

Henrique do Nascimento Camelo

***Estudo Numérico do Vento Aracati para
Caracterização de seu Potencial Eólico***

Fortaleza – CE, Brasil

Maio de 2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Henrique do Nascimento Camelo

***Estudo Numérico do Vento Aracati para
Caracterização de seu Potencial Eólico***

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Ciências Físicas Aplicadas da Universidade Estadual do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências Físicas Aplicadas.

Orientador:

João Bosco Verçosa Leal Junior

MESTRADO EM CIÊNCIAS FÍSICAS APLICADAS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CEARÁ

Fortaleza – CE, Brasil

Maio de 2007

Dissertação de Mestrado sob o título “*Estudo Numérico do Vento Aracati para Caracterização de seu Potencial Eólico*”, defendida por Henrique do Nascimento Camelo e aprovada em 25 de maio de 2007, em Fortaleza, Ceará, pela banca examinadora constituída pelos doutores:

Prof. Dr. João Bosco Verçosa Leal Junior
Universidade Estadual do Ceará (UECE)
Orientador

Prof. Dr. Gerson Paiva Almeida
Universidade Estadual do Ceará (UECE)

Dr. Armando Leite Mendes de Abreu
Brasil Energias Solar e Eólica LTDA (BRASELCO)

Aos meus pais.

In memoriam

Agradecimentos

O capítulo mais importante dessa dissertação é, sem dúvida, o de agradecimentos, pois sem a ajuda dessas pessoas e instituições, nem um trabalho teria sido possível. Portanto mais do que cumprir uma formalidade, gostaria de realmente agradecer:

Ao Prof. Dr. João Bosco Verçosa Leal Júnior, que me possibilitou essa dissertação, e mais do que isso, me incentivou na execução da mesma.

À Universidade Estadual do Ceará (UECE).

Ao Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas (MCFA), da UECE, em especial a todos os funcionários e professores.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro através de bolsa de mestrado.

À Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), à todos os funcionários e pesquisadores que fazem parte dessa instituição.

Ao Prof. Dr. Francisco Sales Ávila Cavalcante, coordenador do MCFA.

Aos Profs. Drs. Carlos Jacinto de Oliveira e Gerson Paiva Almeida, ambos do MCFA, pelas valiosas contribuições no exame de qualificação dessa dissertação.

Ao Prof. Dr. Alexandre Araújo Costa, pesquisador da FUNCEME e professor do MCFA, com o qual pude adquirir muitas dicas sobre modelagens atmosféricas.

Aos Profs. Drs. Paulo Carvalho, Fernando Ramalho, Jaidete Monteiro de Souza e Lutero Carmo de Lima, todos do MCFA, com os quais tive a honra de ter adquirido muitos conhecimentos.

À todos os amigos do mestrado, principalmente ao Paulo Henrique, Majela, Otacílio, Juliana, Érick, Elissandro, Djalma e Luís.

Ao colega Vinícius, do Curso de Graduação em Física da UECE, pelo convívio e ajuda.

À minha Karine, por toda a sua fidelidade, amor, companheirismo e acima de tudo, colaboração.

“Os sábios são os que mais buscam a sabedoria.
Os tolos pensam já tê-la encontrado.”

Napoleão Bonaparte

Resumo

Nesse trabalho fizemos um estudo numérico da Circulação Local no estado do Ceará, no Nordeste Brasileiro, com o objetivo de identificarmos as ocorrências do vento Aracati. Um vento que, segundo os moradores de regiões ribeirinhas do Ceará, diariamente no fim das tardes e começo das noites quentes principalmente da época seca do ano, sopra com características de brisa e que leva uma sensação de conforto térmico aos moradores de tais regiões. Esse vento é denominado pelos próprios moradores de vento Aracati. Ele se originaria do mar, adentraria pelo sertão através do vale do Rio Jaguaribe, o principal rio perene do estado, cuja extensão é de aproximadamente 610 Km, desde as nascentes a sudoeste até o litoral a nordeste. Ele teria, portanto, características semelhantes as de uma brisa marítima, só que com uma grande penetração continente adentro. Fizemos uma análise estatística utilizando os dados de velocidade do vento a um nível de 10 m de altura, coletadas nas Plataformas de Coleta de Dados (PCD) da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) instaladas em todo o estado do Ceará. O objetivo dessa análise foi o de identificarmos os períodos e as regiões de maior ocorrência do vento Aracati. De posse desses resultados, foi possível delimitarmos as fronteiras da simulação numérica regional realizada com o modelo *Regional Atmospheric Modeling System* (RAMS), o qual foi inicializado com os dados do projeto de reanálise fornecidos pelo *National Center For Environmental Prediction* (NCEP). Para que pudéssemos avaliar a confiabilidade do modelo RAMS para os casos simulados, fizemos uma comparação dos dados observado das PCDs com os dados fornecidos pela simulação numérica. Esse trabalho tem ainda como objetivo incentivar cada vez mais a procura de regiões ao longo do estado do Ceará, cujo potencial eólico poderia ser aproveitado para geração de energia elétrica.

Abstract

In this work we performed a numerical study of the Local Circulation in the Ceará State, located at the north-east of Brazil, with the purpose of identifying the regions and periods of occurrence of the Aracati Wind. This wind blows daily in the end of the afternoons and start of the hot nights of the dry time of the year, with breeze characteristics, carrying thermal comfort to the inhabitants of riverside regions. Its origin would be the sea, then it would enter hinterland through the valley of Rio Jaguaribe, the main perennial river of the state, whose extension is of approximately 610 Km. It would have, therefore, similar characteristics of a maritime breeze, but with a great inland penetration. First, we made a statistical analysis using wind speed data recorded at a height of 10 m, collected on the Data Collection Platforms from the Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) installed throughout the Ceará State, with the purpose of identifying the periods and regions of Aracati Wind occurrences. This analysis allowed us delimitating the regions that later served as boundary conditions for the numerical model simulation with the Regional Atmospheric Modeling System (RAMS), which was initialized with reanalysis data supplied by the National Center For Environmental Prediction (NCEP). The study of the Aracati Wind has also an objective of stimulating the search of regions throughout the state of the Ceará where its aeolian potential could be used for electric energy generation.

Sumário

Lista de Figuras	p. xi
Lista de Tabelas	p. xvi
Lista de Símbolos	p. xvii
Lista de Abreviaturas	p. xviii
1 Introdução	p. 1
2 O vento Aracati	p. 8
2.1 Introdução	p. 8
2.2 O que é o Vento Aracati ?	p. 8
3 Verificação da Intensidade dos Ventos Sobre o Estado do Ceará	p. 12
3.1 Introdução	p. 12
3.2 Considerações iniciais	p. 12
3.3 Dados de Medição de Velocidade do Vento	p. 14
3.4 Resultados	p. 16
4 Análise Estatística do Vento Aracati	p. 21
4.1 Introdução	p. 21
4.2 Descrição dos Dados Observados	p. 21
4.3 Resultados	p. 23
5 Validação do Modelo	p. 34

5.1	Introdução	p. 34
5.2	Materiais e Métodos	p. 34
5.3	Resultados	p. 37
5.3.1	Comparação dos Dados Simulados com Observados	p. 37
5.3.2	Correção Estatística dos Dados Simulados comparados com os Observados	p. 37
5.3.3	Correlação Estatística das Séries Simuladas e Observadas	p. 37
5.3.4	Avaliação Numérica de Erros para as Séries Simuladas e Observadas	p. 43
6	Formalismo de Modelagem Atmosférica de Mesoescala	p. 45
6.1	Introdução	p. 45
6.2	Equações Básicas	p. 45
6.2.1	Conservação do <i>Momentum</i>	p. 46
6.2.2	Conservação da Massa	p. 46
6.2.3	Conservação da Energia	p. 46
6.2.4	Conservação da Água e Outras Substâncias	p. 47
6.2.5	Lei do Gás Ideal	p. 47
6.3	Modelos Atmosféricos	p. 47
6.4	Discretização no Espaço e no Tempo	p. 48
6.5	Sistemas de Coordenadas	p. 49
6.6	Médias de <i>Reynolds</i>	p. 50
6.7	Parametrizações Físicas	p. 50
6.7.1	Parametrização de Radiação	p. 50
6.7.2	Parametrização de Turbulência	p. 51
6.7.3	Parametrização de Convecção	p. 51
7	Estudo Numérico do Vento Aracati	p. 53
7.1	Introdução	p. 53

7.2	Condições Iniciais e Parametrizações Utilizadas	p. 53
7.3	Resultados	p. 55
8	Conclusões e Perspectivas	p. 67
	Referências Bibliográficas	p. 69
	Apêndice A – Métodos Estatísticos	p. 73
A.1	Introdução	p. 73
A.2	Equações Utilizadas para Avaliação Estatística de Erros	p. 73
A.3	Correção Estatística Utilizada no Modelo Atmosférico	p. 75
A.4	Coefficiente de Correlação Estatística	p. 75

Lista de Figuras

- 1.1 Mapa do estado do Ceará mostrando os seus principais municípios, rios (como é o caso dos Rios Jaguaribe e Acaraú), acidentes geográficos (serras e chapadas) e também divisões territoriais com outros estados do Nordeste do Brasil. (Fonte: <http://www.guianet.com.br/>, consultada em 12/02/2007). p. 2
- 1.2 Circulação de brisa marítima. p. 3
- 1.3 Circulação de brisa terrestre. p. 3
- 2.1 Mapa do estado do Ceará, destacando as localidades dentro do retângulo em vermelho que possuem ocorrências do vento Aracati. p. 9
- 2.2 Médias horárias da velocidade do vento a um nível de 10 m de altura na cidade de Icó - CE, para o dia 14 de novembro de 2005. Os dados foram coletados por um anemômetro a 10 m de altura pertencente a uma PCD da FUNCEME. p. 10
- 2.3 Médias horárias da velocidade do vento a um nível de 10 m de altura na PCD instalada na cidade de Solonópole - CE, para o dia 14 de novembro de 2005. p. 11
- 3.1 Mapa do estado do Ceará com as PCDs da FUNCEME que serviram de estudo para avaliação da intensidade de velocidade do vento a 10 m de altura. As PCDs do Grupo (I) estão representadas em bolinha vermelha, as do Grupo (II) em azul, as do Grupo (III) em verde, as do Grupo (IV) em cinza, as do Grupo (V) em laranja e as do Grupo (VI) em preta. p. 15
- 3.2 Médias horárias da velocidade de vento a um nível de 10 m de altura para o ano de 2005, representado as PCDs do Grupo (I). (Linha preta para a PCD de Icapuí, vermelha para a de Jaguaruana, azul para a de Aruarú e verde para a de Ibaretama.) p. 16

3.3	Médias horárias da velocidade de vento a um nível de 10 m de altura para o ano de 2005, representado as PCDs do Grupo (II). (Linha verde para a PCD de Acopiara, azul para a de Icó, vermelha para a de Quixeramobim e preta para a de Quixadá.)	p. 17
3.4	Médias horárias da velocidade de vento a um nível de 10 m de altura para o ano de 2005, representado as PCDs do Grupo (III). (Linha verde para a PCD de Santana do Cariri, azul para a de Lavras da Mangabeira, preta para a de Assaré e vermelha para a de Jati.)	p. 18
3.5	Médias horárias da velocidade de vento a um nível de 10 m de altura para o ano de 2005, representado as PCDs do Grupo (IV). (Linha verde para a PCD de Sobral, preta para a de Acaraú, vermelha para a de Granja e azul para a de Barroquinha.)	p. 19
3.6	Médias horárias da velocidade de vento a um nível de 10 m de altura para o ano de 2005, representado as PCDs do Grupo (V). (Linha azul para a PCD de Fortaleza, vermelha para a de São Gonçalo do Amarante, preta para a de Maranguape e verde para a de Pacajús.)	p. 19
3.7	Médias horárias da velocidade de vento a um nível de 10 m de altura para o ano de 2005, representado as PCDs do Grupo (VI). (Linha preta para a PCD de Ubajara, verde para a de São Benedito, vermelha para a de Groaíras e azul para a de Santa Quitéria.)	p. 20
4.1	Mapa do Ceará, com as PCDs da FUNCEME, listadas nas Tabs. 4.1 e 4.2, as quais foram utilizadas para a descrição estatística de velocidade do vento a 10 m de altura.	p. 22
4.2	Mapas de frequência normalizada mensal da ocorrência do vento Aracati em todo o estado do Ceará, que indicam os percentuais de máxima intensidade da velocidade de vento entre 18h e meia-noite, superiores em relação as médias durante o dia, para os seguintes meses: a) janeiro; b) fevereiro; c) março; e d) abril.	p. 26
4.3	Mapas de frequência normalizada mensal da ocorrência do Aracati em todo o Ceará, que indicam os percentuais de máxima intensidade da velocidade de vento entre 18h e meia-noite, superiores em relação as médias durante o dia, para os seguintes meses: a) maio; b) junho; c) julho; e d) agosto.	p. 28

4.4	Mapas de frequência normalizada mensal da ocorrência do vento Aracati em todo o estado do Ceará, que indicam os percentuais de máxima intensidade da velocidade de vento entre 18h e meia-noite, superiores em relação as médias durante o dia, para os seguintes meses: a) setembro; b) outubro; c) novembro; e d) dezembro.	p. 30
4.5	Mapa de frequência normalizada anual da ocorrência do vento Aracati em todo o estado do Ceará.	p. 31
4.6	Ocorrências mensais do vento Aracati para as seguintes PCDs: a) Icó, b) Jaguaribe, c) Castanhão e d) Icapuí.	p. 33
5.1	Mapa do Ceará, com as Plataformas de coleta de dados ao longo do estado, com destaque para as de Icapuí, Jaguaruana, Quixeré, Russas, Icó, e Iguatu em forma de bolinha na cor preta. Já as bolinhas na cor vermelha representam outras PCDs do estado e a linha em azul representa o Rio Jaguaribe e seus afluentes.	p. 35
5.2	Comparação da velocidade de vento a 10 m de altura (em m/s), dos dias 01 a 27 de novembro de 2005, a partir dos dados observados (linha magenta) com a simulação no RAMS (linha preta), para os municípios de, a) Icapuí, b) Jaguaruana e c) Quixeré, todas para a grade 2.	p. 38
5.3	Comparação da velocidade de vento a 10 m de altura, dos dias 01 a 27 de novembro de 2005, a partir dos dados observados (linha magenta) com a simulação no RAMS (linha preta), para as PCDs instaladas nos municípios de, a) Russas, b) Icó e c) Iguatu, todas para a grade 2.	p. 39
5.4	Correção estatística da velocidade de vento a 10 m de altura, a partir dos dados da simulação (linha preta), dos dias 01 a 27 de novembro de 2005, comparada com os dados observados (linha magenta), para os municípios de, a) Icapuí, b) Jaguaruana e c) Quixeré, todas para a grade 2.	p. 40
5.5	Correção estatística da velocidade de vento a 10 m de altura, a partir dos dados da simulação (linha preta), dos dias 01 a 27 de novembro de 2005, comparada com os dados observados (linha magenta), para os municípios de, a) Russas, b) Icó e c) Iguatu, todas para a grade 2.	p. 41

5.6	Correlação estatística de velocidade de vento a 10 m de altura, entre os dados fornecidos pelo modelo RAMS e os dados de observação. O período analisado vai de 01 a 27 de novembro de 2005, para as seguintes PCDs: a) Icapuí, b) Icó, c) Iguatu, d) Jaguaruana, e) Quixeré e f) Russas.	p. 42
7.1	a) Grade 1, com resolução de 40km por 40km. b) Grade 2, com resolução de 10km por 10km.	p. 54
7.2	Velocidade de vento a 10 m de altura (em m/s) e pressão atmosférica para aproximadamente 24 m de altura (em hPa), de 14 de novembro de 2005, para os seguintes horários: a) 15:00h; b) 17:00h; c) 19:00h; e d) 21:00h, todas para a grade 2.	p. 56
7.3	Velocidade de vento a 10 m de altura (em m/s) e pressão atmosférica para aproximadamente 24 m de altura (em hPa), de 15 de novembro de 2005, para os seguintes horários: a) 15:00h; b) 17:00h; c) 19:00h; e d) 20:00h, todas para a grade 2.	p. 57
7.4	a) Velocidade de vento a um nível de 10 m de altura medida (em m/s). b) Direção da velocidade do vento para o nível de 24 m de altura. Ambas variáveis obtidas para os dias 14 à 15 de novembro de 2005, relativas à segunda grade da simulação.	p. 59
7.5	Comparação entre velocidade de vento a 10 m de altura (em m/s) e umidade relativa do ar medida (em %) para 24 m de altura, do dia 14 de novembro de 2005, para os seguintes horários: a) 15:00h; b) 17:00h; c) 19:00h; e d) 21:00h, todas para a grade 2.	p. 60
7.6	Temperatura (em °C) para o nível de aproximadamente 24 m de altura, do dia 14 de novembro de 2005, para os seguintes horários: a) 15:00h; b) 17:00h; c) 19:00h; e d) 21:00h, todas para a grade 2 da simulação.	p. 61

- 7.7 a) Perfil vertical do vento zonal (m/s) para os seguintes horários do dia 14 de novembro de 2005: 15:00h (em vermelha), 17:00h (amarela), 19:00h (verde), e 21:00h (preta). b) perfil vertical do vento meridional (m/s) para os seguintes horários do dia 14 de novembro de 2005: 15:00h (em amarela), 17:00h (verde), 19:00h (preta), e 21:00h (vermelha). c) perfil vertical da magnitude do vento zonal e meridional (m/s), para os seguintes horários do dia 14 de novembro de 2005: 15:00h (em vermelha), 17:00h (amarela), 19:00h (verde), e 21:00h (preta). Os dados foram obtidos para a segunda grade da simulação. p. 63
- 7.8 Velocidade do vento a 10 m de altura medida (em m/s) e linhas de corrente de vento a um nível de aproximadamente 24 m de altura, para o dia 14 de novembro de 2005, para os seguintes horários: a) 15:00h; b) 17:00h; c) 19:00h; e d) 21:00h, todas para a grade 2. p. 65
- 7.9 Velocidade do vento a 10 m de altura medida (em m/s) e linhas de corrente de vento a um nível de 24 m de altura, para o dia 14 de novembro de 2005, mostrando os seguintes horários: a) 07:00h; b) 10:00h; e c) Topografia obtida através do modelo RAMS medida (em m), com resolução de 10 km x 10 km. p. 66

Lista de Tabelas

- 4.1 Lista das PCDs da FUNCEME, com suas respectivas localizações geográficas e quantidade de dias considerados no estudo do vento Aracati. p. 24
- 4.2 Lista das PCDs, com suas respectivas localizações geográficas e quantidade de dias considerados no estudo do vento Aracati. (Continuação) p. 25
- 5.1 Coordenadas das Plataformas de Coletas de Dados para Icapuí, Jaguaruana, Quixeré, Russas, Icó, e Iguatu. p. 36
- 5.2 Pontos de grade do modelo atmosférico de mesoescala RAMS mais próximo das PCDs, para Icapuí, Jaguaruana, Quixeré, Russas, Icó, e Iguatu. p. 36
- 5.3 Validação da simulação da grade 2 do modelo com a velocidade de vento a 10 m de altura das PCDs, para o período de 01 a 27 de novembro de 2005, para os municípios de Icapuí, Jaguaruana, Quixeré, Russas, Icó, e Iguatu. . . p. 43
- A.1 Interpretação do Coeficiente de Correlação Estatística. p. 76

Lista de Símbolos

- u – Componente x da velocidade
- v – Componente y da velocidade
- w – Componente z da velocidade
- x – Coordenada zonal (positiva para o leste)
- y – Coordenada meridional (positiva para o norte)
- z – Coordenada vertical (positiva para cima)
- p – Pressão atmosférica
- f – Parâmetro de Coriolis
- T – Temperatura
- θ – Temperatura potencial
- ρ – massa específica do ar
- S_i – Termos de fonte ou sumidouros
- q_i – Razão de mistura para diversas categorias de água (chuva, neve, ...)
- R' – Costante individual dos gases para o ar seco
- Ω – Velocidade angular da Terra
- g – Aceleração gravitacional terrestre
- ϕ – Latitude
- \mathbf{V} – Velocidade vetorial nas componentes $x, y, e z$
- k – Razão entre R' e o calor específico do ar a pressão constante

Lista de Abreviaturas

CHESF – Companhia Hidro Elétrica do São Francisco

COLA – *Center for Ocean-Land Atmosphere*

CSU – *Colorado State University*

FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos

GrADS – *Grid Analysis and Display System*

MM5 – *Mesoscale Model five*

MME – Ministério das Minas e Energias

NCAR – *National Center for Atmospheric Research*

NCEP – *National Center For Environmental Prediction*

PCD – Plataforma de Coleta de Dados

PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

PSU – *Pennsylvania State University*

RAMS – *Regional Atmospheric Modeling System*

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

1 Introdução

O estado do Ceará está localizado na região norte do Nordeste do Brasil. Seu regime de ventos sofre uma boa influência dos ventos alísios, os quais fazem parte da circulação global atmosférica. No segundo semestre do ano, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) migra para sua posição mais ao norte de sua normal climatológica. É nessa época que os ventos alísios são mais intensos sobre o estado.

No interior do Ceará, em regiões ribeirinhas, diariamente no fim das tardes e começo das noites quentes da época seca do ano, sopra um vento que, de acordo com moradores, leva uma sensação de conforto térmico a tais regiões. Esse vento é denominado pelos próprios moradores de vento Aracati. Ele se originaria do mar, adentraria pelo sertão através do vale do Rio Jaguaribe, o principal rio perene do estado, cuja extensão é de aproximadamente 610 Km (GATTO, 1999), desde a nascente a sudoeste até o litoral a nordeste (como ilustrado na Fig. 1.1). Ele teria, portanto, características semelhantes às de uma brisa marítima, só que com uma grande penetração continente adentro. Vale ressaltar, que a ocorrência do Aracati está condicionada, ao registro de um máximo valor de velocidade de vento para o dia considerado.

A brisa marítima ocorre durante o dia, quando o vento sopra do mar para o continente. A água do mar, que tem um calor específico maior em relação ao do continente, durante o dia sofre variações de temperatura relativamente pequenas. Desse modo, numa região litorânea, a terra se aquece mais do que o mar durante o dia. O ar aquecido em contato com a terra, sobe por ser menos denso, produzindo uma região de baixa pressão sobre a terra, fazendo com que o ar que está sobre o mar, siga em direção ao continente (como ilustrado na Fig. 1.2). Já durante a noite, ao perder calor, a terra se resfria mais rapidamente do que o mar. Então, o processo se inverte e sopra a brisa terrestre, ou seja, o vento saindo do continente em direção ao mar (como ilustrado na Fig. 1.3).

Em geral, a brisa marítima é mais intensa e mais persistente do que a brisa terrestre. A circulação de brisa marítima é localmente induzida por um gradiente térmico que se estabelece perpendicular à linha da costa. Quando se observa um gradiente térmico positivo, significa



Figura 1.1: Mapa do estado do Ceará mostrando os seus principais municípios, rios (como é o caso dos Rios Jaguaribe e Acaraú), acidentes geográficos (serras e chapadas) e também divisões territoriais com outros estados do Nordeste do Brasil. (Fonte: <http://www.guianet.com.br/>, consultada em 12/02/2007).

que a temperatura do ar no continente é maior do que sobre o oceano, indicando desta forma, uma circulação no sentido oceano-continente (brisa marítima), ocorrendo geralmente no horário entre às 15:00h e 18:00h, horário local. Do contrário, quando o gradiente térmico é negativo, ou seja, quando a temperatura do ar do oceano é maior do que sobre o continente, indica uma circulação com sentido continente-oceano (brisa terrestre), que é verificada entre os horários de 03:00h às 09:00h.

A interface entre o ar continental quente e o ar marinho frio contido dentro da circulação de brisa marítima está associado com mudanças significativas de temperatura e direção do vento. Essa região de transição, muitas vezes é bem definida, e denominada de frete de brisa marítima (FOVELL; DAILEY, 2001). Alguns estudos estimam que a velocidade típica de propagação da frente de brisa é de 3 m/s a 7 m/s (CLARKE, 1955; FINKELE, 1998). Em casos extremos, a frente de brisa pode penetrar 300 Km (ATKINSON, 1981) da costa. O alcance da penetração, bem como da aceleração do vento, são funções do gradiente térmico e da topografia local. Ainda maiores detalhes sobre os fenômenos de brisas marítimas e terrestres, podem ser encontrados em Simpson (1994) e Koo e Reible (1995).

A origem e a estrutura do vento Aracati ainda não foi cientificamente comprovada. Não há

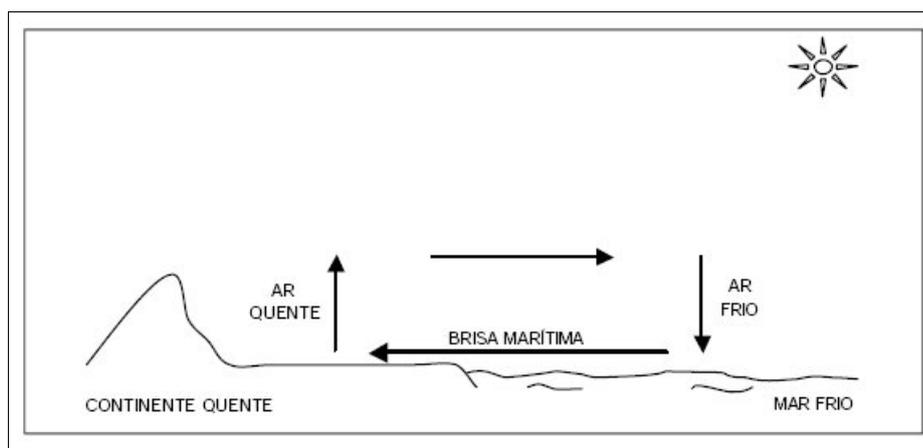


Figura 1.2: Circulação de brisa marítima.

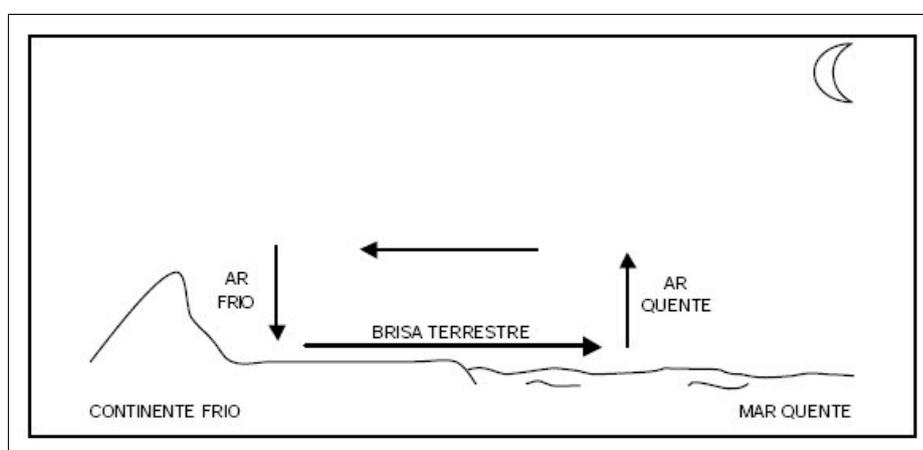


Figura 1.3: Circulação de brisa terrestre.

na literatura algo que nos ajude a elucidar sua climatologia, ou seja, quando e onde ele realmente aparece e qual sua periodicidade, além de que forma ele pode influenciar no clima do Ceará. As causas podem ser as mais diversas, tanto em escala local, regional ou até mesmo global.

A cobertura vegetal influencia no regime de ventos na medida em que sua presença modifica totalmente os fluxos de energia à superfície. Características como albedo, rugosidade, tipo de vegetação e cobertura foliar devem ser levadas em conta nos modelos numéricos computacionais. Diversos estudos envolvendo simulação numérica regional (MAHFOUF; RICHARD; MASCART, 1987; PINTY et al., 1989; CLARK; ARRITT, 1995; HONG; LEACH; RAMAN, 1995; MIAO et al., 2003) mostram o importante papel que a vegetação desempenha na circulação local. No caso do vale do Rio Jaguaribe, existe toda uma vegetação própria, diferente do restante do estado, que pode influenciar na distribuição de ventos.

A umidade do solo está intimamente ligada à cobertura vegetal. A simples presença de vegetação já modifica totalmente os fluxos de água no solo, além de evitar os processos de erosão do mesmo. A evapotranspiração, que é o fenômeno combinado de evaporação de água do solo

e de superfícies líquidas com o de transpiração dos vegetais, é de suma importância no monitoramento climático do Nordeste Brasileiro, identificando regiões onde há secas e estiagens. Physick (1980) mostrou que a taxa de penetração da brisa marítima varia significativamente com a umidade do solo, diminuindo sua intensidade na medida em que a umidade do solo aumenta. Yan e Anthes (1988) mostraram que a circulação de brisa sobre um solo seco é mais intensa do que sobre um solo úmido.

