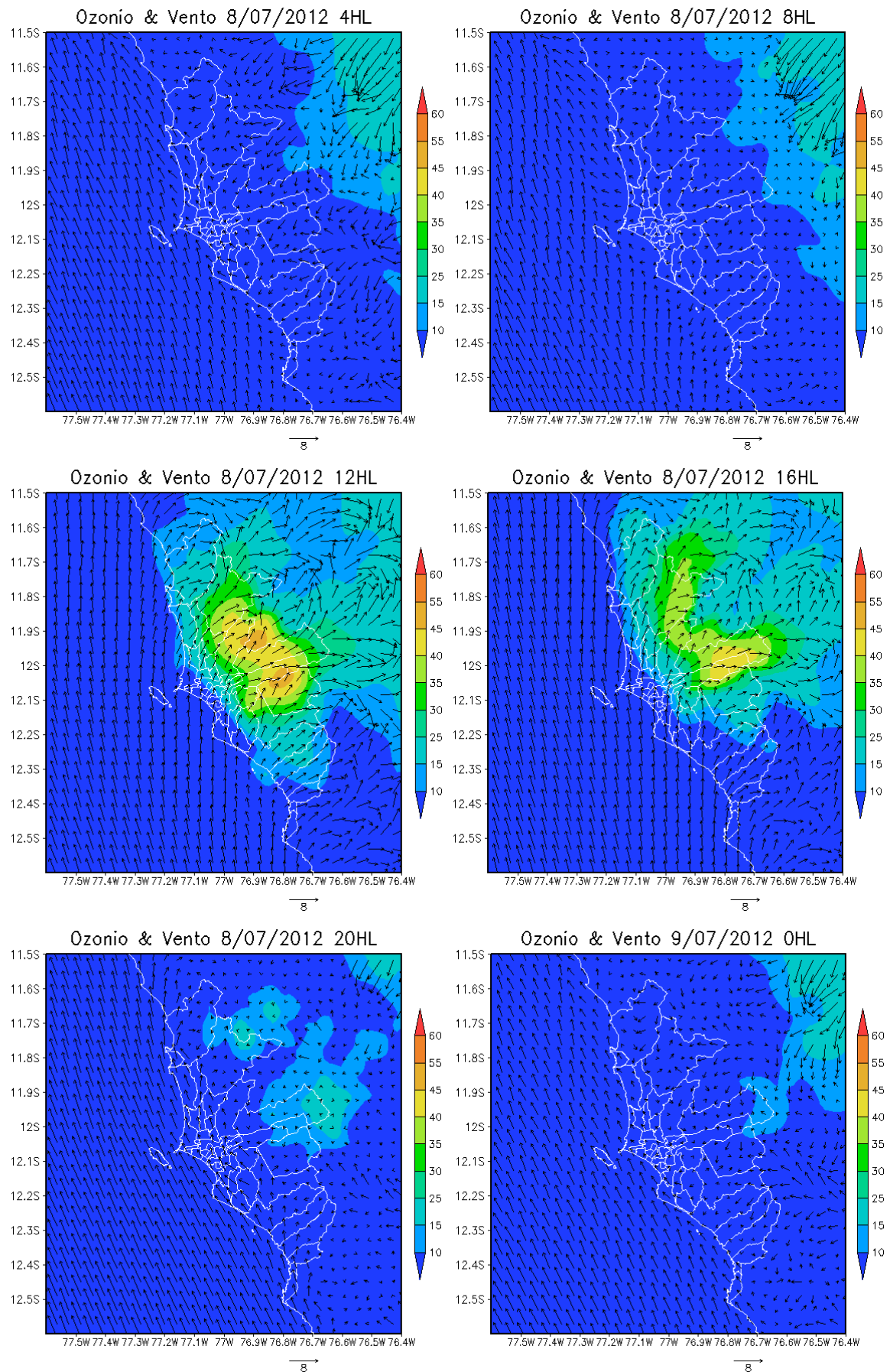


Figura 3.36: Continuação

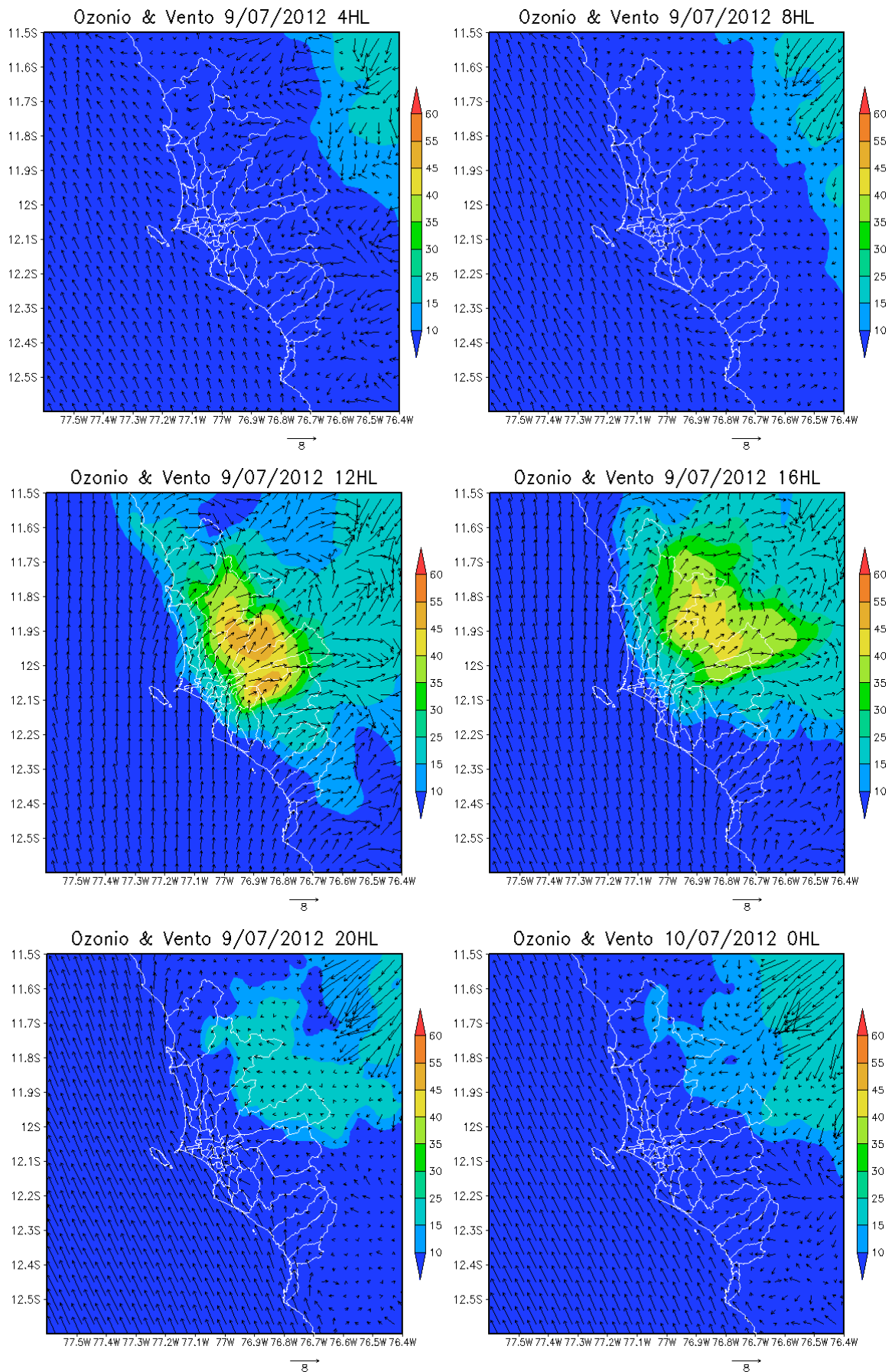


Figura 3.36: Continuação

- O transporte de poluentes na vertical

Na Figura 3.37 mostra-se a velocidade vertical (w) para a longitude de $76,95^\circ$ W e latitude de $11,95^\circ$ S para o caso de julho de 2012. Nesta figura observa-se que o movimento ascendente se inicia próximo das 15 Z (10 HL). A velocidade máxima dentro da célula é de aproximadamente $0,2 \text{ m.s}^{-1}$. A extensão na vertical para quase todos os dias é de 300 m, com a exceção do dia 10 onde a altura é próxima dos 600 m.

