



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFERICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO NO ESTADO DA PARAÍBA: UM ESTUDO
OBSERVACIONAL E NUMÉRICO**

FRANCISCO JOSÉ LOPES DE LIMA

CAMPINA GRANDE – PARAÍBA

2011

FRANCISCO JOSÉ LOPES DE LIMA

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO NO ESTADO DA PARAÍBA: UM ESTUDO
OBSERVACIONAL E NUMÉRICO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande em cumprimento às exigências para obtenção do título de mestre.

Orientadores: Prof. Dr. Enilson Palmeira Cavalcanti.
Prof. Dr. Enio Pereira de Souza.

Área de concentração: Meteorologia de Meso e Grande Escalas
Subárea: Modelagem Numérica da Atmosfera

CAMPINA GRANDE – PARAÍBA

2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

L732a Lima, Francisco José Lopes de.

Avaliação do potencial eólico no Estado da Paraíba: um estudo observacional e numérico / Francisco José Lopes de Lima. — Campina Grande, 2011.

80 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Referências.

Orientadores: Prof. Dr. Enilson Palmeira Cavalcanti, Prof. Dr. Enio Pereira de Souza.

1. Energia Eólica. 2. Densidade de Potência Eólica. 3. BRAMS. I. Título.

CDU – 621.548(043)

FRANCISCO JOSÉ LOPES DE LIMA

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO NO ESTADO DA PARAÍBA: UM
ESTUDO OBSERVACIONAL E NUMÉRICO

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 18/02/2011

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. ENILSON PALMEIRA CAVALCANTI
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. ENIO PEREIRA DE SOUZA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. EMERSON MARIANO DA SILVA
Departamento de Física
Universidade Estadual do Ceará

Dedico este trabalho aos meus pais e avós, José Gerônimo de Lima, Antônia Leusimar Lopes de Lima e Antônio Joaquim Neto e Angelita Lopes da Silva, a quem devo toda minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela alegria da vida e pela força de ter me ajudado a superar as dificuldades que surgiram.

À minha família e amigos, por estarem sempre me apoiando, compreensíveis nos momentos em que precisei.

Aos Professores Enilson Palmeira Cavalcanti e Enio Pereira de Souza, meus orientadores, por terem acreditado e apostado em mim, e pelas oportunidades que vêm me oferecendo.

Aos membros da banca examinadora, pela colaboração na melhoria deste trabalho.

Aos meus colegas do Curso de Mestrado em Meteorologia, pela convivência em todos os momentos.

À universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e ao Mestrado em Meteorologia, pela oportunidade de realizar este curso.

Aos professores, pelo meu aprendizado ao longo do curso.

Aos funcionários, em particular a Divanete, que se mostra sempre a ajudar.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte financeiro.

Quando a gente acha que tem todas as respostas vem a vida e muda todas as perguntas.

- Luís Fernando Veríssimo

RESUMO

Este trabalho destina-se a descrever o potencial eólico de cinco localidades do Estado da Paraíba, de forma pontual, e avaliar a capacidade do modelo atmosférico de mesoescala *Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modelling System* (BRAMS) em descrever a intensidade do vento em São Gonçalo, Monteiro, Patos, Campina Grande e João Pessoa. Os dados observacionais são intensidade e direção do vento a 10 m de altura obtida nas estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). As estações foram selecionadas no período de janeiro de 1977 a dezembro de 1981. Para tanto, extrapolou-se o vento para alturas de 50 m, 80 m e 120 m, bem como os parâmetros da distribuição de Weibull. As conclusões foram: a direção predominante dos ventos nas cinco estações é de leste com variações entre nordeste e sudeste, e verificou-se que o ano de 1977 tem baixos valores de densidade de potência eólica, enquanto que 1981 apresenta os melhores valores. Na sequência, o modelo numérico BRAMS foi usado em simulações de quatro meses, dos referidos anos, referentes ao período de regime de ventos diferentes, março e abril, considerados o períodos chuvoso; e setembro e outubro, o período de estiagem. Constatou-se que todas as localidades possuem um razoável potencial eólico com destaque de maior potencial eólico verificado em Campina Grande, com bons resultados de densidade, enquanto que São Gonçalo apresentou baixos valores. Também se concluiu que o modelo BRAMS foi capaz de reproduzir satisfatoriamente os ciclos mensais do vento nos regimes considerados, bem como a direção predominante. Mas em geral, subestimou os valores de intensidade do vento, principalmente no período de estiagem.

Palavras-chave: Energia Eólica, Densidade de Potência Eólica, BRAMS.

ABSTRACT

In this work is to describe the wind power density for five sites in the State of Paraíba, as well as to assess the ability of the mesoscale atmospheric model Developments on the Brazilian Regional Atmospheric Modeling System (BRAMS) in describing the intensity of wind in São Gonçalo Monteiro, Patos, Campina Grande, João Pessoa. Observational data are wind speed and direction at 10 m from the National Institute of Meteorology (INMET). The data cover the period from January 1977 to December 1981. For this, it was extrapolated the wind to the heights of 50 m, 80 m and 120 m and estimated the Weibull distribution parameters as well. We concluded that the prevailing wind direction in the five sites is easterly, with variations between northeasterly and southeasterly. We also found that the year 1977 had the lowest values of wind power density, while 1981 had the highest values. In the sequence, we used the numerical model BRAMS in simulations for four different months characteristic of different wind regime in those years. We run the model for rainy months: March and April, and for September and October, the dry season. We found that all the sites present a reasonable wind power. Higher values are found in Campina Grande, with good results in power density, while São Gonçalo showed the lowest values. It also concluded that the BRAMS model is able to satisfactorily reproduce the monthly cycle of the wind regimes considered, as well as the main direction. However the model tends to underestimated the wind speed, mainly for the dry season.

Keywords: Wind Power, Wind Power Density, BRAMS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Volume de ar cilíndrico. Fonte: Marques (2004)	25
Figura 2. Grade utilizada: 80 x 80 pontos. Área útil para análise: área colorida	29
Figura 3. Variação média mensal das velocidades dos anos em estudo para as estações, a) São Gonçalo, b) Monteiro, c) Patos, d) Campina Grande, e) João Pessoa	34
Figura 4. Variação média mensal da direção do vento dos anos em estudo para as estações, a) São Gonçalo, b) Monteiro, c) Patos, d) Campina Grande, e) João Pessoa	35
Figura 5. Ciclo anual da Velocidade média (m/s) e estimadas para os níveis de 50 m, 80 m e 120 m acima do solo, a) São Gonçalo, b) Monteiro, c) Patos, d) Campina Grande, e) João Pessoa.....	37
Figura 6. Ciclo diário da Velocidade, a) São Gonçalo, b) Monteiro, c) Patos, d) Campina Grande, e) João Pessoa.....	38
Figura 7. Rosa dos Ventos, velocidade e direção do vento para vento a 10 m acima da superfície medida em a) São Gonçalo, b) Monteiro, c) Patos, d) Campina Grande, e) João Pessoa.....	39
Figura 8. Função Distribuição de frequência e o melhor ajuste da distribuição de Weibull para a Velocidade do Vento em 10 m acima da superfície, a) São Gonçalo, b) Monteiro, c) Patos, d) Campina Grande, e) João Pessoa.....	40
Figura 9. Densidade média de potência para velocidade do vento, a) velocidade do vento a 10 m, b) velocidade do vento a 50 m, c) velocidade do vento a 80 m e d) velocidade 120 m de altura acima da superfície em (W/m ²).....	42
Figura 10. Comparação da velocidade de vento a 10 m de altura em (m/s), dos meses de março e abril, a partir dos dados observados (linha preta) com os dados simulados (linha vermelha), para o município de São Gonçalo, (a) ano de 1977, (b) ano de 1977 com correção estatística, (c) ano de 1981 e (d) ano de 1981 com correção estatística	44
Figura 11. Comparação da velocidade de vento a 10 m de altura em (m/s), dos meses de março e abril, a partir dos dados observados (linha preta) com os dados simulados (linha vermelha), para o município de Monteiro, (c) ano de 1981 e (d) ano de 1981 com correção estatística	45
Figura 12. Comparação da velocidade de vento a 10 m de altura em (m/s), dos meses de março e abril, a partir dos dados observados (linha preta) com os dados simulados (linha vermelha), para o município de Patos, (a) ano de 1977, (b) ano de 1977 com correção estatística, (c) ano de 1981 e (d) ano de 1981 com correção estatística	46
Figura 13. Comparação da velocidade de vento a 10 m de altura em (m/s), dos meses de março e abril, a partir dos dados observados (linha preta) com os dados simulados (linha	

vermelha), para o município de Campina Grande, (a) ano de 1977, (b) ano de 1977 com correção estatística, (c) ano de 1981 e (d) ano de 1981 com correção estatística 47

Figura 14. Comparação da velocidade de vento a 10 m de altura em (m/s), dos meses de março e abril, a partir dos dados observados (linha preta) com os dados simulados (linha vermelha), para o município de João Pessoa, (a) ano de 1977, (b) ano de 1977 com correção estatística, (c) ano de 1981 e (d) ano de 1981 com correção estatística 48

Figura 15. Correlação Linear entre os dados observados e os dados simulados para São Gonçalo, (a) março de 1977, (b) março de 1981, (c) abril de 1977 e (d) abril de 1981 49

Figura 16. Correlação Linear entre os dados observados e os dados simulados para Monteiro, (b) março de 1981 50

Figura 17. Correlação Linear entre os dados observados e os dados simulados para Patos, (a) março de 1977, (b) março de 1981, (c) abril de 1977 e (d) abril de 1981 51

Figura 18. Correlação Linear entre os dados observados e os dados simulados para Campina Grande, (a) março de 1977, (b) março de 1981, (c) abril de 1977 e (d) abril de 1981 52

Figura 19. Correlação Linear entre os dados observados e os dados simulados para João Pessoa, (a) março de 1977, (b) março de 1981, (c) abril de 1977 e (d) abril de 1981 53

Figura 20. Comparação da velocidade de vento a 10 m de altura em (m/s), dos meses de setembro e outubro, a partir dos dados observados (linha preta) com os dados simulados (linha vermelha), para o município de São Gonçalo, (a) ano de 1977, (b) ano de 1977 com correção estatística, (c) ano de 1981 e (d) ano de 1981 com correção estatística 56

Figura 21. Comparação da velocidade de vento a 10 m de altura em (m/s), dos meses de setembro e outubro, a partir dos dados observados (linha preta) com os dados simulados (linha vermelha), para o município de Monteiro, (a) ano de 1977, (b) ano de 1977 com correção estatística, (c) ano de 1981 e (d) ano de 1981 com correção estatística 57

Figura 22. Comparação da velocidade de vento a 10 m de altura em (m/s), dos meses de setembro e outubro, a partir dos dados observados (linha preta) com os dados simulados (linha vermelha), para o município de Patos, (a) ano de 1977, (b) ano de 1977 com correção estatística, (c) ano de 1981 e (d) ano de 1981 com correção estatística 58

Figura 23. Comparação da velocidade de vento a 10 m de altura em (m/s), dos meses de setembro e outubro, a partir dos dados observados (linha preta) com os dados simulados (linha vermelha), para o município de Campina Grande, (a) ano de 1977, (b) ano de 1977 com correção estatística, (c) ano de 1981 e (d) ano de 1981 com correção estatística 59

Figura 24. Comparação da velocidade de vento a 10 m de altura em (m/s), dos meses de setembro e outubro, a partir dos dados observados (linha preta) com os dados simulados (linha vermelha), para o município de João Pessoa, (a) ano de 1977, (b) ano de 1977 com correção estatística, (c) ano de 1981 e (d) ano de 1981 com correção estatística 60

Figura 25. Correlação Linear entre os dados observados e os dados simulados para São Gonçalo, (a) setembro de 1977, (b) setembro de 1981, (c) outubro de 1977 e (d) outubro de 1981.....	61
Figura 26. Correlação Linear entre os dados observados e os dados simulados para Monteiro, (b) setembro de 1981, (c) outubro de 1977 e (d) outubro de 1981.....	62
Figura 27. Correlação Linear entre os dados observados e os dados simulados para Patos, (a) setembro de 1977, (b) setembro de 1981, (c) outubro de 1977 e (d) outubro de 1981.....	63
Figura 28. Correlação Linear entre os dados observados e os dados simulados para Campina Grande, (a) setembro de 1977, (b) setembro de 1981, (c) outubro de 1977 e (d) outubro de 1981.....	64
Figura 29. Correlação Linear entre os dados observados e os dados simulados para João Pessoa, (a) setembro de 1977, (b) setembro de 1981, (c) outubro de 1977 e (d) outubro de 1981.....	65
Figura 30. Rosa dos Ventos, velocidade e direção do vento a 10 m acima da superfície para os meses de março, abril, setembro e outubro medidos em São Gonçalo (a) dados observacionais para o ano de 1977, (b) dados simulados para o ano de 1977, (c) dados observacionais para o ano de 1981 e (d) dados simulados para o ano de 1981.....	68
Figura 31. Rosa dos Ventos, velocidade e direção do vento a 10 m acima da superfície para os meses de março, abril, setembro e outubro medidos em Monteiro (a) dados observacionais para o ano de 1977, (b) dados simulados para o ano de 1977, (c) dados observacionais para o ano de 1981 e (d) dados simulados para o ano de 1981.....	69
Figura 32. Rosa dos Ventos, velocidade e direção do vento a 10 m acima da superfície para os meses de março, abril, setembro e outubro medidos em Patos (a) dados observacionais para o ano de 1977, (b) dados simulados para o ano de 1977, (c) dados observacionais para o ano de 1981 e (d) dados simulados para o ano de 1981.....	70
Figura 33. Rosa dos Ventos, velocidade e direção do vento a 10 m acima da superfície para os meses de março, abril, setembro e outubro medidos em Campina Grande (a) dados observacionais para o ano de 1977, (b) dados simulados para o ano de 1977, (c) dados observacionais para o ano de 1981 e (d) dados simulados para o ano de 1981	71
Figura 34. Rosa dos Ventos, velocidade e direção do vento a 10 m acima da superfície para os meses de março e abril medidos em João Pessoa (a) dados observacionais para o ano de 1977, (b) dados simulados para o ano de 1977, (c) dados observacionais para o ano de 1981 e (d) dados simulados para o ano de 1981.....	72
Figura 35. Densidade média de potência eólica em (W/m ²) para o Estado da Paraíba para o seguinte período, (a) março de 1977, (b) março de 1981, (c) abril de 1977 e (d) abril de 1981	73
Figura 36. Densidade média de potência eólica em (W/m ²) para o Estado da Paraíba para o seguinte período, (a) setembro de 1977, (b) setembro de 1981, (c) outubro de 1977 e (d) outubro de 1981	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Relação das estações de superfície do INMET com dados horários de direção e velocidade do vento para o Estado da Paraíba	24
Tabela 2. Cenário dos quatro períodos estabelecidos neste trabalho.....	28
Tabela 3. Coeficiente de correção estatística, ou coeficiente de correção de Pearson. Fonte: Devore (2006).....	31
Tabela 4. Parâmetros meteorológicos das estações	41
Tabela 5. Índices estatísticos para a velocidade do vento nas localidades de São Gonçalo, Monteiro, Patos, Campina Grande e João Pessoa, onde EA é o Erro Absoluto Médio, EQM é o Erro Quadrático Médio e r é a correlação para o período de Março de 1977 e 1981	54
Tabela 6. Índices estatísticos para a velocidade do vento nas localidades de São Gonçalo, Monteiro, Patos, Campina Grande e João Pessoa, onde EA é o Erro Absoluto Médio, EQM é o Erro Quadrático Médio e r é a correlação para o período de Abril de 1977 e 1981	55
Tabela 7. Índices estatísticos para a velocidade do vento nas localidades de São Gonçalo, Monteiro, Patos, Campina Grande e João Pessoa, onde EA é o Erro Absoluto Médio, EQM é o Erro Quadrático Médio e r é a correlação para o período de Setembro de 1977 e 1981.	66
Tabela 8. Índices estatísticos para a velocidade do vento nas localidades de São Gonçalo, Monteiro, Patos, Campina Grande e João Pessoa, onde EA é o Erro Absoluto Médio, EQM é o Erro Quadrático Médio e r é a correlação para o período de Outubro de 1977 e 1981.	67

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	ESTUDOS OBSERVACIONAIS DO VENTO EM SUPERFÍCIE	16
2.2	MODELAGEM NÚMERICA APLICADA AO ESTUDO DO VENTO	18
2.3	DESCRIÇÃO DO MODELO BRAMS	22
3	MATERIAL E MÉTODOS	24
3.1	ÁREA DE ESTUDO E DADOS	24
3.2	OBTENÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO	25
3.3	SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	28
3.4	ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS SIMULAÇÕES	30
3.4.1	Correção Estatística do Modelo	30
3.4.2	Índices Estatísticos	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
4.1	CARACTERÍSTICAS DA DISTRIBUIÇÃO DO VENTO OBSERVADO	33
4.2	ESTIMATIVAS DA DENSIDADE DE POTÊNCIA EÓLICA NA REGIÃO EM ESTUDO	40
5	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COM O BRAMS	43
5.1	CENÁRIOS MARÇO/ABRIL	43
5.2	CENÁRIOS SETEMBRO/OUTUBRO	56
5.3	DISCUSSÕES COMPLEMENTARES	68
6	CONCLUSÕES	75
	REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento da utilização da energia eólica no mundo, novas tecnologias de geradores e topologias para as usinas eólicas têm sido criadas a fim de melhorar o aproveitamento da energia dos ventos e sua transmissão. Modelos numéricos de previsão de tempo são usados largamente em diversos centros meteorológicos e encontram uma gama de aplicações em agricultura, recursos hídricos, turismos etc. Forçada por dados e modelos globais, é comum aos centros meteorológicos locais manterem sistemas de previsão numéricas baseados em modelos atmosféricos de área limitada, com resoluções espaciais tipicamente da ordem de quilômetros.

Segundo Costa (2007), devido ao crescimento vertiginoso da capacidade dos computadores é possível lançar mão do processamento paralelo para realizar simulações de altíssima resolução espacial da ordem de centenas de metros. O uso desses modelos pode auxiliar tanto na identificação de localidades com elevados potencial eólico quanto, ao serem usados operacionalmente em integrações diárias, na previsão de geração de energia em curto prazo.

O funcionamento da sociedade moderna exige um enorme consumo de energia, conferindo ao meio ambiente um custo muito alto. De acordo com Magalhães e Rodrigues (2007), a energia representa o principal elemento de degradação ambiental, se comparada aos outros agentes poluidores. Numa escala planetária, a produção e o uso de energia contribuem com 76% das emissões de dióxido de carbono, óxidos de nitrogênio e metano, gases importantes no efeito estufa.

No ano de 2003, quando a população mundial era cerca de 6,27 bilhões de habitantes, o consumo mundial médio total de energia era 1,69 toneladas equivalentes de petróleo, (tep) per capita. Uma tonelada de petróleo equivale a 10 milhões de quilocalorias, (kcal), e o consumo diário médio de energia é de 46.300 kcal por pessoa. Como comparação, pode-se mencionar que 2.000 kcal é a energia diária que obtemos dos alimentos e que permite nossa sobrevivência. O restante é usado em transporte, gastos residenciais industriais e perdas nos processos de transformação de energia (GOLDEMBERG & LUCON, 2006).

A energia é essencial ao avanço do ser humano e está intimamente ligada a qualquer atividade e até mesmo à sobrevivência humana. Segundo Magalhães e Rodrigues (2007), desde o início da vida em sociedade, o homem procura fontes de energia que possam ser geradas e armazenadas para serem utilizadas quando forem necessárias. A utilização de

diversas formas de energia pela sociedade possibilitou a humanidade a desenvolver vários tipos de atividades que vão desde cozinhar alimentos até a movimentação de grandes indústrias. Os estágios do desenvolvimento humano podem ser correlacionados com a energia consumida ao longo do tempo.

Com o início da crise do petróleo, na década de setenta, a sociedade passou a procurar novas formas de energia para sua sobrevivência. A energia, mais do que nunca, tornou-se um bem decisivo no desenvolvimento econômico e social e por isso obriga as organizações internacionais, nacionais e locais a dar uma maior atenção às novas formas de energia a serem utilizadas, à sua utilização eficiente e aos efeitos provocados pelas emissões de CO₂.

Denomina-se energia eólica a energia cinética contida nas massas de ar em movimento (vento). Seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética de translação em energia de rotação, com o emprego de turbinas eólicas, também denominadas aerogeradores, para a geração de eletricidade, ou cata-ventos (e moinhos), para trabalhos mecânicos como bombeamento de água.

De acordo com Campos (2004), a diminuição dos custos da eletrônica, tanto de potência quanto da tradicional analógica ou digital, está fazendo com que as novas tecnologias, hoje possíveis, extraiam a energia do vento de forma muito mais eficiente, tornando a geração de energia eólica economicamente competitiva, inclusive em comparação com o uso de combustíveis fósseis.

O objetivo geral desse estudo é avaliar a capacidade do modelo numérico BRAMS em simular os campos de vento, para fins de avaliação do potencial eólico, no Estado da Paraíba. Neste sentido, será feita uma avaliação do potencial eólico nas regiões de São Gonçalo, Patos, Monteiro, Campina Grande e João Pessoa, do Estado da Paraíba, utilizando-se dados observados e simulados através do modelo regional BRAMS, para gerar mapas primários do potencial eólico da região.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica apresentada neste capítulo tem como finalidade principal verificar aspectos relacionados à geração de energia eólica. Neste sentido, os trabalhos mais relevantes para o estudo de vento observacional e numérico, em especial para geração de energia eólica no mundo, no Brasil e principalmente no Nordeste Brasileiro são apresentados.

2.1 ESTUDOS OBSERVACIONAIS DO VENTO EM SUPERFÍCIE

Alguns dos estudos relacionados com o comportamento dos ventos se concentram no problema do ajuste de distribuições estatísticas aos dados de velocidade do vento (JUSTUS e MIKHAIL, 1976; VAN DER AUWERA *et al.* 1980, entre outro). Os resultados destes estudos também indicam a distribuição de Weibull como a que melhor se ajusta a estes dados.

Bastos *et al.* (1987), utilizaram dados de direção e velocidade do vento em superfície para o nordeste brasileiro, verificou que a maior potência eólica localiza-se no litoral norte, em particular em regiões vizinhas a Macau (RN) e Acaraú (CE). Estas regiões se adentram no continente uma centena de quilômetros. No interior do nordeste encontram-se localidades com valores bem próximos aos encontrados no litoral.

Gomes Filho *et al.* (1990), utilizaram dados processados por Bastos *et al.* (1987), fizeram um estudo de correlação por defasagem entre as velocidades do vento em Campina Grande, nos horários das 16 e 17 horas, e as de Recife, João Pessoa e Patos. Os resultados sugerem que o fenômeno de intensificação observado em Campina Grande se propaga com velocidade aproximada de 70 km/h. As análises de direção mostraram que a intensificação ocorre próximo das 17 horas em Campina Grande e em torno das 21 horas em Patos, com um padrão de velocidades determinado pelo regime de vento de Recife e não pelo da brisa em João Pessoa. Os autores especulam que o fator determinante desse fenômeno é o acoplamento entre os ventos Alísios e a brisa marítima em Recife, intensificado pelo efeito orográfico ao atingir a Serra da Borborema.

Bento e Cavalcanti (1994) utilizaram os dados processados por Basto *et al.* (1987), para estudar o comportamento temporal e espacial do vento à superfície no Estado da Paraíba, considerando as localidades de João Pessoa, Campina Grande e Patos, situadas

próximas ao paralelo de 7°S. Os autores observaram, em função do mês e da hora do dia, que a componente zonal do vento é mais intensa (de leste) durante o verão, em torno das 10 horas em João Pessoa, 16 horas em Campina Grande e 20 horas em Patos. A componente meridional (de sul) é mais intensa nos mesmos horários, no período de julho a fevereiro. Durante o inverno, a componente zonal mantém-se relativamente fraca. Nos meses de março, abril, setembro e outubro a componente zonal praticamente não varia no período diurno em João Pessoa, ficando a componente meridional como a principal responsável pelas variações diurnas, o que significa que nesta época do ano o escoamento é praticamente paralelo à costa.