No tocante à topografia, vários estudos numéricos computacionais mostram o papel que ela desempenha na distribuição de ventos locais, desenvolvendo as circulações de vale e montanha (PIELKE; MAHRER, 1975; DORAN; SKYLLINGSTAD, 1992; VARVAYANNI et al., 1993; BOSSERT et al., 1994; VARVAYANNI et al., 1995; TJERNSTROM; GRISOGONO, 1996; VARVAYANNI et al., 1998; KIM; PATEL; LEE, 2000; MIAO et al., 2003). Apesar de sua importância, não possuímos no Ceará nenhum vale ou montanha que possa permitir que atribuamos essa característica como importante causa do vento Aracati, até mesmo porque o vale do Rio Jaguaribe não é profundo.

Encontramos na literatura alguns estudos de casos sobre ventos costeiros que desenvolvem jatos de baixos níveis (SLADKOVIC; KANTER, 1977; SAVIJARVI; NIEMELA; TISLER, 2005; YOSHIKADO; KONDO, 1989; BUCKLEY; KURZEJA, 1997; FINKELE, 1998; SHA; OGAWA; IWASAKI, 2004; ZHU; ATKINSON, 2004; PUYGRENIER et al., 2005), que explicam a ocorrência de ventos de montanhas, vales, brisas e outros ventos de origem térmica, que são influenciados por fatores locais.

Entende-se por jatos de baixos níveis a região do campo vertical de velocidade do vento na qual se observa a existência de um máximo local no primeiro quilômetro acima da superfície e estende-se na vertical por dezenas ou centenas de metros. De acordo com Oliveira (1999), os jatos de baixos níveis possuem uma extensão horizontal de várias centenas de quilômetros e velocidades de vento que podem exceder a 10 m/s. Os jatos de baixos níveis envolvem uma série de fatores dinâmicos e termodinâmicos de distintas escalas espaciais e temporais.

Para estudarmos o vento Aracati, precisamos de dados de velocidade e possivelmente de direção do vento, além de outras grandezas físicas, tais como temperatura e pressão. Essas medidas podem ser obtidas através de estações meteorológicas de superfície automatizadas. A Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), conta com uma série de Plataforma de Coleta de Dados (PCD), espalhadas pelo estado do Ceará. Elas fornecem uma série de medidas à superfície e à 10 m de altura, como por exemplo: velocidade do vento, radiação incidente, temperatura do ar, pressão atmosférica, umidade relativa e precipitação. Todas estas variáveis mencionadas poderão ser úteis no estudo do vento Aracati.

Outra forma de avaliarmos a evolução da atmosfera, com o intuito de estudarmos a formação e a evolução do Aracati, pode ser feita com a realização de simulações numéricas computacionais, com as condições iniciais predominantes dessas regiões para uma determinada época. Desta maneira, podemos verificar também se o vento Aracati recebe alguma influência das forçantes locais citadas anteriormente.

Atualmente, contamos com vários modelos numéricos atmosféricos regionais, ou seja, modelos que simulam a atmosfera na sua escala local, que pode ir de dezenas de metros até centenas de quilômetros. Dentre eles podemos destacar o *Regional Atmospheric Modeling System* (RAMS), desenvolvido pela *Colorado State University* (CSU) e a quinta geração do *Mesoscale Model* (MM5), desenvolvido pela *Pennsylvania State University* (PSU) e pelo *National Center for Atmospheric Research* (NCAR). Estes dois representam o estado da arte em termos de modelos numéricos computacionais em 3 dimensões, incorporando um relevo de alta resolução espacial, tipos de vegetação e de solo realísticos, baseados em medidas de satélite e os mais diversos esquemas de parametrizações físicas.

Uma das grandes vantagens dos modelos atmosféricos é a de permitir que a atmosfera seja modelada a partir de condições iniciais realísticas, obtidas a partir de conjuntos de dados observacionais ou resultados de modelos de circulação global, que passam por diversas análises de consistência e veracidade, possibilitando reproduzirmos a evolução da atmosfera com fins diagnósticos, o que comumente chamados de dados de re-análise, que leva o nome do projeto. Utilizaremos desta capacidade para estudarmos a evolução da atmosfera em uma escala regional, em especial a evolução do campo de vento à superfície no vale do Rio Jaguaribe, com o intuito de entendermos os processos físicos envolvidos na formação e evolução do vento Aracati.

O vento Aracati possui uma significativa importância para o Ceará, pois além de trazer conforto térmico aos moradores de regiões por onde ele se desenvolve, trata-se de um tipo de circulação local. As circulações locais têm sido muito estudadas nos últimos anos através de modelos regionais. Sua importância está ligada à dispersão de poluentes (KIMURA, 1985; LU; TURCO, 1994; LYONS et al., 1995; NESTER, 1995; CAMPS; MASSONS; SOLER, 1996; LU; TURCO; JACOBSON, 1997; MASSONS; CAMPS; SOLER, 1997; DING et al., 2004), à distribuição de chuvas (CAMBERLIN; PLANCHON, 1997; WILSON; MEGENHARDT, 1997; CASE et al., 2002; RAMAN et al., 2005) e ao potencial eólico (LAVAGNINI; SEMPREVIVA; BARTHELMIE, 2003).

A energia eólica é considerada como uma fonte de energia limpa e renovável. O impulso para a discussão da utilização das energias renováveis dá-se a partir da crise do petróleo na dé-

cada de 70. Por um lado, a necessidade de assegurar a diversidade e segurança no fornecimento de energia e, por outro lado, a obrigação de proteger o ambiente, cuja degradação é acentuada pelo uso de combustíveis fósseis, motivaram o renovado interesse pelas energias renováveis.

A maior parte do abastecimento de combustíveis e energia, a nível mundial, é proveniente de combustíveis fósseis, que diariamente emitem o gás dióxido de carbono CO₂, o qual é um dos principais gases causadores do aumento do efeito estufa. Neste aspecto, a utilização das energias renováveis tem despertado cada vez mais interesse na comunidade científica, principalmente sob a alegação de reduzir a poluição atmosférica, já que são consideradas fontes de energia limpas. Mas, a questão da escassez do petróleo, principalmente dada o aumento populacional, também tem sido um outro fator importante. Então surge a necessidade do homem em buscar novas fontes de energia, para que possamos garantir a sustentabilidade das futuras gerações. O Protocolo de Kyoto, neste momento é um dos principais mecanismos com objetivo de atenuar as emissões de CO₂, provenientes da queima de combustíveis fósseis, pois esse documento tem, em sua maior vertente, o incentivo na utilização de recursos energéticos renováveis, como é o caso da energia eólica, solar, biomassa, dentre outras, cujo impacto ambiental é bem menor em relação aos combustíveis fósseis.

O estado do Ceará é bastante conhecido no que se refere ao aproveitamento dos seus regimes de ventos para aplicações em construção de parques eólicos. Isso se dá, pelo motivo de que sua localização geográfica é muito influenciada pelos ventos alísios, os quais fazem parte da circulação global. Além disso, o Ceará possui ótimas condições para o aproveitamento energético de outras fontes de energia limpas e renováveis, pois sua posição geográfica também favorece a utilização da radiação solar, através de células fotovoltaicas. Referente a utilização da energia solar, os custos para a conversão em energia elétrica ainda são muito elevados, devido à matéria-prima utilizada, o silício (um bom material semicondutor), o que ainda inviabiliza a sua utilização em larga escala. Por outro lado, a energia eólica envolve custos de instalação e de manutenção bem menores que os da energia solar. Em virtude disso, o estado do Ceará já possui uma boa experiência no assunto, pois é o primeiro local do mundo onde foi implantado um parque eólico em dunas (CARVALHO, 2003).

Uma das áreas onde possivelmente observaremos maiores avanços em energia eólica será certamente a instalação de turbinas no mar (*offshore*). A tendência para o aumento da potência útil dos aerogeradores, em conjunto com um melhor conhecimento da tecnologia das fundações das turbinas no mar e das condições de vento no local, contribuirão para que se possa tornar mais competitiva esta forma de aproveitar a energia do vento em condições ambientais diferentes do convencional.

Muito do que conhecemos, sobre o vento Aracati são baseados em relatos de moradores das regiões por onde é possível observarmos suas ocorrências. De forma, que nesse trabalho estamos propondo um estudo científico com o intuito de sabermos quais as possíveis origens do vento Aracati, e também quais as consequências de seu aparecimento em localidades ao longo do Rio Jaguaribe.

O desenvolvimento dessa dissertação se dará através das seguintes etapas:

No Cap. 2, faremos alguns comentários sobre o vento Aracati, descrevendo as regiões onde é possível observarmos suas ocorrências, e as consequências de sua passagem. Todas as considerações sobre o Aracati nesse capítulo, serão feitas do ponto de vista de moradores.

No Cap. 3, desenvolveremos um estudo sobre a intensidade de ventos no estado do Ceará, com o objetivo de sabermos se os horários em que os mesmos são mais intensos, encontram-se no período diurno. Esse estudo será importante na medida em que nos servirá de base, para estabelecermos os critérios de ocorrência do Aracati para uma capítulo posterior.

No Cap. 4, procuraremos fazer uma análise estatística descritiva do vento Aracati, a partir de dados de velocidade de vento para todo o estado do Ceará. Através dessa análise procuraremos saber com que frequência ocorre o Aracati, além de quais as cidades que possuem uma maior ocorrência desse fenômeno atmosférico.

No Cap. 5, procuraremos comparar os dados de velocidade de vento das observações com os resultados obtidos na simulação apresentados no Cap. 7. Essa comparação será feita utilizando métodos estatísticos de avaliação de erros, correlação, e também através de verificação em gráficos dos dados observados com os simulados, isso para algumas localidades onde há a ocorrência do Aracati, apresentadas no Cap. 4.

No Cap. 6, apresentaremos o formalismo da modelagem atmosférica, ou seja, as equações básicas, as principais aproximações e simplificações das mesmas, os sistemas de coordenadas adotados e as parametrizações físicas.

No Cap. 7, começaremos por descrever o modelo atmosférico computacional utilizado para a simulação numérica do vento Aracati. Em seguida, os parâmetros adotados na simulação, como por exemplo, as condições iniciais do modelo, as condições de contorno e as parametrizações utilizadas. Por fim, analisaremos os resultados através dos campos de algumas variáveis atmosféricas, como por exemplo, de vento, de pressão e de temperatura.

Finalmente, no Cap. 8, apresentaremos as conclusões dessa dissertação e quais as perspectivas para a realização de futuros trabalhos.

2 *O vento Aracati*

2.1 Introdução

Nesse capítulo, faremos alguns comentários sobre o que vem a ser o vento Aracati, baseado em relatos de moradores das regiões de suas ocorrências. De forma, que iremos mostrar as localidades mais comentadas que possuem relatos de ocorrência do Aracati.

2.2 O que é o Vento Aracati ?

Diariamente em regiões ribeirinhas, no fim das tardes e começo das noites quentes da época seca do ano, sopra um vento que de acordo com moradores, leva uma sensação de conforto térmico a tais regiões, pelo motivo de que as mesmas possuem altas temperaturas. Esse vento é denominado pelos próprios moradores de vento Aracati, não se sabendo ao certo, a partir de que momento ele recebeu tal denominação. Muitos moradores supõem que o Aracati possui origem do mar, e acaba adentrando pelo sertão através do vale do Rio Jaguaribe, o principal rio perene do estado do Ceará, ou também chamado de baixo Jaguaribe.

Um dos grandes historiadores cearenses, Raimundo Girão, identifica o Aracati como sendo “monção ou brisa que sopra nas tardes de verão, saindo do mar e entrando no sertão refrescando-os”. Essa frase pode ser comprovada nas cidades que sobem às margens do Rio Jaguaribe, onde parte da população ainda senta-se a calçada ao final da tarde para descansar esperando a passagem do “Aracati”, que segundo esses moradores, é o vento que se desloca do litoral em direção ao interior pelo leito do Jaguaribe.

No dicionário de Aurélio Buarque, a palavra Aracati possui o significado de “vento que em regiões nordestinas (especialmente no Ceará) sopra de N.E. para S.O”. Mas a palavra Aracati tem origem do Tupi, que possui diversas versões, como por exemplo, “vento ou rajada forte ou aragem forte ou vento que cheira”, ou ainda, "Bonança". Para o escritor cearense José de Alencar, em seu livro *Iracema*, o vento Aracati pode ser traduzido como o “Vento que vem do

mar” Alencar (1829).

Através da (Fig. 2.1), podemos observar as localidades dentro do retângulo em vermelho, onde ocorrem a passagem do vento Aracati, segundo moradores dessas regiões. Nela identificamos que essas localidades possuem proximidade com o Rio Jaguaribe e seus afluentes, como por exemplo, os Açúdes de Orós e Banabuiú.

Ainda através da (Fig. 2.1), identificamos que as regiões de ocorrência do Aracati são aquelas que se encontram na faixa litorânea do estado do Ceará, ou seja, no litoral leste, e também verificamos regiões mais afastadas do litoral, como por exemplo, já bem ao sul do estado, na cidade de Icó.



Figura 2.1: Mapa do estado do Ceará, destacando as localidades dentro do retângulo em vermelho que possuem ocorrências do vento Aracati.

Outra importante característica do aparecimento do vento Aracati em uma determinada localidade que possui proximidade com o Rio Jaguaribe, se deve ao fato, de ser possível registarmos um máximo valor de velocidade média para o dia de sua ocorrência. Tornando dessa forma, um atrativo diferenciado do que normalmente pode ser verificado, referente a intensidade de ventos nas regiões citadas acima.

Para ilustrar o que foi dito antes, através dos dados de medição de médias horárias de velocidade do vento a um nível de 10 m de altura, fornecidos pela FUNCEME, através da (Fig. 2.2), temos um gráfico no qual podemos identificar a ocorrência do vento Aracati na

cidade de Icó, segundo relato de moradores, durante a noite do dia 14 de novembro de 2005. No início da noite, a velocidade média às 18:00h chegou a 2,3 m/s e às 20:00h a 4,6 m/s. Às 21:00h, a velocidade média chegou a quase 6,0 m/s, ou seja, bem maior em relação à média durante o dia. Esse comportamento pôde ser observado durante quase todo os dias do mês de novembro de 2005, novamente segundo relato de moradores.

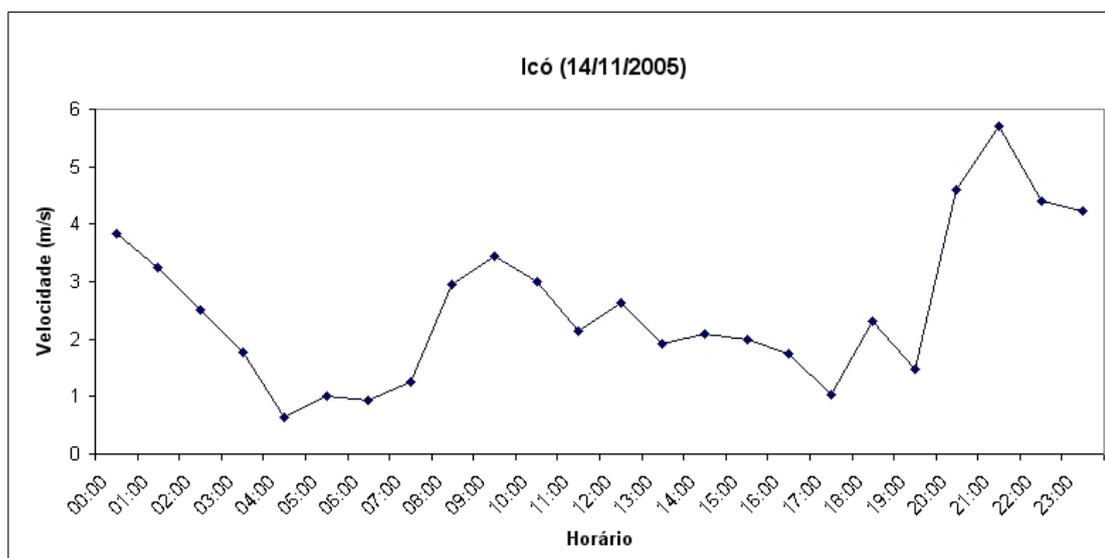


Figura 2.2: Médias horárias da velocidade do vento a um nível de 10 m de altura na cidade de Icó - CE, para o dia 14 de novembro de 2005. Os dados foram coletados por um anemômetro a 10 m de altura pertencente a uma PCD da FUNCEME.

Outro lugar onde podemos identificar a ocorrência do Aracati, também segundo relatos de moradores, foi na cidade de Solonópole que fica nas proximidades do açude Banabuiú (como ilustrado na Fig. 2.1). Novamente, através dos dados de velocidade do vento da FUNCEME, para uma nível de referência a 10 m de altura em relação ao solo, e para o mesmo dia 14 de novembro de 2005, é possível observarmos no gráfico da (Fig. 2.3), a ocorrência do vento Aracati, chegando a uma máxima velocidade média horária de aproximadamente 9,0 m/s em torno das 19:00h. Novamente esse comportamento, ou seja, um maior valor de velocidade média horária do vento durante a noite em relação ao dia, pôde ser observado durante quase todos os dias do mês de novembro de 2005 em Solonópole.

De acordo com um estudo elaborado pela Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF), que realizou médias horárias da velocidade do vento ao longo do dia em 10 estações meteorológicas distribuídas pelo estado do Ceará, durante o período de 1977 a 1981, os ventos sobre o Ceará são mais intensos durante o dia em comparação com à noite Amarante (1987). Com a ocorrência do vento Aracati, esta tendência continua, mas só que em alguns locais, não é mais observado a maior intensidade de ventos durante o dia, tendo em vista que a maior intensidade dos ventos com o aparecimento do Aracati ocorre entre o final da tarde e a meia-noite,

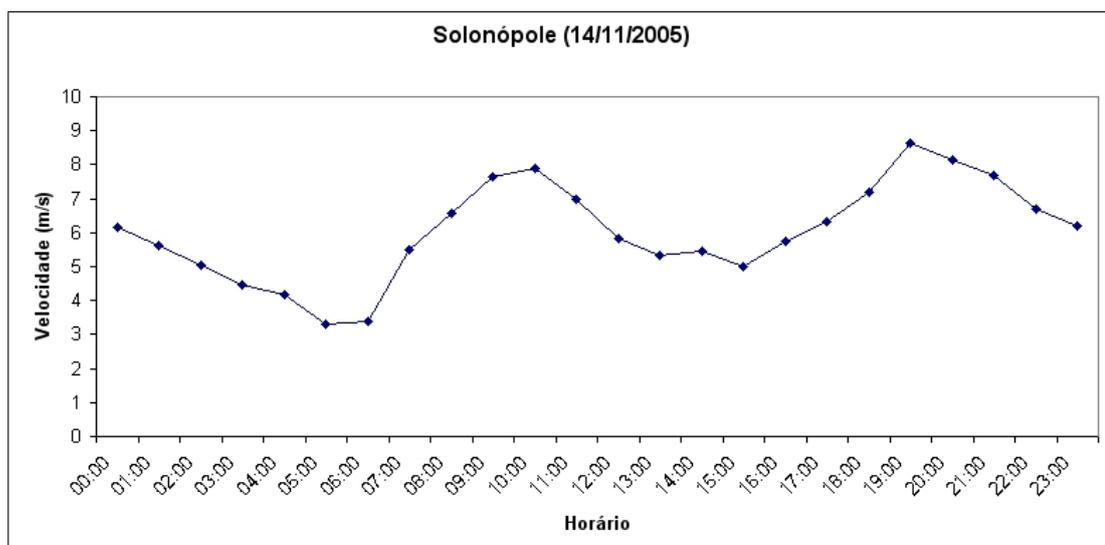


Figura 2.3: Médias horárias da velocidade do vento a um nível de 10 m de altura na PCD instalada na cidade de Solonópole - CE, para o dia 14 de novembro de 2005.

como pudemos constatar nas (Figs. 2.2 e 2.3). No capítulo seguinte estaremos desenvolvendo uma estudo ainda mais atual sobre a intensidade de ventos no Ceará, para de fato, verificarmos a maior intensidade de ventos no período diurno, reforçando assim o estudo desenvolvido pela CHESF, citado acima e, que será de suma importância para o estabelecimento dos critério de ocorrência do vento Aracati, que será realizado num capítulo posterior.

O vento Aracati, possui características semelhantes às de uma brisa marítima, só que com uma grande penetração continente adentro, como por exemplo, na cidade de Morada Nova que fica distante da costa leste do Ceará, de aproximadamente 100 km. Outra cidade ainda mais distante com ocorrência do Aracati é a de Icó, situada a cerca de 300 km do litoral leste do estado.

O estudo do vento Aracati, que possui médias horárias superiores a 5 m/s a 10 m de altura, como ilustrado nos dados das PCDs (Figs. 2.2 e 2.3) poderá servir de motivação para a investigação de um possível aproveitamento de seu potencial eólico, em localidades que possuem suas maiores ocorrências. Dessa forma, esse trabalho poderá auxiliar na busca de regiões para exploração do potencial eólico fora do litoral cearense, já que o mesmo é bastante conhecido, e de incentivar e orientar os tomadores de decisão para que possam vir a aproveitar a energia eólica no seu potencial total no estado.

3 Verificação da Intensidade dos Ventos Sobre o Estado do Ceará

3.1 Introdução

Nesse capítulo, realizaremos um estudo sobre a velocidade dos ventos do estado do Ceará, com o objetivo de identificarmos se os horários de maior intensidade de ventos são os do período diurno, conforme encontrado na literatura. Esse estudo tem como objetivo reforçar os resultados encontrados por Amarante (1987), e dessa forma, verificarmos que com a ocorrência do vento Aracati, de fato não é mais verificado a maior intensidade de velocidade de vento no período diurno. Além disso, estaremos agora utilizando uma metodologia ainda não experimentada, ou seja, as PCDs da FUNCEME.

3.2 Considerações iniciais

Através do Cap. 2, citamos um dos primeiros estudos com o objetivo de verificar o período de máxima velocidade de vento sobre o estado do Ceará, elaborado pela CHESF. Mas recentemente é possível identificarmos um estudo semelhante, desenvolvido pela Secretaria de Infra-Estrutura do Estado do Ceará (SEINFRA, 2001).

Atualmente, muito se tem falado em fontes renováveis de energia. Isso também pode ser justificado pela preocupação do homem na nossa principal fonte energética, o petróleo, que um dia poderá ter seu fim, dado o esgotamento de suas reservas subterrâneas. Mas o fato é que, não podemos pensar somente em uma substituição de fonte de energia, mas garantir que gerações futuras possam viver em um mundo saudável. E para isso, é preciso investir em pesquisas de energias limpas e renováveis, como uma forma de alcançarmos um desenvolvimento sustentável. Nessa perspectiva, o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), criado em 26 de abril de 2002 pelo Governo Federal, coordenado pelo Ministério das Minas e Energia (MME), tem como grande objetivo obter um caminho limpo para o desen-

volvimento, através da motivação em estudos que envolvam a utilização de fontes renováveis, como é o caso da energia eólica, biomassa, e pequenas centrais hidrelétricas.

A meta inicial do PROINFA previa a instalação de aproximadamente 3.300 MW de energia elétrica até 2006, nas seguintes condições: 1.100 MW em fontes eólica, 1.100 MW em pequenas hidrelétricas, e 1.100 MW em biomassa.

Em relação ao estado do Ceará, podemos esperar que as fontes de energia eólica e biomassa receberão destaque especial por parte dos pesquisadores. Isso, se levarmos em conta as ótimas condições de ventos, como já dissemos, e no caso da biomassa, através do Biodiesel de mamona, tendo em vista que o nosso estado oferece ótimas condições climáticas para o plantio dessa oleaginosa.

Muitas informações sobre o potencial eólico do estado do Ceará podem ser obtidas, através do Mapa do Potencial Eólico do Ceará (SEINFRA, 2001). Nesse estudo podemos encontrar informações importantes sobre aspectos climatológicos, dados anemométricos, características do relevo, rugosidade e densidade do ar. Podemos observar também que a região litorânea é a mais privilegiada em termos de potencial eólico.

A informação sobre o potencial eólico de uma determinada localidade, pode ser feita de forma independente das características das turbinas a serem instaladas. Para isso, podemos analisar o potencial eólico através de algumas variáveis, como por exemplo: velocidade e direção do vento de nossa região de interesse, cálculo da densidade de potência disponível do vento, que é medida em (W/m^2) e possivelmente outras formas.

Através das (Figs. 2.2 e 2.3), do capítulo anterior, verificaremos que com a ocorrência do vento Aracati, de fato, não é mais verificado a maior intensidade de velocidade de vento no período diurno. Pois com o aparecimento do Aracati, o maior valor da média horária da velocidade do vento se encontra no período noturno, ou seja, entre 18:00h e meia-noite, horário local.

Então nesse capítulo, estaremos verificando que de fato, a maior intensidade de ventos sobre o estado do Ceará encontrar-se no período diurno, mas sendo que agora, utilizando uma metodologia ainda não experimentada, ou seja, as PCDs da FUNCEME. Muito embora, como já mencionamos estudos semelhantes ao que será apresentado nesse capítulo, vimos a necessidade de um estudo ainda mais atual, tendo em vista que dispomos desses dados de medição de velocidade média horária de vento, para boa parte do território cearense.

3.3 Dados de Medição de Velocidade do Vento

Para que fosse possível o desenvolvimento desse capítulo, tivemos a necessidade de obter dados de velocidade do vento em praticamente todos os lugares do estado, de forma a abranger a maior área de estudo através das PCDs. Vale ressaltar que além dessas PCDs fornecerem dados medições de velocidade do vento, é possível obtermos outras variáveis, como por exemplo, a pressão atmosférica, temperatura do ar, radiação solar incidente, umidade relativa, direção da velocidade do vento, precipitação, dentre outras.

Os dados de velocidade do vento estudados aqui, são constituídos de medidas diárias com médias horárias, a um nível de 10 m de altura em relação ao solo. Foram analisados todos os dias do ano de 2005, pois trata-se de um ano com o maior número de PCDs com dados válidos, além de contar com um período, ou seja, o mês de novembro, em que constatamos a ocorrência do Aracati, segundo relato de moradores, como vimos no Cap. 2.

Como forma de padronizar nossas regiões de estudo ao longo do Ceará, fizemos uma divisão das PCDs em 6 grupos, de acordo com suas localização geográfica, onde cada grupo contém 4 PCDs. Esses grupos foram numerados da seguinte forma:

- **Grupo (I):** Contendo as PCDs de Icapuí, Jaguaruana, Aruarú, e Ibaretama;
- **Grupo (II):** PCDs de Acopiara, Icó, Quixeramobim, e Quixadá;
- **Grupo (III):** PCDs de Santana do Cariri, Lavras da Mangabeira, Assaré, e Jati;
- **Grupo (IV):** PCDs de Sobral, Acaraú, Granja, e Barroquinha;
- **Grupo (V):** PCDs de Fortaleza, São Gonçalo, Maranguape, e Pacajús; e
- **Grupo (VI):** PCDs de Ubajara, São Benedito, Groaíras, e Santa Quitéria.

A escolha dos grupos foi feita com base na proximidade de cada PCD, sendo que cada grupo representa uma região de estudo nos quais verificamos a intensidade de velocidade do vento a 10 m de altura. Tentamos ao máximo explorar as localidades que representassem os extremos do estado do Ceará, para que pudéssemos obter resultados que representassem o estado como um todo. Dessa forma, na (Fig. 3.1), podemos observar as PCDs escolhidas e a representação de seus grupos.