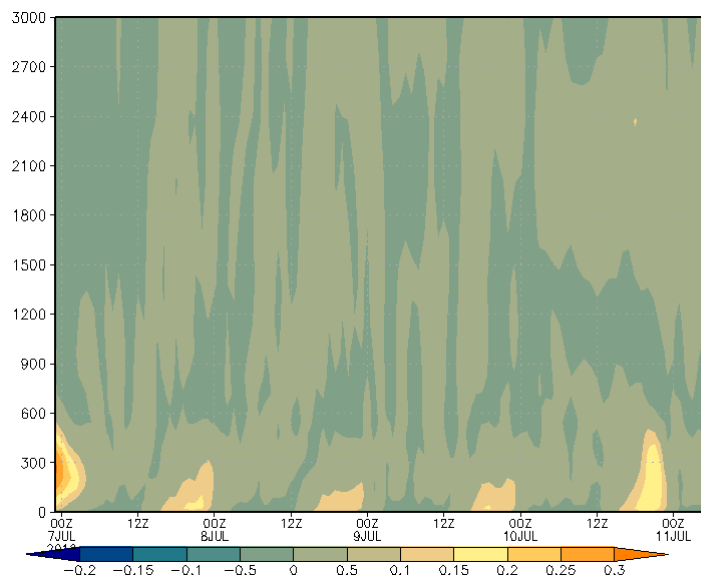


Figura 3.37: Perfil vertical de w (m.s^{-1}) para a longitude de $76,95^\circ$ W e latitude de $11,95^\circ$ S para o caso de julho. A barra de cores indica a intensidade em m.s^{-1}).

Na Figura 3.38 apresenta-se a altura da CLP e a concentração de ozônio na vertical para o mesmo ponto da figura anterior. Nesta figura observa-se que a altura máxima da CLP é de aproximadamente 600 m e é atingida por volta do meio dia durante todos os dias de simulação. Por outro lado, nesta figura observa-se que as maiores concentrações de ozônio alcançam, e até ultrapassam, a altura da camada limite, atingindo a atmosfera livre. No entanto, a magnitude na concentração ozônio na vertical é inferior quando comparada ao caso de verão e observa-se também que a maior concentração encontra-se dentro da CLP.

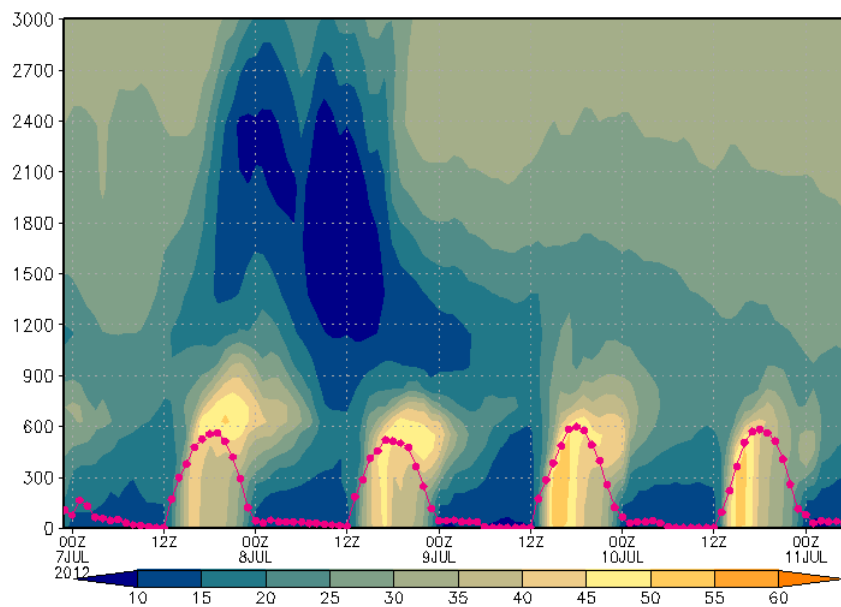


Figura 3.38: Perfil vertical da concentração de ozônio e a altura da camada limite planetária para a longitude de 76.95 W e latitude de 11.95 S para o caso de julho. A barra de cores indica a concentração (em ppb) e a linha vermelha pontilhada representa a altura da CLP (em metros).