Os autores também detectaram um forte gradiente da componente zonal, orientado de leste para oeste, posicionado próximo de 35°W na encosta da Serra da Borborema, após as 14 horas. Esse gradiente sugere uma contribuição para formação de divergência e, portanto, movimento descendente do ar nessa faixa, intensificado à noite pelo provável efeito da brisa terrestre. Durante a noite, mais para o interior, em 38°W (no vale), o gradiente tem sentido contrário e o efeito inverso; convergência associada a movimento ascendente do ar, possivelmente formando uma outra célula. No que diz respeito à componente meridional, observaram um forte cisalhamento à noite e em torno de 5 ou 6 horas da manhã. A maior intensidade da componente meridional dos Alísios no período diurno (8-15 h), interagindo com a topografia na longitude em questão (35°W), parece compensar o efeito subsidente, prevalecendo o efeito da brisa marítima.

Molion e Bernardo (2000), estudaram a variabilidade horária do vento e sua influência na circulação de brisa, procurando estabelecer uma possível associação entre vento e ocorrência de precipitação em horários específicos do dia. Neste estudo utilizaram dados horários do vento (direção e intensidade) coletados pelo Serviço de Proteção ao Voo, (SPV) do Ministério da Aeronáutica (MAER), no Aeroporto de Maceió, no período de 1991-1996. Os dados foram coletados por uma estação automática com sensores de vento, velocidade e direção, a 10 metros de altura. Constataram que a brisa marítima, que ocorre durante o dia, está em fase com os Ventos Alísios, portanto soma-se a estes, fazendo com que a velocidade do vento atinja facilmente valores superiores a 5,0 m/s. Já a brisa terrestre, que ocorreu no período noturno, com velocidade inferior a 1,0 m/s se, contrapõe ao campo dos Alísios e sua velocidade se subtrai, provocando calmarias durante algumas horas do período noturno.

Barreto *et al.* (2002), usaram dados de direção e velocidade do vento em superfície (10 metros de altura), coletados de 77 estações meteorológicas de superfícies do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), espalhadas por toda a Região Nordeste, para estudar o ciclo diário do vento em superfície em toda essa região. Esse estudo mostrou que

nas áreas litorâneas, o vento intensifica-se no período diurno, atingindo intensidade máxima no início-meio da tarde, em resposta ao escoamento médio de grande escala e a brisa marítima, desintensificando-se no período noturno com a atuação da brisa terrestre, no sentido contrário ao escoamento médio de grande escala, o que ocasiona um mínimo de intensidade no final da noite-início da manhã. Fortes indícios da penetração da brisa marítima continente adentram em estados do norte do Nordeste, interagindo com o escoamento médio e outras circulações locais em áreas de orografias complexas, com máximo secundário em algumas áreas.

Silva *et al.* (2002), caracterizaram o regime dos ventos predominantes visando quantificar os recursos eólicos da região. Utilizaram a velocidade e direção do vento a 10 metros de altura, provenientes de 22 estações meteorológicas de superfícies do Instituto Nacional de Meteorologia, (INMET), para o período de janeiro de 1977 a dezembro de 1981. Distribuições de frequência da velocidade em direções predominantes foram geradas. Os resultados mostraram que a distribuição de frequência Weibull representou adequadamente a distribuição de frequência da velocidade do vento, propiciando a identificação de áreas com grande potencial de geração de energia eólica no Estado da Bahia.

Gonçalves (2008) mostrou que os dados práticos coletados pelas estações meteorológicas da escola politécnica e da COELBA/UNIFACS (edifício-sede da COELBA) verificou que a velocidade média dos ventos nos dois locais analisados é relativamente baixa para um aproveitamento eficiente de turbinas eólicas, sejam elas de eixo horizontal ou vertical. Porém, a instalação de uma turbina eólica tornaria possível a geração de energia no próprio ponto de consumo e contribuiria com a redução do consumo de energia entregue pela rede elétrica convencional, ainda que em pequena escala.

2.2 MODELAGEM NÚMERICA APLICADA AO ESTUDO DO VENTO

Alves *et al.* (2005), utilizaram séries de dados de velocidade e direção do vento gerado pelas reanálises do NCEP/NCAR. Investigaram a variabilidade do movimento vertical (w) e de índices atmosféricos associados às Células de circulação do vento de Walker e de Hadley na chuva da pré-estação chuvosa (novembro a janeiro) e na estação chuvosa (fevereiro a maio) para anos de contrastes climáticos, no período de 1971-2000.

Chou *et al.* (2006) realizaram um estudo no qual mostra o mapeamento eólico para o Nordeste, a partir de simulações do Modelo ETA, com 10 km de resolução horizontal, onde as médias anual e sazonal foram catalogadas para os ventos a 50 m. Ressaltam também que as principais regiões de ventos intensos e persistentes coincidiram com as regiões indicadas pelo Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, publicado pelo Ministério de Minas e Energia e que os principais pontos de destaque foram: a divisa entre Piauí e Ceará, as divisas entre Piauí e Pernambuco, várias áreas na Chapada Diamantina, na Bahia, litoral e faixa em pontos altos da Serra da Borborema, no Rio Grande do Norte e Pernambuco, litoral e algumas regiões altas no Ceará.

Leal Júnior *et al.* (2006) estudaram a variabilidade temporal do vento no Estado do Ceará para identificação de padrões de circulação local. A série temporal de velocidade do vento, no período que vai de junho de 2002 até fevereiro de 2006, foi obtida através de anemômetros localizados a 10 metros de altura nas Plataformas de Coleta de Dados (PCD) da FUNCEME. Sobre esta série foi feita uma Análise de Componentes Principais (ACP), que é utilizada quando se deseja reduzir a dimensão do problema, permitindo uma interpretação em um espaço de pequenas dimensões e reduzindo-se ao máximo a perda de informação.

Concluíram que a primeira componente explica aproximadamente quase 46% da variância total do vento observado em superfície, deixando as outras com pequena porcentagem da variância. O que significa que grande parte da informação sobre a variabilidade temporal está inclusa nessa componente. Além disso, dois padrões distintos de circulação foram observados: regiões serranas, situadas na Chapada da Ibiapaba, noroeste do Ceará, e na Serra de Baturité, centro norte do Ceará, e região litorânea, ao longo da costa do estado, penetrando no continente, contornando as serras e acompanhando os rios Jaguaribe e Acaraú.

Sacramento *et al.* (2006) realizaram um estudo preliminar sobre o potencial eólico da Serra da Ibiapaba-CE. Neste estudo foram utilizados os dados das Plataformas de Coleta de Dados, (PCDs), da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, (FUNCEME). Foram selecionadas duas PCDs localizadas na Serra da Ibiapaba (cidades de São Benedito e Ubajara) que estiveram em funcionamento por um período de um ano (Janeiro a Dezembro/2005). Os dados de vento foram medidos a 10 metros de altitude.

Os resultados deste estudo mostraram, segundo os autores, que nas regiões serranas é pequena a variabilidade do vento, em virtude do clima atípico, dada a altitude das regiões. O período de ventos mínimos coincidiu com o período chuvoso do estado, enquanto o período de ventos máximos coincidiu com o período mais seco do Ceará.

Dada a direção predominante dos ventos, concluíram também que o principal forçante dos ventos são os Ventos Alísios, intensificados ou enfraquecidos pelo acoplamento com a circulação vale-montanha, nas regiões de São Benedito e Ubajara, indicadas como detentoras de um ótimo potencial eólico.

De Maria *et al.* (2006) realizaram uma simulação da circulação de vento sobre o Estado do Ceará. As regiões mais enfatizadas foram o Litoral Norte e o entorno do Litoral de Fortaleza. Neste estudo, uma simulação em alta resolução espacial foi feita com o *Regional Atmospheric Modeling System*, (RAMS), em sua versão 6.0, com o propósito de avaliar preliminarmente a habilidade do modelo em trabalhar como sistema de previsão de ventos para geração de energia eólica. No trabalho acima citado, dois tipos de estações foram usadas na coleta dos dados observacionais: as Torres Anemométricas, (TAs), e as Plataformas de Coleta de Dados, (PCDs). Nas TAs, a velocidade do vento foi medida em três níveis (20, 40 e 60 metros acima do solo) e a direção em 2 níveis (40 e 60 metros).

Os autores concluíram que, de forma geral, o modelo mostrou-se competente ao realizar as tarefas para as quais foi destinado. Além disso, correções estatísticas forneceram uma solução para os períodos nos quais o modelo menos se aproximou da realidade, e assim constatou-se que maiores graus dos polinômios da correção podem resultar em melhores correlações com dados observados, oferecendo resultados bastante promissores no que tange ao uso aplicado do modelo em um sistema operacional de previsão de ventos para geração de energia eólica.

Camelo *et al.* (2006) estudaram a circulação local na região do Vale do Rio Jaguaribe no Estado do Ceará. Para simular a evolução temporal do vento ao longo do Rio Jaguaribe foi utilizada a versão 6.0 do RAMS. Esta evolução temporal da velocidade do vento comparada aos dados observados nas PCDs da FUNCEME à 10 metros de altura, no período de 01 a 30 de novembro de 2005.

Como resultado foi identificado o aparecimento de uma região com máximo de velocidade do vento paralelo à costa, na região do Rio Jaguaribe, a partir das 20:00h, horário local, se dispersando depois de 00:00h. Sua trajetória segue o curso do Rio Jaguaribe, adentrando o Sertão do Ceará. Adicionalmente, comparou-se a simulação com os dados observados nos municípios ao longo do Rio Jaguaribe para velocidade e constatou-se que o RAMS tende a reproduzir de maneira satisfatória os campos observacionais.

Oliveira (2007) analisou a influência da variabilidade climática e os impactos da circulação geral no comportamento dos ventos sobre o Nordeste do Brasil, com enfoque no Estado do Ceará utilizando o RAMS. Concluiu que a ocorrência de El Niño e dipolo positivo

no Atlântico apresentam condições significativamente melhores para a geração de energia eólica, enquanto que no cenário de La Niña e dipolo negativo, tem-se chuva e conseqüentemente reservatórios abastecidos proporcionando melhores condições para geração de energia hidrelétrica.

Lira (2009) apresentou uma estimativa dos recursos eólicos, no litoral cearense usando a teoria da regressão linear. Seu objetivo principal foi estimar valores de velocidade média do vento em altitude, a partir de dados observados a 10 metros. Duas regiões são investigadas: Paracuru e Camocim, ambas situadas no Estado do Ceará.

O modelo de regressão linear mostrou um bom desempenho quer seja pelo alto índice de concordância entre as series de dados estimados e a série de dados observados e seus respectivos coeficientes de correlação, quer seja pelos baixos valores dos erros entre essas séries. Em algumas situações, na região de Paracuru, encontraram-se valores de coeficientes de correlação da ordem de 0,99 e coeficiente de determinação explicando 98% da variabilidade dos dados observados. Em Paracuru, encontraram-se valores de erros relativos na ordem de 0,02%.

Os resultados desse estudo, além de confirmarem que Paracuru e Camocim são regiões potencialmente favoráveis ao aproveitamento da energia eólica, mostraram também que é possível, tendo-se como referência os dados de velocidade média do vento nas PCDs da FUNCEME, se estimar valores de velocidade média do vento em altitude em regiões onde não existem torres anemométricas.

Segundo Sauer *et al.* (2006), o Brasil oferece excelentes sítios para instalação de parques eólicos, sendo que as melhores áreas se encontram ao longo da costa. No entanto, indica que no interior, particularmente no Nordeste, onde está inserido o Estado da Paraíba, encontram-se sítios com capacidade de geração de energia eólica.

Encontra-se em Leite e Filho (2006) que a velocidade do vento é uma variável aleatória, com ocorrência de variações anual, mensal, diária e até mesmo horária nos valores médios estimados dentro de uma série de dados. Assim, fica evidente a importância da utilização de uma análise mais criteriosa, através da distribuição de frequência dos valores estimados, dos valores a serem assumidos como geradores de potencial eólico numa determinada região.

Todos os trabalhos acima citados evidenciam o quanto se tem enfatizado ao longo da última década o estudo da quantificação da velocidade ou do regime de ventos, no nordeste brasileiro. Um fator que contribuiu de forma definitiva para o aumento do interesse por esta área de estudo foi o cenário relacionado ao setor elétrico brasileiro que, visando diversificar a

matriz energética nacional, criou condições favoráveis para o investimento de recursos técnicos e financeiros para o aproveitamento da energia eólica.

2.3 DESCRIÇÃO DO MODELO BRAMS

Vários modelos numéricos de mesoescala como, por exemplo, o RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*) descrito em Cotton *et al.* (2003), o RSM (*Regional Spectral Model*) descrito em Juang e Kanamitsu (1994), o MM5 descrito em Duhdia *et al.* (2005), resolvem processos físicos desde a superfície até a alta atmosfera. Estes modelos são aplicados desde a previsão de tempo, até a medição de dispersão de poluentes.

Entre estes, o modelo BRAMS (*Brazilian development on the Regional Atmospheric Modeling System*), desenvolvido a partir do RAMS onde a estrutura básica é descrita por: (PIELKE *et al.* 1992; WALKO *et al.* 1995; COTTON *et al.* 2003). Porém, uma descrição objetiva e sucinta deste modelo pode ser encontrada em Cavalcanti (2001).

O BRAMS foi desenvolvido por pesquisadores brasileiros através de um projeto conjunto da ATMET (*Atmospheric Meteorological and Environmental Technologies*), IME/USP (Instituto de Matemática e Estatística/ Universidade de São Paulo), IAG/USP (Instituto de Astronomia Geofísica/ Universidade de São Paulo) e o CPTEC/INPE (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e o Departamento de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Campina Grande (DCA/UFCG), financiado pela FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos), com o objetivo de desenvolver uma nova versão do RAMS adaptado aos trópicos, tendo em vista um modelo único para a previsão de tempo em escala regional (GOUVÊA, 2007; TEICHRIEB, 2008).

Em 2007 foi liberada uma nova versão do BRAMS; a versão 4.2, resultado das melhorias, computacionais e meteorológicas, feitas na versão anterior do BRAMS e mais algumas correções baseadas no RAMS 6.0.

Este modelo possui um completo e sofisticado conjunto de parametrizações físicas para simular os processos governantes da evolução do estado atmosférico. Ele contém em seu código várias opções de parametrizações físicas. Parametrizações: radiação proposta por Chen e Cotton (1983), a de convecção profunda do tipo Kuo (KUO, 1965; 1974), modificada por Molinari (1985) e Molinari e Corsetti (1985) e a de Grell e Dévényi (2002) e a de convecção rasa desenvolvida e implementada por Souza (1999). A turbulência na camada limite

planetária é calculada segundo Mellor e Yamada (1982) e a microfísica segue o esquema descrito por Walko *et al.* (1995).

O BRAMS na versão 3.2 diferencia-se do RAMS pela introdução da parametrização de cumulus rasos (SOUZA e SILVA, 2003), de uma nova parametrização de convecção profunda do processo de assimilação de umidade do solo heterogênea, da parametrização de superfície SIB2 e de um conjunto de dados no LEAF-3 (*Land Ecosystem-Atmosphere Feedback Model*) com parâmetros observacionais para biomas da América do Sul, bem como aprimoramentos do código para melhor eficiência computacional, como a reprodutibilidade binária.

Em sua versão mais recente o modelo conta com uma parametrização para os processos fotoquímicos na atmosfera (FREITAS *et al.* 2005), além do tratamento adequado para áreas urbanas através do esquema TEB (*Town Energy Budget*), introduzido na versão 4.3 do modelo RAMS (FREITAS *et al.* 2007).

O uso dos modelos de mesoescala pode apresentar resultados importantes no entendimento dos mecanismos das variáveis relacionadas ao comportamento eólico, bem como serem utilizadas para conduzir modelos de microescala para estimativas dos recursos eólicos com maior precisão (FRANCK *et al.* 2001; LANDBERG *et al.* 2003).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO E DADOS

Os dados utilizados nesta pesquisa são observações horárias de direção e velocidade do vento para um período de cinco anos, janeiro de 1977 a dezembro de 1981, coletadas em cinco estações, localizadas no Estado da Paraíba, são estações meteorológicas de superfície da Rede Climatológica do Nordeste operada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Os dados provêm de anemógrafos Universais Fuess, cujos sensores se encontram a 10 metros de altura. Informações referentes ao processamento e análise desses dados visando determinar o potencial eólico são encontrados em Bastos *et al.*, (1987). Foram consideradas todas as medições obtidas no período de janeiro de 1977 a dezembro de 1981.

A direção do vento a 10 m acima do solo foi obtida dividindo-se em oito faixas centradas nas direções, Norte (0°), Nordeste (45°), Leste (90°), Sudeste (135°), Sul (180°), Sudoeste (225°), Oeste (270°) e Noroeste (315°), no sentido horário, cada faixa corresponde a 45° , e a direção Norte, por exemplo, compreende os ventos com direção entre ($0^\circ \pm 22,5^\circ$), Nordeste de ($45^\circ \pm 22,5^\circ$), Leste de ($90^\circ \pm 22,5^\circ$), Sudeste ($135^\circ \pm 22,5^\circ$), Sul ($180^\circ \pm 22,5^\circ$), Sudoeste ($225^\circ \pm 22,5^\circ$), Oeste ($270^\circ \pm 22,5^\circ$) e à Noroeste de ($315^\circ \pm 22,5^\circ$). A localização das estações com suas respectivas, latitude, longitude e a altitude são dadas na Tabela 1.

Tabela 1. Relação das estações de superfície do INMET com dados horários de direção e velocidade do vento para o Estado da Paraíba

Localidade	Número sinótico	Latitude (S)	Longitude (W)	Altitude (m)
São Gonçalo	82698	$6^\circ 50'$	$38^\circ 19'$	235
Monteiro	82792	$7^\circ 52'$	$37^\circ 07'$	596
Patos	82791	$7^\circ 01'$	$37^\circ 17'$	250
Campina Grande	82795	$7^\circ 13'$	$35^\circ 53'$	508
João Pessoa	82798	$7^\circ 07'$	$34^\circ 53'$	5

3.2 OBTENÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO

A força do vento disponível para uma turbina eólica é a energia cinética associada ao movimento de uma dada quantidade de massa de ar, que consiste basicamente de um rotor de duas ou três hélices acoplado a um gerador elétrico. Considerando um rotor de eixo de rotação horizontal, como visto na Figura 1, suas pás ou hélices varrem um tubo de corrente de área S . A energia cinética que uma determinada massa de ar em movimento possui, é dada por:

$$E = \frac{1}{2} v^2 m \quad (1)$$

em que (E) é a energia associada ao movimento de uma dada massa de ar, (m) é a massa do ar e (v) é a velocidade do vento num dado momento. A massa do ar é dada por:

$$m = \rho V \quad (2)$$

em que (V) é o volume do cilindro desta quantidade de ar e ρ a densidade do ar.

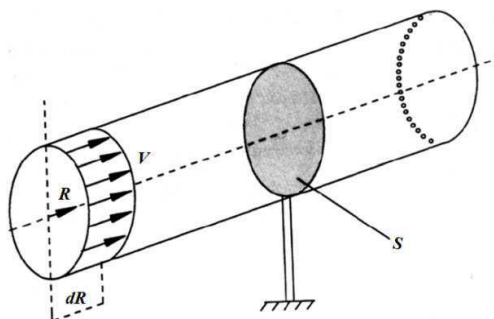


Figura 1. Volume de ar cilíndrico. Fonte: Marques (2004)

Assumindo a velocidade do vento constante, o volume da massa de ar corresponde à área (S), onde tem-se um círculo hipotético de raio (R), que é o comprimento de cada pá de hélice da turbina, multiplicado pelo comprimento (L) percorrido pela massa de ar.

Logo:

$$E = \frac{1}{2} S \rho v^2 L \quad (3)$$

sabe-se que a potência (P) é dada pela taxa de variação da energia em relação ao tempo, logo tem-se:

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} S \rho v^3 \quad (4)$$

A Equação 4 é válida para uma turbina eólica cujas pás varrem uma determinada área S . Assim, para avaliar-se o potencial eólico de uma região é melhor utilizar-se de uma grandeza independente da turbina que irá ser instalada: a densidade de potência, D_p . ela é definida como sendo a potência eólica disponível por unidade de área, em W/m^2 , pode ser escrita como:

$$D_p = \frac{P}{S} = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (5)$$

em que v representa a velocidade do vento na altura do cubo da turbina, ou seja, no centro de rotação de suas pás.

Os dados de vento foram medidos a 10 m de altitude. Utilizou-se a expressão logarítmica para estimar a velocidade do vento nas alturas de 50 m, 80 m e 120 m, alturas características dos aerogeradores (MANWELL *et al.* 2002; ROBALLO *et al.* 2008).

$$v(z) = v(z_r) \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0}\right)} \quad (6)$$

em que $v(z_r)$ é a velocidade na altura de referência 10 m, $v(z)$ é a Velocidade na altura desejada, z altura desejada, z_r altura de referência e z_0 é a rugosidade da região, neste caso foi adotado, 0,03 m.

O modelo da distribuição de Weibull fornece um satisfatório ajuste para a distribuição de ventos de uma região (Justus e Mikhail, 1976; Sansigolo, 2005). Escrita como:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (7)$$

em que, o fator de forma (k) determina a forma da curva de distribuição de Weibull. Esse parâmetro indica a variabilidade dos ventos, ou seja, quanto maior o valor de k , maior será a regularidade do regime de vento, em termos de velocidade do vento. O parâmetro de escala (c) é o fator característico da distribuição que apresenta a mesma unidade de medida da grandeza analisada, e v é a velocidade do vento num dado intervalo de tempo (Castros, 2005).

Os parâmetros de Weibull foram determinados pelo método dos momentos seguindo o mesmo procedimento adotado por (Carvalho, 2003; Silva *et al.*, 2004; Muniz, 2007).

A densidade de potência eólica (D_p) do fluxo instantâneo do vento em (W/m^2) foi calculada com base nos parâmetros da distribuição de Weibull é dada por:

$$D_p = \frac{1}{2} \rho E(v^3) \quad (8)$$

em que $E(v^3)$ é o terceiro momento centrado na origem que, para a distribuição de Weibull é igual a:

$$E(v^3) = c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (9)$$

tem-se que Γ é a função matemática gamma. Escrita como:

$$\Gamma(V) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{V-1} dt \quad (10)$$

3.3 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

As simulações numéricas foram realizadas utilizando-se o modelo BRAMS, com o intuito de avaliar o potencial eólico no Estado da Paraíba, em comparação aos dados observacionais. Foram estabelecidos quatro períodos de março e abril, de 1977 e 1981, correspondentes à temporada do ano de menores intensidades de vento, ou seja, o período chuvoso, e setembro e outubro, dos referidos anos, correspondentes ao período de maiores intensidades de vento, ou seja, o período seco. Os anos escolhidos para análise correspondem às menores e maiores intensidades de vento respectivamente no período observado.

Tabela 2. Cenário dos quatro períodos estabelecidos neste trabalho

	1977	1981
Março/Abril	Cenário 1	Cenário 2
Setembro/Outubro	Cenário 3	Cenário 4

Na simulação do vento com o BRAMS para fins relacionados à geração de energia eólica se faz necessário a utilização de alta resolução. Neste sentido, adotou-se duas grades a grade principal tem uma área retângulo com 80 pontos na direção x e 80 pontos na direção y , com espaçamento de 16 km de cada ponto de grade, correspondendo a uma área que cobre quase toda a região do Nordeste. Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e parte da Bahia e a grade aninhada, situada entre os limites do retângulo pequeno, em azul, possuindo 122 pontos na direção x e 66 pontos na direção y , com espaçamento de 4 km, correspondendo à região da Paraíba. A frequência das análises feitas pelo modelo foram padronizadas para intervalos horários e com as duas grades possuindo 9 níveis de camada de solo. A Figura 3 apresenta uma visualização das grades.

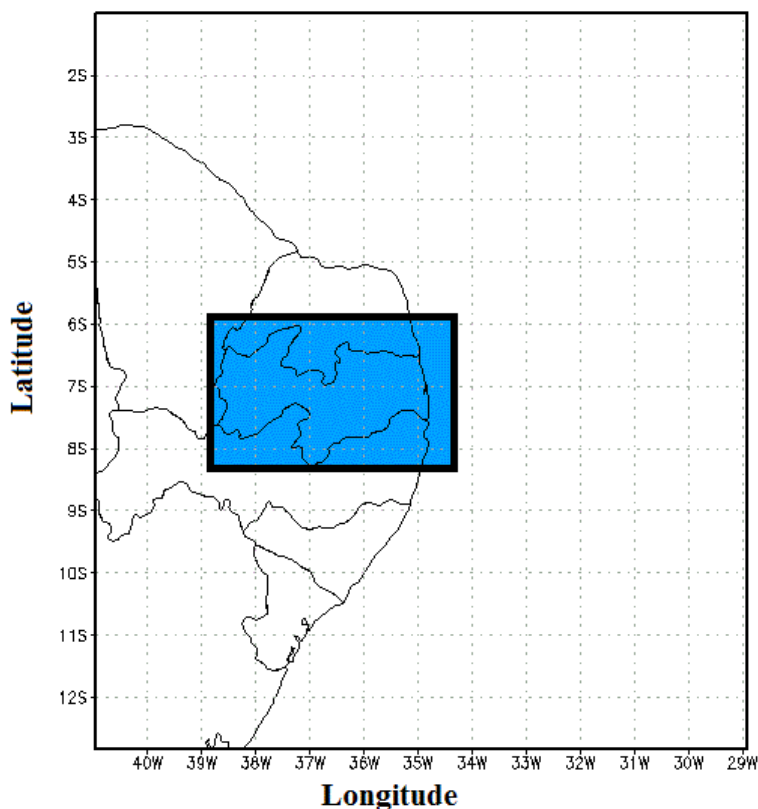


Figura 2. Grade utilizada: 80 x 80 pontos. Área útil para análise: área colorida

Todas as grades apresentam projeção polar-estereográfica e a mesma estrutura vertical, que consiste de 42 níveis com razão de alargamento (*stretch ratio*) de 1,2 e espaçamento máximo de 1000 m.