Ainda sobre os grupos, eles representam localidades distintas entre si, como por exemplo, o Grupo (I) que representa aquelas PCDs que estão mais próximas do Leste do estado do Ceará,

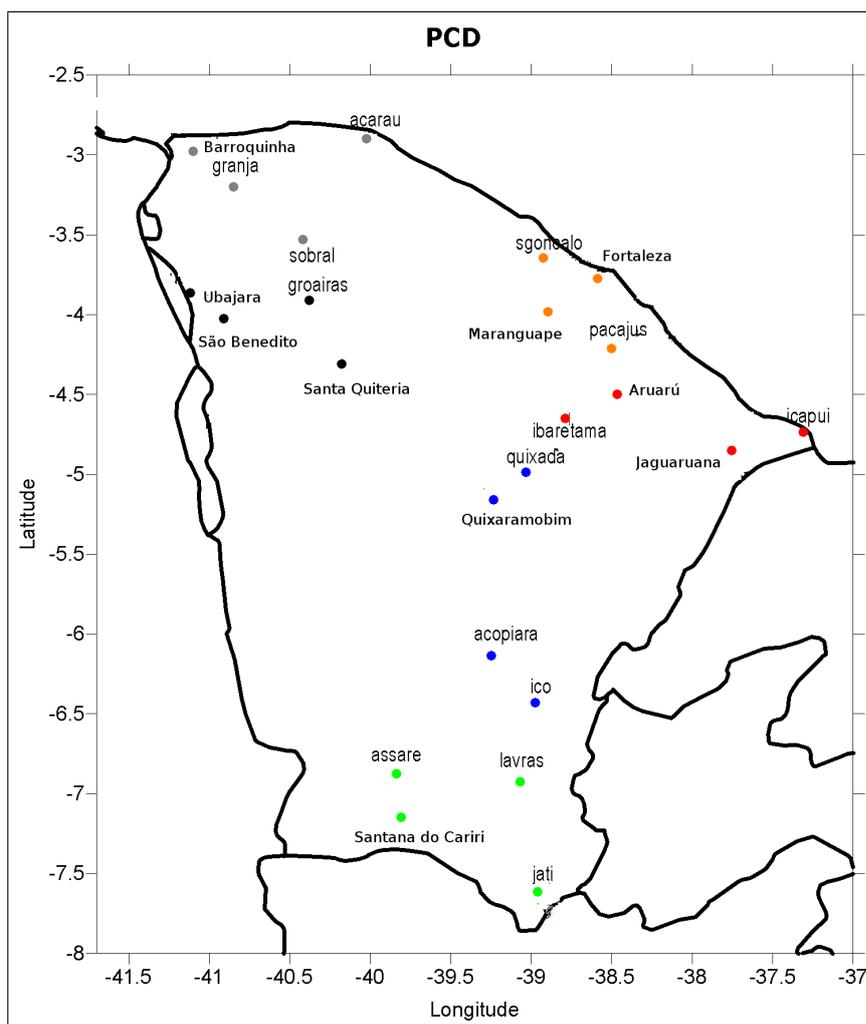


Figura 3.1: Mapa do estado do Ceará com as PCDs da FUNCEME que serviram de estudo para avaliação da intensidade de velocidade do vento a 10 m de altura. As PCDs do Grupo (I) estão representadas em bolinha vermelha, as do Grupo (II) em azul, as do Grupo (III) em verde, as do Grupo (IV) em cinza, as do Grupo (V) em laranja e as do Grupo (VI) em preta.

com destaque para o cidade de Icapuí, localizada no litoral. O Grupo (VI) no oeste do estado, com destaque para a PCD instalada na serra de Ubajara. O Grupo (V), que representa as regiões mais ao norte do estado, destaque para a capital Fortaleza. As do Grupo (IV), localizadas próximas do litoral oeste do estado, destaque para a PCD de Barroquinha (praia). O Grupo (II) são as PCDs que representam o centro-sul do estado, como por exemplo, a PCD de Acopiara. Por fim o Grupo (III), que representa as localidades ao sul do estado, como por exemplo, a PCD de Jati.

3.4 Resultados

Através dos cálculos de médias horárias de velocidade de vento, a um nível de referência a 10 m de altura em relação ao solo, das PCDs analisadas nos citados grupos, foi possível fazermos algumas considerações acerca do potencial eólico do estado do Ceará.

Na (Fig. 3.2), observamos que, na maioria das PCDs analisadas, a média de velocidade de vento tem uma maior intensidade nos horários de 06:00h às 18:00h, horário local, sendo que a única exceção é a PCD de Icapuí, em que verificamos uma maior intensidade da média da velocidade de vento principalmente entre 18:00h e 23:00h, horário local, chegando a atingir máximo de velocidade média de aproximadamente 6,0 m/s às 21:00h.

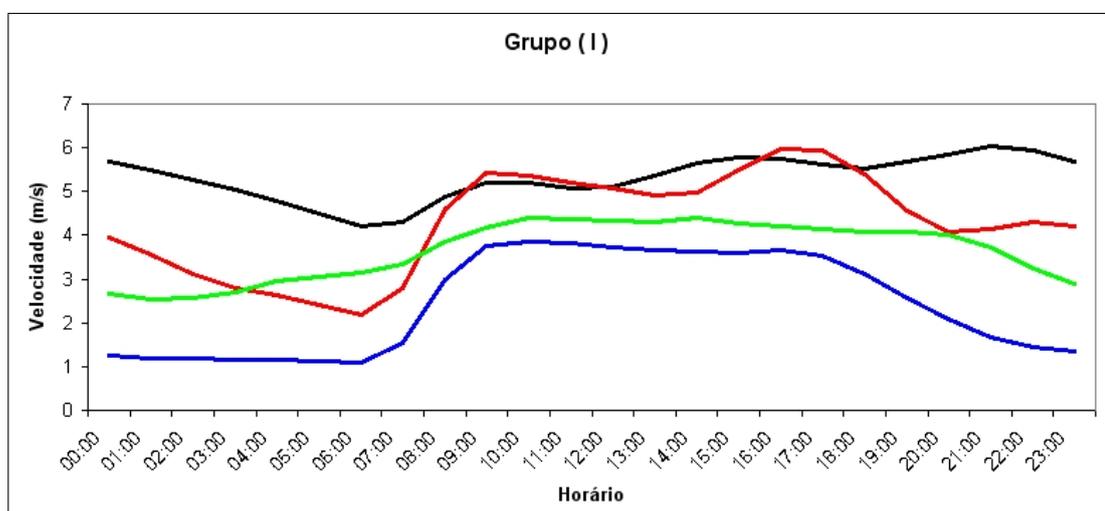


Figura 3.2: Médias horárias da velocidade de vento a um nível de 10 m de altura para o ano de 2005, representado as PCDs do Grupo (I). (Linha preta para a PCD de Icapuí, vermelha para a de Jaguaruana, azul para a de Aruarú e verde para a de Ibaretama.)

Na (Fig. 3.3), verificamos que todas as PCDs analisadas apresentaram médias de velocidade de vento maiores nos horários de 06:00h às 18:00h, como por exemplo, na PCD de Quixadá, que é bem representativa. A maior intensidade durante o dia chegou a atingir valores médios de aproximadamente 4,5 m/s às 10:00h.

Na (Fig. 3.4), identificamos que todas as PCDs estudadas possuem médias de velocidade de vento superiores nos horários de 06:00h às 18:00h, em relação as médias da noite. Destacamos ainda que, nesse grupo, a PCD de Jati foi a que verificamos os maiores valores em relação as demais PCDs, atingindo médias durante o dia de aproximadamente 4,5 m/s.

Na (Fig. 3.5), observamos que na maioria das PCDs, a maior intensidade nas médias de velocidade de vento estão também entre horários de 06:00h às 18:00h, como por exemplo, a PCD de Acaraú, que atingiu valores de velocidade média horária superiores a 6,0 m/s durante

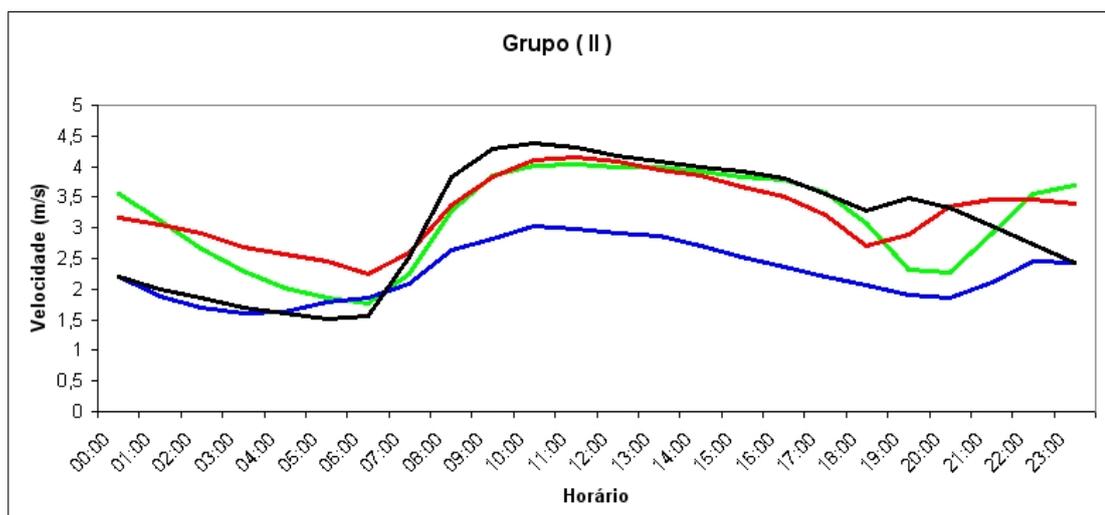


Figura 3.3: Médias horárias da velocidade de vento a um nível de 10 m de altura para o ano de 2005, representado as PCDs do Grupo (II). (Linha verde para a PCD de Acopiara, azul para a de Icó, vermelha para a de Quixeramobim e preta para a de Quixadá.)

o dia. A única exceção nesse grupo foi a PCD de Sobral, na qual verificamos que a maior intensidade da média de velocidade de vento está nos horários noturnos, de 18:00h às 23:00h, com valores de aproximadamente 4,5 m/s.

Na (Fig. 3.6), observamos que, em todas as PCDs estudadas nesse grupo, a maior intensidade nas médias de velocidade de vento seguem os horários entre 06:00h e 18:00h. Destacamos ainda que a PCD de São Gonçalo do Amarante apresentou valores médios durante o dia superiores a 6,0 m/s.

Finalmente, na (Fig. 3.7), temos que em todas as PCDs analisadas, os maiores valores das médias de velocidade de vento estão nos horários de 06:00h às 18:00h. A PCD de Ubajara apresentou uma maior intensidade de vento em relação as demais, em todos os horários analisados. A média da velocidade do vento em Ubajara chegou a atingir um valor máximo de aproximadamente 8,0 m/s às 09:00h. Ainda sobre essa última PCD, podemos afirmar que ela foi a que apresentou maiores valores de velocidade média do vento, também em relação às PCDs de outros grupos.

De uma forma geral, os resultados da média da velocidade de vento a 10 m de altura, para o ano de 2005, representando médias horárias para as PCDs dos Grupos (I), (II), (III), (IV), (V) e (VI), nos mostraram que na maioria das vezes, os ventos no estado do Ceará são mais intensos durante o dia, ou seja, nos horários entre 06:00 às 18:00hs, horário local.

Vale ressaltar que as únicas exceções foram as PCDs de Sobral e Icapuí, onde fenômenos de escala local, ou até mesmo regional, podem ter influenciado nesse comportamento anômalo.

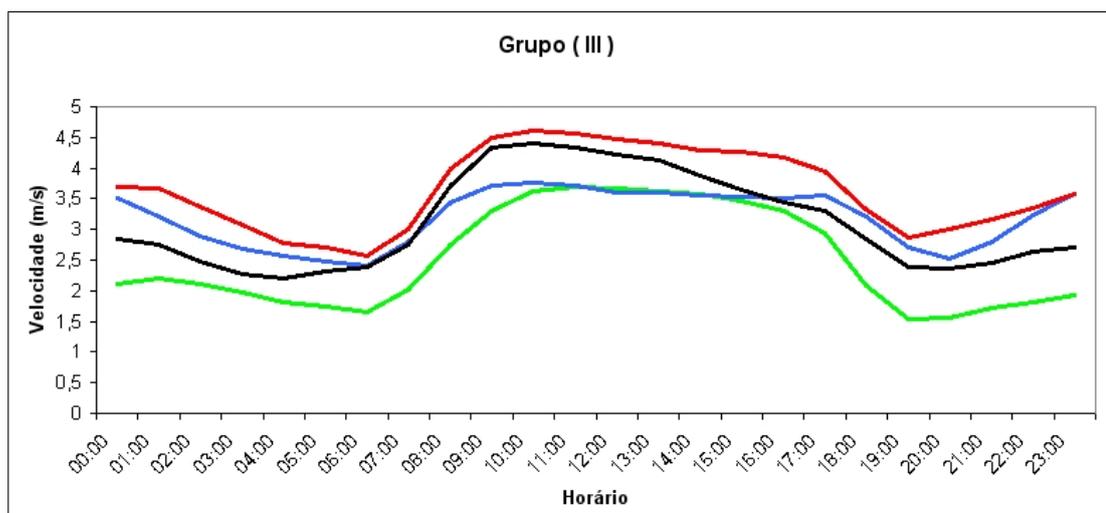


Figura 3.4: Médias horárias da velocidade de vento a um nível de 10 m de altura para o ano de 2005, representado as PCDs do Grupo (III). (Linha verde para a PCD de Santana do Cariri, azul para a de Lavras da Mangabeira, preta para a de Assaré e vermelha para a de Jati.)

Elas serão objeto de estudo nesse trabalho, uma vez que esse comportamento pode ser atribuído a fenômenos de características semelhantes ao vento Aracati, já que o mesmo provoca máximos de velocidade média de vento no período noturno.

Além disso, podemos observar que as maiores intensidades dos ventos podem ser encontradas nos Grupos (I), (IV), (V) e (VI), que possuem PCDs na faixa litorânea e em regiões serranas, como era de se esperar de acordo com o Mapa do Potencial Eólico do Ceará (SEINFRA, 2001).

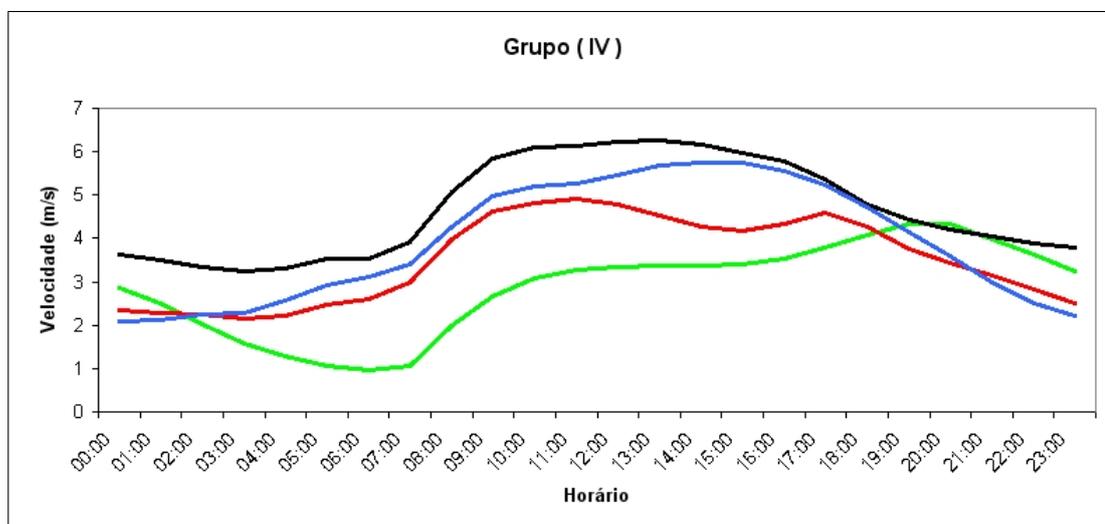


Figura 3.5: Médias horárias da velocidade de vento a um nível de 10 m de altura para o ano de 2005, representado as PCDs do Grupo (IV). (Linha verde para a PCD de Sobral, preta para a de Acaraú, vermelha para a de Granja e azul para a de Barroquinha.)

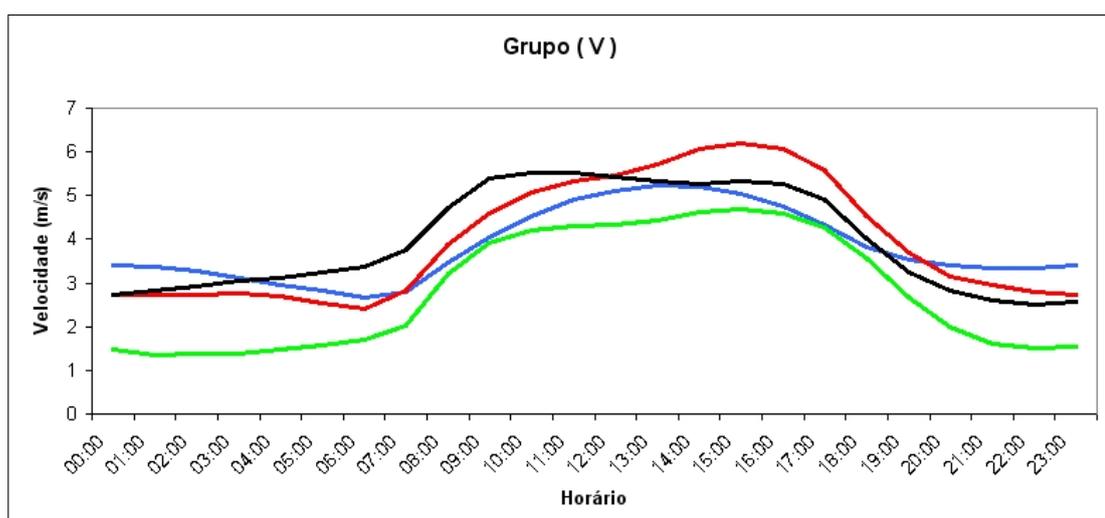


Figura 3.6: Médias horárias da velocidade de vento a um nível de 10 m de altura para o ano de 2005, representado as PCDs do Grupo (V). (Linha azul para a PCD de Fortaleza, vermelha para a de São Gonçalo do Amarante, preta para a de Maranguape e verde para a de Pacajús.)

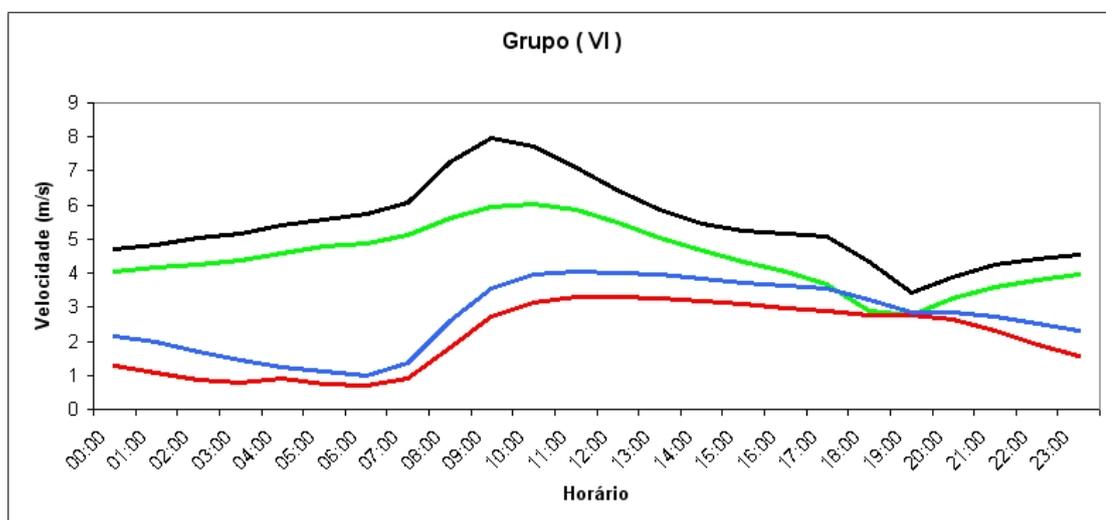


Figura 3.7: Médias horárias da velocidade de vento a um nível de 10 m de altura para o ano de 2005, representado as PCDs do Grupo (VI). (Linha preta para a PCD de Ubajara, verde para a de São Benedito, vermelha para a de Groaíras e azul para a de Santa Quitéria.)

4 Análise Estatística do Vento Aracati

4.1 Introdução

Nesse capítulo, procuraremos fazer uma análise estatística descritiva dos valores de velocidade do vento ao longo do estado do Ceará, com o intuito de identificarmos as regiões de ocorrência do vento Aracati.

Dessa forma, os resultados dessa análise nos auxiliarão na escolha das fronteiras para a simulação numérica computacional, as quais serão efetuadas posteriormente, através de um modelo atmosférico de mesoescala.

4.2 Descrição dos Dados Observados

Os dados para a análise estatística do vento Aracati foram fornecidos pela FUNCEME, constituindo-se de médias horárias de velocidade de vento a 10 m de altura, das PCDs instaladas ao longo do estado do Ceará. Na (Fig. 4.1), é possível observarmos o mapa do Ceará com as PCDs trabalhadas em nosso estudo, as quais estão listadas nas Tabs. 4.1 e 4.2, com suas respectivas localizações geográficas e quantidade de dias analisados.

Ressaltamos que a quantidade de dias verificados nesse estudo, não são iguais por falta de dados. Algumas PCDs possuem mais de um ano de dados válidos, ao passo que outras possuem apenas três meses de dados também válidos. Mas como nosso objetivo é, de tentarmos abranger o máximo das localidades do Ceará, achamos por bem, não excluirmos as PCDs com menos de um ano de dados.

Para que fosse possível observarmos a ocorrência do Aracati, estabelecemos um critério que obedece o seguinte procedimento: i) Consideramos inicialmente a máxima intensidade da velocidade média do vento para o dia considerado, ou ainda, seu valor acima da média de velocidade do vento daquele dia; e ii) Para caracterizar a ocorrência do vento Aracati, esse valor máximo deverá ter ocorrido durante a noite, entre 18:00h e meia-noite, horário local, e em

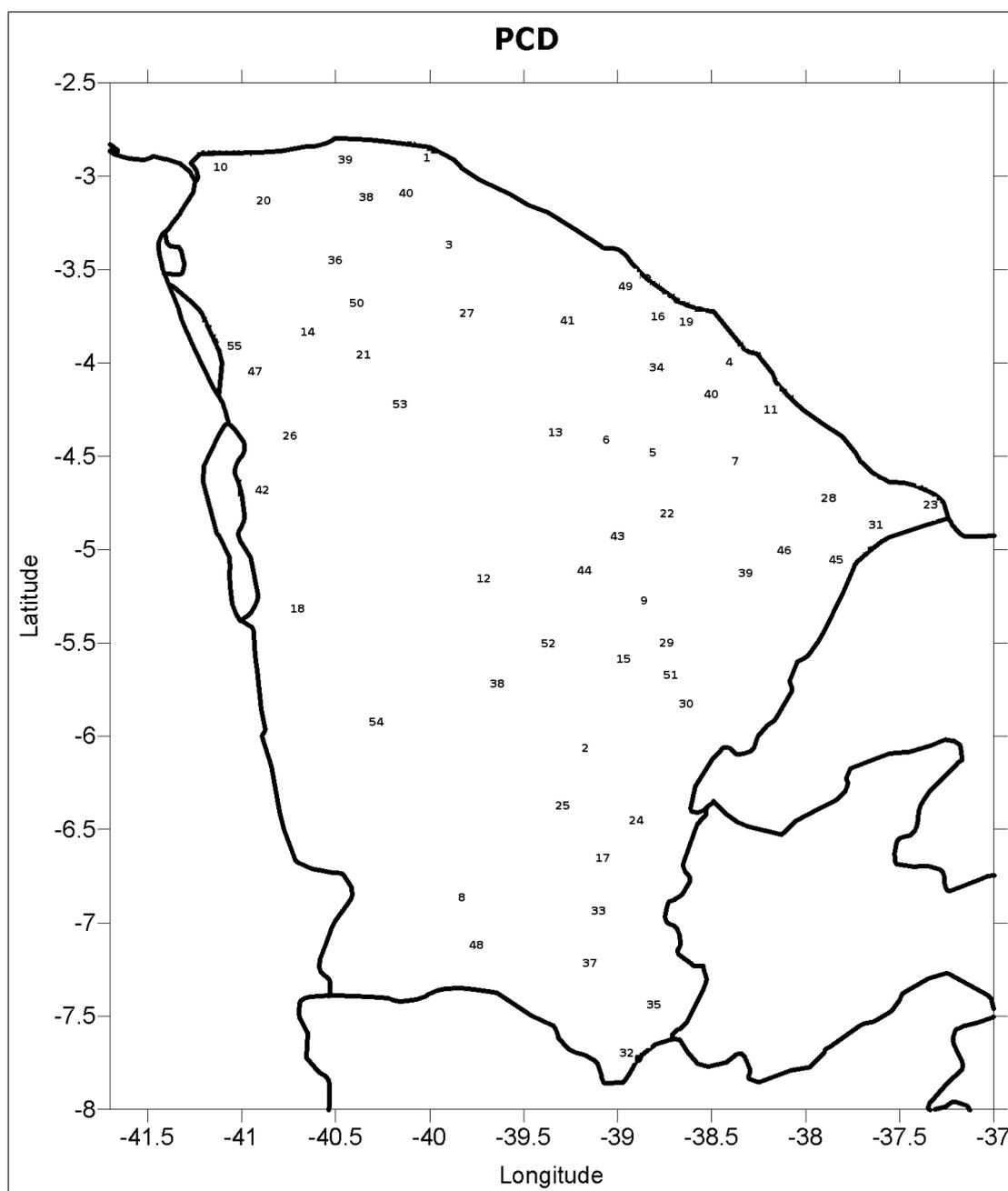


Figura 4.1: Mapa do Ceará, com as PCDs da FUNCEME, listadas nas Tabs. 4.1 e 4.2, as quais foram utilizadas para a descrição estatística de velocidade do vento a 10 m de altura.

regiões que possuem proximidade com o Rio Jaguaribe e seus afluentes.

O período escolhido como critério de ocorrência do Aracati, citado acima, deve-se ao fato de termos apresentado no Cap. 2, as cidades de Icó e Solonópole como ocorrências do vento Aracati, para o citado período segundo relato de moradores.

Outro motivo na escolha do período de ocorrência do Aracati, deve-se ao fato de no Cap. 3, mostrarmos que os ventos no estado do Ceará por via de regra são mais intensos no período diurno, mas o que nós percebemos, é que com o aparecimento do Aracati em regiões ao longo do Rio Jaguaribe, a maior intensidade da média horária da velocidade de vento é registrada agora no período noturno, entre 18:00h e meia-noite.

4.3 Resultados

Após efetuarmos a análise estatística de velocidade do vento a 10 m de altura em todo o estado do Ceará, foi possível obtermos nas Figs. 4.2, 4.3 e 4.4, as PCDs que registraram ocorrência do vento Aracati, conforme os critérios que estabelecemos, ou seja, o maior valor de velocidade do vento, média horária entre 18:00h e meia-noite, em relação a média do dia, ocorrendo em localidades próximas ao Rio Jaguaribe e seus afluentes.

Desta forma, temos a seguir a descrição dos meses verificados nas PCDs em todo o estado do Ceará, com suas respectivas ocorrências do Aracati, representadas através de frequências normalizadas, que são definidas como sendo a frequência absoluta simples dividida pela amplitude da classe respectiva.

Na Fig. 4.2(a), representamos o mês de janeiro, onde observamos que nas seguintes PCDs ao longo do Rio Jaguaribe: Banabuiú, Castanhão, Jaguaratama, Jaguaribe, Morada Nova, e Solonópole, a frequência de ocorrência do Aracati está acima de 90% para os dias estudados em cada cidade, significando dizer que em quase todos os dias do mês de janeiro, verificamos que a maior intensidade da velocidade de vento ocorreu durante a noite. Na cidade de Sobral, também identificamos que ocorreu uma maior intensidade de velocidade do vento a noite com percentuais entre 70% e 80% dos dias considerados para esta cidade, o que nos leva a crer que sejam características de fenômenos semelhantes, uma vez que essa cidade não tem proximidade com o rio Jaguaribe.

Na Fig. 4.2(b), representamos o mês de fevereiro, onde observamos que apenas uma única PCD ao longo do Rio Jaguaribe se destaca em relação as demais, a de Castanhão, com percentuais de ocorrência do Aracati entre 60% e 70% de todos os dias analisados para esse mês.

Tabela 4.1: Lista das PCDs da FUNCEME, com suas respectivas localizações geográficas e quantidade de dias considerados no estudo do vento Aracati.