Capítulo 4

Conclusões e perspectivas

O principal objetivo deste trabalho foi investigar o transporte dos poluentes, NO_x e ozônio, associadas aos padrões de circulação na Região Metropolitana de Lima. Para isso, dois estudos de casos foram considerados. O primeiro estudo corresponde ao período de 22 a 28 de janeiro de 2012 (verão no hemisfério sul). Já o segundo estudo corresponde ao período de 05 a 11 de julho de 2012 (inverno no hemisfério sul). Com este objetivo foram analisadas as simulações da dispersão dos poluentes através da modelagem numérica da atmosfera utilizando o *Weather Research Forecasting with Chemistry* (WRF/Chem), bem como, a utilização de dados observacionais coletados pela rede operacional do *Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología do Perú* (SENAMHI) nas estações de monitoramento de qualidade do ar de Ate, Campo de Marte, Santa Anita, San Borja e Villa Maria del Triunfo com o objeto de avaliar a acurácia do modelo. Desta forma, os principais tipos de circulações locais abordados neste trabalho foram: i) brisas marítimas/terrestre e ii) circulações de Vale-Montanha.

No processo da validação da parte meteorológica do modelo WRF/Chem verificou-se que o modelo apresenta boa concordância nos ciclos de temperatura e umidade relativa para os dois estudos de caso, janeiro e julho, aqui considerados. As análises estatísticas realizadas para a validação mostraram que para a maioria das estações meteorológicas as simulações apresentam um alto grau de correlação com os dados medidos, apresentando correlações maiores que 0,7 e 0,8 para a umidade e temperatura, respectivamente. Para analisar as características, direção e velocidade dos

ventos na RML foi feita a rosa dos ventos observada e simulada, onde verificou-se que o modelo conseguiu se aproximar satisfatoriamente bem dos dados observados, tanto na direção quanto na intensidade.

Na validação da parte química do modelo WRF/Chem, para o caso de janeiro observou-se que o NO_x simulado apresenta boa concordância com o comportamento diurno observado. No entanto, observa-se que os picos de maior concentração, 07-08 HL e 19-20 HL, em geral são subestimadas pelo modelo. Para o ozônio, o modelo simula razoavelmente bem as observações em termos de ciclo diurno, mas adianta o pico máximo em aproximadamente duas horas.

No caso de julho, o NO_x simulado pelo modelo representa os horários dos picos máximos relativamente bem, no entanto, superestima esses picos em alguns dos dias analisados. Observou-se também que após o primeiro pico, 07-08 HL, e antes do segundo, 19-20 HL, o modelo subestima as concentrações consideravelmente, quando comparado com os dados observados. Para o ozônio o modelo não conseguiu representar o ciclo diurno, já que neste período as observações mostraram que ozônio apresenta dois picos máximos, o primeiro durante as horas da madrugada e o segundo perto do meio dia. No entanto, o modelo só consegue representar o segundo pico, além de adiantá-lo em aproximadamente duas horas. Isto indica que o modelo não simula satisfatoriamente bem o ciclo no inverno, mostrando-se similar ao ciclo simulado para o verão.

Através da análise da circulação de grande escala para os dois estudos de caso, janeiro e julho, verificou-se a importância desta circulação com relação ao posicionamento de centros de alta pressão no Oceano Pacífico em latitudes médias. Para o caso de janeiro o posicionamento da zona de alta pressão, localizada à sudeste (45° S e 93° W), impôs um regime de ventos de sudeste sobre o litoral peruano. Essa pode ser uma das razões pela qual a brisa marítima tem uma propagação fraca sobre o continente. No caso de julho o posicionamento da alta pressão fica mais ao norte (36° S e 102° W) intensificando ainda mais os ventos de sudeste na região oceânica próxima ao litoral de Lima. Por outro lado, tem-se a diferença no gradiente de temperatura para ambos os estudos de caso. No caso de janeiro (verão austral) observa-se maior incidência da radiação solar, o que faz com que o gradiente de

temperatura entre o oceano e a terra seja maior do que no caso de julho, onde a radiação incidente é menor e observa-se alta nebulosidade, o que faz com que a superfície da terra não esquite tanto como no verão. Portanto, o gradiente de temperatura entre o oceano e a terra é menor. Desta forma, pode-se dizer que o padrão de ventos de brisa marítima no verão é mais intenso e avança mais rápido continente adentro do que no inverno. Por outro lado, o posicionamento da zona de alta pressão, no verão e no inverno, contribuiu para que a brisa terrestre fosse mais intensa e atingisse uma distância maior sobre o oceano no caso de julho do que no caso de janeiro. Isso também pode ser explicado pelo gradiente de temperatura maior durante a noite, devido ao resfriamento da superfície terrestre ser mais rápido do que o resfriamento da superfície oceânica.