O Relaxamento Newtoniano, (*nudging*), lateral é ativado utilizando 5 pontos, assumindo 1800 s, ou 30 min, como valor constante para todo o período simulado. Já o Relaxamento Newtoniano do topo tem uma escala de 21.600 s, ou 6 h. O Relaxamento Newtoniano no interior do domínio assumiu o mesmo valor do Relaxamento Newtoniano no topo.

Para a parametrização de radiação é utilizado o esquema do tipo Chen, tanto para radiação de onda longa, quanto para onda curta. A parametrização de microfísica utilizada é a de nível 2 do modelo. A parametrização de convecção também foi ativada, sendo o tipo Kuo (Kuo 1965, 1974; Anthes, 1977), a escolhida. Para a parametrização de turbulenta foi escolhida o esquema de Mellor-Yamada.

3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS SIMULAÇÕES

3.4.1 Correção Estatística do Modelo

Para ajustar os dados obtidos pelo BRAMS (representativo da área da grade) com os dados observados (pontuais) foi utilizado o método estatístico, segundo Reis Junior *et al.* (2006); Camelo, (2007) que baseia-se na utilização da média e do desvio padrão das séries observadas e simuladas dada como:

$$\phi_{ci} = \left(\phi_i - \bar{\phi}_i \right) \frac{\sigma_o}{\sigma_i} + \bar{\phi}_o \quad (11)$$

em que ϕ_i representa um valor da simulação, $\bar{\phi}_i$ a média dos valores simulados, σ_o o desvio padrão das séries observadas, σ_i o desvio padrão das séries simuladas por fim, $\bar{\phi}_o$ representa a média dos dados observacionais.

3.4.2 Índices Estatísticos

Diversas são as formas de comparação de modelos numéricos atmosféricos de mesoescala com dados observacionais. Dentre elas, pode-se destacar a comparação direta entre os dados da simulação numérica computacional com os dados das estações meteorológicas e a análise estatística de erros através de cálculos de erro absoluto, erro quadrático médio e correlação estatística.

Através dos estudos de Weber, Buckner, (1982), De Maria (2007) e Cunha (2008), conclui-se que a melhor forma de se avaliar um modelo é utilizando-se um conjunto de índices estatísticos, de forma que possam ser minimizados os erros de interpretação. Por essa razão, é utilizado neste trabalho um conjunto de 3 índices estatísticos: o Erro Absoluto Médio, o Erro Quadrático Médio e o Índice de Correção.

O Erro Absoluto Médio (*EA*) é dado por:

$$EA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |\phi_i - \phi_o| \quad (12)$$

Pela definição, *EA* só pode assumir valores positivos, de forma que quanto menor o valor, maior a semelhança entre as séries.

O Erro Quadrático Médio (*EQM*) é dado pela soma dos quadrados das diferenças entre os resultados do modelo e observações:

$$EQM = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\phi_i - \phi_o)^2 \right]^{1/2} \quad (13)$$

Pode assumir qualquer valor positivo e tem a mesma unidade de medida das séries. É maior a semelhança entre as séries simuladas e observadas quanto mais próximo de zero for à medida do erro.

Uma interpretação mais detalhada do coeficiente de correlação estatística *r* pode ser vista em Devore (2006). Na Tabela 3 tem-se uma interpretação mais refinada do coeficiente de correlação de Pearson.

Tabela 3. Coeficiente de correção estatística, ou coeficiente de correção de Pearson. Fonte: Devore (2006)

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

$$r = \frac{\Sigma(\phi_i - \bar{\phi}_i)(\phi_o - \bar{\phi}_o)}{\sqrt{\left[\Sigma(\phi_i - \bar{\phi}_i)^2 \right] \left[\Sigma(\phi_o - \bar{\phi}_o)^2 \right]}} \quad (14)$$

O valor de um coeficiente de correlação, não é garantia de que as variáveis envolvidas realmente estejam correlacionadas, porém antes de tirar qualquer conclusão sobre os valores dos coeficientes de correlação é necessária a aplicação de um teste estatístico para conhecer o grau real de ligação entre as variáveis analisadas. Para testar a igualdade entre duas médias, o teste *t* de Student é muito utilizado (Huang e Paes, 2009; Menezes, 2010).

Foi aplicado o teste de significância t de Student, com os seguintes valores do parâmetro t :

$$t = \frac{r\sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (15)$$

em que N é o número de dados.

A partir da equação 15 foi extraído o coeficiente de correlação crítico (r_c), que é um valor para a qual aceita ou não a hipótese estatística, r_c é dados por:

$$r_c = \sqrt{\frac{t^2}{(N-2)+t^2}} \quad (16)$$

Tem-se para a variável utilizada neste trabalho, série de dados de 31 e 30 dias, respectivamente. Calcularemos os índices de correlação crítico r_c .

Para a correlação, $N = 31$, ou seja, 31 dias correspondentes aos meses de março e outubro, $N - 2 = 29$, que é o grau de liberdade. Então os valores de t e r_c são:

- Para 99 % de significância, ou seja, com erro de 1 % ($\alpha = 0,01$), $t = 2,462$; $r_c = 0,42$;
- Para 95 % de significância, ou seja, com erro de 5 % ($\alpha = 0,05$), $t = 1,699$; $r_c = 0,30$;
- Para 90 % de Significância, ou seja, com erro de 10 % ($\alpha = 0,10$), $t = 1,311$; $r_c = 0,24$.

Para a correlação, $N = 30$, ou seja, 30 dias correspondentes aos meses de abril e setembro, $N - 2 = 28$, que é o grau de liberdade. Então os valores de t e r_c são:

- Para 99 % de significância, ou seja, com erro de 1 % ($\alpha = 0,01$), $t = 2,467$; $r_c = 0,42$;
- Para 95 % de significância, ou seja, com erro de 5 % ($\alpha = 0,05$), $t = 1,701$; $r_c = 0,30$;
- Para 90 % de Significância, ou seja, com erro de 10 % ($\alpha = 0,10$), $t = 1,313$; $r_c = 0,24$.

Significa que para os coeficientes de correlação obtidos com 29 e 28 de graus de liberdade, a significância estatística de que realmente há correlação entre as variáveis é de 99 %, 95 % e 90 % para r igual ou superior a 0,42, 0,30 e 0,24, respectivamente.

O resultado obtido pode sugerir a aceitação da hipótese de nulidade do coeficiente ou não. Caso o coeficiente de correlação calculado seja igual ou superior ao valor do t crítico para um determinado grau de liberdade e percentual de significância, a hipóteses de nulidade é rejeitada e a tendência observada é verdadeira para aquele nível de significância obtido (Bruni, 2007; Menezes, 2010).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERÍSTICAS DA DISTRIBUIÇÃO DO VENTO OBSERVADO

A Figura 3 representa as médias calculadas para cada mês durante os cinco anos em estudo. É possível observar que de 1977 a 1981 foram registradas velocidades de vento que em média atingiram cerca 1,0 m/s e 4,0 m/s para ventos a 10 m e velocidades superiores a 4,0 m/s para as velocidades de vento a 50 m, 80 m e 120 m, acima do nível do solo. É possível observar a ocorrência de falhas de dados, em especial nas localidades de Monteiro e João Pessoa. Fica evidente também a presença de um ciclo anual com máximos, no segundo semestre dos anos.

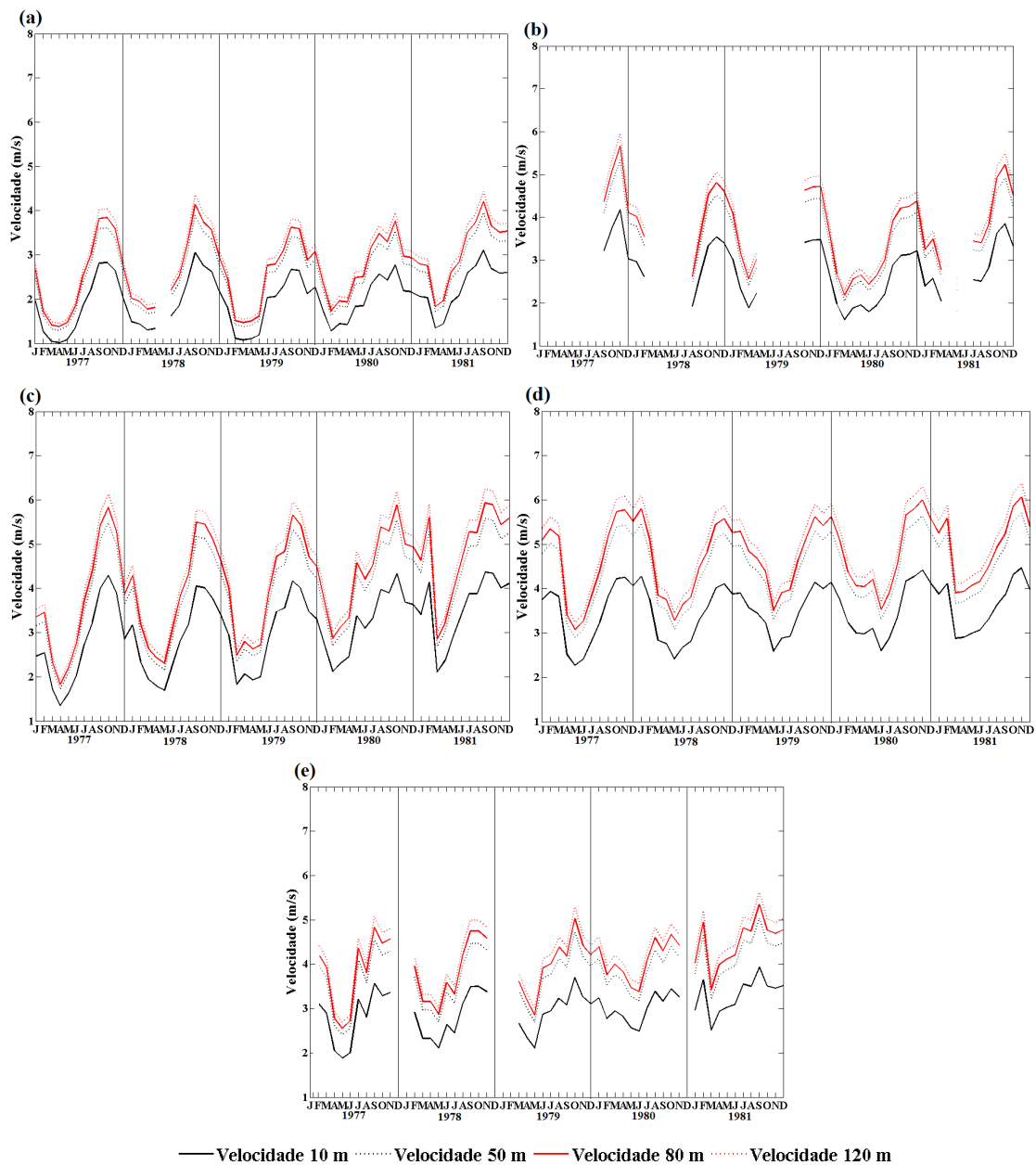


Figura 3. Variação média mensal das velocidades dos anos em estudo para as estações, a) São Gonçalo, b) Monteiro, c) Patos, d) Campina Grande, e) João Pessoa

Na Figura 4 é observada a variação mensal média da direção do vento para os cinco anos. A direção do vento nas regiões de São Gonçalo, Monteiro e Patos variaram ente os ângulos de 20° e 140° no período em estudo, enquanto que em Campina Grande e João Pessoa variou entre os ângulos de 80° e 160° , sendo que em 1979 e 1980 o máximo aproximou-se de 180° . As mesmas falhas se repetem para a direção do vento.

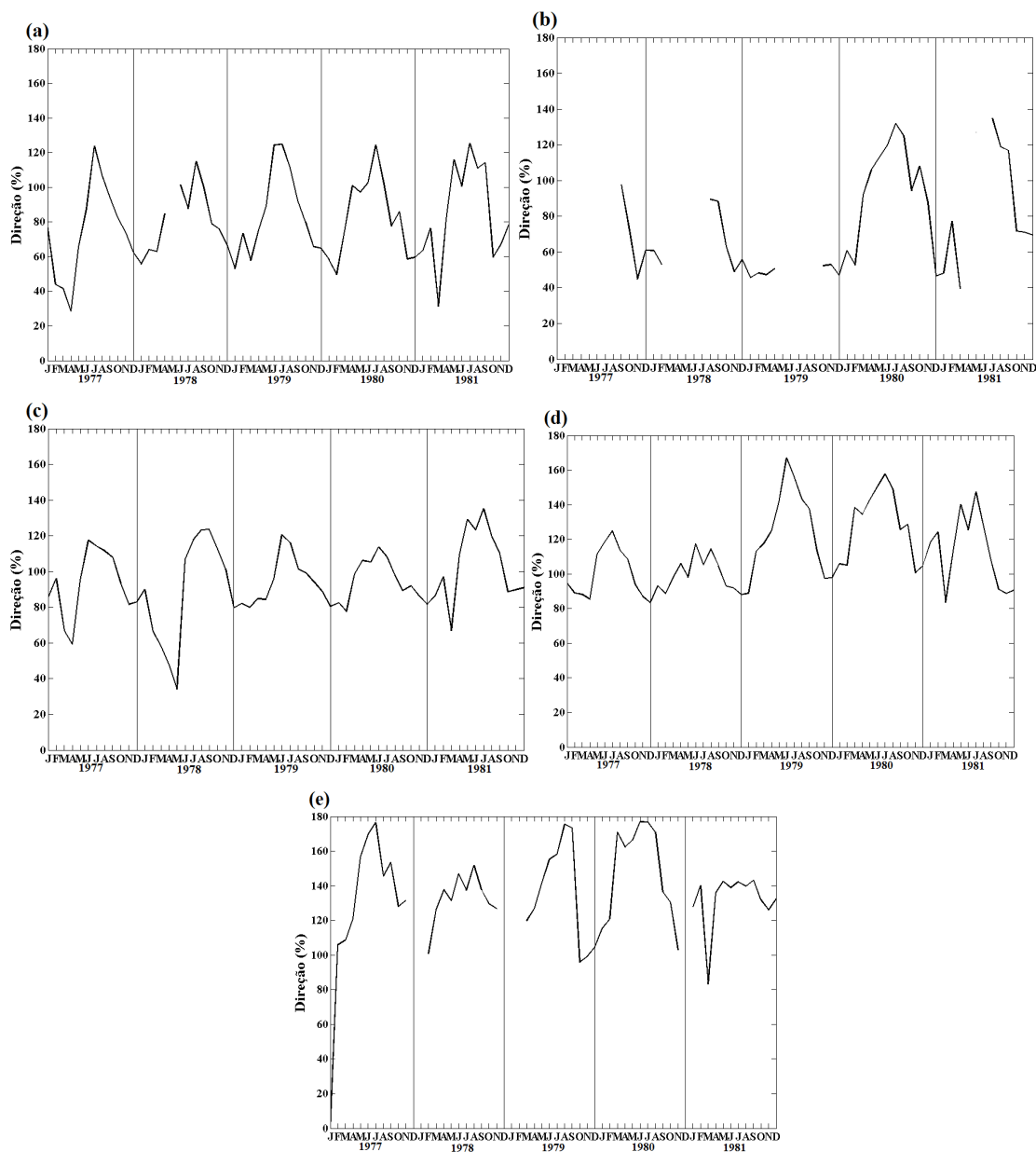


Figura 4. Variação média mensal da direção do vento dos anos em estudo para as estações, a) São Gonçalo, b) Monteiro, c) Patos, d) Campina Grande, e) João Pessoa

A velocidade média mensal dos ventos a 10 m de altura, para as cinco estações em estudo, é mostrada na Figura 5. Os valores foram estimados através do perfil logaritmo do vento, para os níveis de 50 m, 80 m e 120 m, usando a constante de rugosidade da superfície de 0,03 m. Observa-se também nesta Figura a variação sazonal de velocidade média do vento.

Desta forma, fica evidente que os valores menores ocorrem no período chuvoso das regiões, enquanto que os maiores valores de velocidade do vento ocorrem nos meses de setembro a outubro, período mais seco. Estas medições mostram uma característica interessante com presença de ventos máximos no segundo semestre (final do inverno, primavera e início do verão).

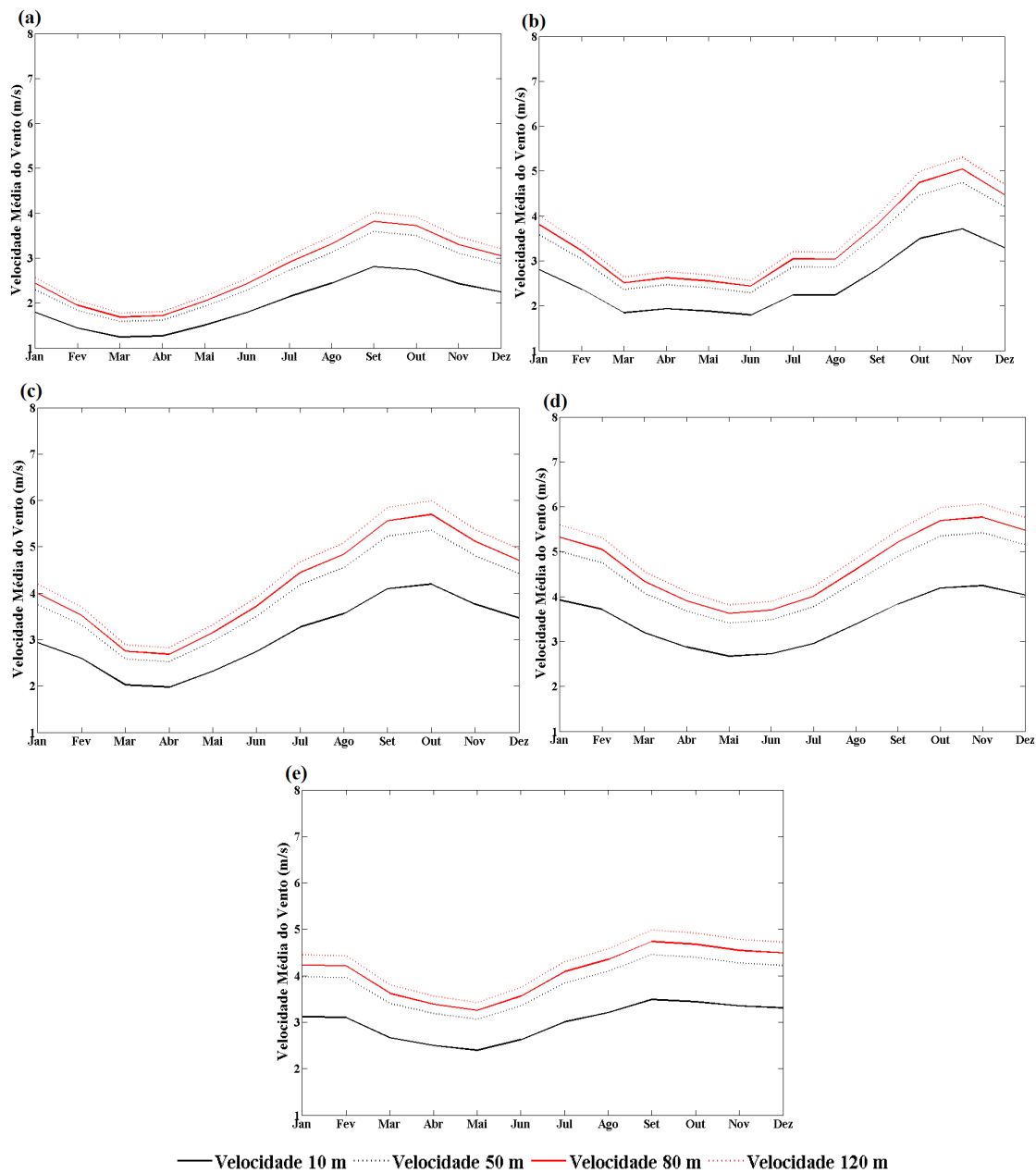


Figura 5. Ciclo anual da Velocidade média (m/s) e estimadas para os níveis de 50 m, 80 m e 120 m acima do solo, a) São Gonçalo, b) Monteiro, c) Patos, d) Campina Grande, e) João Pessoa

Analisando o ciclo diário da velocidade para São Gonçalo (Figura 6a), observam-se valores de picos para a velocidade do vento no período entre 10 e 11 horas. Possivelmente, por ser uma área irrigada, sofre resfriamento mais brusco no final da tarde, estabilizando-se posteriormente. Padrão semelhante para Monteiro (Figura 6b) e Patos (Figura 6c), sendo que nestes casos os picos são observados às 21 horas. Campina Grande obteve a maior média no período da tarde com pico observado às 17 horas e João Pessoa obteve os maiores valores de velocidade entre as 12 e 15 horas, entretanto, há uma diminuição dos ventos após esse período, sendo mais acentuada no período da noite, devido a influencia das brisas terrestres no sentido contrário ao escoamento de grande escala.

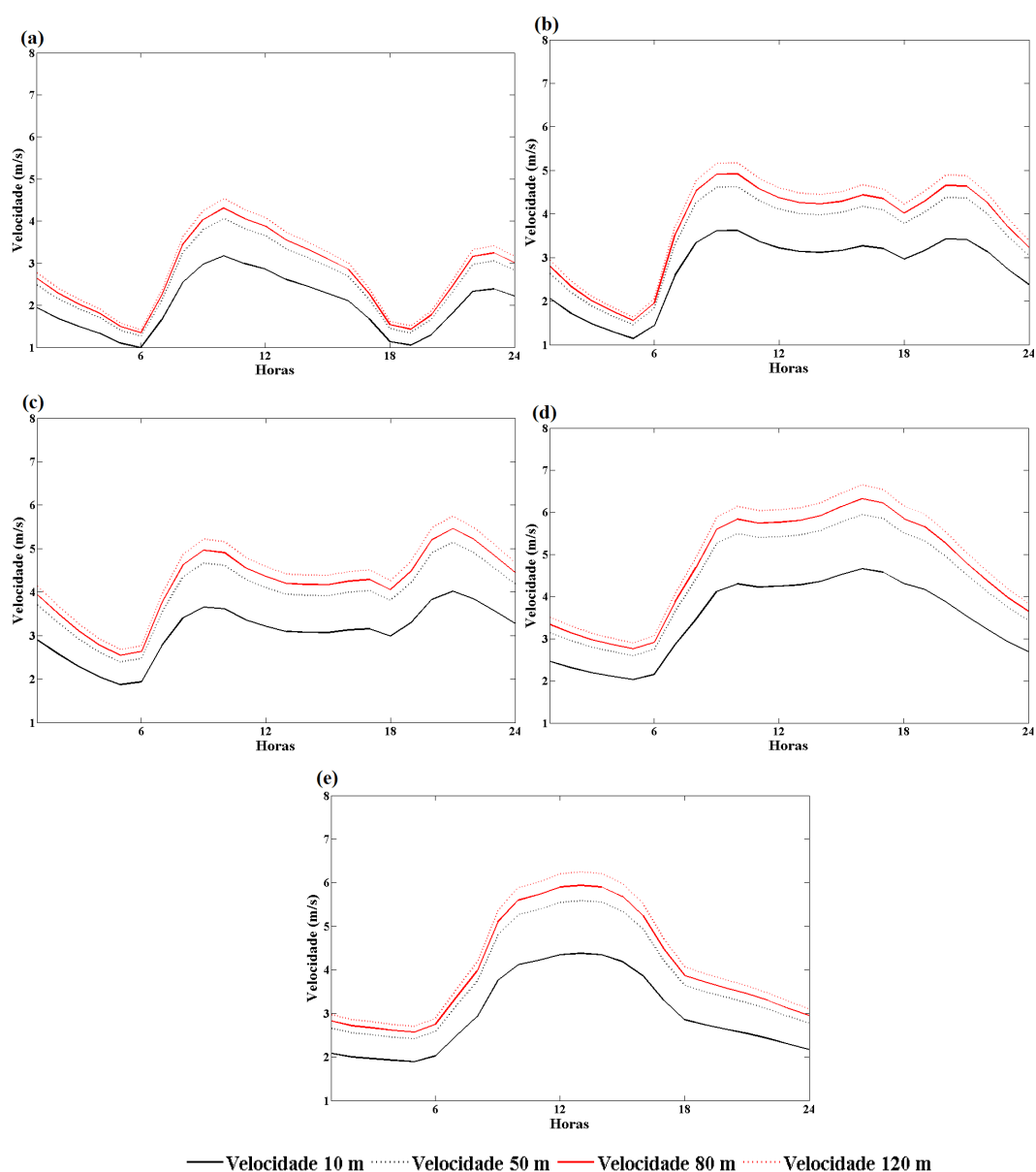


Figura 6. Ciclo diário da Velocidade, a) São Gonçalo, b) Monteiro, c) Patos, d) Campina Grande, e) João Pessoa

Ainda em relação à direção do vento em estudo, foram construídos gráficos de Rosa dos Ventos, Figura 7, para as cinco localidades. Observa-se que, ao longo do período em estudo, os ventos foram predominantes de leste para São Gonçalo, Patos e Campina Grande, de nordeste para Monteiro e de sudeste para João Pessoa, correspondendo ao comportamento dos Ventos Alísios. Na direção norte é observada uma alta porcentagem para a estação de São Gonçalo, provavelmente devido a problemas na obtenção dos dados, ou calmaria. As maiores porcentagem de velocidade do vento ocorreram na faixa de 3,6 m/s a 5,7 m/s para ventos a 10m acima do solo.