Índice	Cidades	Latitude	Longitude	Dias
1	Acaraú	S02°52'35"	W039°59'33"	529
2	Acopiara	S06°50'53"	W039°12'36"	591
3	Amontada	S03°02'00"	W039°40'00"	220
4	Aquiraz	S04°00'22"	W038°23'21"	674
5	Aracoiaba	S04°26'90"	W038°45'21"	464
6	Aratuba	S04°23'21"	W039°20'27"	472
7	Aruarú	S04°31'20"	W038°22'70"	529
8	Assaré	S06°51'15"	W039°51'55"	599
9	Banabuiú	S05°19'28"	W038°55'24"	276
10	Barroquinha	S02°55'48"	W041°70'70"	468
11	Beberibe	S04°14'29"	W038°12'50"	326
12	Boa Viagem	S05°08'30"	W039°44'09"	97
13	Canindé	S04°37'18"	W039°23'34"	não considerada
14	Cariré	S03°50'22"	W040°39'45"	438
15	Castanhão	S05°30'10"	W038°20'15"	397
16	Caucaia	S03°44'16"	W038°41'04"	907
17	Cedro	S06°34'59"	W039°14'25"	329
18	Crateús	S05°16'59"	W040°40'25"	87
19	Fortaleza	S03°43'44"	W038°33'50"	893
20	Granja	S03°90'53"	W040°51'41"	533
21	Groáiras	S03°54'36"	W040°22'40"	503
22	Ibaretama	S04°49'36"	W038°49'51"	546
23	Icapuí	S04°43'56"	W037°18'21"	827
24	Icó	S06°25'38"	W038°55'22"	486
25	Iguatu	S06°23'45"	W039°16'16"	423
26	Ipú	S04°25'36"	W040°42'51"	239
27	Irauçuba	S03°46'49"	W039°46'29"	383

Tabela 4.2: Lista das PCDs, com suas respectivas localizações geográficas e quantidade de dias considerados no estudo do vento Aracati. (Continuação)

Índice	Cidades	Latitude	Longitude	Dias
28	Itaiçaba	S04°44'02"	W037°50'52"	59
29	Jaguaretama	S05°36'00"	W038°45'00"	235
30	Jaguaribe	S05°50'00"	W038°30'00"	590
31	Jaguaruana	S04°50'41"	W037°45'24"	817
32	Jati	S07°43'24"	W038°53'43"	607
33	Lavras da Mangabeira	S06°53'20"	W039°50'60"	603
34	Maranguape	S03°59'60"	W038°47'17"	885
35	Mauriti	S07°26'10"	W038°47'17"	54
36	Meruoca	S03°32'32"	W040°29'59"	467
37	Missão Velha	S07°15'09"	W039°09'26"	410
38	Mombaça	S05°43'34"	W039°38'43"	355
39	Morada Nova	S05°80'10"	W038°21'23"	289
40	Pacajús	S04°11'24"	W038°29'54"	765
41	Pentecoste	S03°47'57"	W039°15'47"	219
42	Poranga	S04°44'44"	W040°52'26"	94
43	Quixadá	S04°59'18"	W039°00'40"	495
44	Quixeramobim	S05°70'24"	W039°10'56"	320
45	Quixeré	S05°50'20"	W037°51'24"	280
46	Russas	S05°02'30"	W038°07'08"	97
47	São Benedito	S04°10'29"	W040°54'39"	538
48	Santana do Cariri	S07°90'60"	W039°45'52"	608
49	São Gonçalo do Amarante	S03°39'00"	W038°56'32"	876
50	Sobral	S03°43'41"	W040°23'16"	891
51	Solonópole	S05°41'28"	W038°57'03"	100
52	Senador Pompeu	S05°34'50"	W039°23'56"	49
53	Santa Quitéria	S04°18'35"	W040°10'36"	458
54	Tauá	S05°58'51"	W040°07'30"	167
55	Ubajara	S03°51'45"	W041°70'30"	498

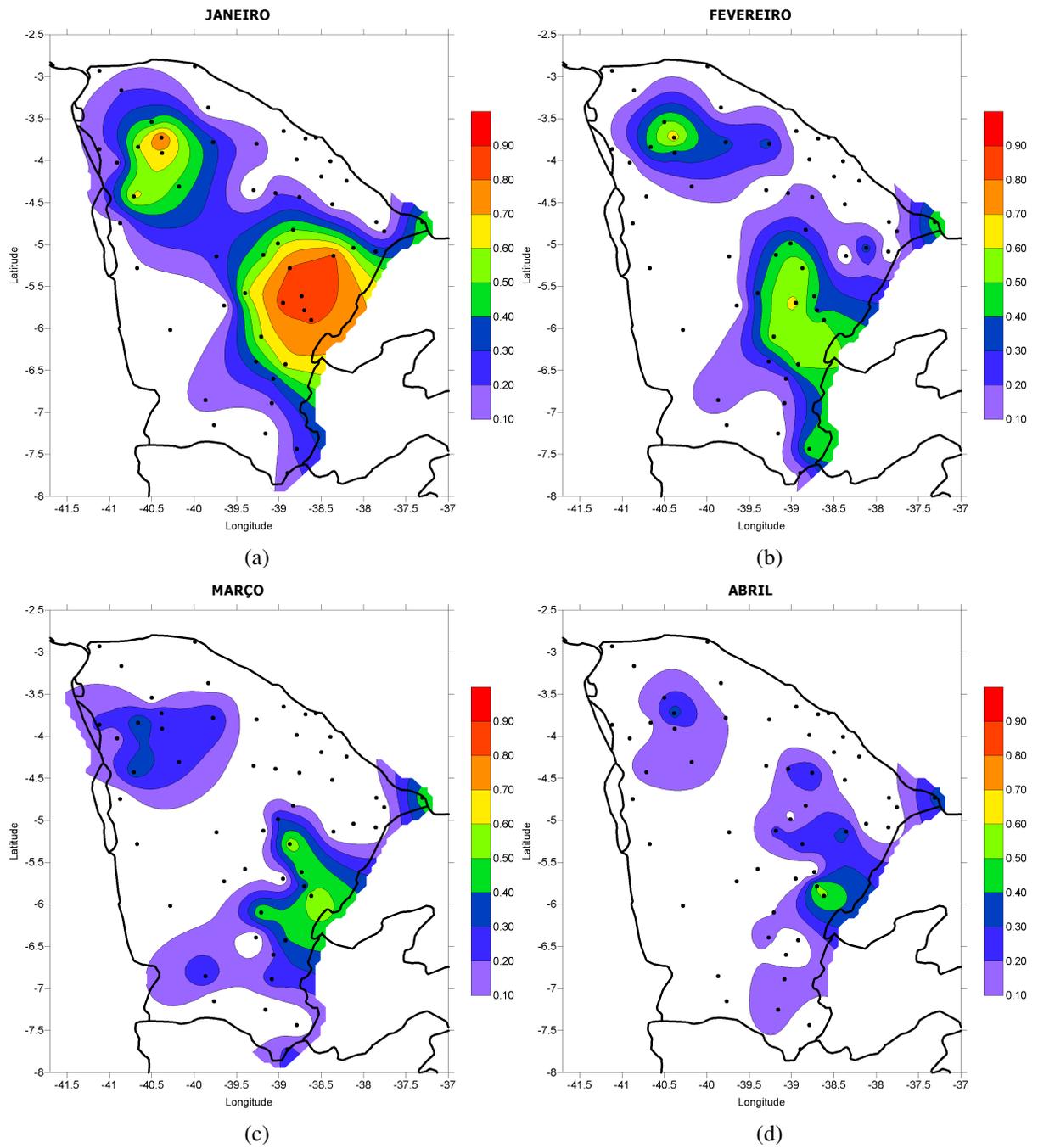


Figura 4.2: Mapas de frequência normalizada mensal da ocorrência do vento Aracati em todo o estado do Ceará, que indicam os percentuais de máxima intensidade da velocidade de vento entre 18h e meia-noite, superiores em relação as médias durante o dia, para os seguintes meses: a) janeiro; b) fevereiro; c) março; e d) abril.

Porém, fora das regiões ao longo do Jaguaribe, novamente podemos destacar a PCD instalada na cidade de Sobral, também com percentuais de maiores intensidades de velocidades de ventos no período noturno entre 60% e 70% dos dias considerados.

Na Fig. 4.2(c), representamos o mês de março, onde observamos que poucas PCDs registraram percentuais de ocorrência do Aracati acima de 50%, como é o caso de Jaguaribe e Banabuiú. Mas mesmo assim, outras PCDs possuem uma ocorrência entre 40% e 50%, como é o caso de Icapuí, no litoral leste do estado, e as cidades de Solonópole, Jaguaretama e Acopiara. Vale ressaltar que esta última PCD citada, assim como as demais, possuem proximidades com o Rio Jaguaribe.

Na Fig. 4.2(d), representamos o mês de abril, onde apenas duas PCDs se destacaram em relação às demais, com percentuais entre 50% a 60% dos dias estudados, sendo elas Solonópole, que se mantêm em relação ao mês de março, e Jaguaribe.

Na Fig. 4.3(a), representamos o mês de maio, onde muitas PCDs sequer apresentaram ocorrência do Aracati acima de 10%, com exceções de Jaguaruana, Itaiçaba, Castanhão, Sobral, dentre outras. Mas mesmo assim temos uma única PCD, instalada na cidade de Icapuí, com o maior percentual de ocorrência para esse mês, entre 30% e 40% dos dias estudado. Temos também que outras PCDs apresentam-se com percentuais abaixo de 30% de ocorrência, como é o caso das cidades de Jaguaribe, Icó, dentre outras.

Na Fig. 4.3(b), representamos o mês de junho, onde uma única PCD que se destaca com máxima ocorrência do Aracati em relação às demais, instalada na cidade de Icapuí, com percentuais entre 40% e 50%, ou seja, aproximadamente a metade dos dias desse mês com velocidade do vento superior durante a noite comparando-se com a média do dia.

Na Fig. 4.3(c), representamos o mês de julho, onde, ao longo do Rio Jaguaribe, apenas Jaguaretama apresenta ocorrência do vento Aracati entre 40% e 50% dos dias estudados. Observamos também que em Sobral, a ocorrência de máxima intensidade de velocidade do vento durante a noite possui percentuais entre 40% e 50% dos dias estudados. Mas, na maioria das PCDs ao longo do Rio Jaguaribe, os valores atingidos foram abaixo de 10% de frequência do Aracati.

Na Fig. 4.3(d), representamos o mês de agosto, onde destacamos a PCD instalada em Jaguaribe com ocorrência do Aracati entre 60% e 70% dos dias estudados para este mês. Esse mesmo percentual também foi atingido em Sobral. Mas, em relação ao mês de julho, em agosto já observamos uma maior ocorrência do Aracati em outras PCDs, como é o caso de Solonópole, Icapuí, e Jaguaretama, com ocorrências entre 50% a 60%, ou seja, mais da metade dos dias do

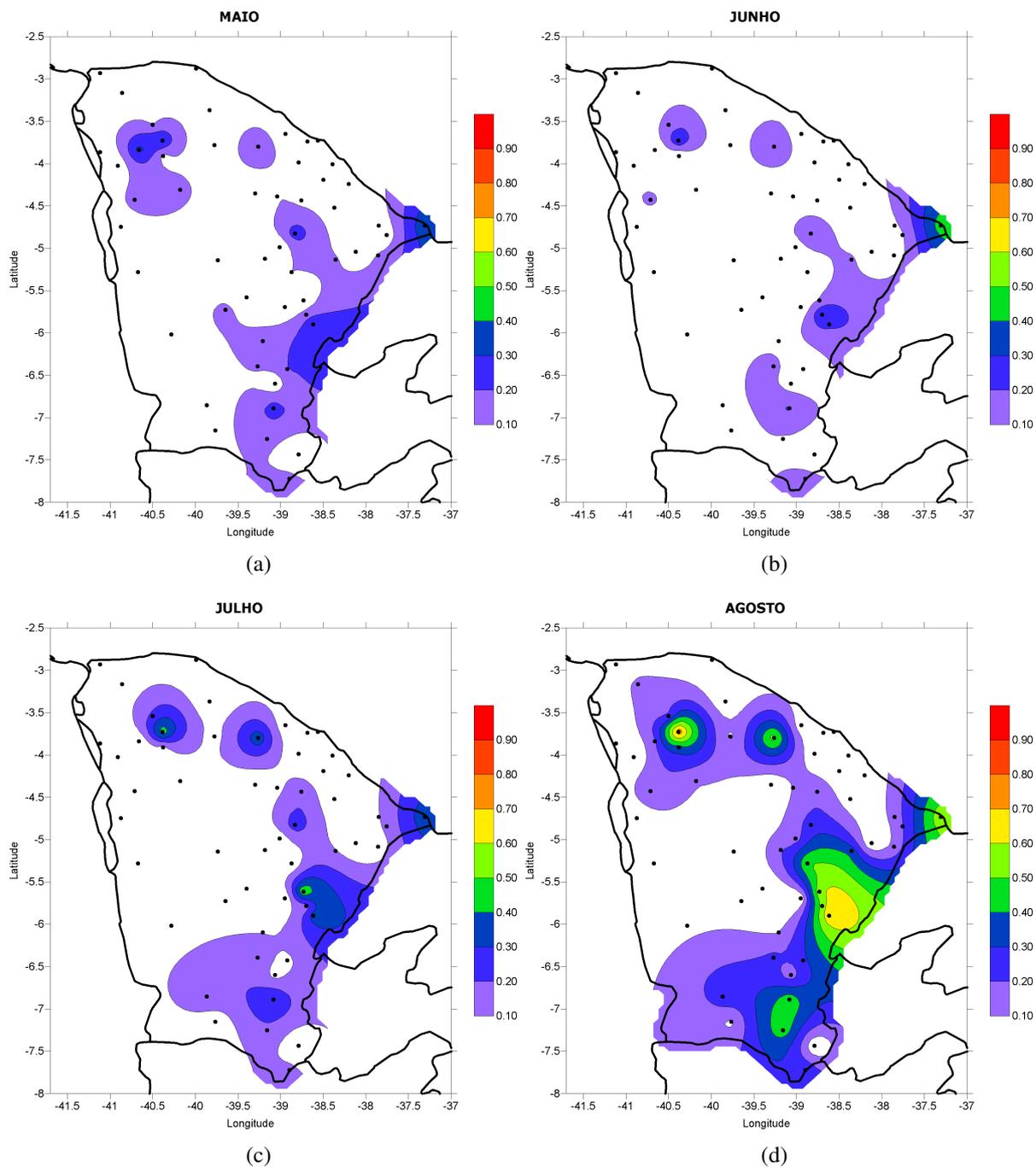


Figura 4.3: Mapas de frequência normalizada mensal da ocorrência do Aracati em todo o Ceará, que indicam os percentuais de máxima intensidade da velocidade de vento entre 18h e meia-noite, superiores em relação as médias durante o dia, para os seguintes meses: a) maio; b) junho; c) julho; e d) agosto.

mês de agosto.

Na Fig. 4.4(a), representamos o mês de setembro, onde primeiramente observamos que houve uma frequência de ocorrência do Aracati acima de 90% nas cidades de Jaguaribe, Jaguaretama, Banabuiú. Além disso, com os mesmos percentuais, ou seja, acima de 90%, temos que também destacar a PCD instalada em Sobral, embora já temos alertado da não proximidade com o Rio Jaguaribe. Depois disso, observamos que a PCD instalada em Icapuí, possui percentuais de ocorrência do Aracati entre 40% e 50% dos dias estudados.

Na Fig. 4.4(b), representamos o mês de outubro, em que os resultados da verificação de ocorrência do Aracati nas PCDs, ao longo do Rio Jaguaribe, tiveram um aumento significativo em relação aos meses até aqui mencionados. Então, temos no total 5 PCDs (Jaguaribe, Solonópole, Jaguaretama, Banabuiú, e Acopiara), as quais chegam a um percentual de ocorrência acima de 90% dos dias considerados. Outras PCDs (Sobral, Boa Viagem, e Crateús), que não possuem proximidades com o Rio Jaguaribe, apresentaram percentuais de máxima intensidade de velocidade do vento durante a noite acima de 90% dos dias considerados.

Na Fig. 4.4(c), representamos o mês de novembro, onde temos 6 PCDs (Acopiara, Castanhão, Solonópole, Banabuiú, Jaguaribe, e Jaguaretama) com percentual de ocorrência do vento Aracati acima de 90% dos dias estudados para esse mês. Também verificamos a existência de duas PCDs (Icó e Iguatu) com ocorrência do Aracati com percentuais entre 70% e 80%. Vale ressaltar que essas duas últimas cidades, até então, não havíamos observado ocorrência superior a 50% dos dias analisados nos últimos meses. Temos que destacar ainda a PCD de Sobral, com percentuais acima de 90% de verificação da intensidade máxima de velocidade do vento durante a noite.

Finalmente, na Fig. 4.4(d), representamos o mês de dezembro, em que verificamos uma grande quantidade de ocorrência do vento Aracati, com 6 PCD's (Banabuiú, Morada Nova, Icó, Jaguaretama, Jaguaribe, e Solonópole), todas com frequência acima de 90% dos dias para esse mês. A PCD de Sobral se manteve com o mesmo percentual em relação ao mês passado, mas agora adicionado da PCD de Ipú, que também não possui proximidade com o Rio Jaguaribe.

Fazendo um balanço de todos os meses analisados, verificamos que, em nossa análise estatística descritiva, as maiores ocorrências do vento Aracati são percebidas nos meses de setembro, outubro, novembro, dezembro e janeiro, conforme critérios que estabelecemos como ocorrência do Aracati, novamente, uma intensidade máxima de velocidade do vento entre 18:00h e meia-noite, horário local, isso ocorrendo para as regiões com proximidade ao Rio Jaguaribe e seus afluentes. Porém, no caso de outras regiões fora do Rio Jaguaribe, que possuem uma

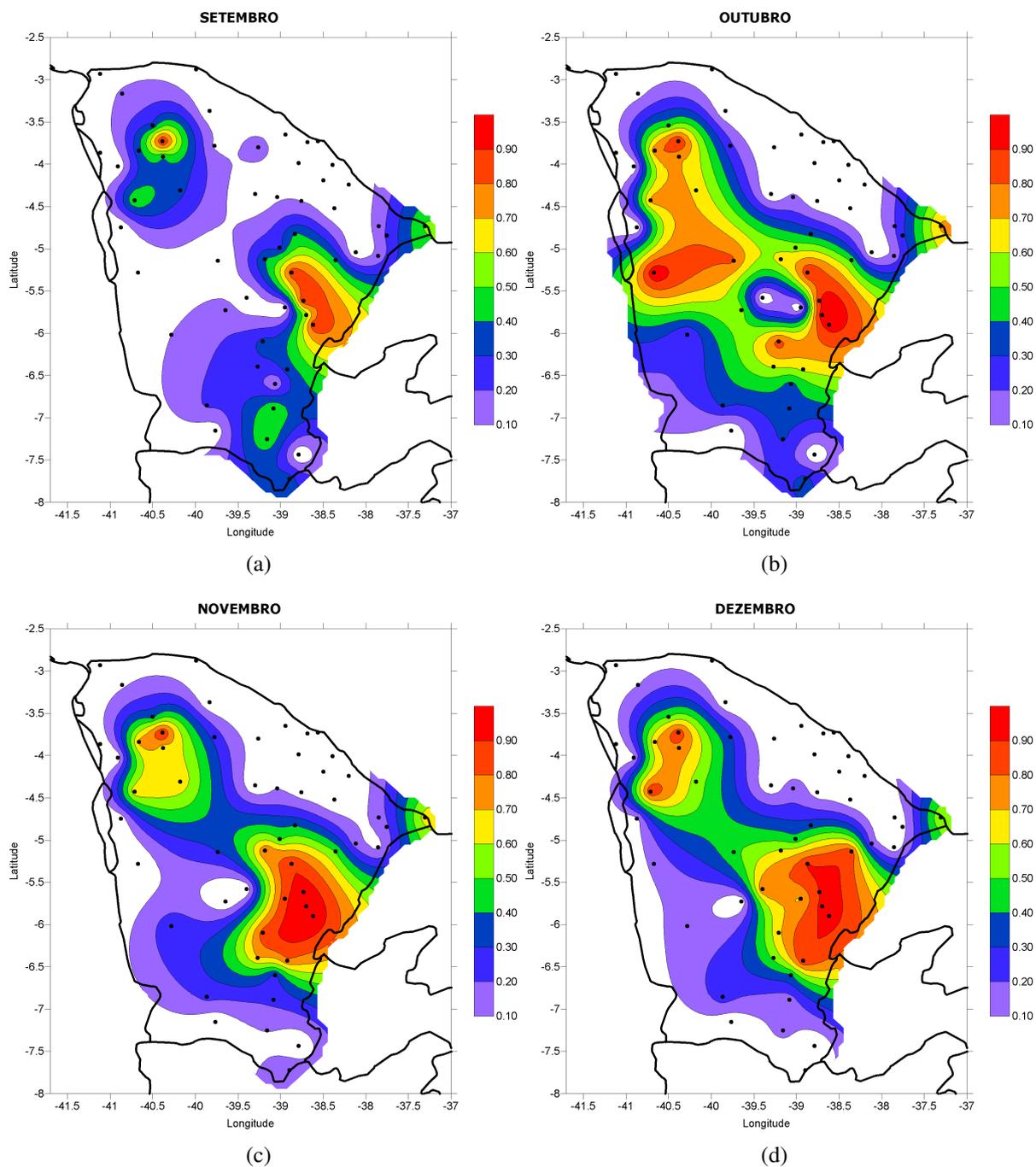


Figura 4.4: Mapas de frequência normalizada mensal da ocorrência do vento Aracati em todo o estado do Ceará, que indicam os percentuais de máxima intensidade da velocidade de vento entre 18h e meia-noite, superiores em relação as médias durante o dia, para os seguintes meses: a) setembro; b) outubro; c) novembro; e d) dezembro.

intensidade máxima de velocidade de vento no período noturno, podemos destacar a PCD instalada em Sobral, na qual verificamos fenômeno semelhante ao Aracati nos meses de agosto, setembro, outubro, novembro, dezembro e janeiro.

Na Fig. 4.5, temos o mapa de frequência normalizada anual, que nos dá uma visão geral da ocorrência do vento Aracati em todas as PCDs do Ceará, durante todo o período estudado.

A partir dela, reafirmamos que as maiores ocorrências do Aracati estão em regiões ao longo do Rio Jaguaribe e seus afluentes, onde se destacam as PCDs de Castanhão e Jaguaratama, com mais de 70% dos dias do ano com Aracati, Banabuiú e Jaguaribe, com porcentagens entre 60% e 70% de ocorrência, além de Solonópole e Senador Pompeu, com mais da metade, ou seja, 50% de dias com Aracati no ano.

Novamente, percebemos que a região de Sobral, a qual é banhada pelo Rio Acaraú, apresenta também uma grande ocorrência de uma máxima intensidade do vento no período noturno, fenômeno esse semelhante ao do vento Aracati. Já havíamos comentado esse comportamento no Cap. 3, quando apresentamos o estudo da máxima intensidade da velocidade do vento para o estado do Ceará.

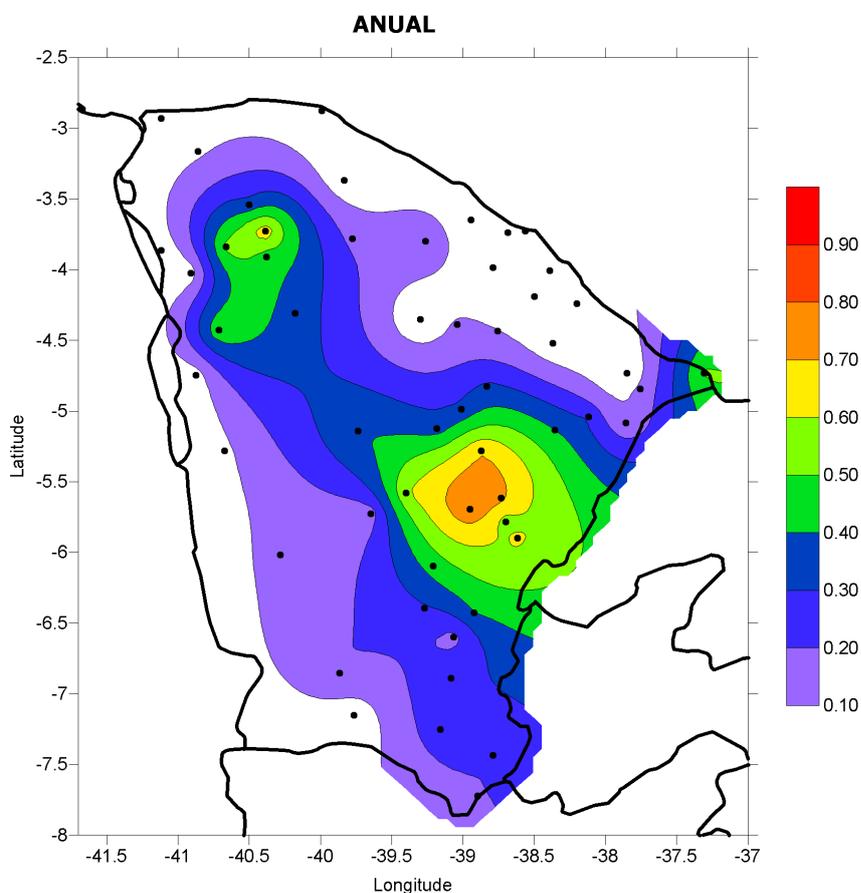


Figura 4.5: Mapa de frequência normalizada anual da ocorrência do vento Aracati em todo o estado do Ceará.

Para verificarmos se existe um mês com maior ocorrência do Aracati no Ceará, escolhemos quatro PCDs que se destacam em relação às demais, todas possuindo proximidade com o Rio Jaguaribe e seus afluentes, e elaboramos os gráficos de ocorrências mensais do Aracati, que pode ser visto na Fig. 4.6. Nela, verificamos que, como afirmamos anteriormente, todas apresentam os meses de agosto a janeiro como os de maior ocorrência do vento Aracati, sem que, no entanto, haja um mês preferencial com o máximo de ocorrências do Aracati.

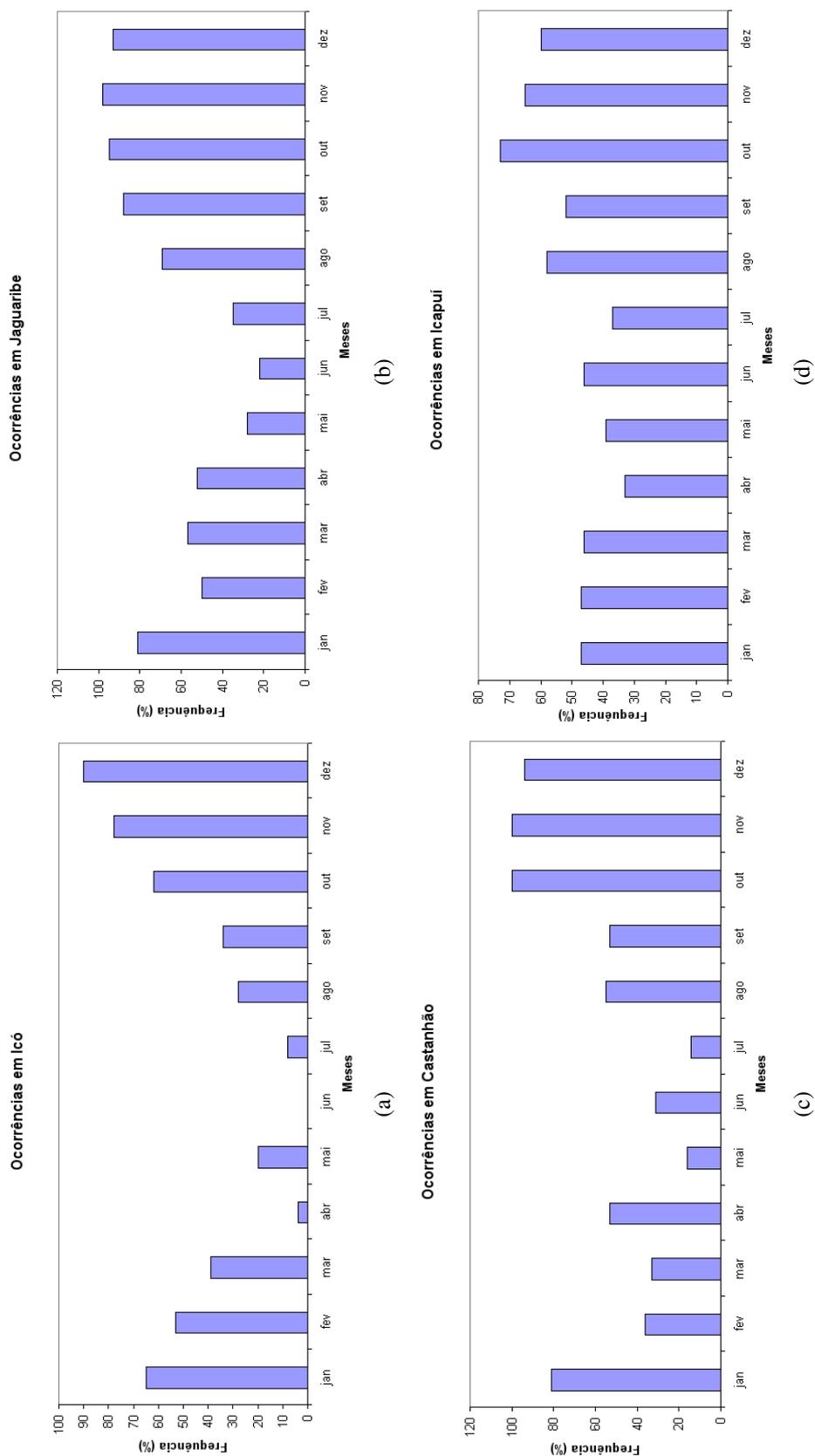


Figura 4.6: Ocorrências mensais do vento Aracati para as seguintes PCDs: a) Icó, b) Jaguaribe, c) Castanhão e d) Icapuí.

5 *Validação do Modelo*

5.1 Introdução

Nesse capítulo, faremos uma comparação dos dados da simulação numérica do modelo RAMS, com os dados de observação.