Com relação ao padrão de dispersão dos poluentes aqui considerados, os principais resultados obtidos neste trabalho foram:

- De maneira geral o caso de janeiro apresentou valores mais altos de concentração de NO_x em comparação a julho. No entanto, as estações Ate e Santa Anita, situadas dentro da zona leste de Lima, apresentam concentrações de NO_x e ozônio mais altas em ambos os casos. Por outro lado, nas simulações observa-se que as zonas norte e leste de Lima apresentaram concentrações apenas de NO_x mais altas nos dois estudos de caso, coincidindo com os dados observados na zona leste. Com isso pode-se dizer que apesar de haver grandes incertezas na distribuição espacial das emissões usadas como dado de entrada no modelo, observou-se que as simulações conseguiram representar relativamente bem a distribuição das plumas.
- No estudo de caso de janeiro de 2012 (verão), mostrou-se que o padrão de ventos de brisa marítima é mais intenso do que para o estudo de caso de julho de 2012 (inverno) o que poderia estar influenciando o transporte e a dissipação dos poluentes durante o dia no verão. No entanto, a brisa terrestre apresenta-se menos intensa, contribuindo para que o poluente que foi transportado para nordeste da RML pela brisa marítima não consiga retornar até a RML, concentrando-se próximo as montanhas. Isto foi observado nas séries

temporais das medidas nas estações de monitoramento, onde não se observa picos noturnos. Com isso pode-se dizer que possivelmente não se tem ozônio vindo de outros lugares e este seja formado na própria RML. Por outro lado, o modelo mostrou que a concentração de ozônio na vertical ultrapassa a altura da CLP atingindo a atmosfera livre.

- No estudo de caso de julho de 2012 (inverno), mostrou-se que o padrão de ventos de brisa marítima é menos intenso do que para o estudo de caso de janeiro de 2012 (verão) como mencionado anteriormente. Por este motivo o transporte de poluentes no inverno é mais lento do que no verão. No entanto, durante a noite a brisa terrestre apresenta maior intensidade em comparação ao período de janeiro e a propagação dos poluentes, que durante o dia atingiram locais próximos às montanhas, agora tem a possibilidade de chegar até a RML, o que pode ser uma razão para a presença de picos nas horas de madrugada observados no ciclo de ozônio. O modelo também mostrou que a concentração de ozônio na vertical é menor que durante o verão, ficando grande parte dentro da CLP e somente uma pequena porção consegue ultrapassar e atingir a atmosfera livre.

É necessário ressaltar que erros na estimativa da velocidade e direção de vento apresentaram diferenças nas localizações das plumas urbanas observadas na simulação. Outro fator muito importante é a grande incerteza que se tem na distribuição das emissões de poluentes, uma vez que esta distribuição foi obtida através de imagens de satélite que identificam luzes no período noturno.

Outro resultado relevante aqui apresentado foi a observação do transporte horizontal de plumas poluídas por ozônio mostrando que a RML possui um grande potencial para contaminação de áreas afastadas, como por exemplo, a contaminação da província de Canta. Isto ressalta a necessidade dos modelos de qualidade do ar reproduzirem níveis de ozônio observados, de modo a serem utilizados como indicadores para o desenvolvimento de estratégias de controle de emissões.

4.1 Sugestões para trabalhos futuros

Todas as análises realizadas nesse trabalho foram feitas para dois períodos de tempo pequeno. Sendo assim, a realização de um maior número de simulações para períodos maiores e diferentes é recomendada.

Este trabalho teve foco na análise das circulações e concentrações de poluentes nas porções mais baixas da atmosfera. A análise em níveis mais altos da atmosfera, que permitam identificar a corrente de retorno das circulações de brisa e vale-montanha é importante para o processo de dispersão, devendo ser investigado.

Para os órgãos ambientais, é importante a instalação de um maior número de estações na RML, principalmente nas porções Lima-norte e Lima-leste e, se possível, sobre a província de Canta, região susceptível à altas concentrações de ozônio, conforme mostrado neste trabalho.

Apêndice

Tabela 1: Tipos de veículos utilizados nas emissões.