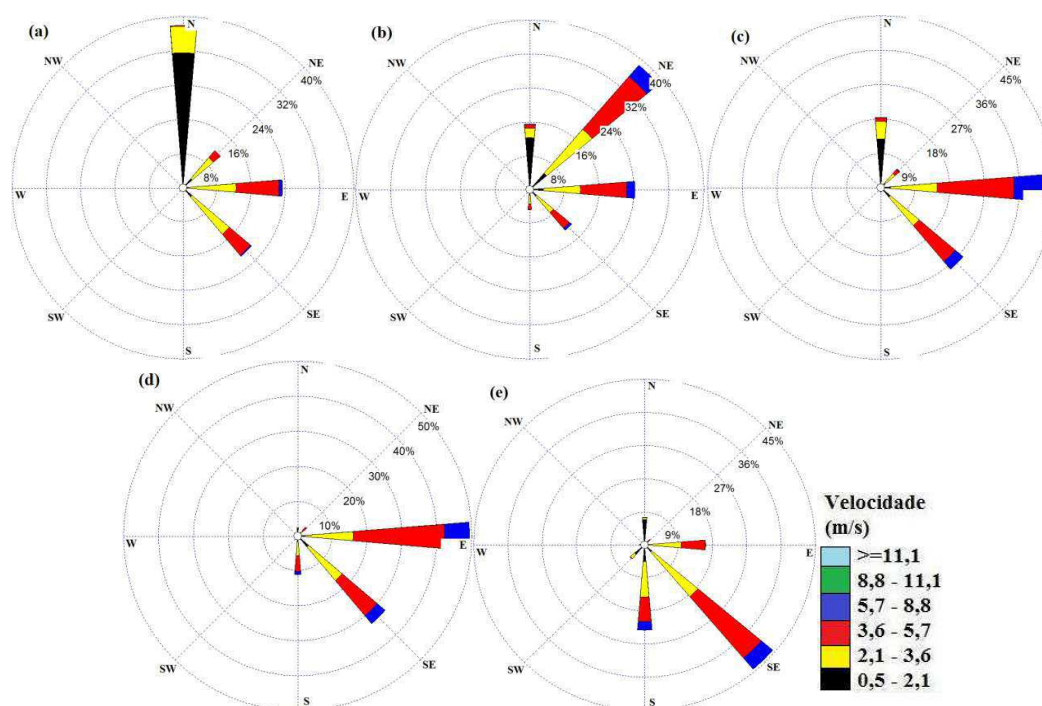


Figura 7. Rosa dos Ventos, velocidade e direção do vento para vento a 10 m acima da superfície medida em a) São Gonçalo, b) Monteiro, c) Patos, d) Campina Grande, e) João Pessoa

Outra informação obtida com o tratamento dos dados é a distribuição de frequência das velocidades de vento. A Figura 8 apresenta a frequência de velocidade do vento para determinadas faixas. A curva sobreposta às faixas de velocidade representa a distribuição de Weibull. Essa distribuição de probabilidade é comumente usada para caracterizar a amplitude da distribuição de velocidades dos ventos.

A distribuição de frequência da velocidade dos ventos revela que em São Gonçalo a maior ocorrência de ventos é na faixa de 1,5 a 3,5 m/s, enquanto que para as demais estações, os ventos são superiores a 4 m/s em especial Patos, Campina Grande e João Pessoa.

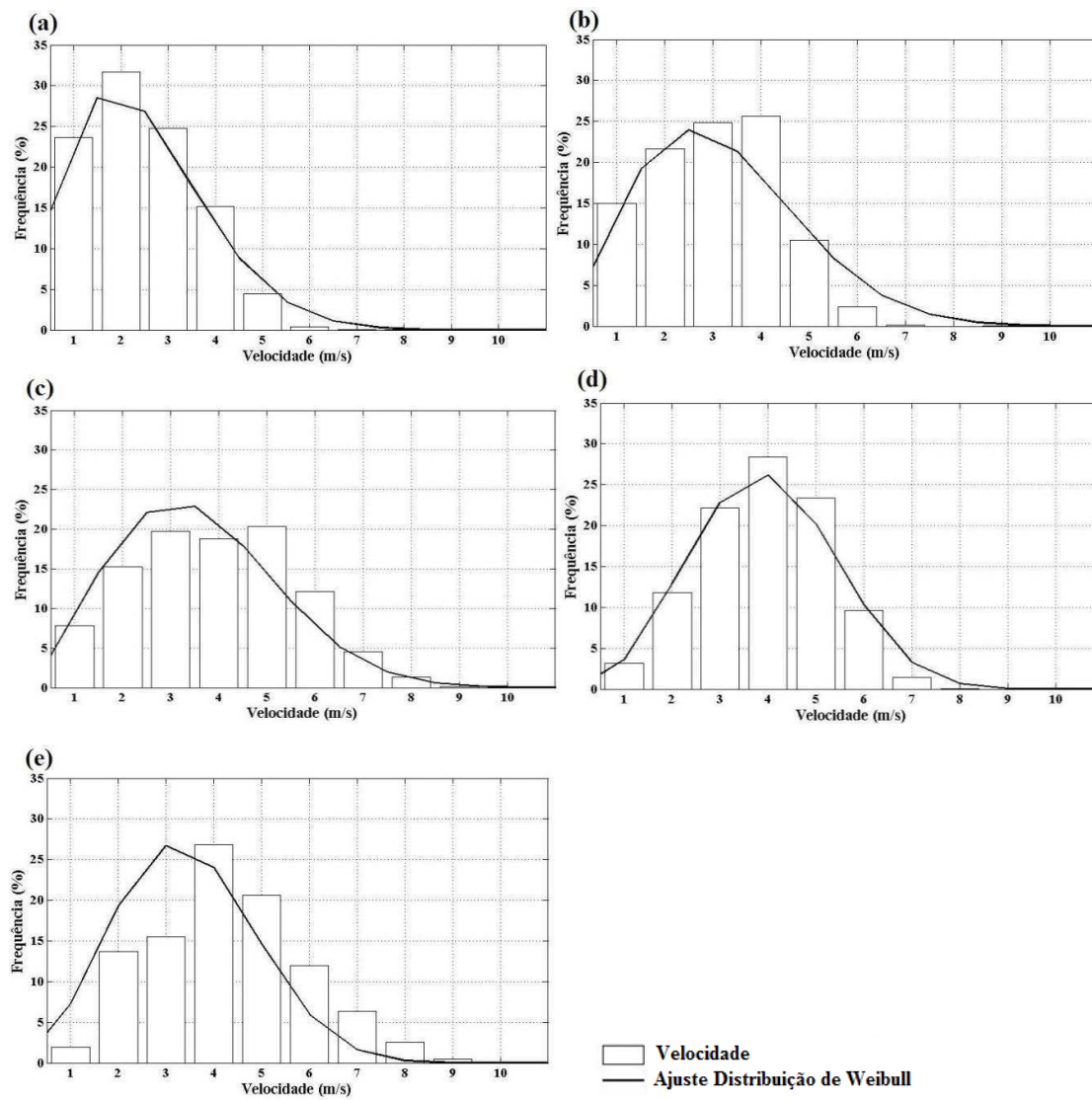


Figura 8. Função Distribuição de frequência e o melhor ajuste da distribuição de Weibull para a Velocidade do Vento em 10 m acima da superfície, a) São Gonçalo, b) Monteiro, c) Patos, d) Campina Grande, e) João Pessoa

4.2 ESTIMATIVAS DA DENSIDADE DE POTÊNCIA EÓLICA NA REGIÃO EM ESTUDO

Para estimar a densidade de energia eólica nas estações mencionadas, foram calculados os parâmetros de Weibull, baseados nos gráficos analisados anteriormente que são apresentadas na Tabela 3, com os principais parâmetros do potencial eólico das localidades.

Tabela 4. Parâmetros meteorológicos das estações

Parâmetros\Estações		São Gonçalo			
Variável	Estimado 120m	Estimado 80m	Estimado 50m	Velocidade 10m	
Média da velocidade do vento (m/s)	2,864	2,723	2,561	2,005	
Weibull k	1,679	1,679	1,679	1,679	
Weibull c (m/s)	3,357	3,192	3,002	2,351	
Média da densidade de potência (W/m ²)	37	32	26	13	
Teor médio de energia (kWh/m ² ano)	324	279	232	111	
Parâmetros\Estações		Monteiro			
Variável	Estimado 120m	Estimado 80m	Estimado 50m	Velocidade 10m	
Média da velocidade do vento (m/s)	3,918	3,726	3,504	2,743	
Weibull k	1,844	1,844	1,844	1,844	
Weibull c (m/s)	4,509	4,289	4,033	3,158	
Média da densidade de potência (W/m ²)	74	63	53	25	
Teor médio de energia (kWh/m ² ano)	646	556	463	222	
Parâmetros\Estações		Patos			
Variável	Estimado 120m	Estimado 80m	Estimado 50m	Velocidade 10m	
Média da velocidade do vento (m/s)	4,4	4,185	3,935	3,081	
Weibull k	1,984	1,984	1,984	1,984	
Weibull c (m/s)	5,013	4,768	4,484	3,511	
Média da densidade de potência (W/m ²)	98	85	70	34	
Teor médio de energia (kWh/m ² ano)	862	742	617	296	
Parâmetros\Estações		Campina Grande			
Variável	Estimado 120m	Estimado 80m	Estimado 50m	Velocidade 10m	
Média da velocidade do vento (m/s)	4,969	4,726	4,443	3,48	
Weibull k	2,549	2,549	2,549	2,549	
Weibull c (m/s)	5,616	5,341	5,024	3,933	
Média da densidade de potência (W/m ²)	112	96	80	38	
Teor médio de energia (kWh/m ² ano)	978	841	700	336	
Parâmetros\Estações		João Pessoa			
Variável	Estimado 120m	Estimado 80m	Estimado 50m	Velocidade 10m	
Média da velocidade do vento (m/s)	4,247	4,039	3,798	2,974	
Weibull k	2,213	2,213	2,213	1,94	
Weibull c (m/s)	4,822	4,587	4,313	3,284	
Média da densidade de potência (W/m ²)	82	71	59	28	
Teor médio de energia (kWh/m ² ano)	719	619	515	247	

Observa-se na Tabela 4 que o teor médio de energia para a estação de São Gonçalo para vento a 10 m, 50 m, 80 m e 120 m acima do solo é de 111, 232, 279 e 324 kWh/m²ano respectivamente onde se encontram os menores valores de velocidade entre as estações em estudo. Todas as outras estações obtiveram valores bem razoáveis tanto para ventos a 10 m quanto para ventos a 50 m, 80 m e 110 m de altura. Campina Grande apresentou os melhores resultados dentre essas cinco estações, com valores para vento a 10 m

de 336kWh/m²ano, e para as estimativas de 50 m, 80 m e 120 m com valores de teor médio de energia de 700, 841 e 978 kWh/m²ano respectivamente.

A Figura 9 expressa a densidade de potencia eólica para todas as estações e anos em estudo. A maior potência eólica verifica-se em Patos no ano de 1981 com valores de 46 W/m² para ventos a 10 m e cerca de 95, 114 e 132 W/m² para ventos de 50 m, 80 m e 120 m respectivamente. Campina Grande obteve os melhores resultados, com valores maiores de 35 W/m² para todos os anos em estudo, para vento a 10 m de altura. João Pessoa obteve médias acima de 25 W/m². O interior da Paraíba apresenta valores maiores que 30 W/m². É razoável supor que existe influência orográfica nessas regiões. A baixa região de potência é observada em São Gonçalo com 12 W/m² para vento a 10 m. No litoral, ou seja, em João Pessoa, os Alísios favorecem a penetração de brisa marítima no continente durante os períodos de máxima. Nestas épocas, maiores intensidades de potência eólica encontram-se adentradas no continente.

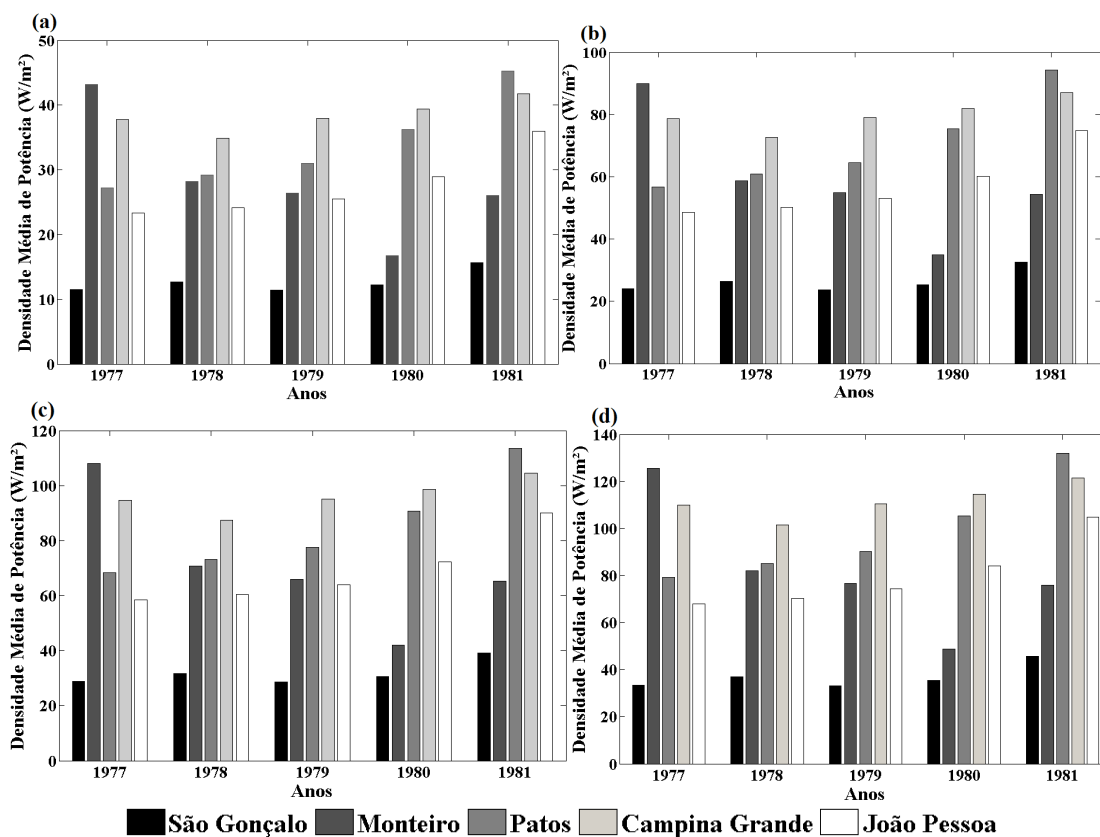


Figura 9. Densidade média de potência para velocidade do vento, a) velocidade do vento a 10 m, b) velocidade do vento a 50 m, c) velocidade do vento a 80 m e d) velocidade 120 m de altura acima da superfície em (W/m²)

5 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COM O BRAMS

Neste capítulo são investigados os aspectos das simulações numéricas, no que se refere à representação dos campos de vento, no período de março, abril, setembro e outubro dos anos estudados, onde os dois primeiros meses correspondem ao período chuvoso e os outros meses ao período seco, nas estações em questão.

5.1 CENÁRIOS MARÇO/ABRIL

Nas Figuras de 10 a 14 são mostradas as séries temporais de velocidade do vento, na altura de 10 m. Faz-se uma comparação entre os dados observados e simulados pelo modelo de mesoescala BRAMS, bem como os gráficos onde foram feitas as correções estatísticas dos dados simulados, para as referidas localidades. Em Monteiro foram registrados dados observados apenas para o mês de março de 1981. Nas Figuras (a) e (c), são representadas as comparações entre os dados observados e os dados da simulação, sem correção estatística. Nas Figuras (c) e (d) tem-se os dados observados e os dados simulados pelo modelo com correção estatística.

Na Figura 10 mostra-se a comparação entre as séries de dados simulados e observados durante o período. Nessa Figura, observa-se uma concordância entre os valores de velocidades médias simuladas e observadas. De maneira geral, para o município de São Gonçalo o modelo superestima a série dos dados observados, no de 1977, Figura 10(a), com uma inversão no final de março e início de abril. Já no ano de 1981, Figura 10(c), o modelo subestima para o mês de março e superestima para o mês de abril. Pode-se observar um ciclo bem definido em 1981 em relação a 1977, onde se espera uma maior correlação. Nas Figuras 10(b) e 10(d), têm-se os gráficos com as correções estatísticas para o ano de 1977 e 1981, respectivamente, onde mostra uma aproximação dos dados simulados em relação aos dados observados.

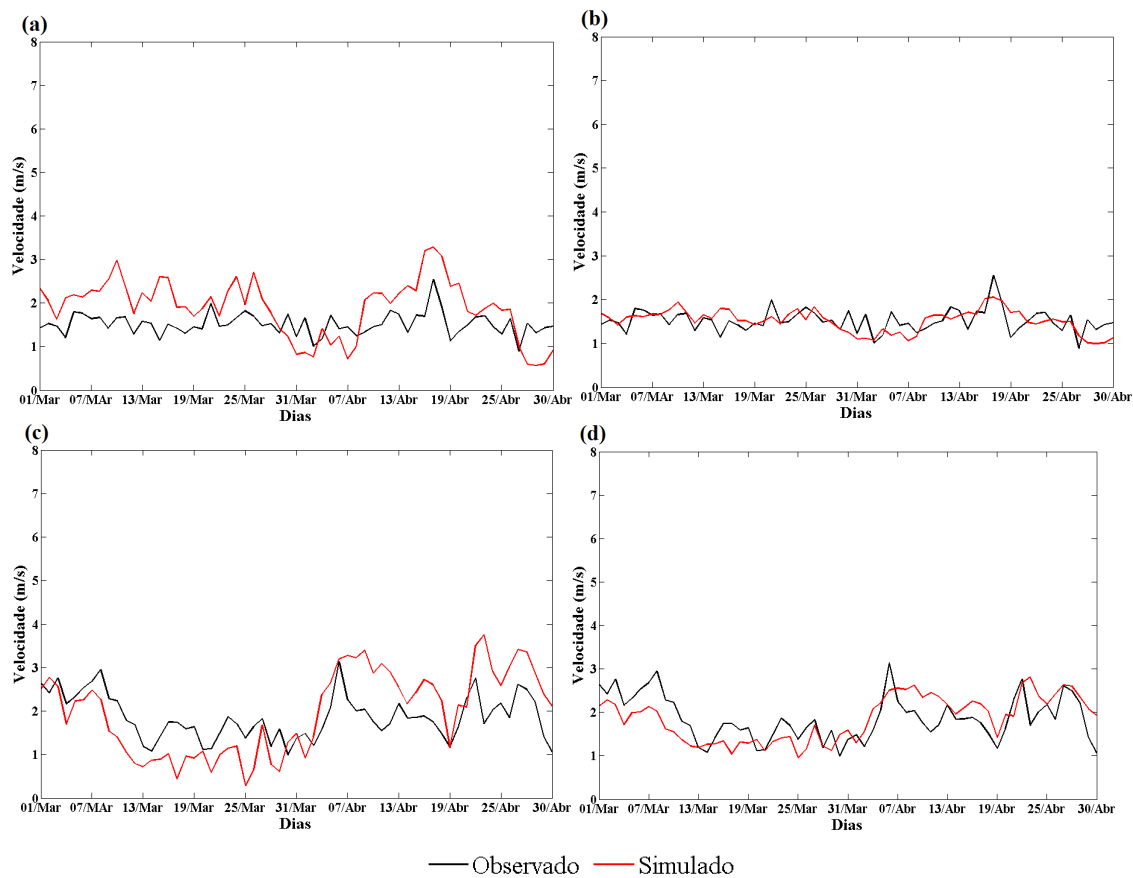


Figura 10. Comparação da velocidade de vento a 10 m de altura em (m/s), dos meses de março e abril, a partir dos dados observados (linha preta) com os dados simulados (linha vermelha), para o município de São Gonçalo, (a) ano de 1977, (b) ano de 1977 com correção estatística, (c) ano de 1981 e (d) ano de 1981 com correção estatística

Na Figura 11 observa-se concordância entre os valores de velocidades simuladas e observados em todo o período estudado. De maneira geral, para o município de Monteiro, o modelo representa bem o ciclo mensal do mês de março de 1981, Figura 11(c). Não foram registrados dados para os meses de março e abril de 1977 e abril de 1981. Os resultados apontam uma leve subestimativa nesse período.

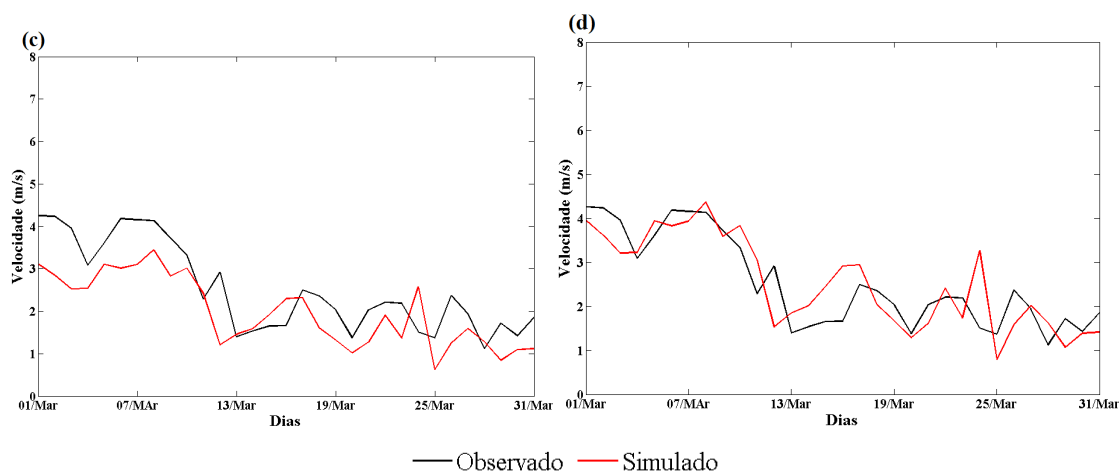


Figura 11. Comparação da velocidade de vento a 10 m de altura em (m/s), dos meses de março e abril, a partir dos dados observados (linha preta) com os dados simulados (linha vermelha), para o município de Monteiro, (c) ano de 1981 e (d) ano de 1981 com correção estatística

Na Figura 12, para o município de Patos, observa-se que os dados modelados seguem o ciclo mensal bem definido, onde se pode observar que para os meses de março e abril de 1977, Figura 12(a) e 1981, Figura 12(c), o modelo subestima os dados observacionais, mas segue um ciclo bem definido em comparação com os dados observados. Nas Figuras 12(b) e (d) observa-se concordância entre os valores de velocidades simulados e corrigidos com os observados em todo o período. Talvez isso se deva a uma reconfiguração da camada limite devido ao período chuvoso.