Diversas são as formas de comparação de modelos numéricos atmosféricos de mesoescala com dados observacionais. Dentre as formas de comparação que podemos encontrar na literatura, temos abaixo:

- Análise estatística de erros através de cálculos de desvio padrão, erro quadrático médio, e erro quadrático médio descontado de erro sistemático (ou do inglês, *bias*);
- Utilização de imagens de satélites na região foco da simulação;
- Comparação direta entre os dados da simulação numérica computacional com os dados das estações meteorológicas, instaladas nos locais onde as grades do modelo atmosférico estão inseridas; e
- Correlação estatística entre os dados obtidos na simulação numérica com os dados observacionais.

5.2 Materiais e Métodos

A comparação da simulação no modelo RAMS será feita utilizando os dados das PCDs da FUNCEME que possuem proximidade com o Rio Jaguaribe. Faremos isso, em virtude de termos encontrado no Cap. 7, uma região de máxima intensidade de velocidade de vento ao nível de 10 m de altura, que, como já dissemos, possui características que podem ser atribuídas ao vento Aracati, começando aproximadamente às 15:00h, horário local, nas proximidades do litoral leste do estado do Ceará, em quase todos os dias do mês de novembro de 2005, que

diminui de intensidade aproximadamente às 21:00h do mesmo dia, seguindo a trajetória do Rio Jaguaribe e seus afluentes.

Outro motivo, conforme vimos no Cap. 4, em que efetuamos uma análise estatística de velocidade de vento a 10 m de altura, a maioria das regiões onde acontecem as maiores ocorrências do vento Aracati são aquelas próximas do Rio Jaguaribe e seus afluentes.

Desta forma, as PCDs comparadas serão: Icapuí, Jaguaruana, Quixeré, Russas, Icó, e Iguatu. Todas elas estão destacadas na (Fig. 5.1) em formato de bolinha preta, ao passo que as que estão em forma de bolinha vermelha representam as outras PCDs, que também pertencem a FUNCEME. Nela também temos a representação do Rio Jaguaribe, juntamente com seus afluentes, pela linha azul.

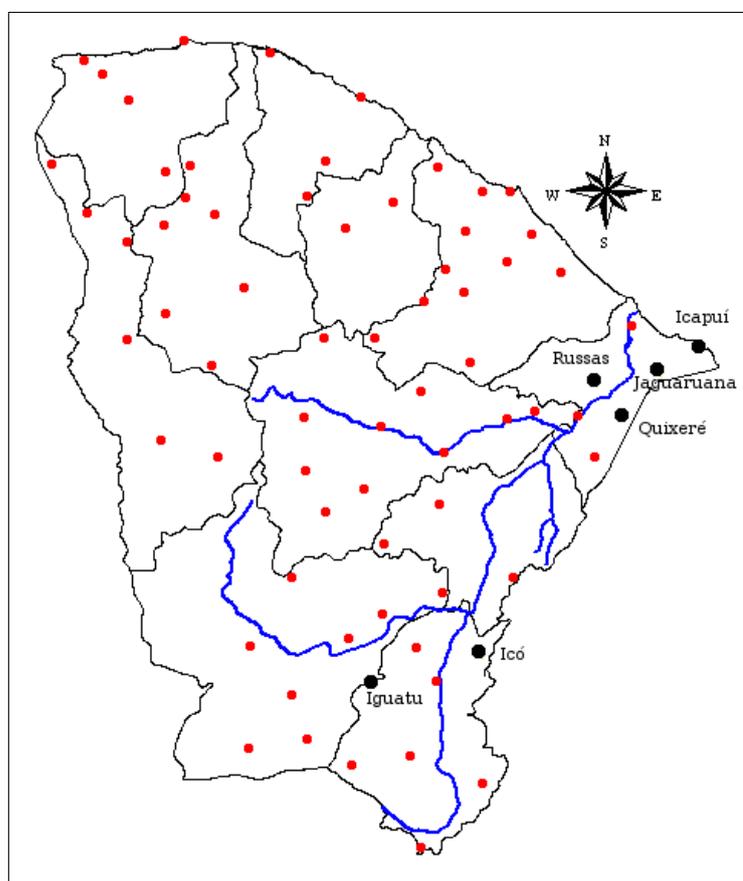


Figura 5.1: Mapa do Ceará, com as Plataformas de coleta de dados ao longo do estado, com destaque para as de Icapuí, Jaguaruana, Quixeré, Russas, Icó, e Iguatu em forma de bolinha na cor preta. Já as bolinhas na cor vermelha representam outras PCDs do estado e a linha em azul representa o Rio Jaguaribe e seus afluentes.

Através dos dados fornecidos pelo modelo RAMS, faremos uma correção estatística com o objetivo de sabermos se é possível aproximar os dados simulados com os observados. Nessa correção, utilizaremos as médias e os desvios-padrões do modelado e observado. Uma discus-

são mais aprofundada desta técnica pode ser encontrada no Apêndice A.3.

Faremos também uma correlação estatística através dos dados obtidos na modelagem numérica do vento Aracati, com os dados das PCDs citadas acima. Nessa correlação, visaremos saber o grau de dependência entre as duas variáveis. Descrevemos esse método estatístico com maiores detalhes no Apêndice A.4.

Através da Tab. 5.1, podemos verificar a localização geográfica das PCDs, que foram utilizadas na nossa estatística. Já na Tab. 5.2, temos os pontos de grade do modelo RAMS mais próximos dessas PCDs.

Tabela 5.1: Coordenadas das Plataformas de Coletas de Dados para Icapuí, Jaguaruana, Quixeré, Russas, Icó, e Iguatu.

Cidades	Latitude	Longitude
Icapuí	S04,7322°	W037,306°
Jaguaruana	S04,8447°	W037,757°
Quixeré	S05,0839°	W037,857°
Russas	S05,0417°	W038,119°
Icó	S06,4272°	W038,923°
Iguatu	S06,3958°	W039,271°

Tabela 5.2: Pontos de grade do modelo atmosférico de mesoescala RAMS mais próximo das PCDs, para Icapuí, Jaguaruana, Quixeré, Russas, Icó, e Iguatu.

Cidades	Latitude	Longitude
Icapuí	S04,7082°	W037,324°
Jaguaruana	S04,8882°	W037,774°
Quixeré	S05,0682°	W037,864°
Russas	S05,0682°	W038,134°
Icó	S06,4181°	W038,944°
Iguatu	S06,4181°	W039,304°

Finalmente, outra forma de comparação numérica que faremos nesse capítulo será a proposta por Pielke (2002), que consiste em sabermos de que forma os dados da simulação no RAMS estão de acordo com os dados obtidos nas PCDs. Utilizando elementos estatísticos definidos como erro quadrático médio, E , erro quadrático médio descontado do *bias*, E_{UB} , desvio padrão para os dados simulados, σ , e desvio padrão para os dados observados, σ_{obs} . No Apêndice A.2, descrevemos com maiores detalhes esses parâmetros estatísticos.

O período utilizado para todas as comparações citadas até aqui serão semelhantes, e cor-

responde a horário local, tanto para os dados de modelagem, bem como para os de observação. Começamos, então, às 00:00h do dia 01/11/2005 e iremos até às 23:00h do dia 27/11/2005, onde, nesse intervalo de tempo, todos os dados são válidos, tanto para a modelagem como também para a observação.

5.3 Resultados

5.3.1 Comparação dos Dados Simulados com Observados

Nas Figs. 5.2 e 5.3, representamos as comparações entre os dados observados das PCDs e os dados da simulação com o RAMS, sem correção estatística. Nelas, podemos identificar uma boa relação entre a simulação e os dados coletados, principalmente no caso das PCDs localizadas nos município de Russas, Quixeré e Jaguaruana, na medida em que o ciclo diário é bem simulado, seus máximos e mínimos se assemelham e os horários em que ocorrem são próximos entre si.

5.3.2 Correção Estatística dos Dados Simulados comparados com os Observados

No tocante à correção estatística, nas Figs. 5.4 e 5.5, podemos verificar que, no caso da comparação com os dados observados das PCDs instaladas em Icapuí, Jaguaruana e Quixeré, com os dados da simulação no RAMS, foi possível obtermos uma maior aproximação entre os resultados dessa correção com os dados observados, tendo em vista que os dados corrigidos nos forneceram novos valores para a simulação, como ilustrado nas Figs. 5.4(a), 5.4(b) e 5.4(c).

Apesar das PCDs de Icapuí, Jaguaruana e Quixeré apresentarem melhores resultados quando corrigidos, não podemos desprezar as outras, representadas nas Figs. 5.5(a), 5.5(b) e 5.5(c), isto porque a comparação não está muito distante do que verificamos nas Figs. 5.3(a), 5.3(b) e 5.3(c).

5.3.3 Correlação Estatística das Séries Simuladas e Observadas

A correlações estatísticas mostradas nos gráficos da Fig. 5.6, foram realizadas através das séries simuladas no modelo RAMS (variável “speed10m”) e observadas (velocidade ao nível de 10 m de altura) das PCDs.

Abaixo temos a listagem dos resultados do coeficiente de correlação para cada uma das PCDs estudadas:

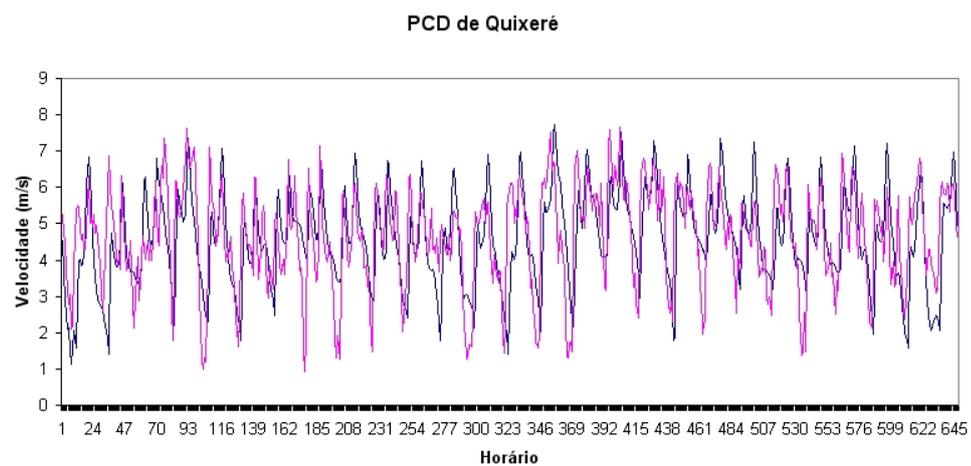
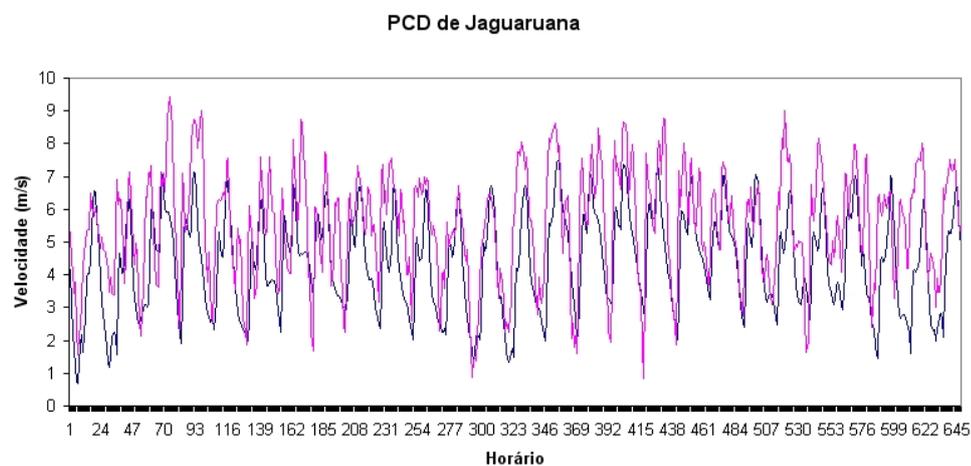
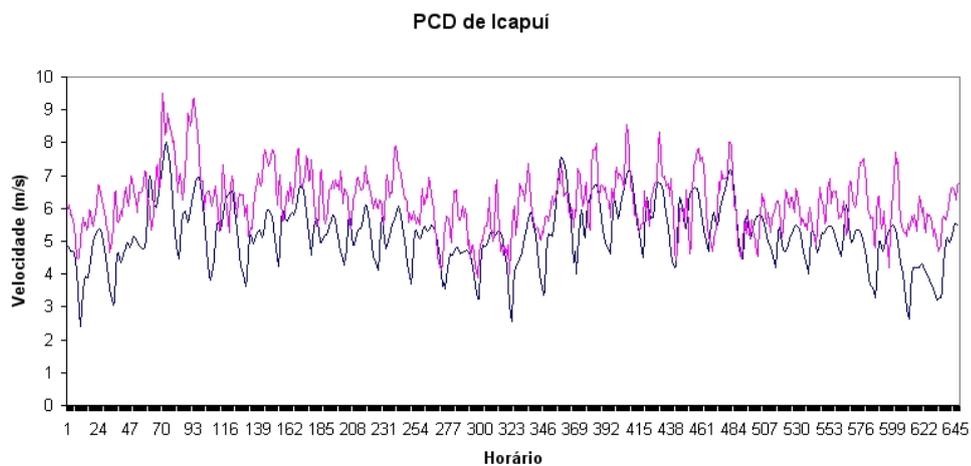


Figura 5.2: Comparação da velocidade de vento a 10 m de altura (em m/s), dos dias 01 a 27 de novembro de 2005, a partir dos dados observados (linha magenta) com a simulação no RAMS (linha preta), para os municípios de, a) Icapuí, b) Jaguaruana e c) Quixeré, todas para a grade 2.

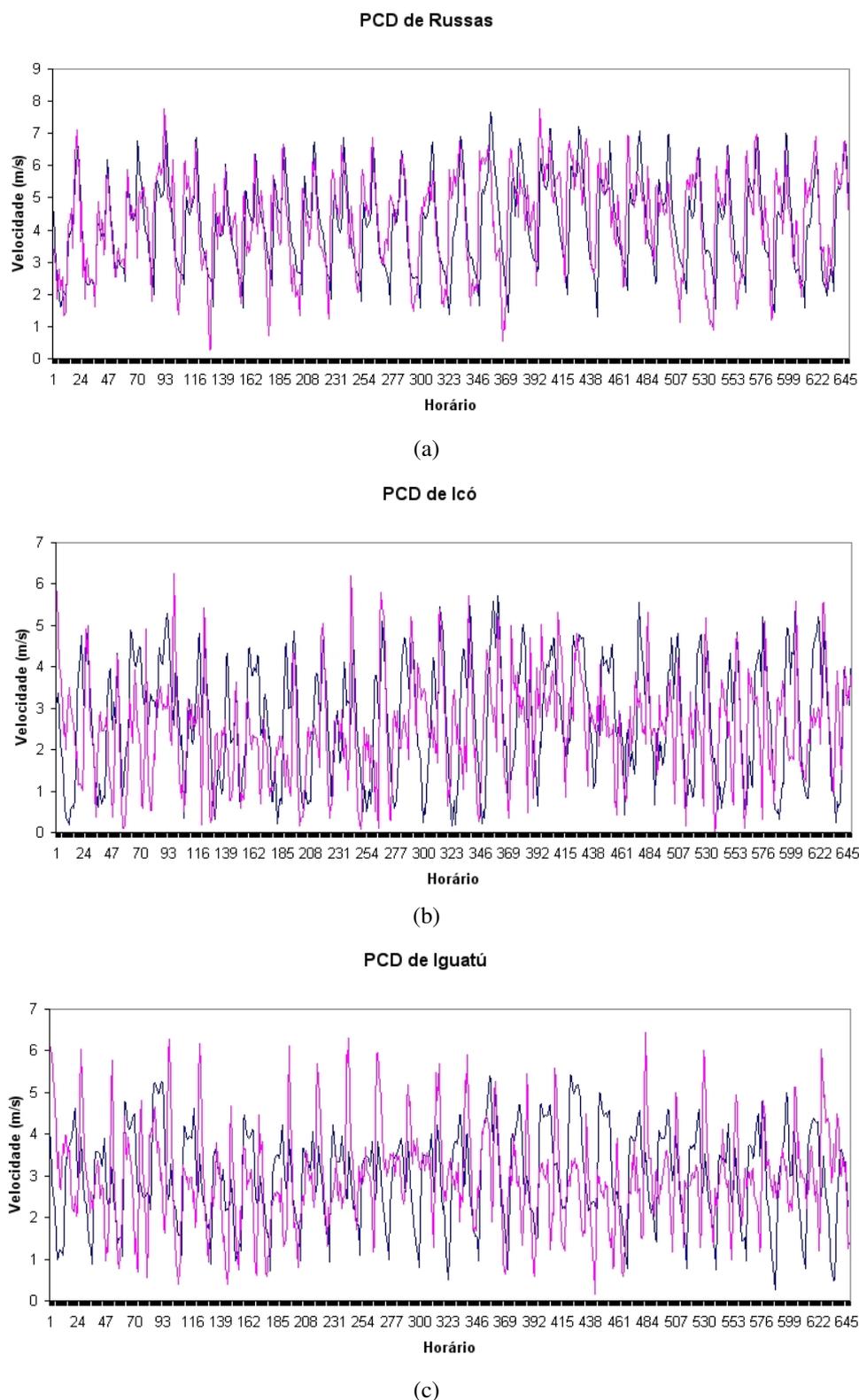


Figura 5.3: Comparação da velocidade de vento a 10 m de altura, dos dias 01 a 27 de novembro de 2005, a partir dos dados observados (linha magenta) com a simulação no RAMS (linha preta), para as PCDs instaladas nos municípios de, a) Russas, b) Icó e c) Iguatu, todas para a grade 2.

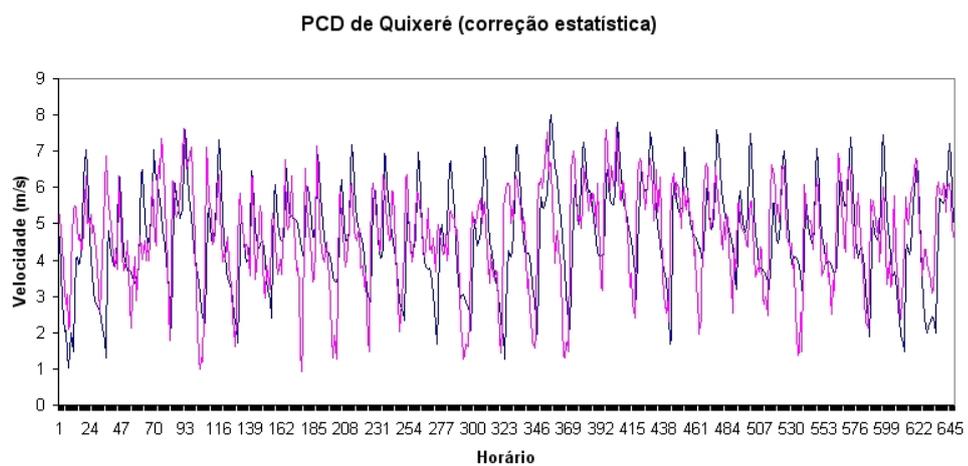
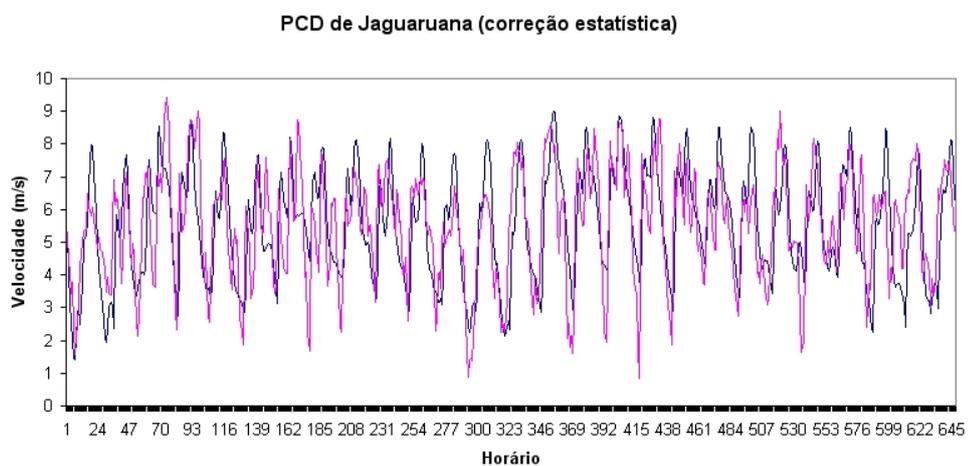
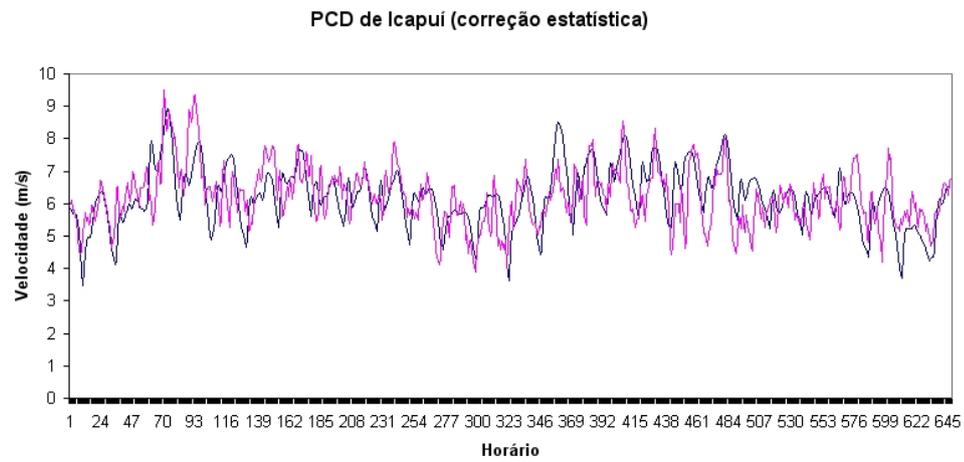


Figura 5.4: Correção estatística da velocidade de vento a 10 m de altura, a partir dos dados da simulação (linha preta), dos dias 01 a 27 de novembro de 2005, comparada com os dados observados (linha magenta), para os municípios de, a) Icapuí, b) Jaguaruana e c) Quixeré, todas para a grade 2.

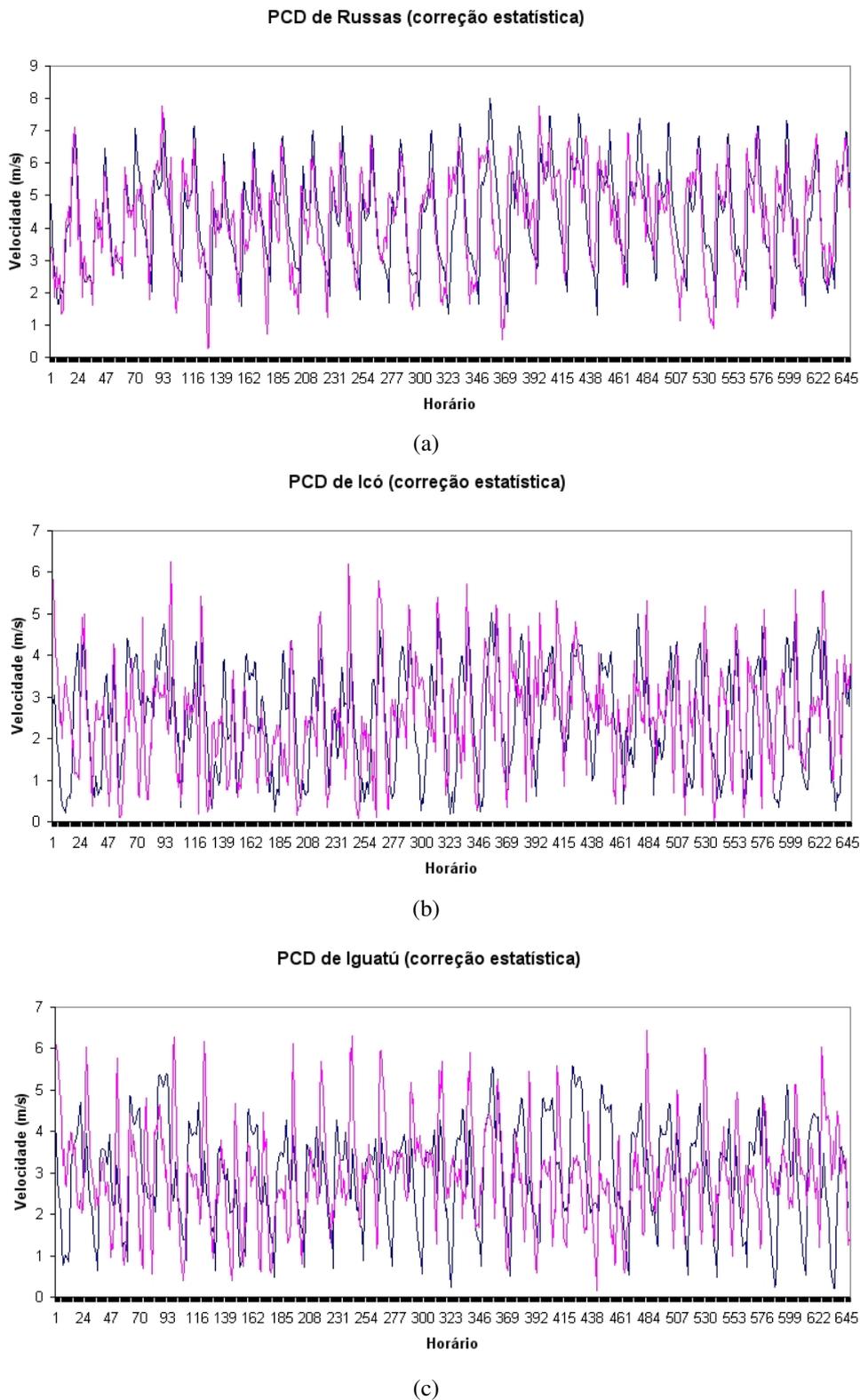


Figura 5.5: Correção estatística da velocidade de vento a 10 m de altura, a partir dos dados da simulação (linha preta), dos dias 01 a 27 de novembro de 2005, comparada com os dados observados (linha magenta), para os municípios de, a) Russas, b) Icó e c) Iguatú, todas para a grade 2.

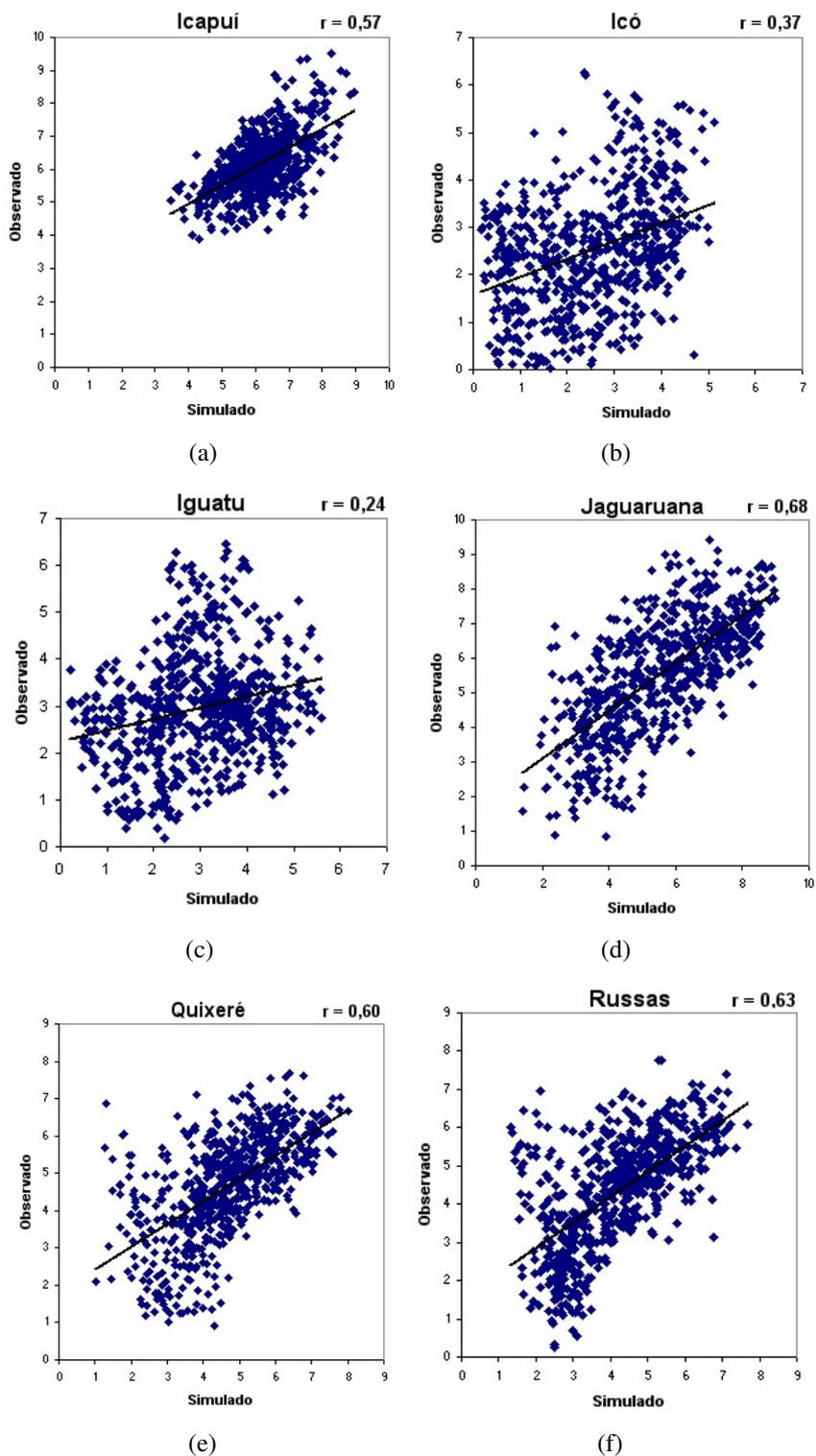


Figura 5.6: Correlação estatística de velocidade de vento a 10 m de altura, entre os dados fornecidos pelo modelo RAMS e os dados de observação. O período analisado vai de 01 a 27 de novembro de 2005, para as seguintes PCDs: a) Icapuí, b) Icó, c) Iguatu, d) Jaguaruana, e) Quixeré e f) Russas.