Categoria	Subcategorias	Símbolos
Veículos Leves (Light vehicles) (0-3500 kg)	Veículos de passageiros a gasolina sem conversor catalítico (Old and high emitters; Improved)	VEH LIV SC + E VEH LIV SC - E
	Veículos de passageiros a gasolina com conversor catalítico	VEH LIV CC
	Taxi a gasolina sem conversor catalítico (Old and high emitters; improved)	TAX SC + E TAX SC - E
	Taxi a gasolina com conversor catalítico	TAX CC
	Taxi a GLP sem conversor catalítico	TAX SC GLP
	Taxi a diesel	TAX DIESEL
	Caminhão leve a gasolina (Light Duty Truck, gasoline)	CAM LIV GASOL
	Caminhão leve a diesel (Light Duty Truck, diesel)	CAM LIV DIESEL
Micro-ônibus	Micro-ônibus a diesel	MICROBUS
Outros Ônibus (Other buses)	Ônibus sem controle de exaustão (without exhaust control) (anteriores 1990)	BUS S/CONTROL
	Ônibus com controle de exaustão (with exhaust control)	BUS C/CONTROL
	Mini-ônibus, a diesel	MINIBUS
Caminhões (Trucks) (>3500 kg)	Caminhões pequenos	CAM>7.5T
	Caminhões pesados (Heavy Duty Trucks) a diesel <16T	CAM<16T
	Caminhões pesados (Heavy Duty Trucks) a diesel >16T	CAM>16T
Motocicletas	Motocicletas, 2 tempos (2-stroke)	MOTO 2T
	Motocicletas, 4 tempos (4-stroke)	MOTO 4T

Referências Bibliográficas

- Abreu, M. e Bannon, P. Dynamics of the south american coastal desert. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 50:2952–2964, 1993.
- Atkinson, R. Atmospheric chemistry of vocs and nox. *Atmospheric Environment*, 34(12-14):2063–2101, 2000. doi: 10.1016/S1352-2310(99)00460-4.
- Cenedese, A. e Monti, P. Interaction between an inland urban heat island and a sea-breeze flow: A laboratory study. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 42, 2003. doi: 10.1175/1520-0450(2003)042<1569:IBAIUH>2.0.CO;2.
- Chen, F. e Dudhia, J. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the penn state-ncar mm5 modeling sistem. part i: Model implementation and sensitivity. *Monthly Weather Review*, 129:569–585, April 2001.
- Chen, S. H. e Sun, W. Y. A one-dimensional time dependent cloud model. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 80(1):99–118, 2002.
- Chou, M. D.; Suarez, M. J.; Ho, C. H.; Yan, M. M. H., e Lee, K. T. Parametrizations for cloud overlapping and shortwave single-scattering properties for use in general circulation and cloud ensemble models. *Journal of Climate*, 11:202–214, 1998.
- Elbir, T. Comparison of model predictions with the data of an urban air quality monitoring network in izmir, turkey. *Atmospheric Environment*, 37(15):2149–2157, May 2003. doi: 10.1016/S1352-2310(03)00087-6.
- Enfield, D. B. Thermally Driven Wind Variability in the Planetary Boundary Layer Above Lima, Perú. *Journal of Geophysical Research*, 86:2005–2016, 1981.

- Estoque, M. A. The sea breeze as a function of prevailing synoptic situation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 19:244 – 250, 1962.
- Fast, J. D.; Gustafson, W. I. Jr.; Easter, R. C.; Zaveri, R. A.; Barnard, J. C.; Champman, E. G.; Grell, G. A., e Peckham, S. E. Evolution of ozone, particulates, and aerosol direct radiative forcing in the vicinity of houston using a fully coupled meteorology-chemistry-aerosol model. *Journal of Geophysical Research*, 111(D21305), 2006.
- Freitas, E. D. *Circulações locais em São Paulo e sua influência sobre a dispersão de poluentes*. PhD thesis, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Uniersidade de São Paulo, 2003.
- Freitas, E. D.; Rozoff, C. M.; Cotton, W. R., e Dias, P. L. Silva. Interactions of an urban heat island and sea-breeze circulations during winter over the metropolitan area of sao paulo, brazil. *Boundary Layer Meteorology*, 122(1):43–65, 2007. doi: 10.1007/s10546-006-9091-3.
- Garreaud, R. D. e Aceituno, P. *The Physical Geography of South America*, chapter 3. Oxford University Press, 2007.
- Garreaud, R. D.; Rutllant, J. A., e Fuenzalida, H. Coastal lows along the subtropical west coast of south: Mean structure and evolution. *Monthly Weather Review*, pages 75–88, 2002.
- Grell, G. A. e Baklanov, A. Integrated modeling for forecasting weather and air quality: A call for fully coupled approaches. *Atmospheric Environment*, 45(38): 6845 – 6851, 2011. ISSN 1352-2310.
- Grell, G. A. e Devenyi, D. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophysical Research Letters*, 29(14), 2002.
- Grell, G. A.; Peckham, S. E.; Schmitz, R.; McKeen, S. A.; Frost, G.; Skamarock, W. C., e Eder, B. Fully coupled online chemistry within the wrf model. *Atmospheric Environment*, 39(37):6957 – 6975, 2005. ISSN 1352-2310.