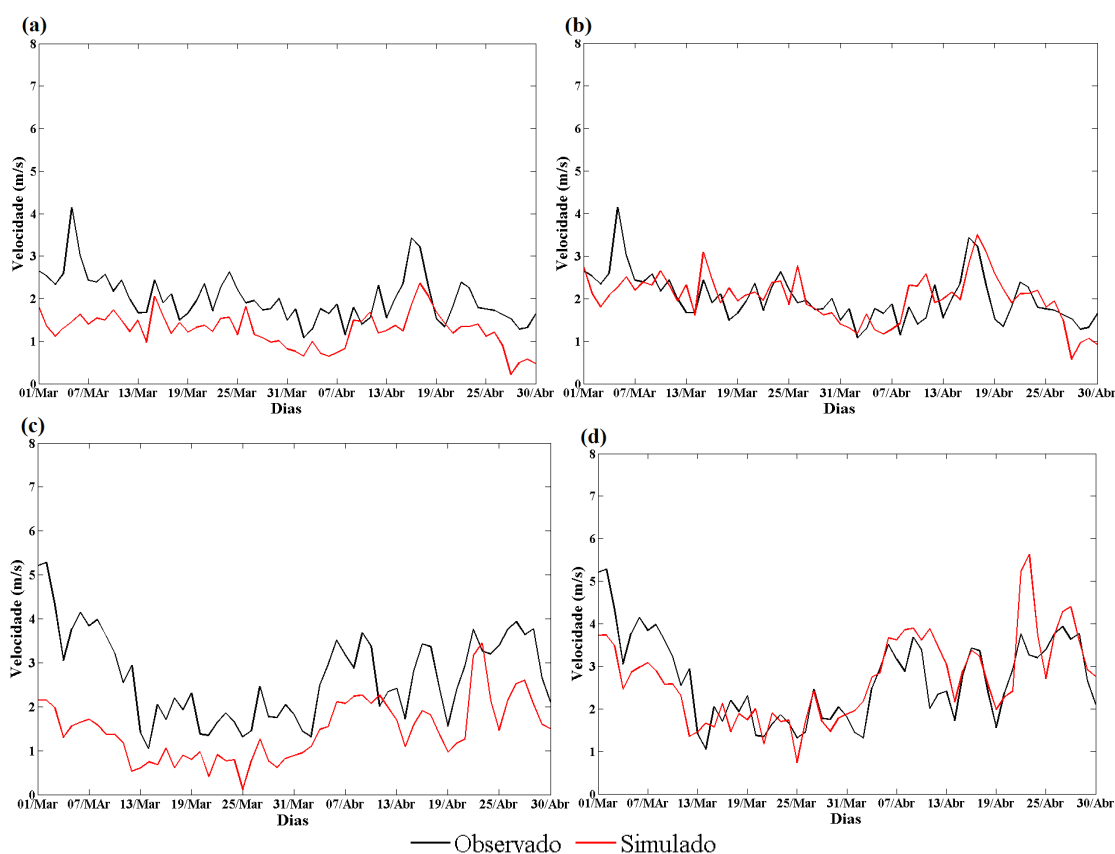


Figura 12. Comparação da velocidade de vento a 10 m de altura em (m/s), dos meses de março e abril, a partir dos dados observados (linha preta) com os dados simulados (linha vermelha), para o município de Patos, (a) ano de 1977, (b) ano de 1977 com correção estatística, (c) ano de 1981 e (d) ano de 1981 com correção estatística

Na Figura 13, referente a Campina Grande, pode-se ver que em março de 1977 há uma quebra do ciclo quando comparado ao mês de abril, Figura 13(a), onde pode ser percebido principalmente na primeira quinzena de março, com redução acentuada dos ventos. Para o mês de abril, ainda na Figura 13(a), observa-se que os dados simulados seguem um ciclo bem definido em relação aos dados observados. Observa-se que para o mês de março de 1981, Figura 13(c), o modelo subestima os dados observacionais, assim como observado em todo o período de março e abril de 1971, mas com um ciclo mais definido para o mês de março em comparação ao mês de abril do mesmo ano. Pode se dizer que o modelo simulou bem o mês de março de 1981 para essa região. Nas Figuras 13(b) e 13(d), têm-se as correções estatísticas, onde se mostra o ajuste dos dados simulados aos dados observados.

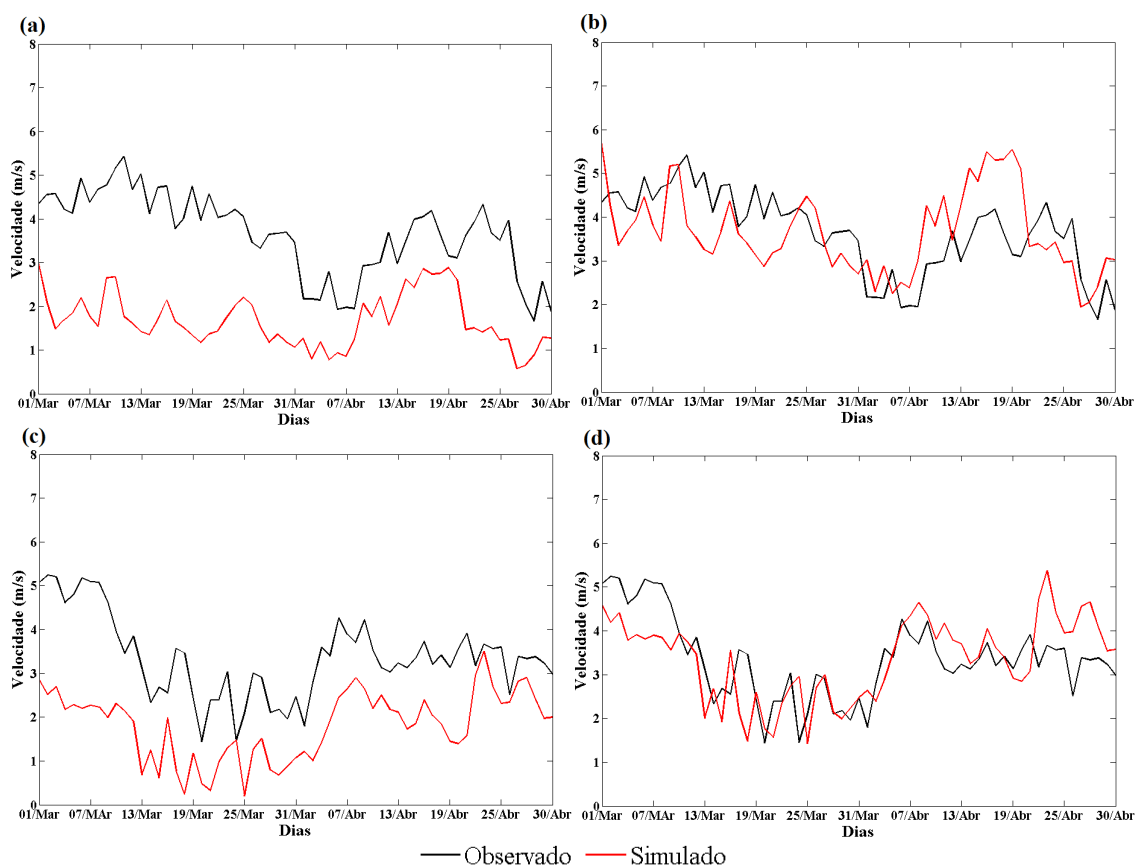


Figura 13. Comparação da velocidade de vento a 10 m de altura em (m/s), dos meses de março e abril, a partir dos dados observados (linha preta) com os dados simulados (linha vermelha), para o município de Campina Grande, (a) ano de 1977, (b) ano de 1977 com correção estatística, (c) ano de 1981 e (d) ano de 1981 com correção estatística

Na Figura 14, observa-se para a localidade de João Pessoa a ausência de um ciclo bem definido para o mês de março de 1977 e a existência de um ciclo mensal um pouco mais bem definido para o mês de abril do mesmo ano, na Figura 14(a). Para o ano de 1981, Figura 14(c), tem-se para o mês de março um ciclo mensal bem definido, já para o mês de abril do mesmo ano, pode-se observar a ausência de um ciclo mensal. Na localidade de João Pessoa, verificou-se que os dados simulados em 1977 e 1981 subestimam para o mês de março os dados observacionais. E há uma variabilidade para o mês de abril em relação a superestimava e subestimativa. Nas Figuras 14(b) e 14(d) observam-se as correções estatísticas do modelo que se ajustou bem aos dados observacionais nesta região.

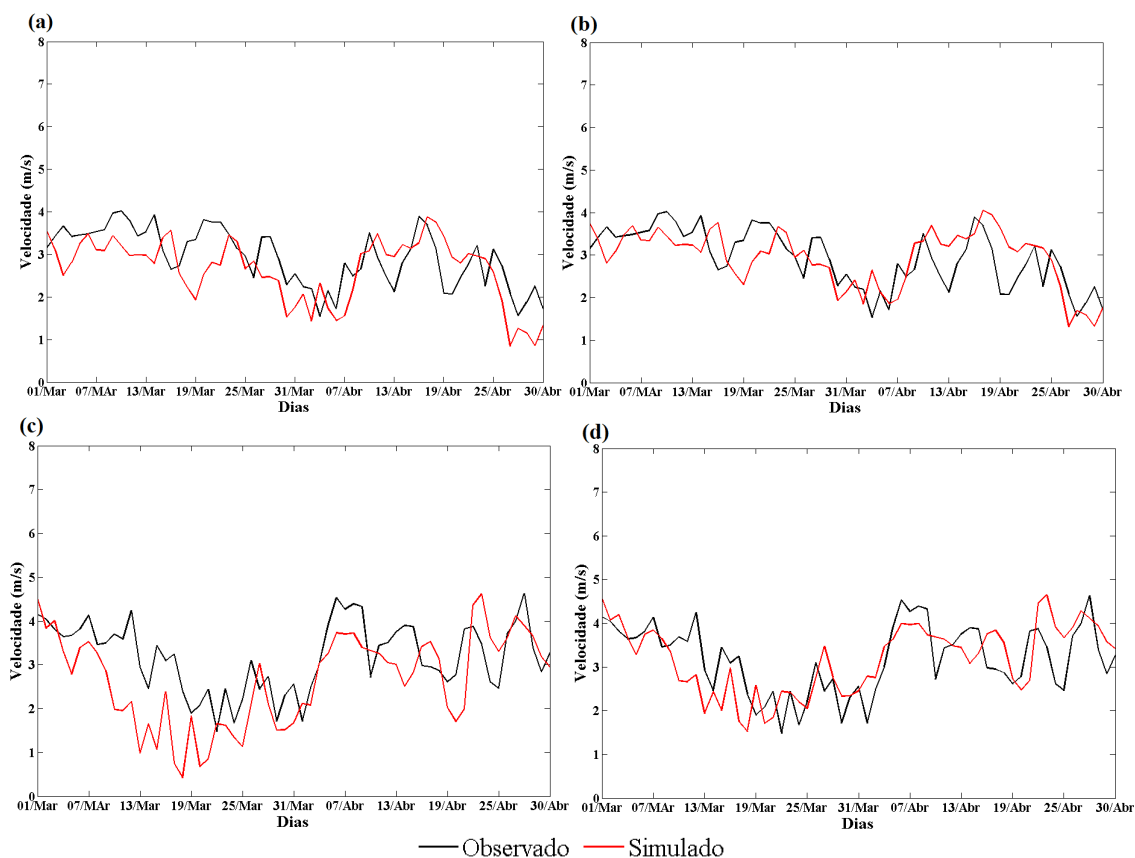


Figura 14. Comparação da velocidade de vento a 10 m de altura em (m/s), dos meses de março e abril, a partir dos dados observados (linha preta) com os dados simulados (linha vermelha), para o município de João Pessoa, (a) ano de 1977, (b) ano de 1977 com correção estatística, (c) ano de 1981 e (d) ano de 1981 com correção estatística

Visando quantificar a relação entre os dados observados e simulados, é apresentado o coeficiente de Pearson e os respectivos gráficos da dispersão dos dados. As Figuras de 15 a 19 apresentam as correlações entre os valores de velocidade de vento, a 10 m de altura do solo, e os dados simulados pelo modelo BRAMS, também na altura de 10 m acima do solo, para todas as localidades e períodos estudados neste trabalho. Nestas Figuras têm-se as equações das retas de regressão correspondentes e os coeficientes de determinação.

Os resultados mostraram que o coeficiente de determinação (R^2) foram sempre superiores para o ano de 1981, exceto para o mês de abril, das estações de Campina Grande e João Pessoa, Figuras 18(c) e 18(d) e Figuras 19(c) e 19(d), respectivamente. Na Figura 15, tem-se que para o ano de 1971 do mês de março e abril, Figura 15(a) e 15(c), o coeficiente de determinação explica apenas 7% e 25%, respectivamente, da variabilidade dos dados observados, enquanto que para o ano de 1981, no período, o coeficiente explica 68% e 39%, Figuras 15(b) e 15(d) da variabilidade dos dados observacionais.

Os coeficientes de correlação para São Gonçalo em relação ao período estudado são: 1977/março: $r = 0,27$, o que indica uma fraca correlação; 1977/abril: $r = 0,50$, o que indica uma moderada correlação; 1981/março: $r = 0,83$, o que indica uma correlação forte e 1981/abril: $r = 0,62$, correlação moderada.

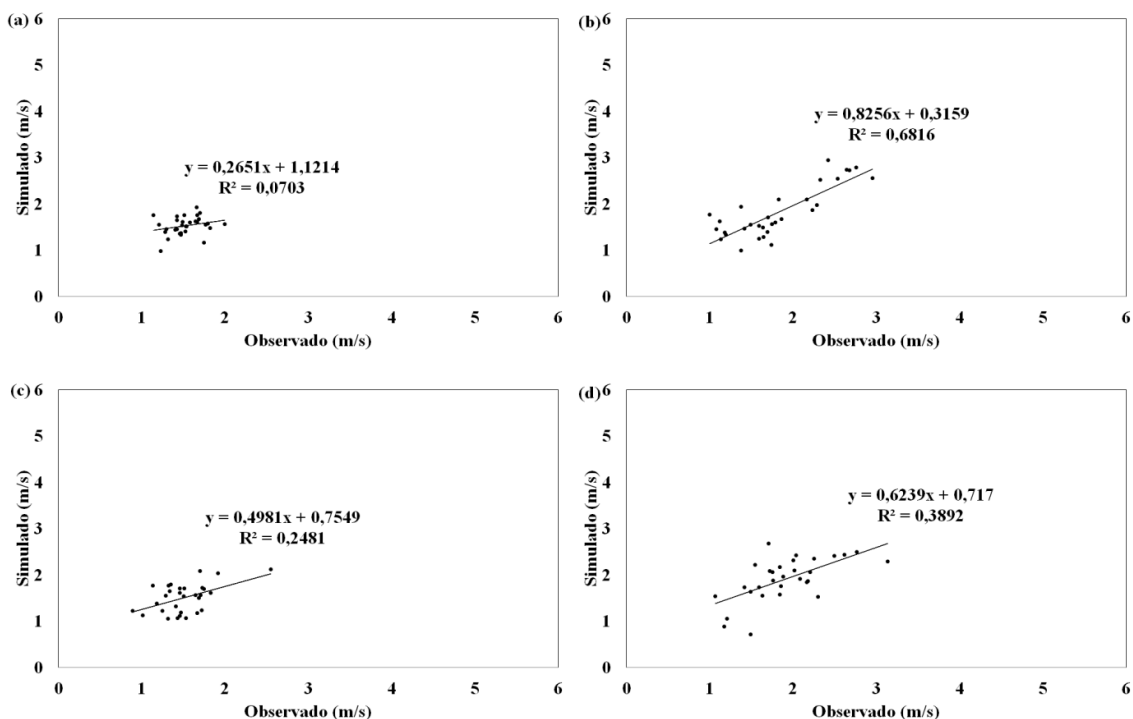


Figura 15. Correlação Linear entre os dados observados e os dados simulados para São Gonçalo, (a) março de 1977, (b) março de 1981, (c) abril de 1977 e (d) abril de 1981

A Figura 16 mostra que, para o ano de 1981, do mês de março, o coeficiente de determinação explica 65% da variabilidade dos dados observados. A seguir, tem-se o coeficiente de correlação para Monteiro: 1981/março: $r=0,81$, o que indica uma forte correlação;

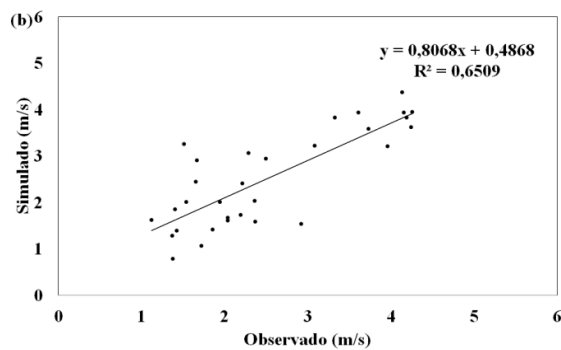


Figura 16. Correlação Linear entre os dados observados e os dados simulados para Monteiro, (b) março de 1981

Na Figura 17, observa-se que para o ano de 1977 do mês de março e abril, Figura 17(a) e 17(c), o coeficiente de determinação explica apenas 16% e 38%, respectivamente, da variabilidade dos dados observados, enquanto que para o ano de 1981, no mesmo período, o coeficiente explica 81% e 48% Figuras 17(b) e 17(d).

Os coeficientes de correlação para Patos são: 1977/março: $r = 0,40$, o que indica uma moderada correlação; 1977/abril: $r = 0,62$, indica uma moderada correlação; 1981/março: $r = 0,90$, o que indica uma correlação muito forte e 1981/abril: $r = 0,70$, correlação forte.

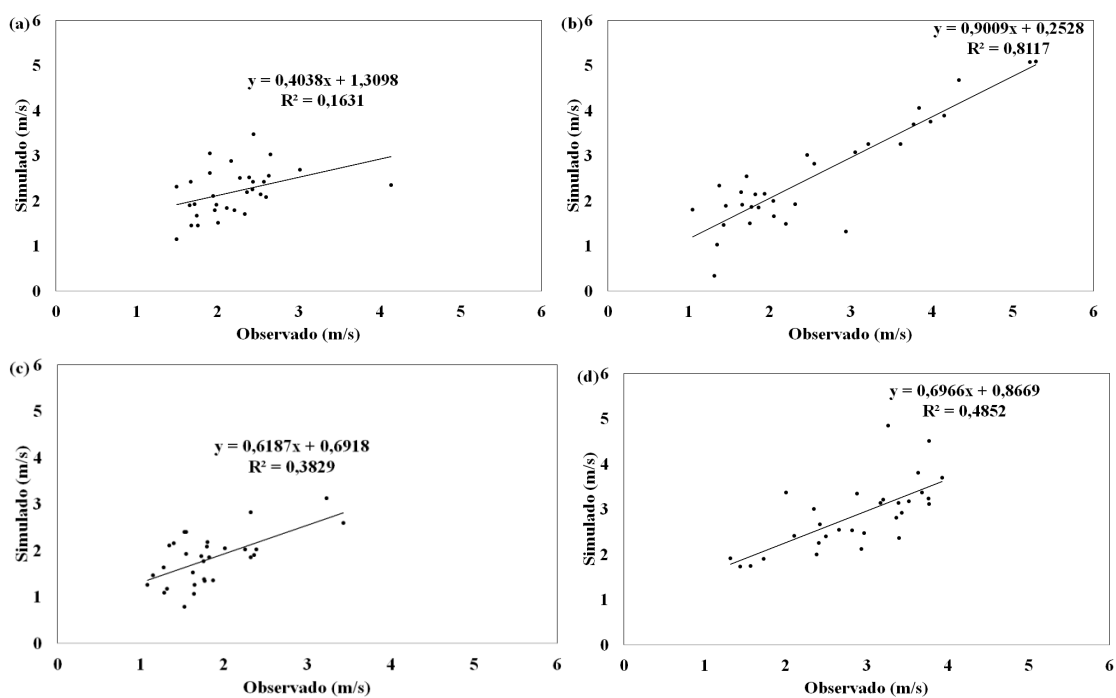


Figura 17. Correlação Linear entre os dados observados e os dados simulados para Patos, (a) março de 1977, (b) março de 1981, (c) abril de 1977 e (d) abril de 1981

Na Figura 18, observa-se que o coeficiente de determinação explica aproximadamente 15% e 35% da variabilidade dos dados observacionais, para o período de março e abril de 1977, Figuras 18(a) e 18(c), respectivamente, sendo que para o ano de 1981, Figuras 18(b) e 18(d), os coeficientes de determinação explicam 62% e 16% para os meses de março e abril, respectivamente.

Abaixo têm-se os coeficientes de correlação para cada um dos períodos analisados na localidade de Campina Grande, bem como sua classificação: 1977/março: $r = 0,39$, o que indica uma fraca correlação; 1977/abril: $r = 0,59$, indica uma moderada correlação; 1981/março: $r = 0,79$, o que indica uma correlação forte e 1981/abril: $r = 0,41$, correlação moderada.

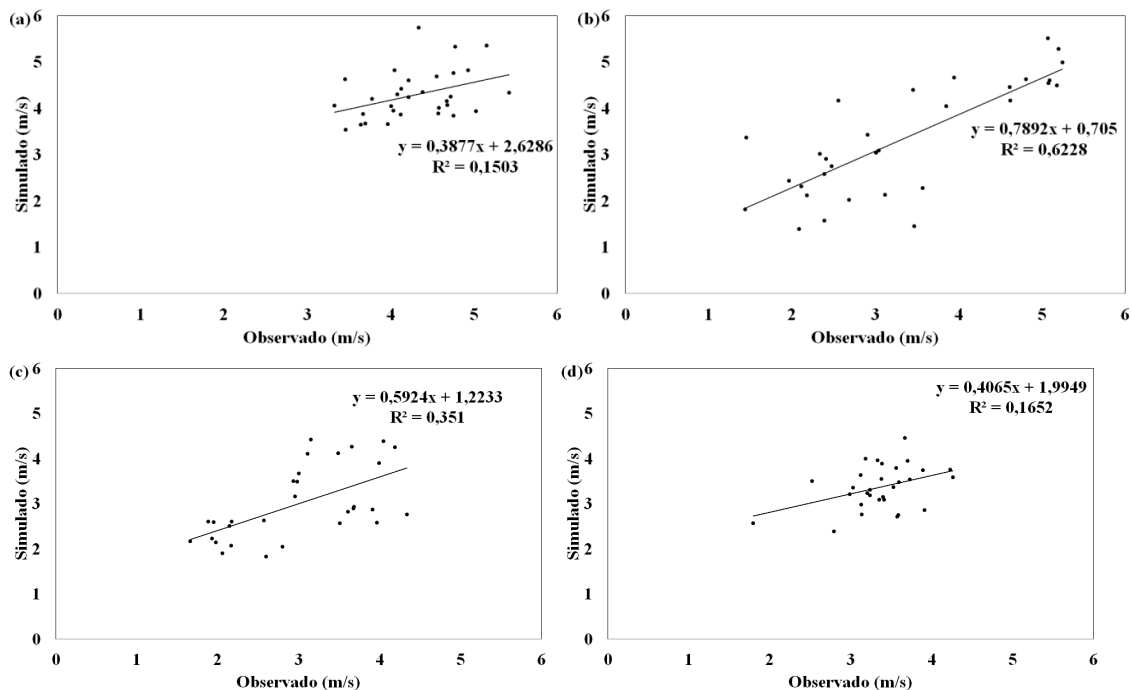


Figura 18. Correlação Linear entre os dados observados e os dados simulados para Campina Grande, (a) março de 1977, (b) março de 1981, (c) abril de 1977 e (d) abril de 1981

Observa-se, na Figura 19, que os coeficientes de determinação para o período de 1977 nos meses de março e abril explicam 13% e 40%, respectivamente, da variabilidade dos dados observados nesse período. Já para o ano de 1981 do mês de março, o coeficiente de determinação explica cerca de 44%, e para o mês abril explica 22% da variabilidade dos dados observacionais da estação de João Pessoa. Em relação à classificação tem-se: 1977/março: $r=0,36$, o que indica uma fraca correlação; 1977/abril: $r=0,64$, indica uma moderada correlação; 1981/março: $r=0,66$, o que indica uma correlação moderada e 1981/abril: $r=0,47$, correlação moderada.