- **Icó:** $r = 0,37$, o que indica uma fraca correlação;
- **Icapuí:** $r = 0,57$, indicando uma correlação moderada;
- **Jaguaruana:** $r = 0,68$, correlação moderada;
- **Quixeré:** $r = 0,60$, correlação moderada;
- **Russas:** $r = 0,63$, correlação moderada; e
- **Iguatu:** $r = 0,24$, correlação fraca.

5.3.4 Avaliação Numérica de Erros para as Séries Simuladas e Observadas

Os resultados da comparação proposta por Pielke (2002) estão listados na Tab. 5.3, onde analisamos os resultados para a grade 2. Os critérios para que tenhamos uma boa simulação estabelecem que: 1) $\sigma \simeq \sigma_{obs}$; 2) $E < \sigma_{obs}$; e 3) $E_{UB} < \sigma_{obs}$.

Quando afirmamos que a condição (1) acima deve ser satisfeita para que a simulação seja válida, devemos levar em conta a ordem de grandeza da variável estudada, nesse caso a velocidade do vento. Por esse motivo, incluímos nessa tabela o valor médio das velocidades observadas nas PCDs, $\overline{v_{obs}}$, para o período proposto na comparação.

Tabela 5.3: Validação da simulação da grade 2 do modelo com a velocidade de vento a 10 m de altura das PCDs, para o período de 01 a 27 de novembro de 2005, para os municípios de Icapuí, Jaguaruana, Quixeré, Russas, Icó, e Iguatu.

Cidades/Variáveis	E (m/s)	E_{UB} (m/s)	σ (m/s)	σ_{obs} (m/s)	$\overline{v_{obs}}$ (m/s)
Icapuí	1,201	0,001	0,823	0,838	6,205
Jaguaruana	1,691	0,008	1,607	1,716	5,504
Quixeré	1,331	0,053	1,328	1,369	4,638
Russas	1,245	0,051	1,421	1,437	4,424
Icó	1,584	0,134	1,480	1,388	2,501
Iguatu	1,344	0,137	0,985	1,078	2,952

Dessa forma, na Tab. 5.3, é possível identificarmos que, nas cidades de Icapuí e Quixeré os desvios padrões nos casos simulados e observados se assemelham muito e a diferença relativa entre ambos não chega a 1%, dado o valor de $\overline{v_{obs}}$ para cada uma delas. As outras localidades, no entanto, não deixam de satisfazer a condição (1) de validação para a simulação, pois as diferenças relativas entre σ e σ_{obs} , para cada uma delas, não ultrapassa 5% do valor de $\overline{v_{obs}}$. Isto nos mostra que a condição (1) é satisfeita para todas as cidades avaliadas no período.

Ainda na Tab. 5.3, temos que, somente nas PCDs de Jaguaruana, Quixeré e Russas, o valor de E é menor do que o σ_{obs} . Isso quer dizer que a condição (2) só é satisfeita para as cidades destacadas acima, ficando de fora dessa última condição as localidades de Icapuí, Icó e Iguatu.

Por último, podemos verificar que, para todas as PCDs, o E_{UB} é menor do que σ_{obs} . Isso nos mostra que a condição (3) é satisfeita para todas as localidades avaliadas no período, mostrando que a correção de *bias* produz bons resultados.

6 *Formalismo de Modelagem Atmosférica de Mesoescala*

6.1 Introdução

Nesta seção iremos apresentar brevemente o formalismo da modelagem atmosférica em escala regional, ou de mesoescala, enfatizando as principais equações utilizadas, os sistemas de coordenadas e as parametrizações físicas. Nosso intuito é o de descrever todos os parâmetros envolvidos na compreensão da dinâmica e da termodinâmica da atmosfera a partir de modelos numéricos computacionais. Uma discussão mais aprofundada foge do escopo deste trabalho e pode ser facilmente encontrada em diversos livros-textos (PIELKE, 2002; HOLTON, 2004).

6.2 Equações Básicas

Em modelagem atmosférica, diversas são as equações que visam representar a dinâmica e a termodinâmica da nossa região de estudo. Elas são fundamentais para a compreensão dos processos físicos que ocorrem na natureza, e são regidas por leis de conservação de massa, *momentum*, energia, água, dentre outras. Como as soluções de algumas dessas equações não são analíticas, é necessária a utilização de programas computacionais de modelagem numérica, para que possamos, através desses cálculos, diagnosticar os fenômenos atmosféricos de uma determinada região.

Nas seções a seguir, temos a descrição de algumas dessas equações utilizadas em modelagens atmosféricas, cujos símbolos nelas contidos estão descritos na Lista de Símbolos, no começo desta dissertação.

6.2.1 Conservação do *Momentum*

A lei de conservação do *momentum* pode ser obtida através da aplicação da segunda lei de Newton a um fluido compressível, somando todas as forças por unidade de massa.

Como a terra não é um referencial inercial, forças fictícias aparecerão, como por exemplo, a força centrífuga, que é desprezível em relação ao termo gravitacional, podendo ser desprezada, e a força de Coriolis aparecendo como um termo à parte, de grande importância na dinâmica da atmosfera, especialmente em latitudes mais altas.

Então, as equações que representam a conservação do *momentum*, em coordenadas cartesianas, são dadas por

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = fv - \hat{f}w - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (6.1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -fu - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y}, \quad (6.2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = \hat{f}u - g - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z}, \quad (6.3)$$

onde $f = 2\Omega \sin \phi$, $\hat{f} = 2\Omega \cos \phi$, além de termos desprezados os termos da força viscosa.

6.2.2 Conservação da Massa

A lei de conservação da massa também chamada de equação da continuidade, e, quando aplicada à atmosfera, pode ser representada em forma de fluxos, ou seja,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \Rightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} + w \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0. \quad (6.4)$$

6.2.3 Conservação da Energia

Existem muitas formas de representarmos a conservação da energia em modelos atmosféricos. Uma delas é escrever em termos da conservação da temperatura potencial, θ ,

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \theta = 0, \quad (6.5)$$

onde

$$\theta = T \left(\frac{p_0}{p} \right)^k, \quad (6.6)$$

com $p_0 = 1000$ hPa.

6.2.4 Conservação da Água e Outras Substâncias

A Conservação da Água pode se dar em diversas categorias, como por exemplo, o vapor, água de nuvem, água de chuva, cristais de gelo, neve ou agregados, graupel, granizo, e entre outras categorias. Então a taxa de variação, da razão de mistura de uma dada categoria pode ser representada como,

$$\frac{\partial(\rho q_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} q_i) = \rho S_i. \quad (6.7)$$

6.2.5 Lei do Gás Ideal

A atmosfera pode ser tratada, com uma boa aproximação, como sendo um gás ideal. Portanto, a relação entre a pressão, volume e temperatura é dada por

$$p = \rho R' T. \quad (6.8)$$

Todas as equações acima, não estão em sua forma completa. Mas para um maior detalhamento das mesmas, poderá ser obtido em livros de Ciências Atmosféricas (HOLTON, 2004; PIELKE, 2002).

6.3 Modelos Atmosféricos

Todo modelo atmosférico visa fazer uma representação da realidade. Os modelos numéricos atmosféricos apresentam as soluções das equações do fluido atmosférico através de aproximações, pelo motivo das mesmas, de uma forma geral, não possuem soluções analíticas.

A seguir, temos algumas categorias de modelos atmosféricos:

- **Modelos Globais:** Têm como objetivo descrever movimentos atmosféricos em grande escala, ou seja, sobre o planeta como um todo. Também são conhecidos como Modelos de Circulação Geral; e
- **Modelos de Mesoescala:** Possuem espaçamento de grade reduzida em relação aos modelos globais, o que faz com que representem fenômenos típicos de mesoescala, que vão desde centenas de metros a dezenas de quilômetros de extensão. Esses modelos geralmente são aplicados a estudos ou previsões de tempo em escala regional ou local. Os modelos de mesoescala são capazes de permitir a representação de fenômenos que dificilmente são simulados em modelos globais, como a circulação local, a influência da

topografia, dentre outros. Os modelos de mesoescala utilizam resolução em torno de algumas dezenas de quilômetros, ou seja, sua resolução é maior em comparação com os globais.

6.4 Discretização no Espaço e no Tempo

Todas as equações de um fluido atmosférico são escritas para um meio contínuo, ou seja, cujas grandezas podem assumir infinitos valores. Mas o contínuo não pode ser representado em um computador, cuja natureza é discreta e os recursos são necessariamente limitados. Então, o que o computador resolve são aproximações discretas destas equações, resolução esta que é feita em uma grade de pontos discretos.

A distância entre dois pontos adjacentes de uma grade é chamada de espaçamento de grade e é uma medida da capacidade de resolução espacial do modelo, de forma que, quanto mais fina a grade, melhor é a sua resolução.

Alguns procedimentos podem ser utilizados para aumentar localmente a resolução de um modelo atmosférico, como por exemplo, o chamado aninhamento de grades. Essa técnica consiste em colocar uma grade de maior resolução e menor área dentro de uma grade de maior área.

Os modelos numéricos além de serem discretos no espaço, são discretos no tempo. O intervalo discreto no tempo em que os modelos recalculam as variáveis corresponde a uma interação, que chamamos de passo de tempo. Um passo de tempo menor oferece uma melhor resolução temporal.

No entanto, a escolha do espaçamento de grade está fortemente relacionada com a do passo de tempo, de forma a manter a estabilidade numérica do modelo. Essa escolha leva em conta a condição de Courant-Friedrich-Lewy, ou simplesmente CFL. Ela implica que o número de Courant, C , seja menor ou igual a 1 para que o modelo seja considerado estável. O número de Courant é definido como

$$C = v \frac{\Delta t}{\Delta x}, \quad (6.9)$$

v é a maior velocidade característica do problema simulado, Δt representa o passo de tempo do modelo, e Δx o espaçamento de grade do modelo.

Além disso, o espaço limitado de memória impede o uso de um número muito grande de pontos de grade, assim como de um número excessivo de passos de tempo, além de acarretar um aumento excessivo no processamento computacional.

6.5 Sistemas de Coordenadas

Em modelagem Atmosférica, o uso de coordenadas não-cartesianas é muito comum tanto na horizontal quanto na vertical, como é o caso de modelos globais que usam coordenadas esféricas.

Já os modelos de mesoescala podem utilizar coordenadas cartesianas na horizontal, principalmente quando temos uma única área coberta pelo domínio computacional.

O uso da coordenada horizontal polar estereográfica em um modelo é muito comum. Essa projeção leva em conta as diferenças entre o plano da grade e a superfície da esfera, tendo em vista que o domínio de um modelo de mesoescala é extenso. A deformação associada à representação da esfera sobre a grade do modelo pode ser dada pelo fator de escala de projeção, m , que é definido como

$$m = \frac{D_p}{D_r}, \quad (6.10)$$

onde D_p é a distância projetada na grade do modelo, e D_r é distância real sobre a superfície terrestre.

Em diversas simulações, quando a topografia da região é envolvida, temos que utilizar coordenadas verticais. Fazemos isso em virtude das coordenadas cartesianas não serem adequadas para algumas aplicações em escala regional. Dessa forma, os sistemas de coordenadas verticais mais utilizados são:

- **Isobáricas:** Utiliza a representação de categorias em níveis de pressão atmosférica;
- **Isentrópicas:** Utiliza a representação de categorias em níveis de temperatura potencial, que é definida como sendo a temperatura que uma parcela de ar teria se fosse trazida adiabaticamente, desde um nível de pressão qualquer, até o nível de pressão de 1000 hPa; e
- **Sigma-z (σ_z):** A coordenada sigma-z tem a particularidade de seguir o terreno da topografia em questão, e, por esse motivo, torna-se uma das mais utilizadas em modelagem atmosférica, pois ela tende a reproduzir com mais detalhes a região de estudo da simulação.

Descreveremos um pouco mais o sistema de coordenadas sigma-z, a qual utilizaremos em nossa simulação. A equação que representa esta coordenada pode ser escrita como

$$z^* = \sigma_z H = \left(\frac{z - z_g}{H - z_g} \right) H, \quad (6.11)$$

onde H representa a altura do topo do domínio e z_g é a altura da topografia local.

Podemos perceber que σ_z varia de 0, na superfície, até a unidade, no topo, e z^* , varia de 0, na superfície, até H , no topo. Mas no topo do domínio computacional, o que temos em uma superfície horizontal é que z e z^* coincidem.

6.6 Médias de Reynolds

Na prática, os modelos atmosféricos são, de certa forma, incapazes de apresentar os valores das grandezas físicas em um exato ponto. Então, o que o modelo se propõe a apresentar são os valores médios dessas grandezas em “caixas” de grade.

Para uma grandeza física qualquer, sua flutuação em pequena escala será representada por f' , de tal modo que,

$$f = \bar{f} + f', \quad (6.12)$$

onde \bar{f} representa o valor médio.

6.7 Parametrizações Físicas

Alguns processos físicos não conseguem ser resolvidos em modelos atmosféricos, tais como as circulações em escala de subgrade, ou seja, turbulência, trocas radiativas, processos microfísicos, interação com a superfície, dentre outros. Dessa forma, esses processos precisam ser parametrizados.

Nas seções a seguir, comentaremos algumas parametrizações utilizadas em modelos atmosféricos.

6.7.1 Parametrização de Radiação

A equação prognóstica para radiação em modelos atmosféricos para uma variável termodinâmica, como por exemplo, a temperatura potencial, pode ser escrita como

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = S_\theta = -\frac{1}{\rho c_p} \nabla \cdot R, \quad (6.13)$$

onde c_p representa o calor específico do ar a pressão constante, R é a radiância (energia incidente por unidade de área) e os demais termos já foram citados nas seções anteriores.

As parametrizações de radiação utilizadas em modelos atmosféricos podem ser enumeradas em:

1. **Céu claro:** Onde são considerados apenas os processos envolvendo os gases que interagem com a radiação, como por exemplo, o ozônio, o dióxido de carbono, e o vapor d'água. Os processos envolvendo nuvens são desconsiderados. Este tipo de parametrização foi proposta por Mahrer e Pielke (1977);
2. **Nuvens como superfície:** Este é o caso em que as nuvens entram no processo, refletindo e absorvendo a radiação solar, e também como emissoras de radiação infravermelha. Este é o caso da parametrização proposta por Chen e Cotton (1983); e
3. **Radiação acoplada à microfísica:** Ocorre uma interação direta da radiação com todas as sete classes de hidrometeoros, dentre elas podemos citar nuvem, chuva e gelo. As propriedades de espalhamento e absorção da radiação são determinadas pela microfísica. Este tipo de parametrização é comumente chamado de parametrização de *Harrington*, devido a um de seus autores (WALKO et al., 1995).

6.7.2 Parametrização de Turbulência

Na literatura é possível encontrarmos diversos esquemas de parametrização de turbulência. Faremos aqui um pequeno comentário da parametrização de Mellor e Yamada (1974), que, no seu esquema proposto, os campos de vento (u e v), a temperatura potencial (θ) e a energia cinética turbulenta (e) são fornecidas pelos campos prognósticos do RAMS.

Esse esquema é baseado na equação prognóstica para a energia cinética turbulenta, que é resolvida no modelo meteorológico. Maiores detalhes dessa e outras parametrizações de turbulência utilizadas pelo RAMS podem ser encontradas em Lima (2004) e Soares (2004).

6.7.3 Parametrização de Convecção

Uma das parametrizações mais utilizadas em modelos atmosféricos é a de Kuo (1974), que é baseada na observação de uma forte correlação entre precipitação convectiva e a convergência total de vapor em larga escala em uma coluna atmosférica.

O esquema tem, em sua fundamentação teórica, a hipótese do equilíbrio, na qual a convecção ocorre para consumir a instabilidade convectiva fornecida pela larga escala, transportando

calor e umidade. Após o acionamento desta parametrização, um modelo de nuvens com correntes ascendentes e descendentes é utilizado. O esquema de *Kuo*, como é assim chamado, precisa resolver uma equação de balanço para o vapor d'água envolvendo a convergência de umidade, a evaporação, a precipitação e o termo de armazenamento.

7 *Estudo Numérico do Vento Aracati*

7.1 Introdução

Nesse capítulo, desenvolveremos um estudo numérico computacional sobre o vento Aracati com o objetivo de tentarmos observar a ocorrência do mesmo em nosso modelo numérico.

Uma vez que o modelo possa nos fornecer resultados de algumas grandezas físicas, das regiões onde estão inserida nossas grades, procuraremos saber quais as possíveis causas e conseqüências da passagem do vento Aracati.

7.2 Condições Iniciais e Parametrizações Utilizadas

Para realizarmos a simulação numérica do vento Aracati, escolhemos o modelo *Regional Atmospheric Modeling System* (RAMS), desenvolvido pela *Colorado State University* (CSU), pela nossa experiência já adquirida nesse modelo.

O período analisado foi o mês de novembro de 2005, isto, pelo motivo de termos, no Cap. 2, apresentado o dia 14 do de novembro de 2005 como um período de ocorrência do Aracati segundo relato de moradores, e também por representar um período seco no estado do Ceará, período no qual, ainda de acordo com os moradores das regiões onde ocorre o Aracati, pode ser verificado as suas maiores ocorrências. Outro motivo, agora por conta dos resultados obtidos no Cap. 4, no mês de novembro houve uma grande ocorrência do Aracati, de acordo com os critérios estabelecidos nesse capítulo.

A inicialização do modelo foi feita utilizando dados de re-análise do *National Center for Environmental Prediction* (NCEP), com intervalo de frequência de 6h. A simulação foi feita através do uso de duas grades aninhadas, com as seguintes resoluções 40 km por 40 km, e 10 km por 10 km.

Na (Fig. 7.1), a primeira grade, representa praticamente todos os estados do Nordeste do Brasil. Já na segunda grade, temos o estado do Ceará em maior destaque, em conjunto com as

regiões ao longo do Rio Jaguaribe. As duas grades são do tipo polar estereográficas, concêntricas em $5,3^{\circ}\text{S}$, e $38,0^{\circ}\text{W}$. As coordenadas vertical são do tipo sigma-z.

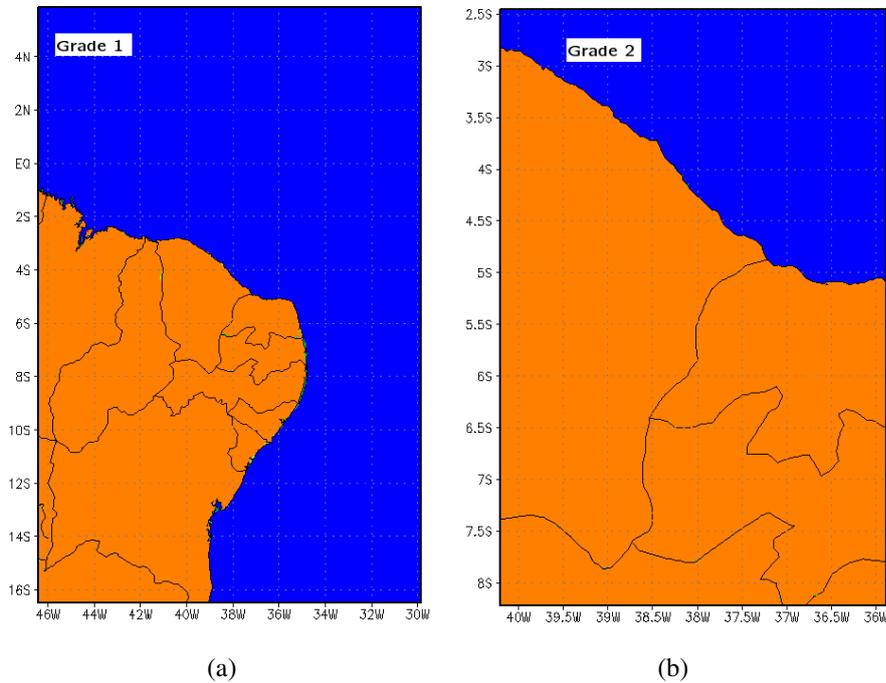


Figura 7.1: a) Grade 1, com resolução de 40km por 40km. b) Grade 2, com resolução de 10km por 10km.

A simulação teve início as 00:00Z do dia 01 de novembro de 2005, tendo fim às 23:00Z do dia 30 de novembro de 2005.

No tocante as parametrizações, utilizamos nas duas grades:

- Parametrização de Harrington (WALKO et al., 1995) para a radiação, tanto de ondas curtas como também de ondas longas;
- Parametrização de Mellor e Yamada (1974) para o esquema de turbulência; e
- Parametrização de Kuo (1974) para convecção.

Já os número de pontos de grades utilizados foram:

- Direção x temos para a primeira grade 48 pontos, e para a segunda, 50 pontos;
- Direção y temos para a primeira grade 64 pontos, e para a segunda, 66 pontos; e
- Direção z , nas duas grades, temos 35 pontos.

A microfísica utilizada foi a que considera todas as formas de hidrometeoros, ou seja, microfísica resolvida para as duas grades.

O tipo de vegetação utilizada foi a *deciduous needleleaf tree*. Utilizamos 11 níveis de solo no modelo. O esquema de topografia utilizado nas duas grades foi o *reflected envelope orography*.

Todos os cálculos e visualizações gráficas foram produzidos pelo *software* livre GrADS (*Grid Analysis and Display System*), desenvolvido pelo *Center for Ocean-Land Atmosphere* (COLA). Esse *software* nos permite visualizar os resultados da simulação atmosférica de mesoescala através de mapas das regiões em estudo, elaborados a partir de seções horizontais e/ou verticais.

7.3 Resultados

Feita a simulação numérica com o RAMS para o período desejado, a segunda grade foi a que melhor representou o padrão de circulação local ao longo do Rio Jaguaribe, o que era de se esperar, pois a resolução da mesma é quatro vezes maior do que a primeira. Alertamos ainda, que todos os resultados obtidos da simulação serão mostrados relativos ao horário local.

Quando verificamos a variável de saída do modelo “speed10m”, ou seja, a velocidade de vento a 10 m de altura, podemos observar que na maioria dos dias simulados ocorre a formação de uma região de máxima intensidade de velocidade de vento paralela ao litoral leste do estado do Ceará, aproximadamente às 15:00h, que com o passar do tempo, diminui progressivamente de intensidade até o seu desaparecimento aproximadamente às 21:00h, do mesmo dia, seguindo um trajetória no sentido do mar para o continente.

Podemos visualizar um exemplo do fenômeno descrito acima na (Fig. 7.2), onde a região de máxima intensidade do vento começa por volta de 15:00 do dia 14 de novembro de 2005, se estendendo até às 21:00h do mesmo dia. Essa região de máximo valor de velocidade possui também valores de pressão entre 990 hPa a 1000 hPa, esses valores para o segundo nível da simulação com o RAMS, ou seja, aproximadamente a 24 m de altura, que, à medida que o tempo passa, se desloca para localidades de menores valores de pressão atmosférica. Esse padrão pôde ser observado na maioria dos dias do mês de novembro de 2005, como também podemos verificar na (Fig. 7.3), onde mostramos os mesmos horários para o dia seguinte, 15 de novembro de 2005.

Como já foi dito anteriormente, os ventos de brisa marítima ocorrem durante o dia e são mais intensos entre os horários de 13:00h às 15:00h, horário local. De acordo com Atkinson

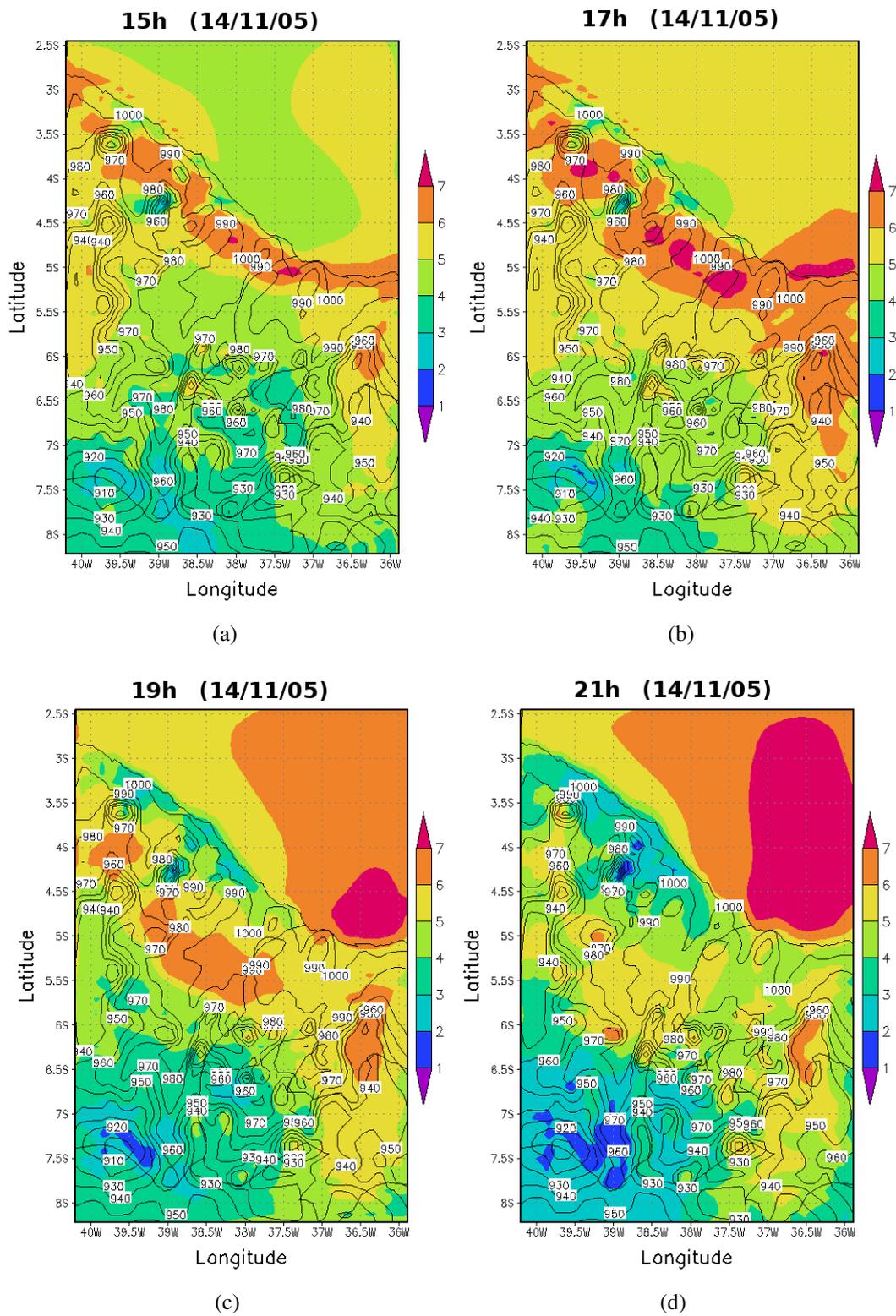


Figura 7.2: Velocidade de vento a 10 m de altura (em m/s) e pressão atmosférica para aproximadamente 24 m de altura (em hPa), de 14 de novembro de 2005, para os seguintes horários: a) 15:00h; b) 17:00h; c) 19:00h; e d) 21:00h, todas para a grade 2.