- Hong, S. Y.; Noh, Y., e Dudhia, J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review*, 134:2318–2341, 2006.
- IMARPE, . *Boletín Semanal de la temperatura superficial del agua de mar en el litoral peruano*, 2012.
- Jiang, G. e Fast, J. D. Modeling the effects of voc and nox emission sources on ozone formation in houston during the texaqs 2000 field campaign. *Atmospheric Environment*, 38:5071–5085, 2004.
- Lents, J.; Davis, N.; Nikkila, N., e Osses, M. Lima vehicle activity study. Technical report, International Sustainable Systems Research and Global Sustainable Systems Research and University of Chile, 2004.
- Martins, J. A.; Martins, L. D.; Freitas, E. D.; Mazzoli, C. R.; Hallak, R., e Andrade, M. F. Aplicação de imagens de satélite no desenvolvimento de inventários de emissão de alta resolução. In *XV Congresso Brasileiro de Meteorologia*, 2008.
- Mlawer, E. J.; Taubman, S. J.; Brown, P. D.; Iacono, M. J., e Clough, S. A. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: Rrtm, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research*, 102(D14):16663–16682, 1997.
- Morris, C. J. G.; Simmonds, I., e Plummer, N. Quantification of the influences of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city. *Journal of Applied Meteorology*, 40:169 – 182, 2001. doi: 10.1175/1520-0450(2001)040<0169:QOTIOW>2.0.CO;2.
- Pielke, R. A. *Mesoescala meteorological modeling*, volume 78. Academic Press - International Geophysics Series, San Diego - California, 2002.
- PROTRANSPORTE, . Informe final. estudio de línea base ambiental cosac i. Technical report, Municipalidad de Lima Metropolitana, 2005.
- Seinfeld, J. H. e Pandis, S. N. *Atmospheric Chemistry and Physics: from air pollution to climate change*. Second Edition. Jonh Wiley, New Jersey, 2006.

- Sillman, S. Chapter 12 the relation between ozone, nox and hydrocarbons in urban and polluted rural environments. In Jill Austin, Peter Brimblecombe e Sturges, William, editors, *Air Pollution Science for the 21st Century*, volume 1 of *Developments in Environmental Science*, pages 339 – 385. Elsevier, 2002.
- Sillman, S. 9.11 - tropospheric ozone and photochemical smog. In in Chief: Heinrich D. Holland, Editors e Turekian, Karl K., editors, *Treatise on Geochemistry*, pages 407 – 431. Pergamon, Oxford, 2003.
- Skamarock, W. C.; Klemp, J. B.; Dudhia, J.; Gill, D. O.; Barker, D. M.; Duda, M. G.; Huang, X. Y.; Wang, W., e Power, J. G. A description of the advanced research wrf version 3. *NCAR Tech. Note NCAR/TN/475/STR*, Natl. Cent. for Atmos. Res., Boulder, Colo., June 2008.
- Stockwell, W. R.; Middleton, P., e Chang, J. S. The second generation regional acid deposition model chemical mechanism for regional air quality modeling. *Journal of Geophysical Research*, 95(D10):343–367, Setember 1990.
- Stull, R. B. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 1988.
- Wallace, J. M. e Hobbs, P. V. *Atmospheric Sciences. An Introductory survey*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 2006.
- Wilks, D. S. *Statistic Methods in the Atmospheric Sciences*, volume 59. Academic Press-International Geophysics Series, San Diego - California, 1995.
- Yutaka, T. e Taniyama, T. Atmospheric no2 and co concentration in lima, peru. *Environment International*, 28:227–233, 2002.