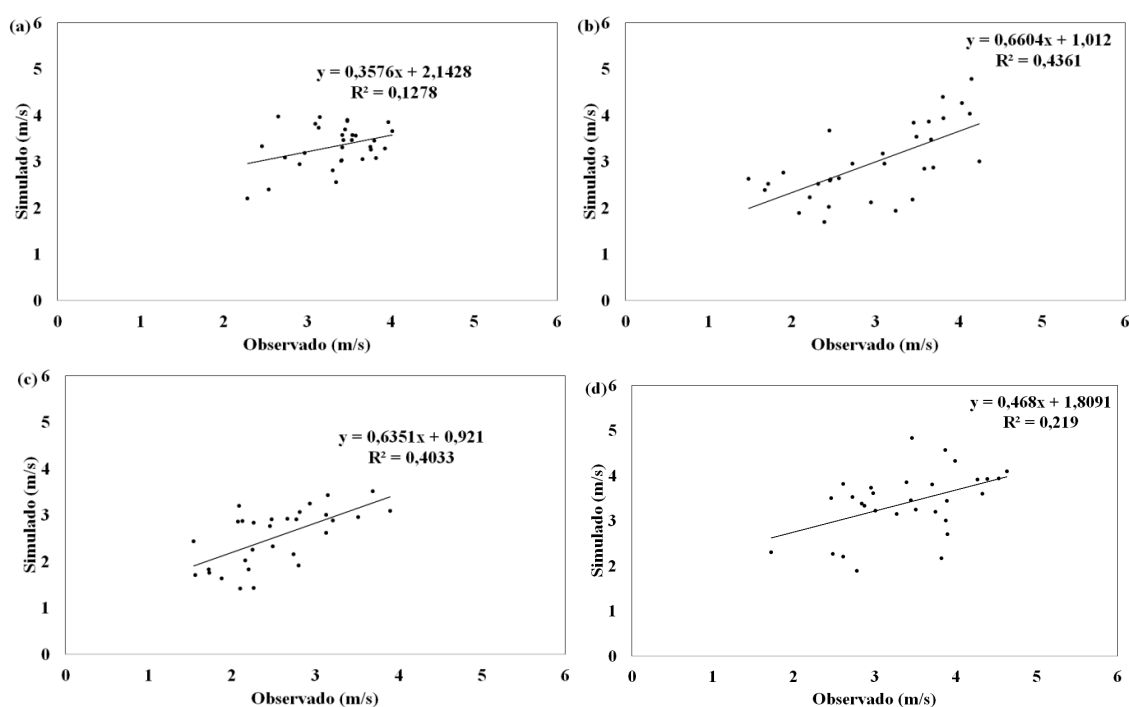


Figura 19. Correlação Linear entre os dados observados e os dados simulados para João Pessoa, (a) março de 1977, (b) março de 1981, (c) abril de 1977 e (d) abril de 1981

Portanto, no geral, os maiores valores do coeficiente de determinação foram verificados no ano de 1981, tendo em sua maioria correlações moderadas com algumas correlações fortes. De maneira geral, o modelo BRAMS correspondeu bem para o período chuvoso em todas as estações analisadas.

Com objetivo de avaliar o desempenho dos resultados das simulações entre as séries de dados simulados pelo modelo de mesoescala BRAMS e os dados observados, foram obtidos os índices estatísticos que podem ser vistos nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5. Índices estatísticos para a velocidade do vento nas localidades de São Gonçalo, Monteiro, Patos, Campina Grande e João Pessoa, onde EA é o Erro Absoluto Médio, EQM é o Erro Quadrático Médio e r é a correlação para o período de Março de 1977 e 1981

	MARÇO/1977			MARÇO/1981		
	EA	EQM	r	EA	EQM	r
São Gonçalo	0,61	0,70	0,27***	0,53	0,62	0,83*
Monteiro	-	-	-	0,69	0,81	0,81*
Patos	0,83	0,96	0,40**	1,49	1,66	0,90*
Campina Grande	2,56	2,62	0,39**	1,89	2,03	0,79*
João Pessoa	0,64	0,74	0,36**	0,94	1,17	0,66*

* significância ao nível de 99%, ** significância ao nível de 95%, *** significância ao nível de 90%, **** sem significância estatística.

Observa-se que para os valores do erro absoluto e erro quadrático médio, os melhores valores são quanto mais próximos de zero eles se encontrarem. Analisando o mês de março de 1977, observa-se que o melhor valor do erro absoluto foi encontrado na estação de São Gonçalo, com 0,61 m/s, enquanto que Campina Grande obteve um valor muito alto para o erro absoluto, com 2,56 m/s. Em relação ao mesmo período, só que agora no ano de 1981, no que se refere ao erro absoluto, a melhor localidade continua a ser São Gonçalo, com 0,53 m/s, e o pior valor foi novamente encontrado em Campina grande. Para o erro quadrático médio, em 1977, o melhor resultado foi em São Gonçalo e o pior em Campinha Grande, com 0,70 m/s e 2,62 m/s, respectivamente, o mesmo acontecendo no ano de 1981, com valores iguais a 0,62 m/s para São Gonçalo e 2,03 m/s para Campina Grande.

Observando o coeficiente de correlação pode-se dizer que os melhores resultados foram encontrados para o ano de 1981. Provavelmente, um fator determinante para isto tenha sido a qualidade dos dados observacionais, que podem ter sido melhores em relação ao ano de 1977. As correlações para o ano de 1981 apresentaram coeficientes muito forte, fortes e moderados. Utilizando o teste *t* de Student, observa-se que para o ano de 1981, todos os coeficientes de correlação apresentaram significância estatística para nível de significância de 99%, enquanto que para o ano de 1977, no mês de março, a estação de São Gonçalo apresentou significado estatístico para o nível de significância 90%. As demais localidades apresentam significado estatístico para nível de significância de 95%.

Tabela 6. Índices estatísticos para a velocidade do vento nas localidades de São Gonçalo, Monteiro, Patos, Campina Grande e João Pessoa, onde EA é o Erro Absoluto Médio, EQM é o Erro Quadrático Médio e r é a correlação para o período de Abril de 1977 e 1981

	ABRIL/1977			ABRIL/1981		
	EA	EQM	r	EA	EQM	r
São Gonçalo	0,59	0,70	0,50*	0,76	0,89	0,62*
Monteiro	-	-	-	-	-	-
Patos	0,67	0,79	0,62*	1,00	1,12	0,70*
Campina Grande	1,33	1,51	0,59*	1,14	1,29	0,41**
João Pessoa	0,57	0,68	0,64*	0,61	0,74	0,47*

* significância ao nível de 99%, ** significância ao nível de 95%, *** significância ao nível de 90%, **** sem significância estatística.

Analisando o mês de abril de 1977 e 1981, Tabela 6, observa-se que o melhor valor do erro absoluto foi encontrado na estação de João Pessoa, para o ano de 1977, com 0,57 m/s, enquanto que Campina Grande obteve o valor mais alto, com valor de 1,33 m/s. No mesmo período, só que agora para o ano de 1981, em relação ao erro absoluto, a melhor localidade continua a ser João Pessoa, com 0,61 m/s, e o pior valor novamente foi encontrado em Campina Grande, com 1,14 m/s. Pode-se observar que tanto para o mês de março quanto para o mês de abril, para os dois anos em estudo, a estação de Campina Grande obteve alto valores de erro absoluto. Para o erro quadrático médio, o melhor resultado continua sendo em João Pessoa, para o ano de 1977, seguido por São Gonçalo, Patos e Campina Grande. Em Monteiro não foram registrados dados observacionais. O mesmo acontecendo em 1981.

Observando o coeficiente de correlação, pode-se dizer que os resultados, tanto em 1977 quanto em 1981, no mês em questão, foram aproximados. As correlações para o ano de 1977 apresentaram coeficientes moderados em todas as estações, enquanto que no ano de 1981, todas as estações obtiveram correlação moderadas, assim como foi observado no ano de 1977. Utilizado o teste *t* de Student, observa-se que para o ano de 1977 todos os coeficientes de correlação apresentaram significância estatística, para nível de significância de 99%, enquanto que para o ano de 1981, para o mês de abril, a estação de Campina Grande apresentou significado estatístico para o nível de significância de 95%. As demais localidades apresentam significado estatístico para o nível de significância de 99%.

5.2 CENÁRIOS SETEMBRO/OUTUBRO

Na Figura 20, observa-se a comparação entre as séries de dados simulados e observados em todo o período de setembro e outubro de 1977 e 1981, correspondente ao período considerado de estiagem na região. Nessa Figura, mostra-se uma concordância entre os valores de velocidades médias simuladas e observadas. De maneira geral, para o município de São Gonçalo, o modelo subestima a série dos dados observados para o ano de 1977, Figura 20(a), como foi observado em todo o período de outubro, com uma inversão no final de setembro. Já para o ano de 1981, Figura 20(c), o modelo varia durante o período analisado, superestimando no período do meio para o fim do mês de outubro. Nas Figuras 20(b) e 20(d), têm-se os gráficos com as correções estatísticas para o ano de 1977 e 1981, respectivamente, onde mostra uma aproximação dos dados simulados em relação aos dados observados.

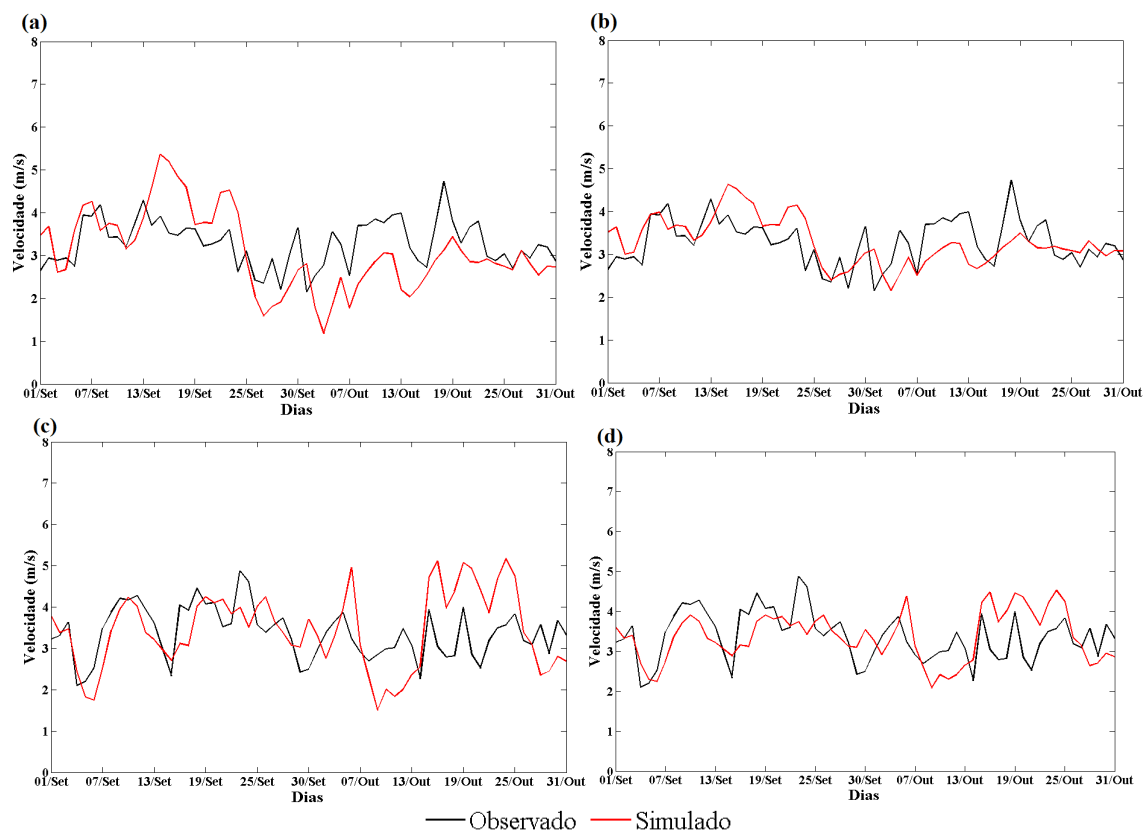


Figura 20. Comparação da velocidade de vento a 10 m de altura em (m/s), dos meses de setembro e outubro, a partir dos dados observados (linha preta) com os dados simulados (linha vermelha), para o município de São Gonçalo, (a) ano de 1977, (b) ano de 1977 com correção estatística, (c) ano de 1981 e (d) ano de 1981 com correção estatística

Na Figura 21, observa-se concordância entre os ciclos de velocidades simulados e observados em todo o período estudado. De maneira geral, para o município de Monteiro, o modelo representa bem o ciclo mensal do mês de outubro para o ano 1977 e para os meses de setembro e outubro de 1981, Figura 21(a) e 21(c). Não foram registrados dados para o mês de setembro durante o ano de 1977. Os resultados apontam uma subestimativa nesse período, Figuras 21(a) e 21(c). Nas Figuras 21(b) e 21(d), podem-se observar as correções estatísticas.

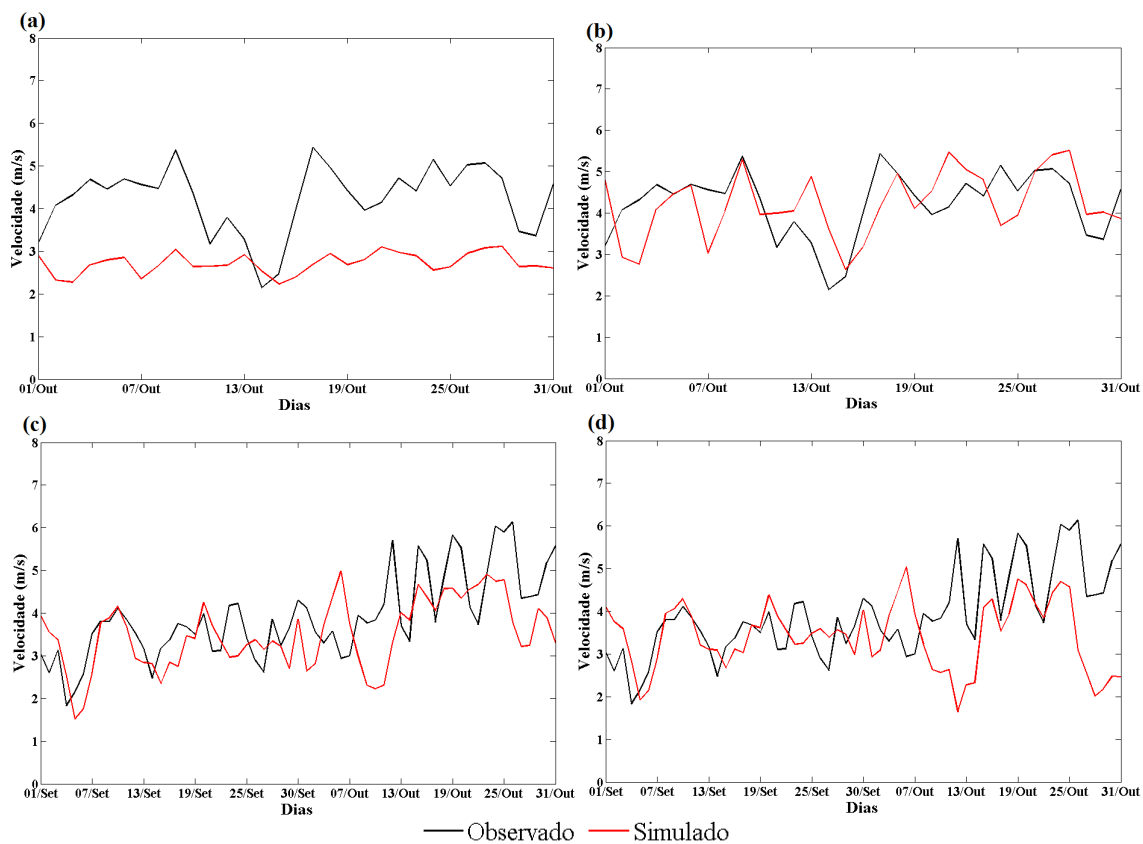


Figura 21. Comparação da velocidade de vento a 10 m de altura em (m/s), dos meses de setembro e outubro, a partir dos dados observados (linha preta) com os dados simulados (linha vermelha), para o município de Monteiro, (a) ano de 1977, (b) ano de 1977 com correção estatística, (c) ano de 1981 e (d) ano de 1981 com correção estatística

Na Figura 22, para o município de Patos, observa-se que há uma ausência de ciclo mensal bem definida no ano de 1977. Verifica-se que nos meses de setembro e outubro, Figura 22(a), o modelo subestima os dados observacionais. Já no ano de 1981, Figura 22(c), segue um ciclo um pouco mais definido, em comparação com os dados observados. Nas Figuras 22(b) e 22(d), percebe-se concordância entre os valores de velocidades modelados e observados em todo o período.

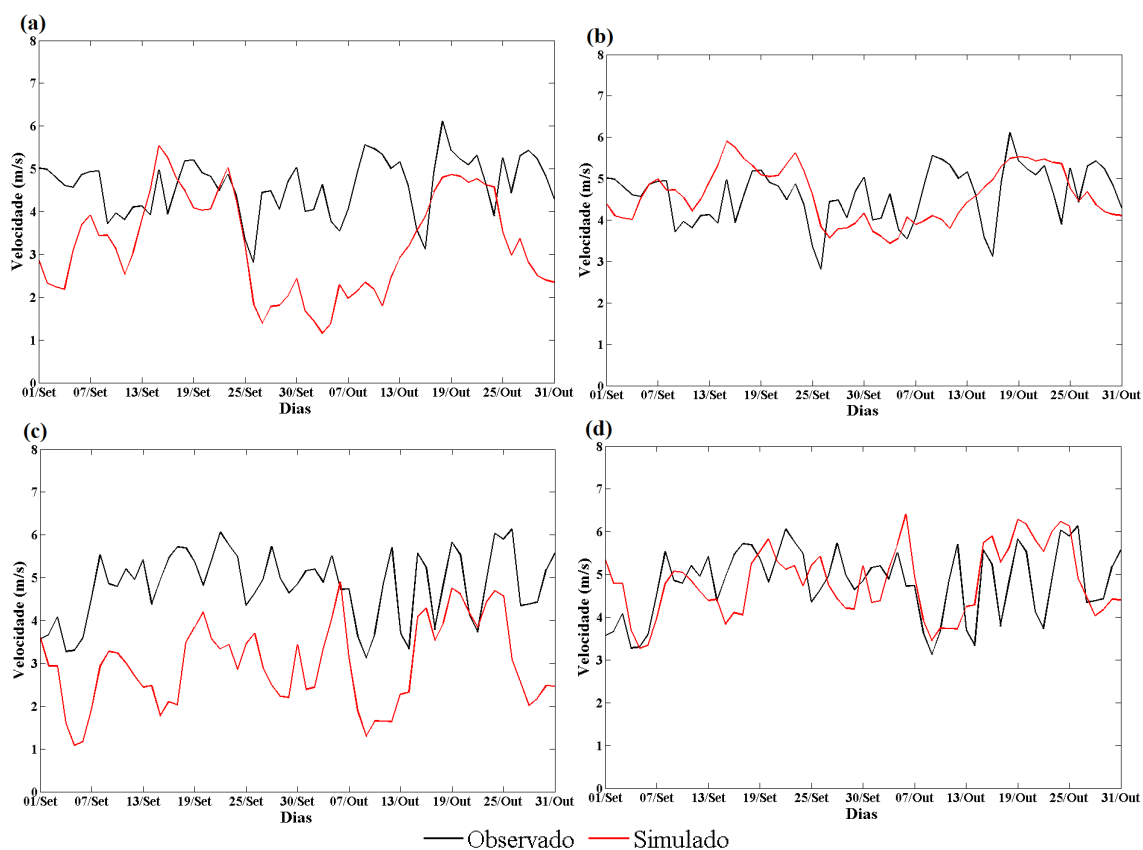


Figura 22. Comparação da velocidade de vento a 10 m de altura em (m/s), dos meses de setembro e outubro, a partir dos dados observados (linha preta) com os dados simulados (linha vermelha), para o município de Patos, (a) ano de 1977, (b) ano de 1977 com correção estatística, (c) ano de 1981 e (d) ano de 1981 com correção estatística

Na Figura 23, analisa-se Campina Grande, mas agora durante o período de estiagem. Pode-se ver que, no final do mês de setembro de 1977, há uma queda da velocidade do vento, verificada nos dados observacionais, prevista pelo modelo, mas é observada por volta do dia 25 de setembro, Figura 23(a). No geral, para o ano de 1977, o modelo subestimou os dados observacionais. Em 1981, Figura 23(c), observa-se que há ausência de um ciclo bem definido em relação aos dados observados. Já em 1981, Figura 23(c), o modelo subestima os dados observacionais, assim como foi verificado em todo o período de setembro e outubro de 1977. Pode se dizer que o modelo não simulou bem o meses de setembro e outubro, de 1981, para essa região. Nas Figuras 23(b) e 23(d), têm-se as correções estatísticas, que mostram o ajuste dos dados simulados aos dados observados.

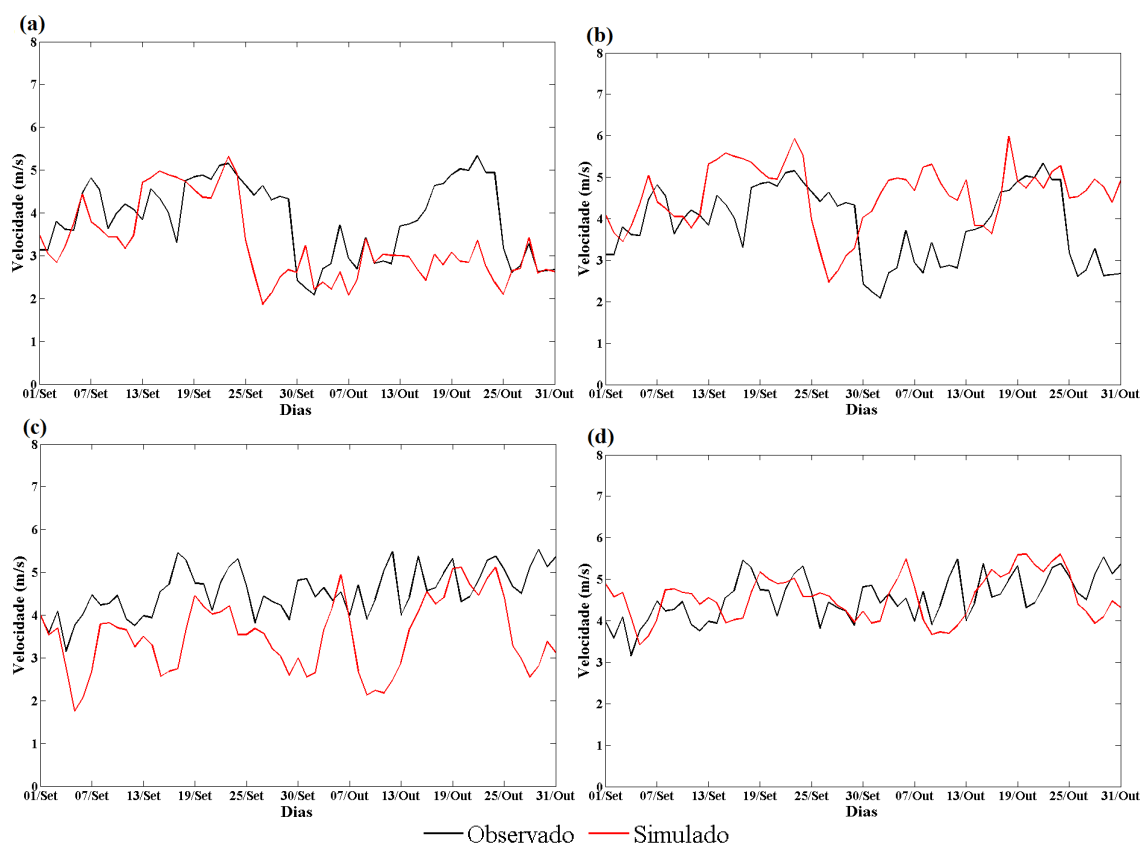


Figura 23. Comparação da velocidade de vento a 10 m de altura em (m/s), dos meses de setembro e outubro, a partir dos dados observados (linha preta) com os dados simulados (linha vermelha), para o município de Campina Grande, (a) ano de 1977, (b) ano de 1977 com correção estatística, (c) ano de 1981 e (d) ano de 1981 com correção estatística

Na Figura 24, observa-se a localidade de João Pessoa, onde verifica-se um ciclo bem definido para os meses de setembro e outubro de 1977 e a existência de um ciclo mensal um pouco mais bem definido para os meses de setembro e outubro de 1981, nas Figuras 24(a) e 24(c). Observa-se que os dados simulados tanto para o ano de 1977 quanto para 1981 têm uma variabilidade para todo o período estudado, em relação a superestimava e subestimativa. Nas Figuras 24(b) e 24(d), observa-se as correções estatísticas do modelo, que se ajustou bem, aos dados observacionais nesta região, em especial para o ano de 1981.