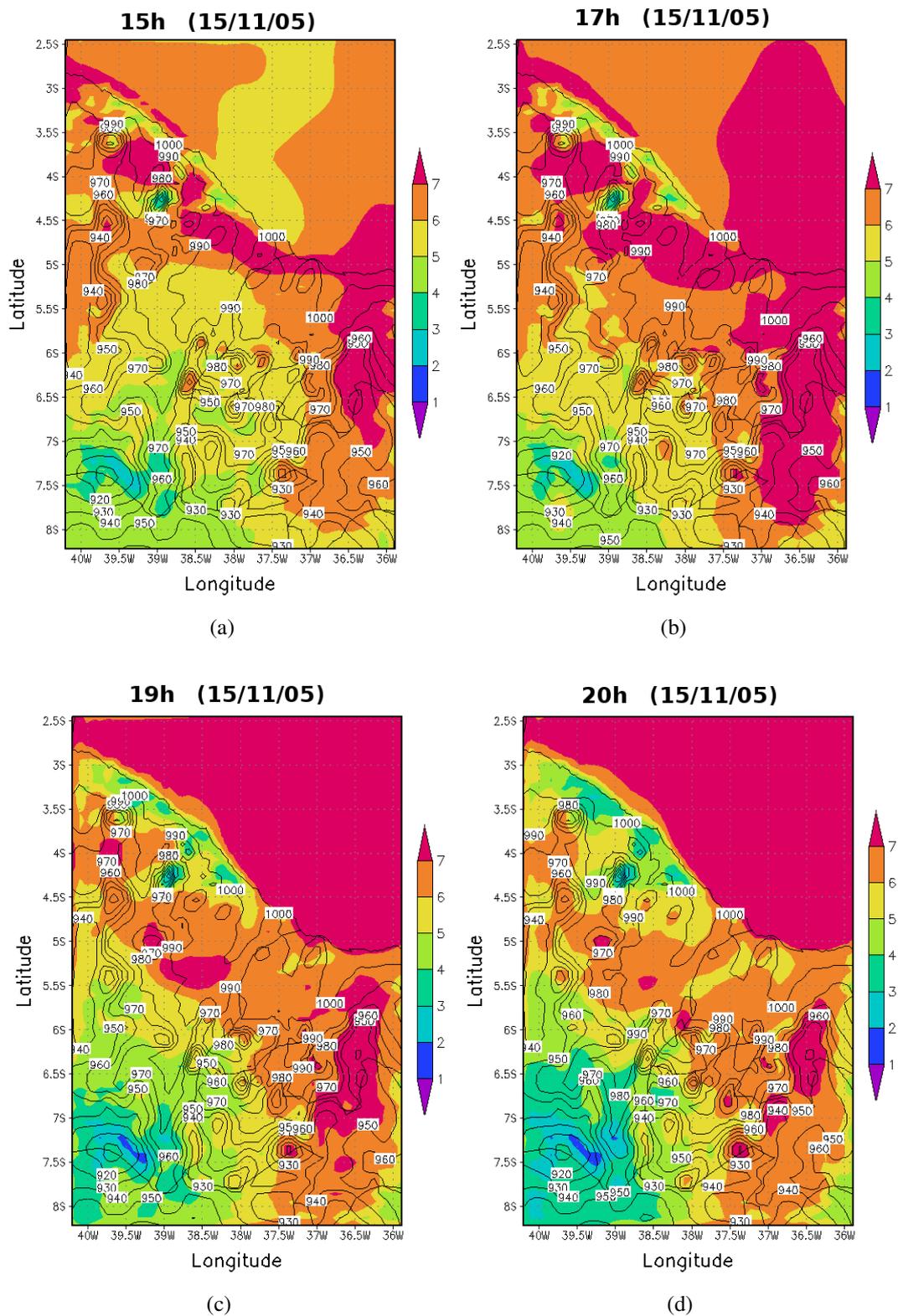


Figura 7.3: Velocidade de vento a 10 m de altura (em m/s) e pressão atmosférica para aproximadamente 24 m de altura (em hPa), de 15 de novembro de 2005, para os seguintes horários: a) 15:00h; b) 17:00h; c) 19:00h; e d) 20:00h, todas para a grade 2.

(1981), a frente de brisa marítima pode penetrar até 300 km da costa.

A região com máximo valor de velocidade de vento descrita acima, possui características que podem se atribuídas ao vento Aracati, ou seja, valores superiores a 6 m/s de velocidade do vento, estando localizada próxima à foz do Rio Jaguaribe. Desta forma, observamos nas Figs. 7.2 e 7.3, que uma das possíveis causas do vento Aracati, pode ser explicada através de um fenômeno de brisa marítima. Para isso, tomamos por base a formação do Aracati às 15:00h, próximo ao litoral leste do estado do Ceará.

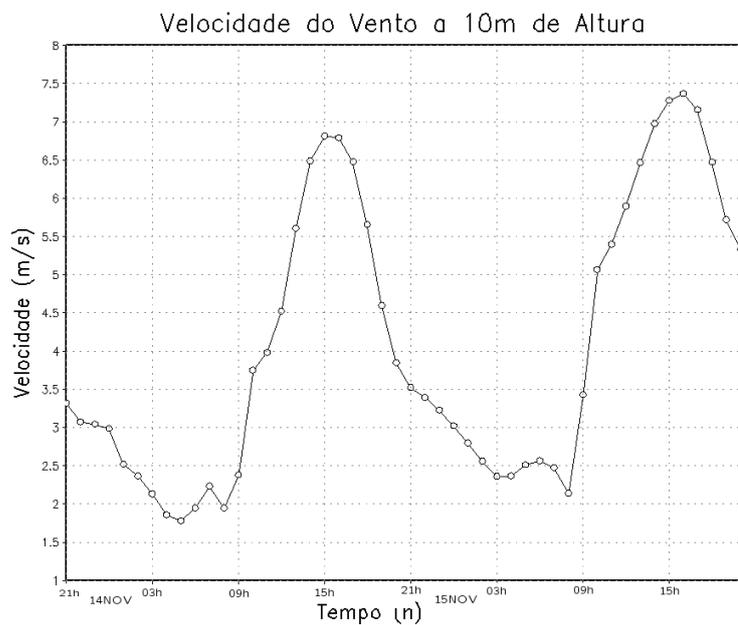
De acordo com Atkinson (1981) e Simpson, Mansfield e Milford (1977), algumas das condições para o estabelecimento da brisa marítima podem ser caracterizadas pelo aumento na intensidade do vento, aumento da umidade do ar e mudança na direção do vento.

Na (Fig. 7.4), mostramos as variáveis do modelo “speed10m” e “direction” para o segundo nível do modelo (aproximadamente 24 m de altura), esta última representando a direção do vento. Ambas foram obtidas para o ponto situado nas coordenadas geográficas $S04,71^\circ$ de latitude, e $W038,22^\circ$ de longitude, ou seja, nas coordenadas que coincidem com o início da região de máximo valor de velocidade de vento, mostrada nas Figs. 7.2 e 7.3.

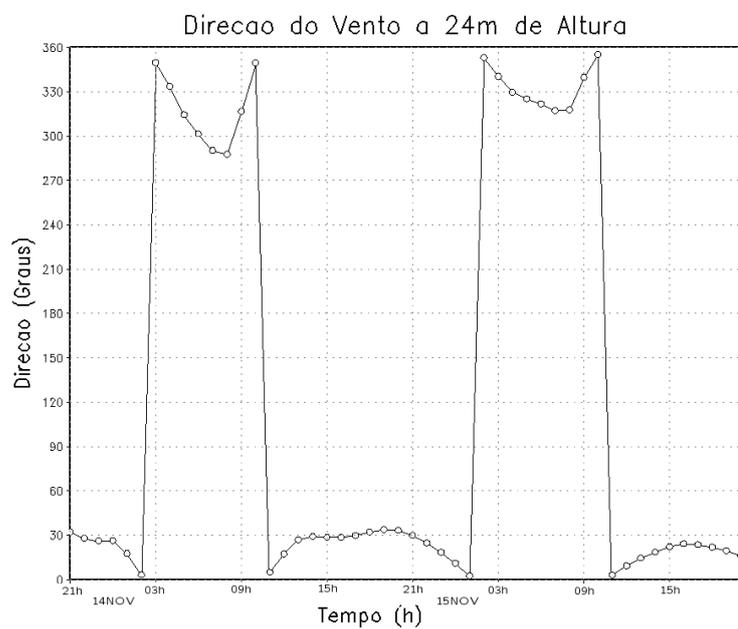
Nela, podemos verificar que uma das condições descrita acima para o estabelecimento da brisa marítima, ou seja, um aumento da velocidade do vento, para o período entre 13:00h e 15:00h, é atingido, tanto para o dia 14, como também para o dia 15, ambos para o mês de novembro de 2005. Nesses dois dias citados, observamos que as 15:00h, temos o horário em que a velocidade de vento possui a máxima intensidade. Ainda na (Fig. 7.4), é possível verificamos a representação de ciclos diários para a velocidade de vento, e também para a direção do vento.

Na (Fig. 7.5), mostramos uma comparação entre a velocidade de vento a 10 m de altura e a umidade relativa do ar (em %), representada pela variável do modelo “relhum”, para o segundo nível, aproximadamente 24 m de altura. O período foi do dia 14 de novembro de 2005, para os seguintes horários: 15:00h, 17:00h, 19:00h e 21:00h, todas para a grade 2 da simulação.

Nela, podemos verificar que a região de maior umidade relativa do ar encontra-se sobre o oceano, com valores acima de 75%. No interior, os valores situam-se inicialmente entre 30% e 40%. Porém, a medida que o tempo passa observamos um aumento da umidade tanto no interior do continente como também nas proximidades do litoral leste. No final do período observado (como ilustrado na Fig. 7.5(d)), nas regiões onde houve a passagem do Aracati, a umidade, que era inicialmente de 30% a 40%, chegou a atingir valores entre 60% e 80%, mostrando possivelmente as características de brisa marítima do vento Aracati.



(a)



(b)

Figura 7.4: a) Velocidade de vento a um nível de 10 m de altura medida (em m/s). b) Direção da velocidade do vento para o nível de 24 m de altura. Ambas variáveis obtidas para os dias 14 à 15 de novembro de 2005, relativas à segunda grade da simulação.

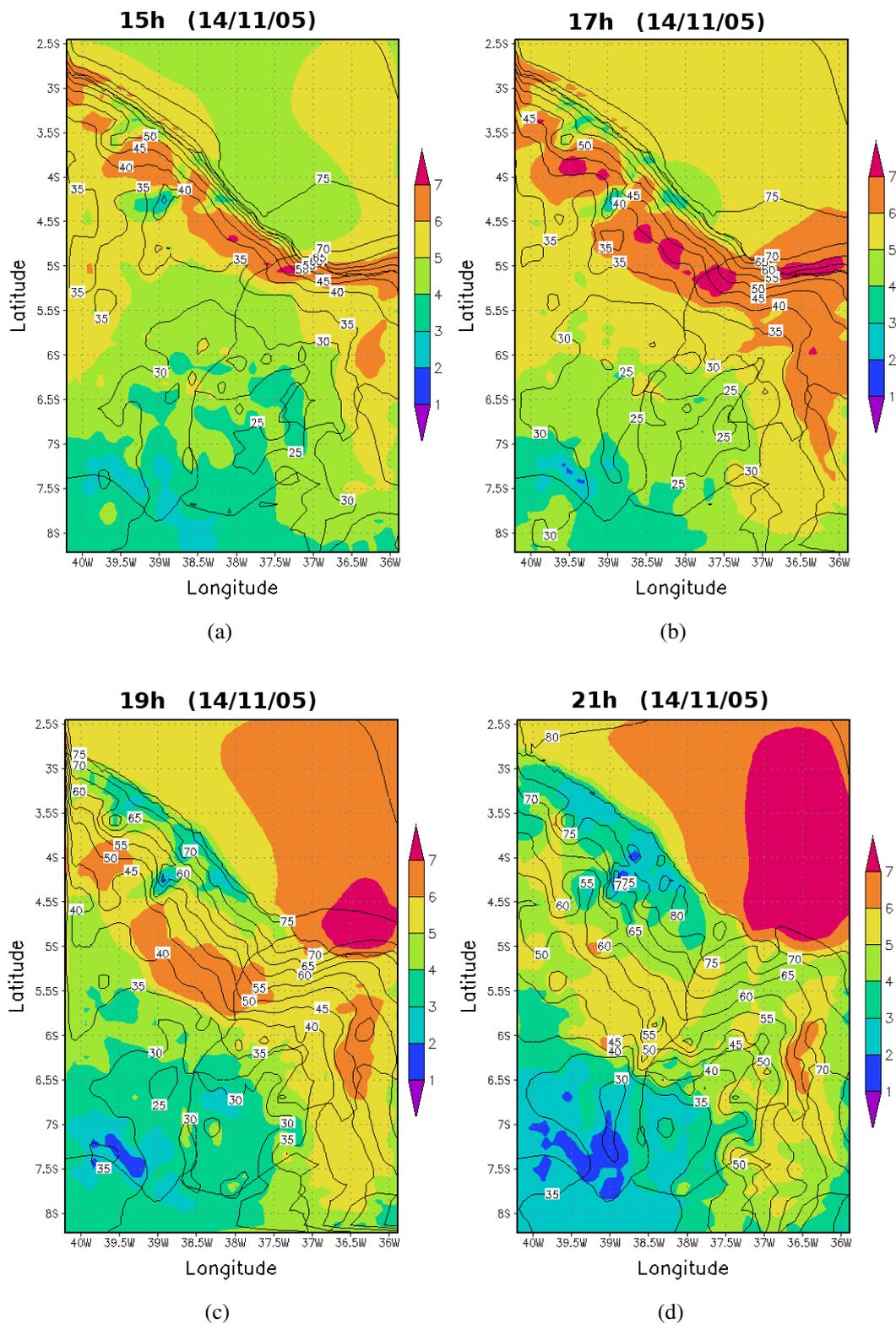


Figura 7.5: Comparação entre velocidade de vento a 10 m de altura (em m/s) e umidade relativa do ar medida (em %) para 24 m de altura, do dia 14 de novembro de 2005, para os seguintes horários: a) 15:00h; b) 17:00h; c) 19:00h; e d) 21:00h, todas para a grade 2.

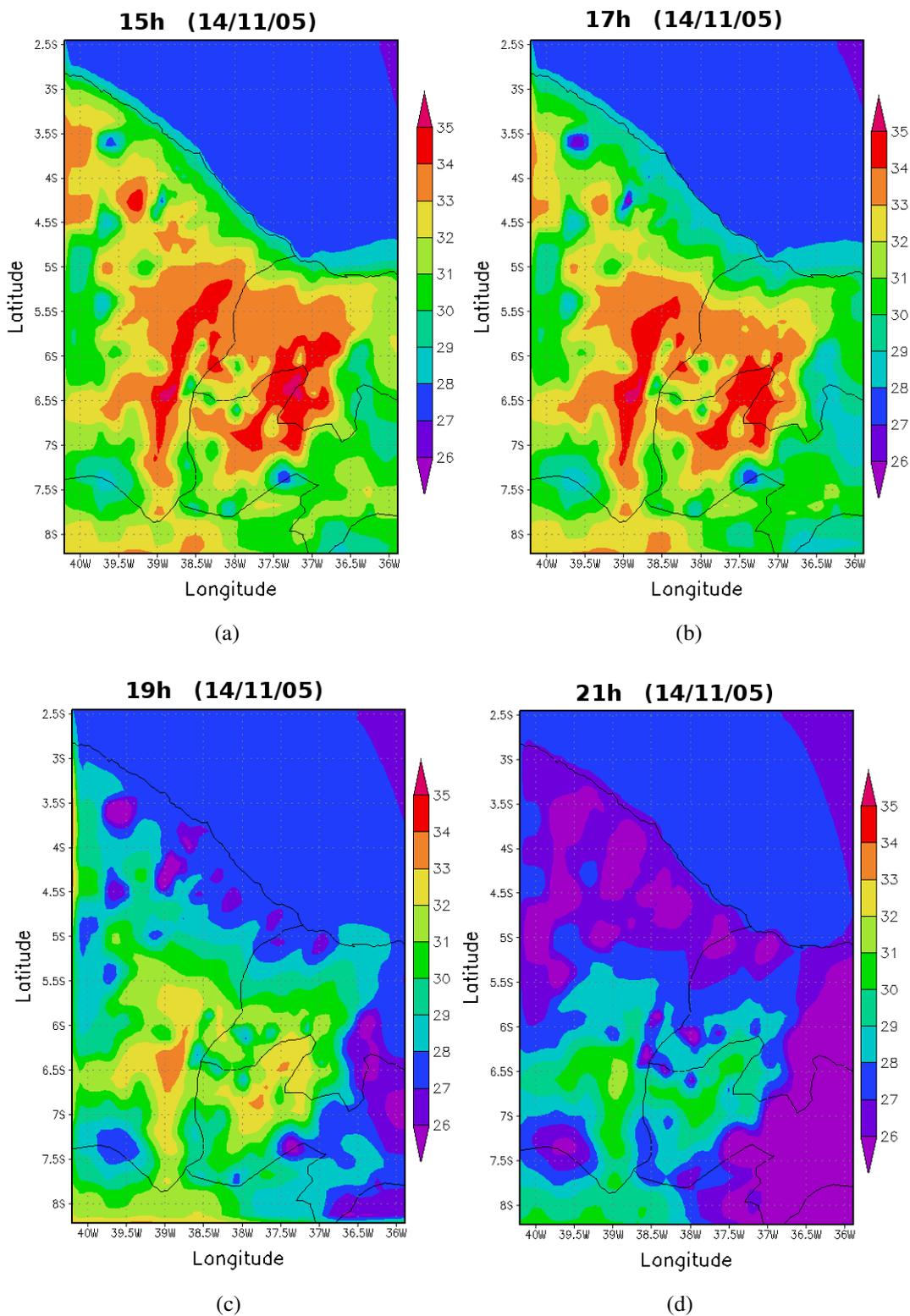


Figura 7.6: Temperatura (em °C) para o nível de aproximadamente 24 m de altura, do dia 14 de novembro de 2005, para os seguintes horários: a) 15:00h; b) 17:00h; c) 19:00h; e d) 21:00h, todas para a grade 2 da simulação.

Na (Fig. 7.6), mostramos a variável de saída do modelo “tempc” para o segundo nível da simulação. Ela foi obtida para os mesmos horários em que apresentamos os resultados da variável “speed10m”. Nela, identificamos que, às 15:00h do dia 14 de novembro de 2005, os maiores valores estão acima de 35°C nas regiões localizadas ao centro-sul do estado do Ceará (como ilustrado na Fig. 7.6(a)).

Já nas proximidades do litoral leste do estado, onde encontramos a região de máxima intensidade de velocidade de vento, os valores de temperatura estão entre 27°C e 29°C. Porém, à medida que o tempo passa, podemos observar que, com o deslocamento do vento Aracati, as regiões mais quentes vão se resfriando progressivamente, de tal forma que, às 21:00h do dia 14 de novembro de 2005, algumas localidades que antes registravam temperaturas acima de 35°C, com a passagem do Aracati, agora registram valores entre 26°C à 30°C, como mostrado na Fig. 7.6(d).

Os resultados da temperatura na simulação com o RAMS podem revelar, que de fato, como os próprios moradores da região de incidência do vento Aracati relatam, o seu deslocamento é responsável por levar um conforto térmico às regiões mais distantes do litoral leste do estado, com temperaturas mais amenas e um ar mais úmido.

Na (Fig. 7.7), temos a representação do perfil vertical da velocidade do vento zonal, meridional, e a magnitude de ambas, para os horários acima descritos e para as coordenadas geográficas S04,71° de latitude, e W038,22° de longitude, ou seja, nas coordenadas que coincidem com o início da região de máxima intensidade de velocidade do vento, mostrada nas Figs. 7.2 e 7.3.

Na Fig. 7.7(a), é possível percebermos que os valores negativos de velocidade do vento zonal indicam um sentido de leste para oeste, mostrando a forçante de larga escala, nesse caso os alísios. Já na Fig. 7.7(b), os valores negativos de velocidade do vento meridional próximos à superfície indicam um sentido de norte para sul, e o contrário em alturas mais elevadas. Isso pode ser mais um indicativo de que nesses horários temos o efeito de brisa marítima atuante, com o máximo se tornado em torno de 300 m e a corrente de retorno acima de 1200 m. Estes valores estão em concordância com os encontrados na literatura.

Na Fig.7.7(c), em todos os horários mostrados, a magnitude da velocidade do vento possui valores superiores a 8 m/s a uma altura de 100 a 400 m. Além disso, a evolução temporal do perfil vertical da magnitude do vento mostra que o Aracati pode ser considerado como um fenômenos semelhante a jatos de baixos níveis.

Através das variáveis velocidade do vento zonal e meridional, obtidas na simulação com

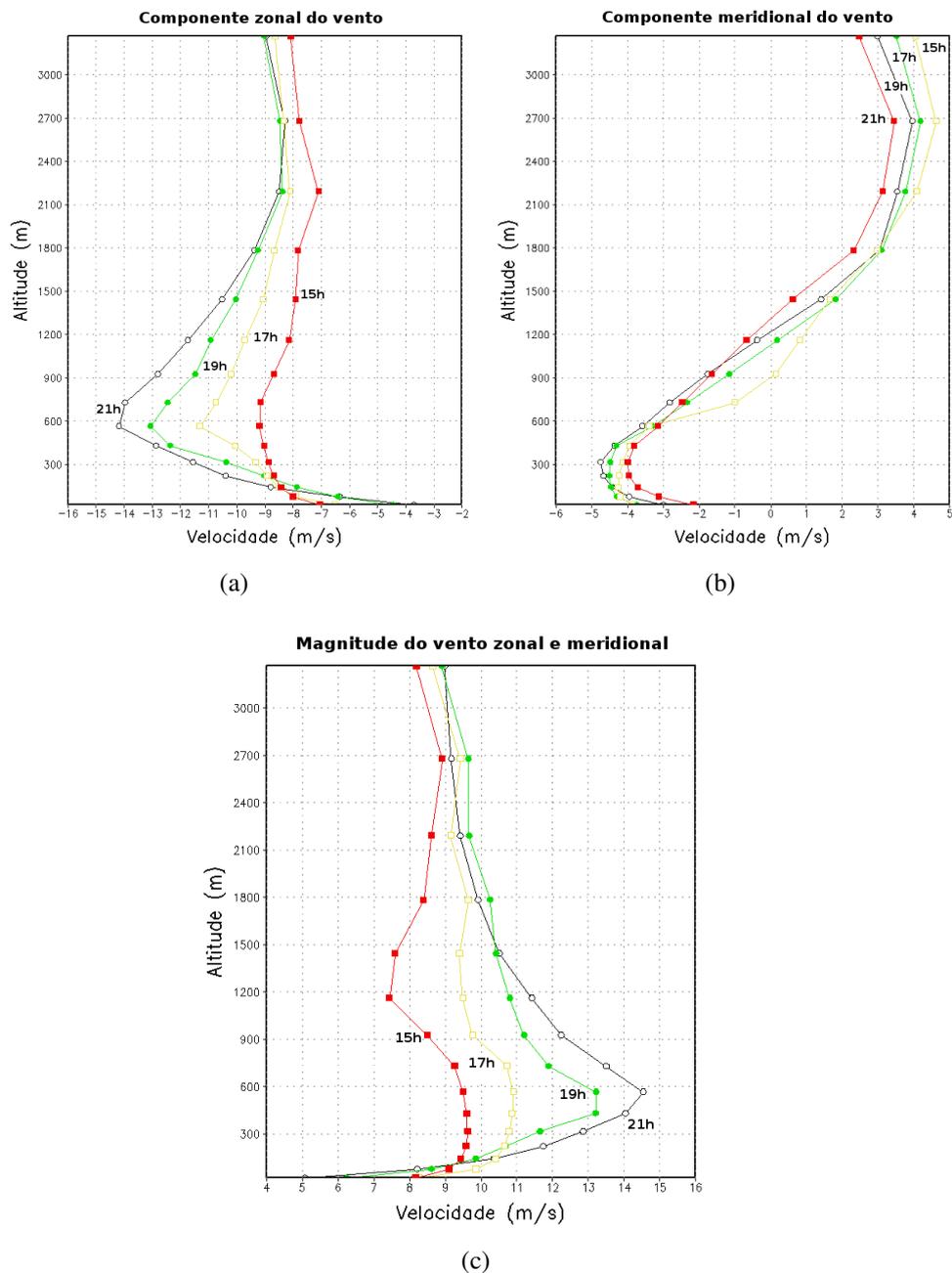


Figura 7.7: a) Perfil vertical do vento zonal (m/s) para os seguintes horários do dia 14 de novembro de 2005: 15:00h (em vermelha), 17:00h (amarela), 19:00h (verde), e 21:00h (preta). b) perfil vertical do vento meridional (m/s) para os seguintes horários do dia 14 de novembro de 2005: 15:00h (em amarela), 17:00h (verde), 19:00h (preta), e 21:00h (vermelha). c) perfil vertical da magnitude do vento zonal e meridional (m/s), para os seguintes horários do dia 14 de novembro de 2005: 15:00h (em vermelha), 17:00h (amarela), 19:00h (verde), e 21:00h (preta). Os dados foram obtidos para a segunda grade da simulação.

RAMS, pudemos plotar os gráficos de campo de vento. Na (Fig. 7.8), representamos a comparação entre velocidade a 10 m de altura e o campo de vento a 24 m de altura. Na Fig. 7.8(a), observamos que, referente às 15:00h do dia 14 de novembro de 2005, as linhas de corrente do vento estão apontando do litoral leste, seguindo para as regiões mais ao sul do estado do Ceará. Ressaltarmos ainda que, para outros horários em que não foi possível verificarmos o padrão de circulação do Aracati, o mesmo não acontece com as linhas de correntes, como podemos ver nas Figs. 7.9(a) e 7.9(b).

Quando observamos a topografia da região onde estão inseridas as nossas grades, na Fig. 7.9(c), pudemos perceber que o vento Aracati surge em localidades do chamado baixo Jaguaribe, ou seja, uma região de baixa topografia localizada próxima ao litoral leste do estado do Ceará. Porém, na medida que o tempo evolui, o Aracati se desloca para regiões ao longo do Rio Jaguaribe, até o seu desaparecimento em regiões de maior topografia, chamadas de médio e até mesmo alto Jaguaribe.

Uma das possíveis explicações, para a ocorrência do vento Aracati em regiões mais afastadas do litoral leste, onde a simulação com o RAMS mostrou o início do Aracati, pode estar associado ao Rio Jaguaribe, tendo em vista, que o mesmo pode desempenhar um papel importante, servindo como canalizador do vento.

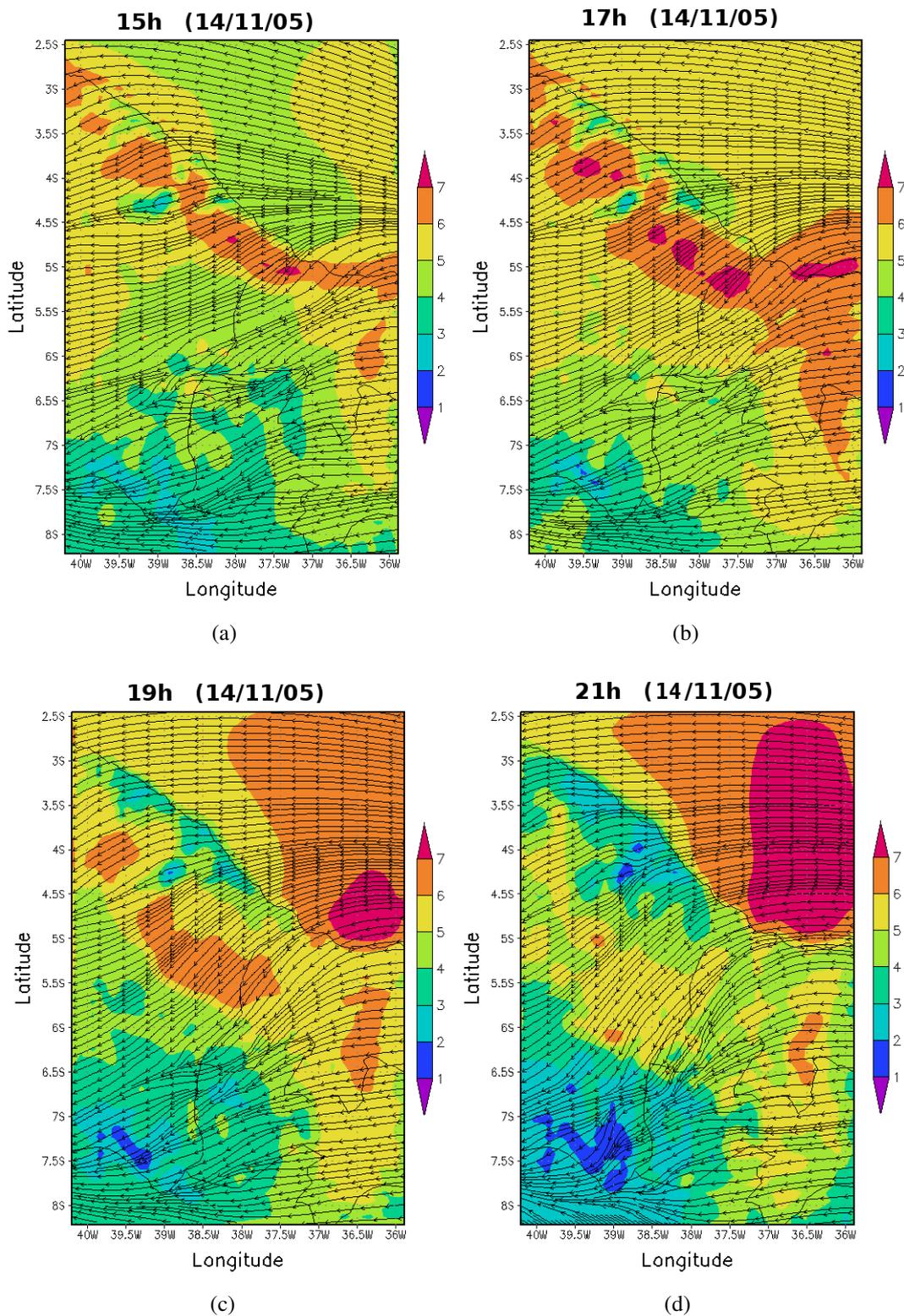


Figura 7.8: Velocidade do vento a 10 m de altura medida (em m/s) e linhas de corrente de vento a um nível de aproximadamente 24 m de altura, para o dia 14 de novembro de 2005, para os seguintes horários: a) 15:00h; b) 17:00h; c) 19:00h; e d) 21:00h, todas para a grade 2.