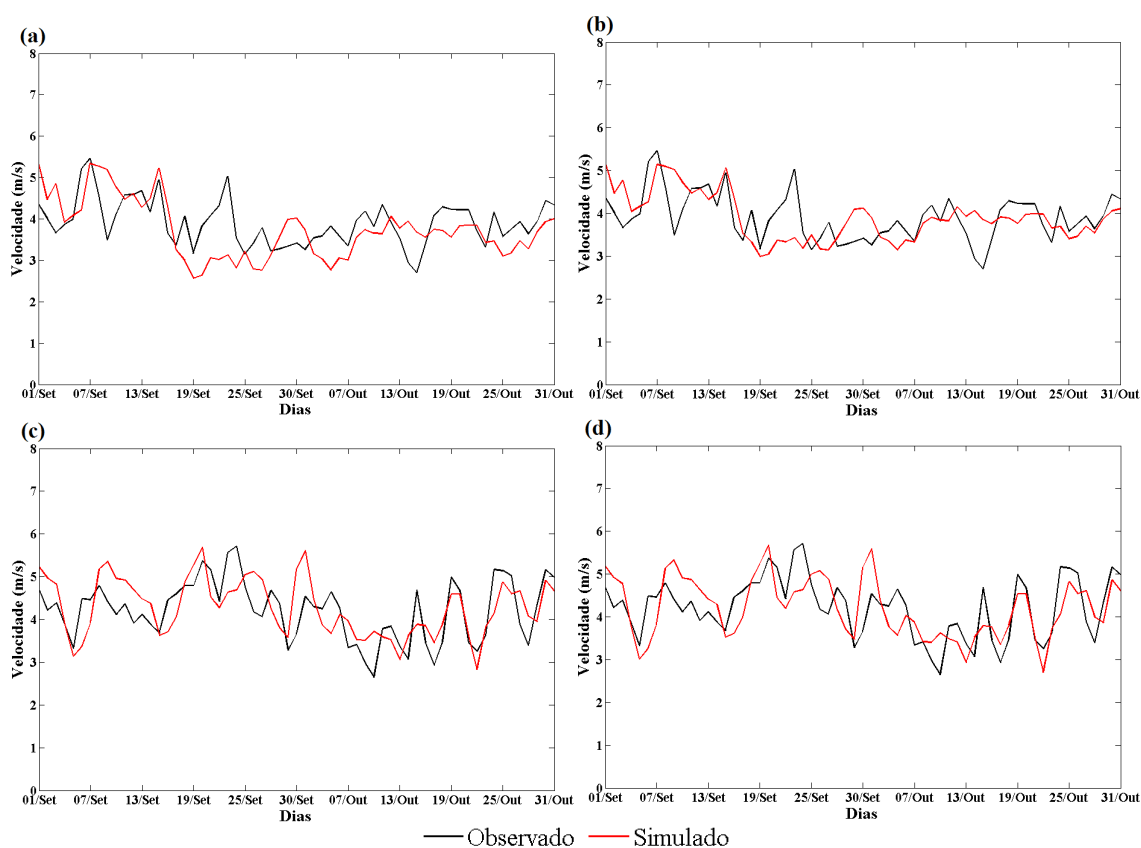


Figura 24. Comparação da velocidade de vento a 10 m de altura em (m/s), dos meses de setembro e outubro, a partir dos dados observados (linha preta) com os dados simulados (linha vermelha), para o município de João Pessoa, (a) ano de 1977, (b) ano de 1977 com correção estatística, (c) ano de 1981 e (d) ano de 1981 com correção estatística

Nas Figuras 25 a 29, pode-se verificar as equações das retas correspondentes aos ajustes entre os dados observacionais e simulados pelo modelo juntamente com os coeficientes de determinação.

Na Figura 25, mostra que para o ano de 1971 dos meses de setembro e outubro, Figuras 25(a) e 25(c), o coeficiente de determinação explica apenas 46% e 14%, respectivamente, da variabilidade dos dados observados, enquanto que em 1981, para o mesmo período, o coeficiente explica 50% e 8%, Figuras 25(b) e 25(d) da variabilidade dos dados observacionais.

A seguir temos os resultados do coeficiente de correlação para São Gonçalo: 1977/setembro: $r = 0,68$, o que indica uma moderada correlação; 1977/outubro: $r = 0,38$, o que indica uma fraca correlação; 1981/setembro: $r = 0,71$, o que indica uma correlação forte e 1981/outubro: $r = 0,28$, correlação fraca.

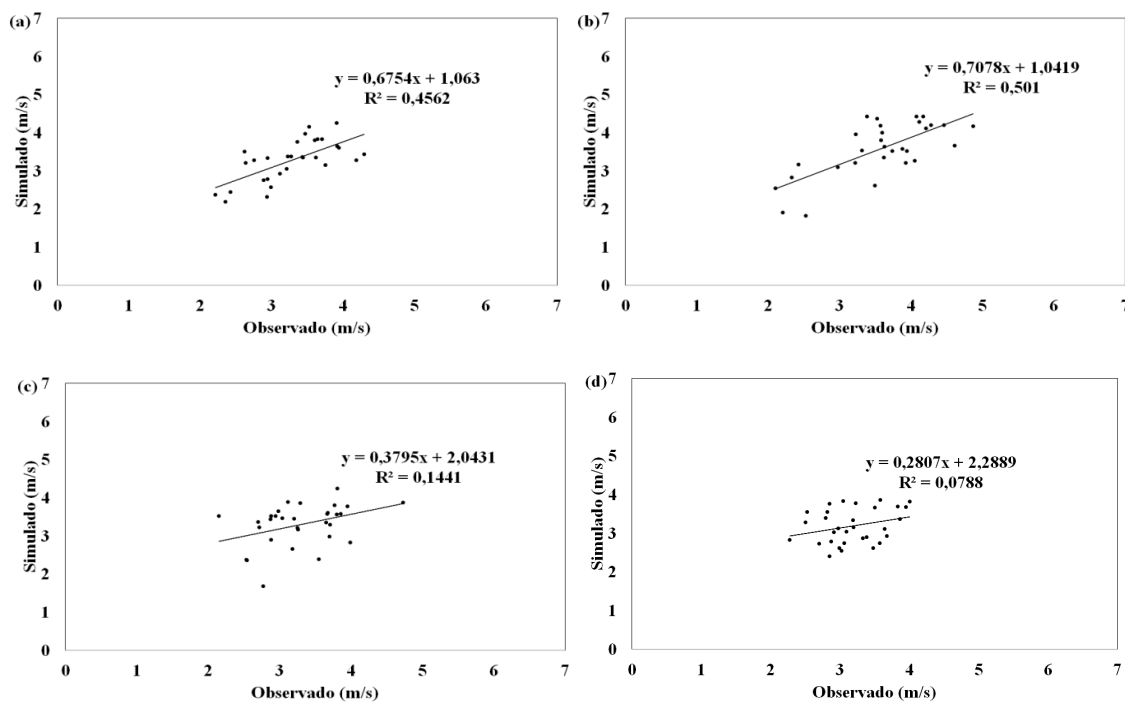


Figura 25. Correlação Linear entre os dados observados e os dados simulados para São Gonçalo, (a) setembro de 1977, (b) setembro de 1981, (c) outubro de 1977 e (d) outubro de 1981

A Figura 26 mostra que para o ano de 1977, no mês de setembro, não foram observados dados observacionais. Já em 1981, para o mês de setembro, o coeficiente de determinação explica 24% da variabilidade dos dados observados, enquanto que para o mês de outubro dos anos de 1977 e 1981, Figuras 26(c) e 26(d), o coeficiente de determinação explica 14% e 1,3%. A seguir têm-se os coeficientes de correlação para Monteiro: 1977/outubro: $r = 0,37$, o que indica uma fraca correlação; 1981/setembro: $r = 0,49$, o que indica uma correlação moderada e 1981/outubro: $r = 0,12$, correlação bem fraca.

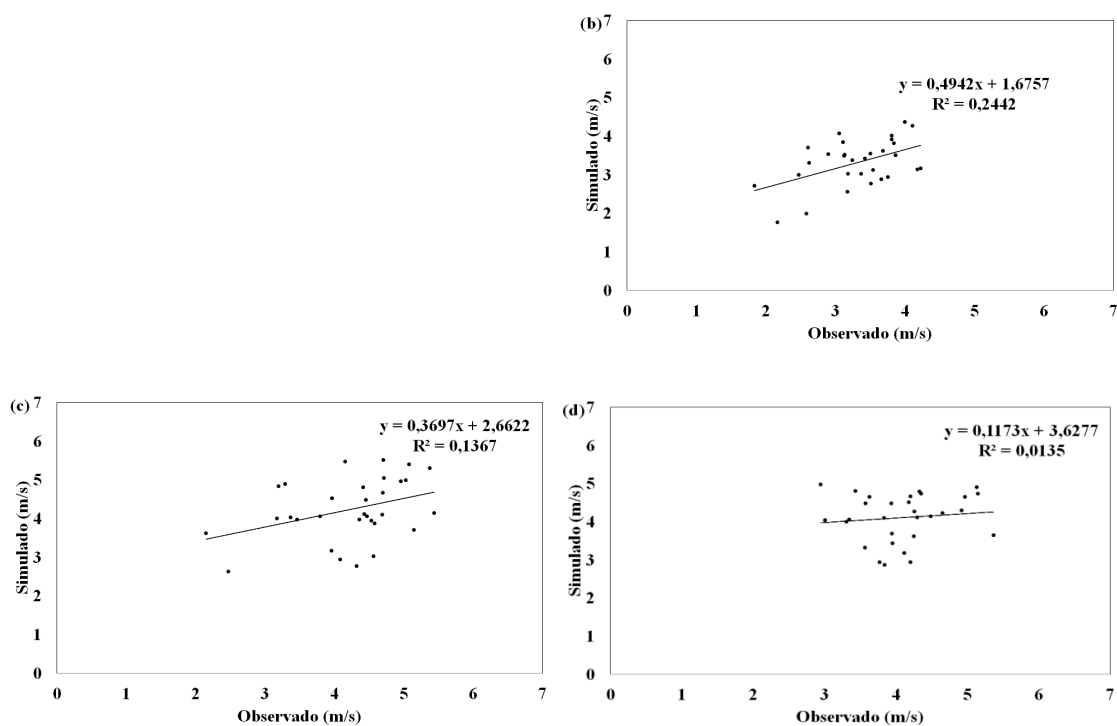


Figura 26. Correlação Linear entre os dados observados e os dados simulados para Monteiro, (b) setembro de 1981, (c) outubro de 1977 e (d) outubro de 1981

A Figura 27 mostra que para o ano de 1971, nos meses de setembro e outubro, Figura 27(a) e 27(c), o coeficiente de determinação explica apenas 6% e 21%, respectivamente, da variabilidade dos dados observados, enquanto que para o ano de 1981, para o mesmo período, o coeficiente explica 13% e 21%, Figuras 27(b) e 27(d) da variabilidade dos dados observacionais. Os coeficientes de correlação para Patos são: 1977/setembro: $r = 0,26$, o que indica uma fraca correlação; 1977/outubro: $r = 0,46$, o que indica uma moderada correlação; 1981/setembro: $r = 0,36$, o que indica uma correlação fraca e 1981/outubro: $r = 0,46$, correlação moderada.

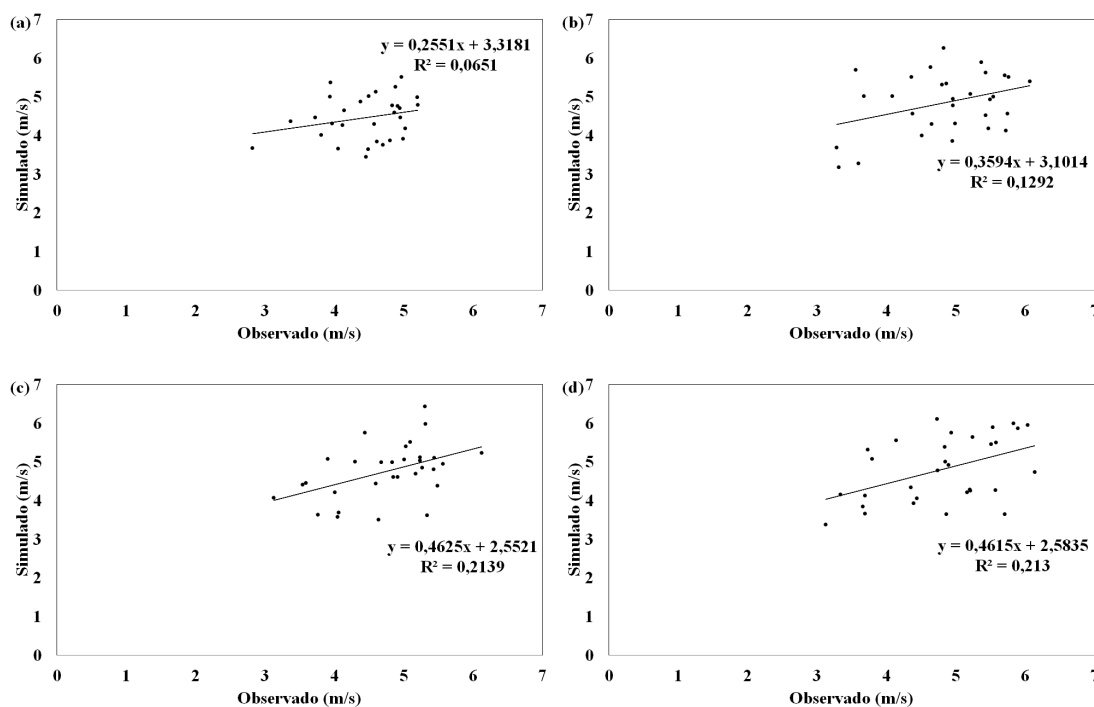


Figura 27. Correlação Linear entre os dados observados e os dados simulados para Patos, (a) setembro de 1977, (b) setembro de 1981, (c) outubro de 1977 e (d) outubro de 1981

Na Figura 28, observa-se que o modelo explica aproximadamente apenas 7% e 8% da variabilidade dos dados observacionais, para o período de setembro e outubro de 1977, Figuras 28(a) e 28(c), respectivamente, sendo que para o ano de 1981, Figuras 28(b) e 28(d), o coeficiente de determinação explica 6% e 0,9% para os meses de setembro e abril, respectivamente. Os coeficientes de correlação para cada um dos períodos analisados para a localidade de Campina Grande são: 1977/setembro: $r=0,28$, o que indica uma fraca correlação; 1977/outubro: $r=0,30$, o que indica uma fraca correlação; 1981/setembro: $r=0,26$, o que indica uma correlação fraca e 1981/outubro: $r=0,09$, correlação bem fraca.

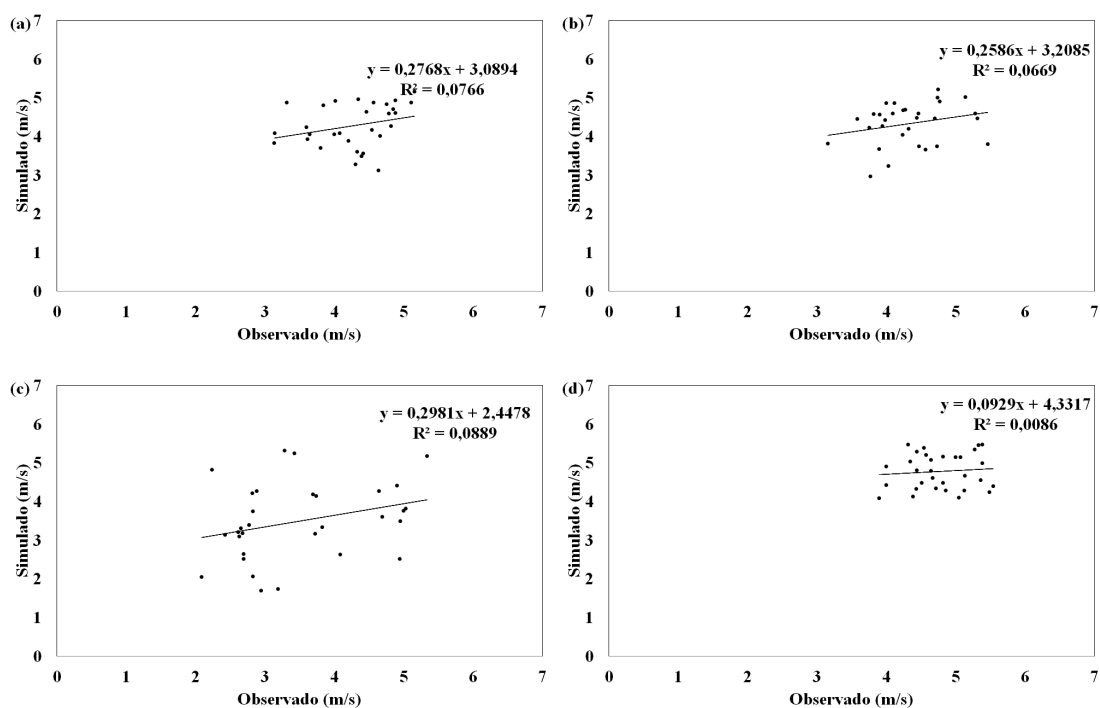


Figura 28. Correlação Linear entre os dados observados e os dados simulados para Campina Grande, (a) setembro de 1977, (b) setembro de 1981, (c) outubro de 1977 e (d) outubro de 1981

Observa-se na Figura 29, que o coeficiente de determinação para o período de 1977 para os meses de setembro e outubro explica 24% e 5%, respectivamente, da variabilidade dos dados observados nesse período. Já para o ano de 1981 do mês de setembro, o coeficiente de determinação explica cerca de 24% e para o mês outubro explica 39% da variabilidade dos dados observacionais, verificados na estação de João Pessoa. Em relação aos coeficientes de correção têm-se: 1977/setembro: $r = 0,49$, o que indica uma moderada correlação; 1977/outubro: $r = 0,23$, o que indica uma fraca correlação; 1981/setembro: $r = 0,49$, o que indica uma correlação moderada e 1981/outubro: $r = 0,62$, correlação moderada.

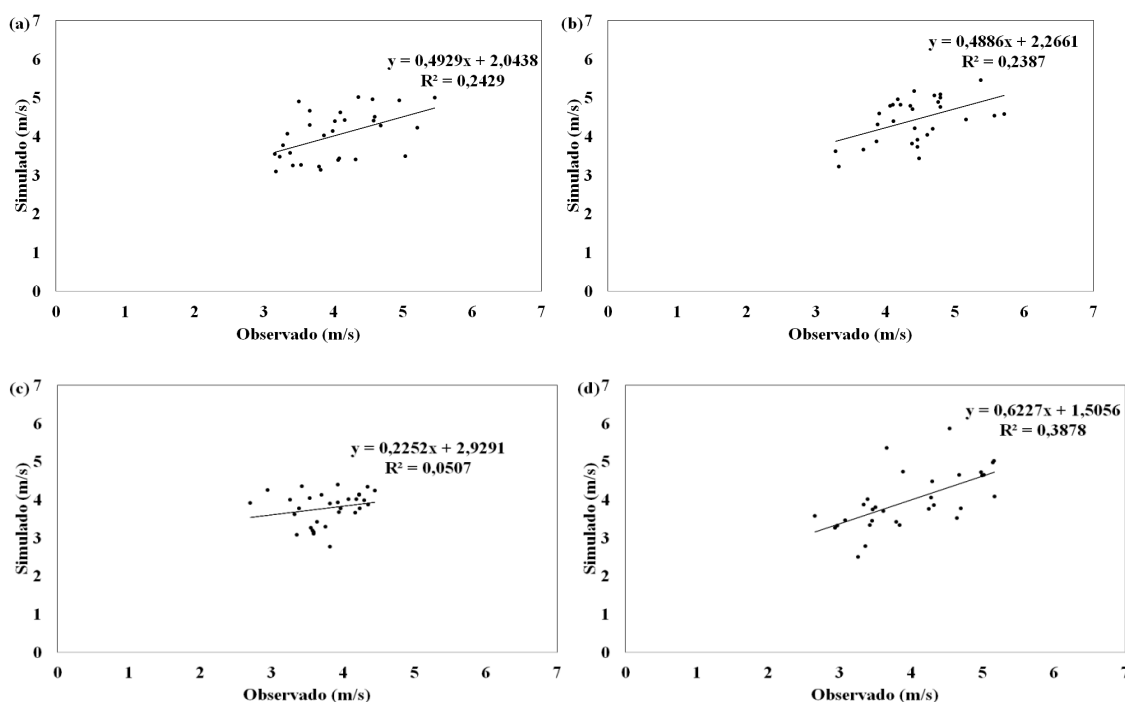


Figura 29. Correlação Linear entre os dados observados e os dados simulados para João Pessoa, (a) setembro de 1977, (b) setembro de 1981, (c) outubro de 1977 e (d) outubro de 1981

Portanto, no geral, para o período de estiagem das cinco estações analisadas, foram obtidos baixos índices de coeficiente de determinação, tendo em sua maioria para todo o período estudado correlações fracas e moderadas. De maneira geral, o modelo BRAMS não apresentou desempenho satisfatório para o período de estiagem.

Tabela 7. Índices estatísticos para a velocidade do vento nas localidades de São Gonçalo, Monteiro, Patos, Campina Grande e João Pessoa, onde EA é o Erro Absoluto Médio, EQM é o Erro Quadrático Médio e r é a correlação para o período de Setembro de 1977 e 1981.

	SETEMBRO/1977			SETEMBRO/1981		
	EA	EQM	r	EA	EQM	r
São Gonçalo	0,62	0,78	0,68*	0,43	0,54	0,71*
Monteiro	-	-	-	0,50	0,62	0,49*
Patos	1,19	1,50	0,26***	2,01	2,22	0,36**
Campina Grande	0,77	1,04	0,28***	0,92	1,17	0,26***
João Pessoa	0,63	0,80	0,49*	0,53	0,61	0,49*

* significância ao nível de 99%, ** significância ao nível de 95%, *** significância ao nível de 90%, **** sem significância estatística.

Observa-se no mês de setembro de 1977 que o melhor valor do erro absoluto foi encontrado na estação de São Gonçalo, com 0,62 m/s, enquanto que Patos obteve um valor muito alto para o erro absoluto, com 1,19 m/s. Para o mesmo período, só que agora para o ano de 1981, em relação ao erro absoluto a melhor localidade continua a ser São Gonçalo, com 0,43 m/s, e o pior valor foi novamente encontrado em Patos. Observa-se que em João Pessoa também foram encontrados baixos valores de erro absoluto. Para o erro quadrático médio, para o ano de 1977, o melhor resultado foi em São Gonçalo, seguido de João Pessoa e pior em Patos, o mesmo acontecendo para o ano de 1981, com valores iguais a 0,54 m/s para São Gonçalo e 2,22 m/s para Patos.

Observando o coeficiente de correlação pode-se dizer que os dois anos analisados apresentaram resultados considerados médios para o coeficiente de correlação. Provavelmente, um fator determinante para isto tenha sido a baixa qualidade dos dados observacionais para os anos de 1977 e 1981. As correlações para o ano de 1981 apresentaram coeficientes fracos e moderados. Utilizado o teste *t* de Student, observa-se que para o ano de 1977, apenas São Gonçalo e João Pessoa apresentaram coeficientes de correlação com significância estatística, para nível de significância de 99%, enquanto que as demais localidades apresentaram significância estatística ao nível de 90%. Já para o ano de 1981, para o mês de setembro, São Gonçalo, Monteiro e João Pessoa apresentaram significância estatística ao nível de 99%, enquanto Patos ao nível de 95% e por fim Campina Grande ao nível de 90%.

Tabela 8. Índices estatísticos para a velocidade do vento nas localidades de São Gonçalo, Monteiro, Patos, Campina Grande e João Pessoa, onde EA é o Erro Absoluto Médio, EQM é o Erro Quadrático Médio e r é a correlação para o período de Outubro de 1977 e 1981.