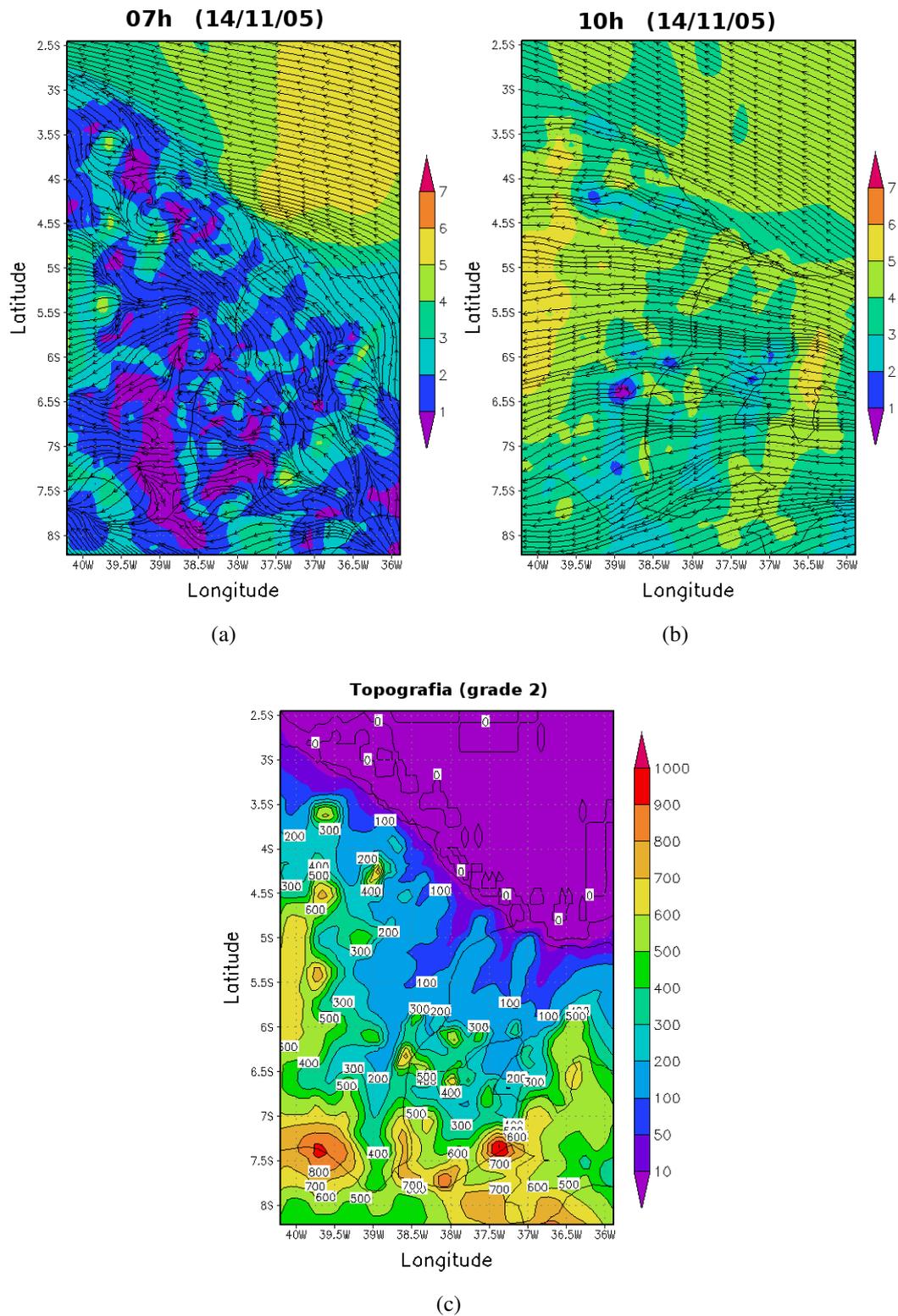


Figura 7.9: Velocidade do vento a 10 m de altura medida (em m/s) e linhas de corrente de vento a um nível de 24 m de altura, para o dia 14 de novembro de 2005, mostrando os seguintes horários: a) 07:00h; b) 10:00h; e c) Topografia obtida através do modelo RAMS medida (em m), com resolução de 10 km x 10 km.

8 *Conclusões e Perspectivas*

Neste trabalho, fizemos uma análise estatística de velocidade do vento através das medidas coletadas em Plataformas de Coletas de Dados (PCD) da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), instaladas em praticamente todo o estado do Ceará, no Nordeste Brasileiro, com o objetivo de identificarmos as regiões de incidência do vento Aracati, que, segundo moradores das localidades de sua ocorrência, surge em regiões ribeirinhas no interior do estado, diariamente no fim das tardes e começo das noites quentes, principalmente na época seca do ano.

A avaliação da intensidade dos ventos sobre o estado do Ceará, realizada no Cap. 3, através de dados de medições de velocidade de vento a 10 m de altura da FUNCEME, distribuídas ao longo do Ceará, nos mostrou que os ventos são mais intensos durante o período diurno, com exceção das PCDs de Sobral e Icapuí.

A análise estatística descritiva realizada no Cap. 4, nos forneceu as localidades com maiores ocorrências do Aracati. Observamos que as mesmas possuem proximidade com o Rio Jaguaribe e seus afluentes, com exceção de Sobral, que é banhada pelo Rio Acaraú. De posse dessa região, foi possível delimitarmos as fronteiras da simulação numérica, descrita no Cap. 7, na qual utilizamos um modelo atmosférico de mesoscala RAMS versão 6.0, para o mês de novembro de 2005. A escolha desse período deveu-se a dois fatores: a ocorrência do Aracati mostrada para o dia 14 de novembro de 2005, segundo relato de moradores e, a partir da análise estatística, observamos que há uma quantidade considerável de PCDs que possuem ocorrência do Aracati nesse mês.

Na simulação com o RAMS, a variável “speed10m” mostrou uma região com máxima intensidade de velocidade de vento, paralelo à costa do litoral leste do estado do Ceará, nas proximidades do vale do Rio Jaguaribe, aproximadamente às 15:00h, que diminui progressivamente de intensidade depois das 21:00h, observado em quase todos os dias simulados. Essa região possui características que podem se atribuídas ao vento Aracati, ou seja, valores superiores a 6 m/s de velocidade, estando localizada próxima ao Rio Jaguaribe e seus afluentes. Dessa

forma, uma das possíveis causas do vento Aracati é que o mesmo pode surgir, como um vento de brisa marítima, dado o horário de sua formação e também a proximidade com o litoral leste do estado do Ceará.

A explicação para o surgimento do Aracati em regiões mais distantes do litoral pode estar associado ao Rio Jaguaribe, o qual desempenharia um papel importantíssimo no sentido de servir como canalizador do vento, de maneira que, essa idéia pode ser uma das possíveis explicações para as ocorrências do Aracati em, por exemplo, Icó, situado aproximadamente 300 km do litoral leste do Ceará.

Ainda com relação à simulação numérica, os resultados da temperatura podem revelar, que de fato, como os próprios moradores da região de incidência do vento Aracati relatam, o seu deslocamento é responsável por levar um conforto térmico às regiões mais distantes do litoral leste do Ceará.

O fato de termos observado que a PCD de Sobral apresentou comportamento semelhante ao da região onde ocorre o vento Aracati, conforme vimos nos Caps. 3 e 4, poderá servir como tema para trabalhos futuros, investigando se é possível encontrarmos fenômeno semelhante ao do vento Aracati naquela região, a qual poderá ser realizada através de uma simulação numérica com o RAMS.

No Cap. 5, comparamos a simulação com os dados observados para alguns municípios ao longo do Rio Jaguaribe. Através da variável “speed10m”, observamos que o RAMS tende a reproduzir de maneira satisfatória os dados das PCDs comparadas, principalmente nos casos de Russas, Jaguaruana, e Quixeré. O modelo ainda foi validado utilizando técnicas estatísticas propostas por Pielke (2002), de forma que, as PCDs que mais representaram a comparação dos dados observados com a simulação no RAMS, foram as de Jaguaruana, Quixeré, e Russas.

Esse trabalho poderá contribuir, cada vez mais, na divulgação do potencial eólico do estado do Ceará, bem como na procura de outras regiões, fora do litoral cearense, tendo em vista que o mesmo já é bastante conhecido, nas quais seu potencial eólico poderia ser aproveitado para geração de energia elétrica.

O estudo do vento Aracati, poderá servir de motivação futura, para identificar regiões nas quais a sua ocorrência poderia ser aproveitada na questão energética. Nesta dissertação, nosso propósito foi o de mostrarmos as possíveis origens do Aracati, ou seja, descrever um fenômeno atmosférico. De forma que, o mesmo, realmente possui uma intensidade diferenciada, do que normalmente não é verificado quando da sua não ocorrência. Resta sabermos, se o potencial eólico do vento Aracati pode vir a ser futuramente aproveitado de alguma forma.

Referências Bibliográficas

- ALENCAR, J. d. *Iracema*. São Paulo: Hedra, 1829. 201 p.
- AMARANTE, O. A. C. *Energia Eólica - Inventário, Tecnologia*. Rio de Janeiro: Companhia Hidro Elétrica do São Francisco - CHESF, 1987. (Fontes Energéticas Brasileiras). 5 volumes.
- ATKINSON, B. W. *Meso-scale Atmospheric Circulations*. London: Academic Press, 1981. 495 p.
- BOSSERT, J. E. et al. Regional-scale flows in mountainous terrain .2. simplified numerical experiments. *Mon. Wea. Rev.*, v. 122, n. 7, p. 1472–1489, 1994.
- BUCKLEY, R. L.; KURZEJA, R. J. An observational and numerical study of the nocturnal sea breeze. part i: Structure and circulation. *Mon. Wea. Rev.*, v. 36, n. 12, p. 1577–1598, 1997.
- CAMBERLIN, P.; PLANCHON, O. Coastal precipitation regimes in kenya. *Geogr. Ann. A.*, v. 79A, n. 1-2, p. 109–119, 1997.
- CAMPS, J.; MASSONS, J.; SOLER, M. R. Numerical modelling of pollutant dispersion in sea breeze conditions. *Ann. Geophys.-Atm. Hydr.*, v. 14, n. 6, p. 665–677, 1996.
- CARVALHO, P. C. M. *Geração Eólica*. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2003. 146 p.
- CASE, J. L. et al. Verification of high-resolution RAMS forecasts over East-Central Florida during the 1999 and 2000 summer months. *Wea. Forecasting*, v. 17, n. 6, p. 1133–1151, 2002.
- CHEN, C.; COTTON, W. R. A one-dimensional simulation of the stratocumulus-capped mixed layer. *Bound.-Layer Meteor.*, v. 25, n. 3, p. 289–321, 1983.
- CLARK, C. A.; ARRITT, R. W. Numerical simulations of the effect of soil-moisture and vegetation cover on the development of deep convection. *J. Appl. Meteor.*, v. 34, n. 9, p. 2029–2045, 1995.
- CLARKE, R. H. Some observations and comments on the sea breeze. *Aust. Meteor. Mag.*, v. 11, p. 47–68, 1955.
- DEVORE, J. L. *Probabilidade e Estatística para Engenharia e Ciências*. São Paulo: Thomson Pioneira, 2006. 706 p.
- DING, A. et al. Simulation of sea-land breezes and a discussion of their implications on the transport of air pollution during a multi-day ozone episode in the Pearl River Delta of China. *Atmos. Environ.*, v. 38, n. 39, p. 6737–6750, 2004.
- DORAN, J. C.; SKYLLINGSTAD, E. D. Multiple-scale terrain forcing of local wind fields. *Mon. Wea. Rev.*, v. 120, n. 5, p. 817–825, 1992.

- FEDDERSEN, H.; NAVARRA, A.; WARD, M. N. Reduction of model systematic error by statistical correction for dynamical seasonal predictions. *J. Climate*, v. 12, n. 7, p. 1974–1989, 1999.
- FINKELE, K. Inland and offshore propagation speeds of a sea breeze from simulations and measurements. *Bound.-Layer Meteor.*, v. 87, n. 2, p. 307–329, 1998.
- FONSECA, J. S. *Estatística Aplicada*. 2. ed. São Paulo: Atlas, 1985. 272 p.
- FOVELL, R. G.; DAILEY, P. S. Numerical simulation of the interaction between the sea-breeze front and horizontal convective rolls. part ii: Alongshore ambient flow. *Mon. Wea. Rev.*, v. 129, n. 8, p. 2057–2072, 2001.
- GATTO, L. C. S. *Diagnóstico Ambiental da Bacia do Rio Jaguaribe*. Salvador: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, 1999. 77 p. Acessado em 25 de abril de 2007. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/recursosnaturais/diagnosticos/jaguaribe.pdf>.
- HOLTON, J. R. *An Introduction to Dynamic Meteorology*. 4th. ed. Burlington, MA: Elsevier Academic Press, 2004. 535 p.
- HONG, X. D.; LEACH, M. J.; RAMAN, S. Role of vegetation in generation of mesoscale circulation. *Mon. Wea. Rev.*, v. 29, n. 16, p. 2163–2176, 1995.
- KIM, H. G.; PATEL, V. C.; LEE, C. M. Numerical simulation of wind flow over hilly terrain. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, v. 87, n. 1, p. 45–60, 2000.
- KIMURA, F. A numerical-simulation of local winds and photochemical air-pollution .2. application to the Kanto Plain. *J. Meteor. Soc. Japan*, v. 63, n. 5, p. 923–936, 1985.
- KOO, Y. S.; REIBLE, D. D. Flow and transport modeling in the sea-breeze .2. flow model application and pollutant transport. *Bound.-Layer Meteor.*, v. 75, n. 3, p. 209–234, 1995.
- KUO, H. L. Further studies of parameterization of influence of cumulus convection on large-scale flow. *J. Atmos. Sci.*, v. 31, n. 5, p. 1232–1240, 1974.
- LAVAGNINI, A.; SEMPREVIVA, A. M.; BARTHELMIE, R. J. Estimating wind energy potential offshore in Mediterranean areas. *Wind Energy*, v. 6, n. 1, p. 23–34, 2003.
- LIMA, S. M. *Avaliação de duas parametrizações de difusão turbulenta em evento de linha de instabilidade utilizando o modelo atmosférico RAMS*. Dissertação (Mestrado) — COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004. 134 p.
- LU, R.; TURCO, R. P. Air pollutant transport in a coastal environment .1. 2-dimensional simulations of sea-breeze and mountain effects. *J. Atmos. Sci.*, v. 51, n. 15, p. 2285–2308, 1994.
- LU, R.; TURCO, R. P.; JACOBSON, M. Z. An integrated air pollution modeling system for urban and regional scales .2. simulations for SCAQS 1987. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, v. 102, n. D5, p. 6081–6098, 1997.
- LYONS, W. A. et al. Modeling impacts of mesoscale vertical motions upon coastal zone air-pollution dispersion. *Atmos. Environ.*, v. 29, n. 2, p. 283–301, 1995.

- MAHFOUF, J. F.; RICHARD, E.; MASCART, P. The influence of soil and vegetation on the development of mesoscale circulations. *J. Climate Appl. Meteor.*, v. 26, n. 11, p. 1483–1495, 1987.
- MAHRER, Y.; PIELKE, R. A. Effects of topography on sea and land breezes in a 2-dimensional numerical-model. *Mon. Wea. Rev.*, v. 105, n. 9, p. 1151–1162, 1977.
- MASSONS, J.; CAMPS, J.; SOLER, M. R. Modeling of pollutant dispersion in sea breeze conditions using a lagrangian model. *Theor. Appl. Climatol.*, v. 56, n. 3-4, p. 255–266, 1997.
- MELLOR, G. L.; YAMADA, T. Hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary-layers. *J. Atmos. Sci.*, v. 31, n. 7, p. 1791–1806, 1974.
- MIAO, J. F. et al. Impacts of topography and land degradation on the sea breeze over eastern Spain. *Meteor. Atmos. Phys.*, v. 84, n. 3-4, p. 157–170, 2003.
- NESTER, K. Influence of sea-breeze flows on air-pollution over the Attica Peninsula. *Atmos. Environ.*, v. 29, n. 24, p. 3655–3670, 1995.
- OLIVEIRA, P. J. *Estudo do vento e da turbulência na camada limite atmosférica em áreas de floresta e pastagem na Amazônia*. Dissertação (Mestrado) — INPE, São José dos Campos, 1999. 108p. — (INPE-8350-TDI/769).
- PHYSICK, W. L. Numerical experiments on the inland penetration of the sea breeze. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, v. 106, n. 450, p. 735–746, 1980.
- PIELKE, R. A. *Mesoscale Meteorological Modeling*. San Diego: Academic Press, 2002. 676 p.
- PIELKE, R. A.; MAHRER, I. Effect of topography on sea breeze. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, v. 56, n. 2, p. 330–330, 1975.
- PINTY, J. P. et al. An investigation of mesoscale flows induced by vegetation inhomogeneities using an evapotranspiration model calibrated against hapex-mobilhy data. *J. Appl. Meteor.*, v. 28, n. 9, p. 976–992, 1989.
- PUYGRENIER, V. et al. Investigation on the fine structure of sea-breeze during ESCOMPTE experiment. *Atmos. Res.*, v. 74, n. 1-4, p. 329–353, 2005.
- RAMAN, S. et al. Numerical simulation of mesoscale circulations in a region of contrasting soil types. *Pure Appl. Geophys.*, v. 162, n. 8-9, p. 1689–1714, 2005.
- REIS JUNIOR, D. S. et al. Previsão sazonal de vazões no estado do ceará. In: *VIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*. Gravatá - PE: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2006. p. 20.
- SAVIJARVI, H.; NIEMELA, S.; TISLER, P. Coastal winds and low-level jets: Simulations for Sea Gulfs. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, v. 131, n. 606, p. 625–637, 2005.
- SEINFRA. *Mapa do Potencial Eólico do Estado do Ceará*. 2001. Acessado em 25 de abril de 2007. Disponível em: <<http://www.seinfra.ce.gov.br/downloads/Atlas.zip>>.
- SHA, W. M.; OGAWA, S.; IWASAKI, T. A numerical study on the nocturnal frontogenesis of the sea-breeze front. *J. Meteor. Soc. Japan*, v. 82, n. 2, p. 817–823, 2004.

- SIMPSON, J. E. *Sea Breeze and Local Winds*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. 234 p.
- SIMPSON, J. E.; MANSFIELD, D. A.; MILFORD, J. R. Inland penetration of sea-breeze fronts. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, v. 103, n. 435, p. 47–76, 1977.
- SLADKOVIC, R.; KANTER, H. J. Low-level jet in Bavarian pre-Alpine region. *Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimatol., Ser. A*, v. 25, n. 4, p. 343–355, 1977.
- SOARES, P. M. M. *Parametrização da turbulência e nuvens de camada limite em modelos atmosféricos*. Tese (Doutorado) — Universidade de Lisboa, Portugal, 2004. 129 p.
- TJERNSTROM, M.; GRISOGONO, B. Thermal mesoscale circulations on the baltic coast .1. numerical case study. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, v. 101, n. D14, p. 18979–18997, 1996.
- VARVAYANNI, M. et al. Numerical simulation of daytime mesoscale flow over highly complex terrain: Alps case. *Atmos. Environ.*, v. 32, n. 7, p. 1301–1316, 1998.
- VARVAYANNI, M. et al. Wind flow simulation over greater athens area with highly resolved topography. *Atmos. Environ.*, v. 29, n. 24, p. 3593–3604, 1995.
- VARVAYANNI, M. et al. Effects of onshore and offshore topography on sea-breeze circulation - an observational study at eastern Attica, Greece. *Pure Appl. Geophys.*, v. 140, n. 4, p. 681–720, 1993.
- WALKO, R. L. et al. New RAMS cloud microphysics parameterization .1. the single-moment scheme. *Atmos. Res.*, v. 38, n. 1-4, p. 29–62, 1995.
- WILSON, J. W.; MEGENHARDT, D. L. Thunderstorm initiation, organization, and lifetime associated with florida boundary layer convergence lines. *Mon. Wea. Rev.*, v. 125, n. 7, p. 1507–1525, 1997.
- WOOD, A. W. et al. Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, v. 107, n. D20, p. 4429, 2002.
- YAN, H.; ANTHES, R. A. The effect of variations in surface moisture on mesoscale circulations. *Mon. Wea. Rev.*, v. 116, n. 1, p. 192–208, 1988.
- YOSHIKADO, H.; KONDO, H. Inland penetration of the sea breeze over the suburban area of Tokyo. *Bound.-Layer Meteor.*, v. 48, n. 4, p. 389–407, 1989.
- ZHU, M.; ATKINSON, B. W. Observed and modelled climatology of the land-sea breeze circulation over the persian gulf. *Int. J. Climatol.*, v. 24, n. 7, p. 883–905, 2004.

APÊNDICE A – Métodos Estatísticos

A.1 Introdução

Nesta seção, iremos apresentar alguns métodos estatísticos aplicados ao estudo numérico do vento Aracati, como por exemplo:

- Avaliação de erros, o qual é adotado para validarmos as simulações do modelo de mesoescala RAMS com os dados observados em estações meteorológicas. Dessa forma, estaremos avaliando a capacidade de acerto da simulação numérica computacional;
- Correção estatística dos dados de modelagem com o RAMS; e
- Por fim, o cálculo do coeficiente de correlação estatística, para que possamos avaliar a relação entre os dados de observação e os dados de saída do modelo RAMS.

A.2 Equações Utilizadas para Avaliação Estatística de Erros

Com objetivo de compararmos as simulação dos modelos atmosféricos de mesoescala, como é o caso do RAMS, com os dados observados em estações meteorológicas, é possível efetuarmos uma análise estatística de erros, a qual é baseada em alguns parâmetros como erro sistemático (ou do inglês, *bias*), erro quadrático médio e desvio padrão. O erro sistemático, BE , mede a tendência do modelo em superestimar ou subestimar uma variável, e é definido matematicamente para uma dada variável ϕ , por

$$BE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\phi_i - \phi_{i_{obs}}), \quad (\text{A.1})$$

onde N é o número total de observações, e os sub-índices i e obs indicam simulação e observação, respectivamente. Um valor positivo de BE indica uma predisposição do modelo em

superestimar uma variável particular. Já um valor negativo, uma subestimação do modelo na avaliação de uma variável.

O erro quadrático médio, E , representa as diferenças individuais quadráticas entre a previsão e as observações, que pode ser definido matematicamente, para uma dada variável ϕ , por

$$E = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\phi_i - \phi_{i_{obs}})^2 \right\}^{1/2}, \quad (\text{A.2})$$

medindo, então, o erro típico da simulação do modelo. Grandes valores do erro quadrático médio representam grandes erros nas variáveis previstas, e valores próximos de zero indicam uma previsão quase perfeita.

O erro quadrático médio descontado o *bias*, E_{UB} , pode ser representado pela seguinte equação,

$$E_{UB} = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(\phi_i - \phi_0) - (\phi_{i_{obs}} - \phi_{0_{obs}})]^2 \right\}^{1/2}, \quad (\text{A.3})$$

onde ϕ_0 é a média dos dados da simulação, e $\phi_{0_{obs}}$ representa a média dos dados de observação.

O desvio padrão dos dados simulados, σ , representa o grau de dispersão dos dados numéricos em torno de um valor médio, ou seja, mede a variabilidade dos valores em torno da média da simulação. O valor mínimo do desvio padrão é 0, indicando que não há variabilidade, ou seja, que todos os valores da simulação são iguais à média dos dados simulados. Dessa forma, quanto mais próximo de 0 for σ , menor será a dispersão dos dados simulados em relação a sua média. Podemos representar σ por

$$\sigma = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\phi_i - \phi_0)^2 \right\}^{1/2}. \quad (\text{A.4})$$

O desvio padrão dos dados observados, σ_{obs} , indica, da mesma forma que o desvio padrão dos dados simulados, a variabilidade dos dados de observação em torno da média observada. Da mesma forma que σ , quanto mais próximo de 0 for o valor de σ_{obs} , menor será essa variação. Ele pode ser representado por

$$\sigma_{obs} = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\phi_{i_{obs}} - \phi_{0_{obs}})^2 \right\}^{1/2}. \quad (\text{A.5})$$

A.3 Correção Estatística Utilizada no Modelo Atmosférico

Uma forma de aproximarmos os dados obtidos na simulação de um modelo atmosférico de mesoescala com os dados de observação, é utilizando uma correção estatística dos dados simulados.

Nessa seção iremos apresentar o método de correção estatística empregado no estudo numérico do vento Aracati, que se baseia na utilização da média e do desvio padrão das séries observada e simulada, ou seja, o valor corrigido dos dados simulados, ϕ_{ci} , é dado por

$$\phi_{ci} = (\phi_i - \bar{\phi}_i) \frac{\sigma_{obs}}{\sigma} + \bar{\phi}_o, \quad (\text{A.6})$$

onde ϕ_i representa um valor da simulação, $\bar{\phi}_i$ a média dos valores simulados e, por fim, $\bar{\phi}_o$ representa a média dos dados de observação. Maiores detalhes sobre o método de correção aqui utilizado poderá ser encontrado em Reis Junior et al. (2006), Feddersen, Navarra e Ward (1999) e Wood et al. (2002).

A.4 Coeficiente de Correlação Estatística

O coeficiente de correlação estatística de Pearson (ou coeficiente de correlação produto-momento), pode ser definido como um parâmetro matemático que viabiliza o grau de comparação de duas variáveis X e Y .

Este coeficiente, normalmente representado pela letra “ r ”, assume apenas valores entre -1 e 1. Onde, quando $r = 1$, significa uma correlação perfeita positiva entre as duas variáveis. Porém, quando $r = -1$, significa uma correlação negativa perfeita entre as duas variáveis, isto é, se uma aumenta, a outra sempre diminui. Ainda, se $r = 0$, significa que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra. No entanto, pode existir uma outra dependência que seja “não linear”. Assim, o resultado $r = 0$ deve ser investigado por outros meios.

Outros critérios também podem ser avaliados para uma interpretação mais detalhada do coeficiente de correlação estatística r , como por exemplo, de acordo com Devore (2006), temos na Tab. A.1 uma interpretação mais refinada do coeficiente de correlação de Pearson.

Sejam as seguintes variáveis ϕ e ϕ_o , que representam os dados de simulação e observação respectivamente, então o coeficiente de correlação estatística pode ser definido como,

Tabela A.1: Interpretação do Coeficiente de Correlação Estatística.

Intervalos	Definição
0,00 a 0,19	correlação bem fraca
0,20 a 0,39	correlação fraca
0,40 a 0,69	correlação moderada
0,70 a 0,89	correlação forte
0,90 a 1,00	correlação muito forte

$$r = \frac{\sum (\phi - \bar{\phi}) (\phi_o - \bar{\phi}_o)}{\sqrt{[\sum (\phi - \bar{\phi})^2] [\sum (\phi_o - \bar{\phi}_o)^2]}}, \quad (\text{A.7})$$

onde $\bar{\phi}$ e $\bar{\phi}_o$, representam a média dos dados do modelo e a média dos dados do observado, respectivamente. Alguns livros poderão ser consultados para uma maior entendimento sobre correlação estatística, como por exemplo, Fonseca (1985).

Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

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