	OUTUBRO/1977			OUTUBRO/1981		
	EA	EQM	r	EA	EQM	r
São Gonçalo	0,73	0,89	0,38**	0,94	1,11	0,28***
Monteiro	1,53	1,67	0,37**	0,89	1,13	0,12****
Patos	2,84	2,90	0,46*	1,65	1,93	0,46*
Campina Grande	0,87	1,19	0,30***	1,25	1,54	0,09****
João Pessoa	0,46	0,52	0,23****	0,50	0,61	0,62*

* significância ao nível de 99%, ** significância ao nível de 95%, *** significância ao nível de 90%, **** sem significância estatística.

Analisando o mês de outubro de 1977 e 1981, Tabela 8, observa-se que o melhor valor do erro absoluto foi encontrado na estação de João Pessoa, no ano de 1977, concordando com o período de março e abril analisado anteriormente, com 0,46 m/s, enquanto que Patos obteve o valor mais alto, para o erro absoluto, com 2,84 m/s. Em relação ao mesmo período, só que agora em 1981, no que se refere ao erro absoluto, a melhor localidade continua a ser João Pessoa, com 0,50 m/s, e o pior valor novamente foi encontrado em Patos, com 1,65 m/s. Pode-se observar que tanto para o mês de setembro quanto para o mês de outubro, para os dois anos em estudo, a estação de Patos obteve altos valores de erro absoluto. Para o erro quadrático médio, o melhor resultado continua sendo em João Pessoa, no ano de 1977, seguido por São Gonçalo, Campina Grande e Monteiro. Já Patos obteve o maior valor com 2,90 m/s.

Observando o coeficiente de correlação pode-se dizer que os resultados, tanto para o ano de 1977 como para o ano de 1981, para o mês em questão, foram aproximados. As correlações para o ano de 1977 apresentaram coeficientes fracos e moderados para todas as estações, enquanto que para o ano de 1981, as estações obtiveram correlações bem fracas e moderadas. Utilizado o teste *t* de Student, observa-se que para o ano de 1977 apenas a estação de Patos obteve significância estatística ao nível de 99%, enquanto que São Gonçalo e Monteiro obtiveram ao nível de 95% e Campina Grande ao nível de 90%. Porém, a estação de João Pessoa não obteve significância estatística, em 1981. No mês de outubro, as estações de Patos e João Pessoa apresentaram significado estatístico para o nível de significância de 99%, enquanto que São Gonçalo ao nível de 95%. Monteiro e Campina Grande não apresentaram significância estatística.

5.3 DISCUSSÕES COMPLEMENTARES

Em relação à direção do vento em estudo, foram construídos gráficos de Rosa dos Ventos, Figuras 30 a 34, para as cinco localidades, no período de março, abril, setembro e outubro e faz-se uma comparação qualitativa entre a direção do período observacional e o período de simulação, para identificar se um modelo simulou bem as localidades em estudo, em relação à variável direção. Na Figura 30, percebe-se que ao longo do período em estudo de 1977 a 1981, os ventos foram predominantes de leste, variando de 45° a 135°, ou seja, variando de nordeste a sudeste. Na direção norte, é observada uma alta porcentagem para a estação de São Gonçalo, provavelmente devido a problemas na obtenção dos dados, ou calmaria. As maiores porcentagens de velocidade do vento ocorreram na faixa de 3,6 m/s a 5,7 m/s. Pode-se observar uma semelhança entre os dados simulados e observados, principalmente no ano de 1981.

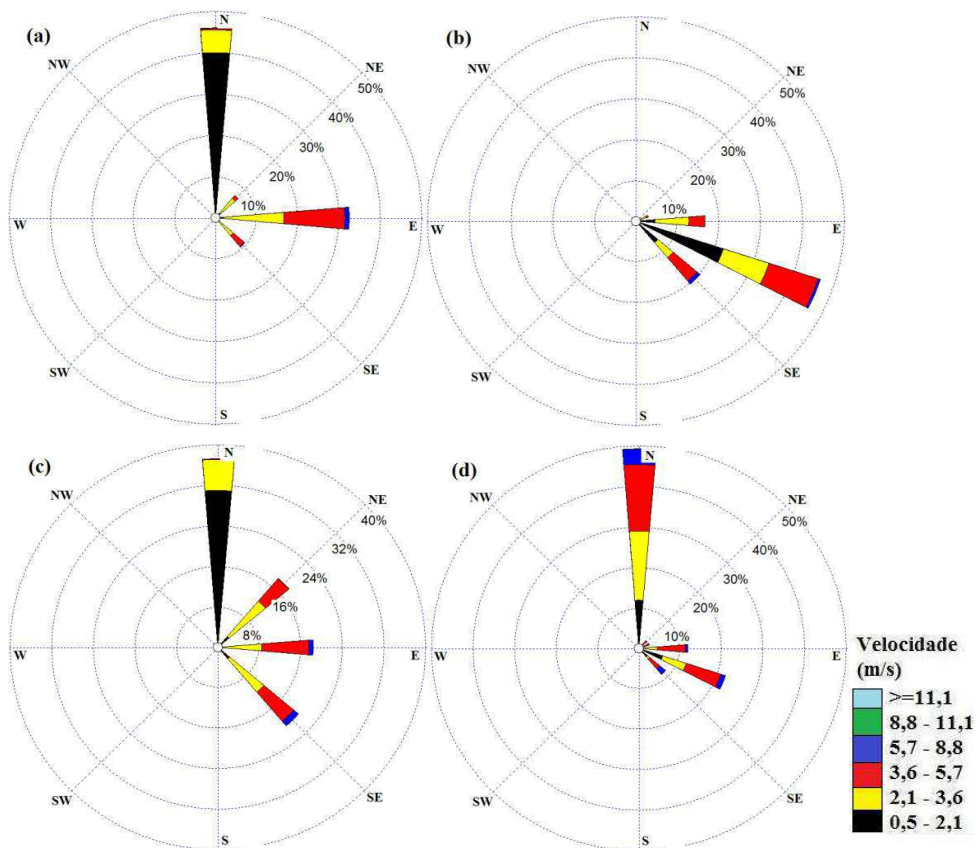


Figura 30. Rosa dos Ventos, velocidade e direção do vento a 10 m acima da superfície para os meses de março, abril, setembro e outubro medidos em São Gonçalo (a) dados observacionais para o ano de 1977, (b) dados simulados para o ano de 1977, (c) dados observacionais para o ano de 1981 e (d) dados simulados para o ano de 1981

Na Figura 31, observa-se que os ventos foram predominantes de leste, variando de 45° a 135° , ou seja, variando de nordeste a sudeste, como observado em São Gonçalo. Na direção norte é verificada uma alta porcentagem para os dados observacionais para o ano de 1981, Figura 31(c), provavelmente devido a problemas na obtenção dos dados, ou calmaria. As maiores porcentagens de velocidade do vento ocorreram na faixa de 3,6 m/s a 5,7 m/s e 5,7 m/s a 8,8 m/s. Pode-se observar uma semelhança entre os dados simulados e observados, ou seja, tanto para a estação de São Gonçalo quanto para a de Monteiro o modelo parece ter simulado bem a direção do vento.

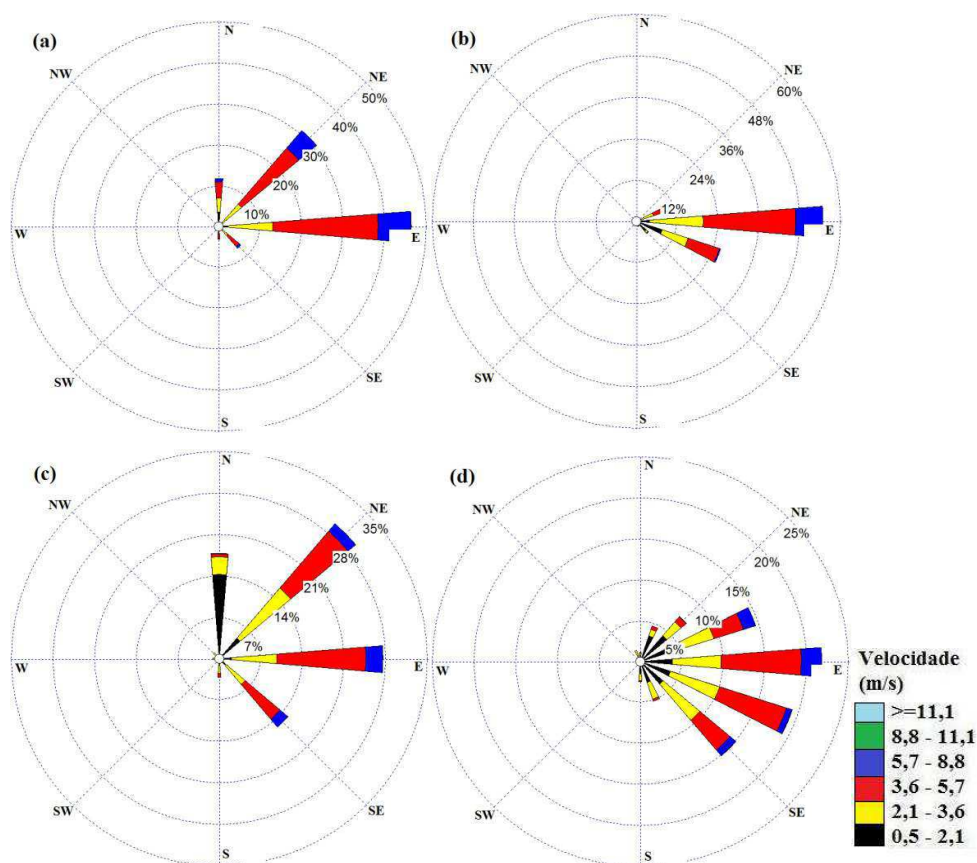


Figura 31. Rosa dos Ventos, velocidade e direção do vento a 10 m acima da superfície para os meses de março, abril, setembro e outubro medidos em Monteiro (a) dados observacionais para o ano de 1977, (b) dados simulados para o ano de 1977, (c) dados observacionais para o ano de 1981 e (d) dados simulados para o ano de 1981

Na Figura 32, observa-se que os ventos foram predominantes de leste, variando de 90° a 135°, ou seja, variando de leste a sudeste. Na direção norte, é observada uma alta porcentagem para os dados observacionais, para o ano de 1977, Figura 32(a). As maiores porcentagem de velocidade do vento ocorreram nas faixas de 2,1 m/s a 3,6 m/s e 3,6 m/s a 5,7 m/s, pode-se observar uma semelhança entre os dados simulados e observados.

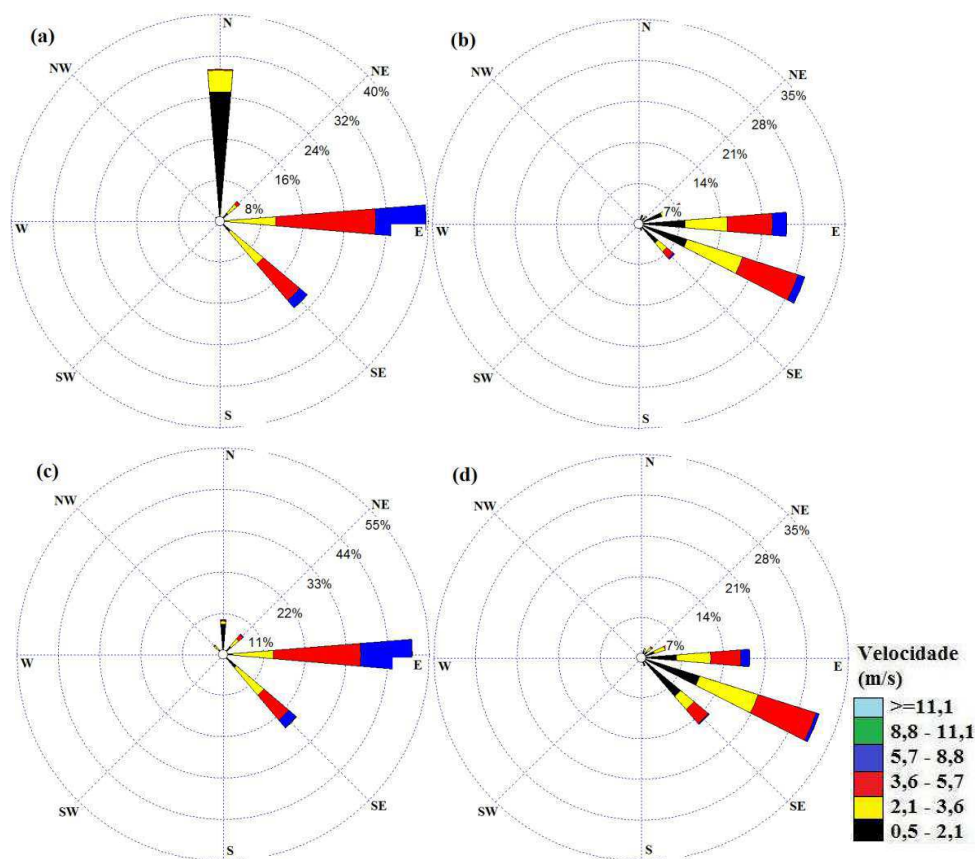


Figura 32. Rosa dos Ventos, velocidade e direção do vento a 10 m acima da superfície para os meses de março, abril, setembro e outubro medidos em Patos (a) dados observacionais para o ano de 1977, (b) dados simulados para o ano de 1977, (c) dados observacionais para o ano de 1981 e (d) dados simulados para o ano de 1981

Na Figura 33 tem-se a estação de Campina Grande, onde os ventos foram predominantes de leste, variando de 45° a 135°, ou seja, variando de nordeste a sudeste, para os dados observacionais, Figuras 33(a) e 33(c), enquanto que para os dados simulados pelo modelo os ventos foram predominantes de sudeste, variando de leste a sudeste. As maiores porcentagens de velocidade do vento ocorreram nas faixas de 2,1 m/s a 3,6 m/s, 3,6 m/s a 5,7 m/s e 5,7 m/s a 8,8 m/s. Pode-se observar uma semelhança entre os dados simulados e observados, tendo em vista que os dados observacionais só assumem valores exatos como; 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315° e por fim 360°, enquanto que o modelo pode assumir qualquer valor entre 0° e 360°.

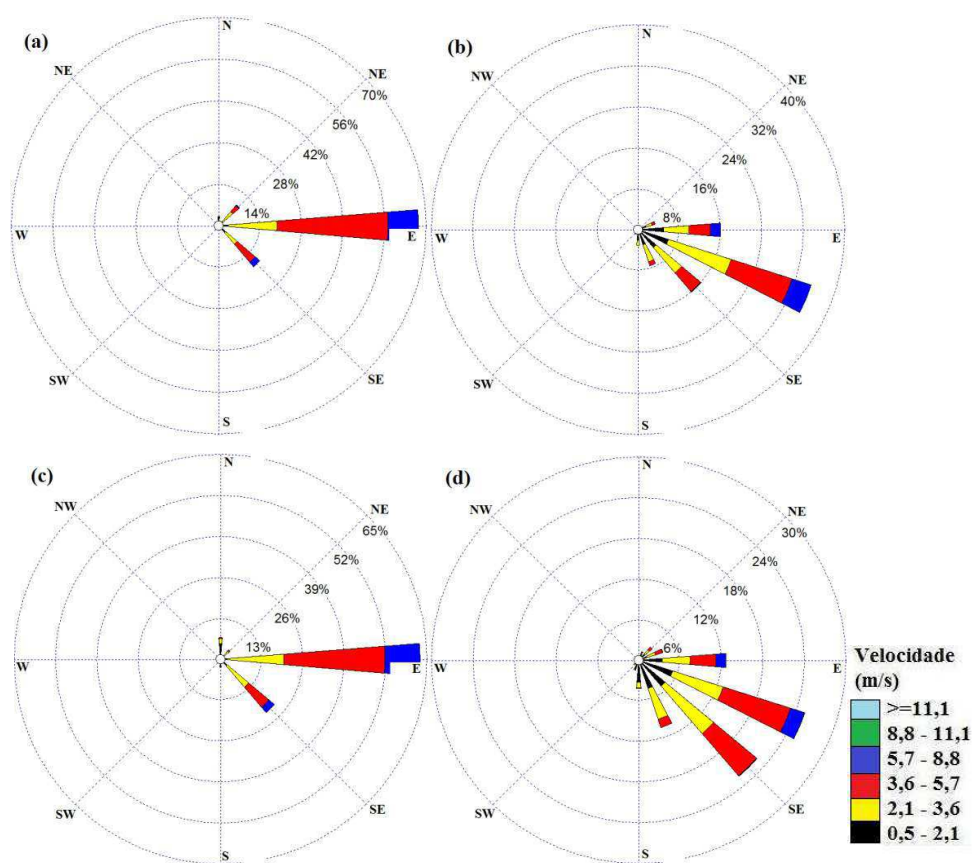


Figura 33. Rosa dos Ventos, velocidade e direção do vento a 10 m acima da superfície para os meses de março, abril, setembro e outubro medidos em Campina Grande (a) dados observacionais para o ano de 1977, (b) dados simulados para o ano de 1977, (c) dados observacionais para o ano de 1981 e (d) dados simulados para o ano de 1981

Na Figura 34, tem-se a estação de João Pessoa onde os ventos foram predominantes de sudeste, variando de 90° a 180° , ou seja, variando de leste a sudeste. As maiores porcentagens de velocidade do vento ocorreram nas faixas de 2,1 m/s a 3,6 m/s, 3,6 m/s a 5,7 m/s e 5,7 m/s a 8,8 m/s. Pode-se observar uma semelhança entre os dados simulados e observados. É importante frisar que, para termos uma melhor noção acerca do ajuste entre os dados observacionais e os dados simulados pelo modelo, tem-se que fazer uma análise quantitativa dos dados. Para isso, deve-se usar os índices estatísticos descritos na metodologia deste trabalho.

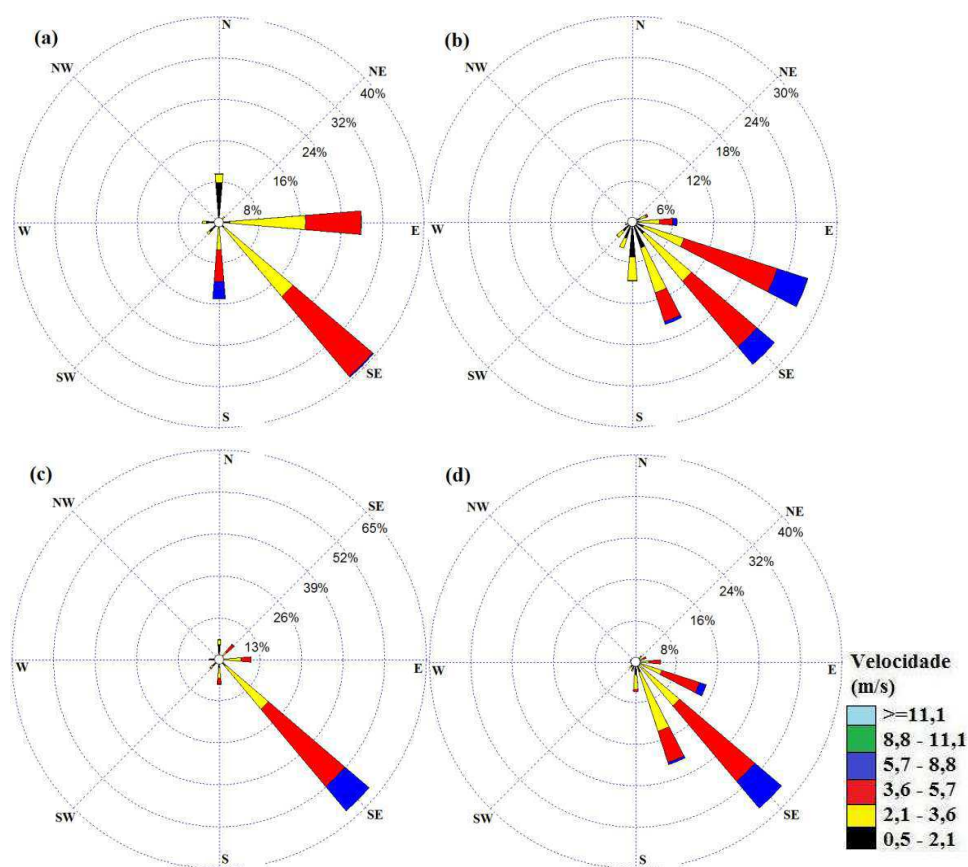


Figura 34. Rosa dos Ventos, velocidade e direção do vento a 10 m acima da superfície para os meses de março e abril medidos em João Pessoa (a) dados observacionais para o ano de 1977, (b) dados simulados para o ano de 1977, (c) dados observacionais para o ano de 1981 e (d) dados simulados para o ano de 1981

Nas Figuras 35 e 36 têm-se o mapa do Estado da Paraíba para a densidade média de potência eólica com a localização das estações utilizadas para o período considerado chuvoso na região, ou seja, para os meses de março e abril, Figura 35, e para o período de estiagem na região, ou seja, para os meses de setembro e outubro, Figura 36, nos anos de 1977 e 1981.

Pode-se observar na Figura 35 que os maiores valores de densidade de potência eólica foram encontrados na mesorregião do Planalto da Borborema, onde se localiza as estações de Monteiro e Campina Grande. É possível verificar também que para o mês de março os maiores valores foram para o ano de 1977, enquanto que para o mês de abril os maiores valores foram encontrados no ano de 1981.

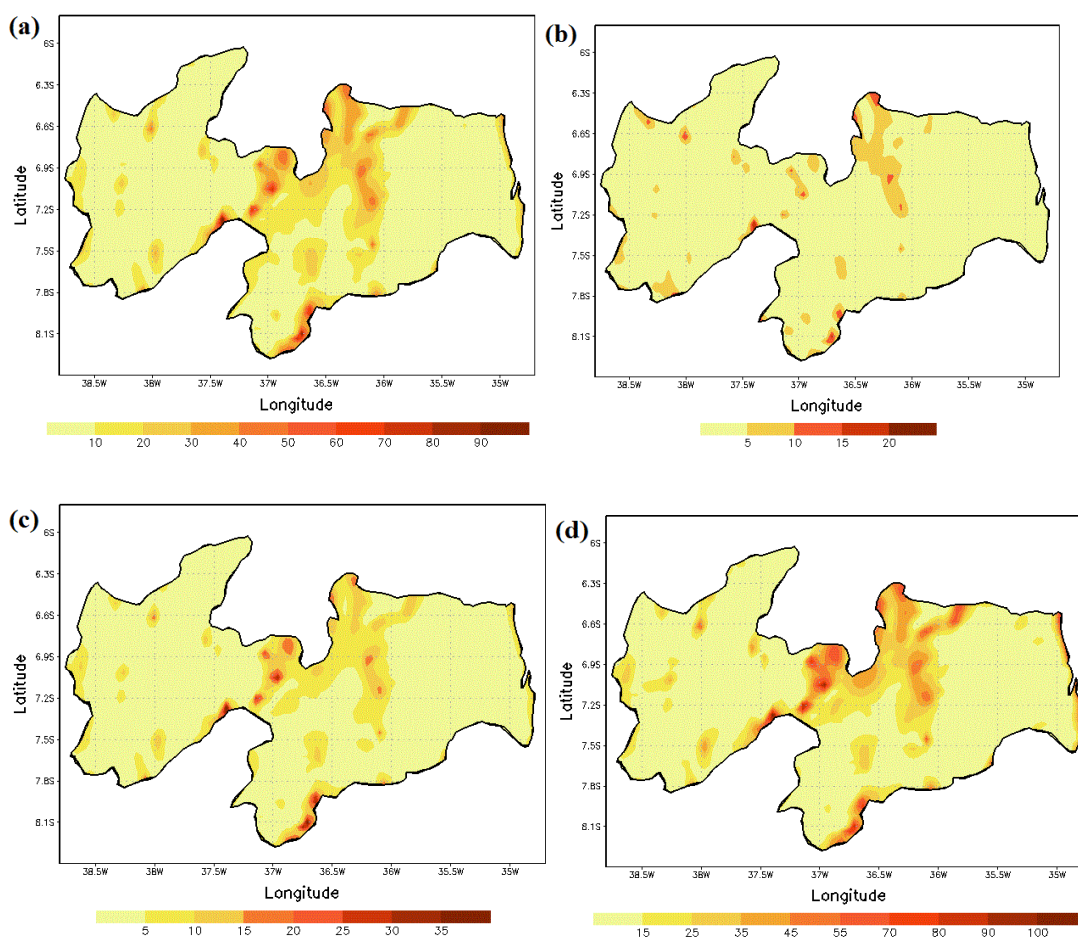


Figura 35. Densidade média de potência eólica em (W/m^2) para o Estado da Paraíba para o seguinte período, (a) março de 1977, (b) março de 1981, (c) abril de 1977 e (d) abril de 1981

Na Figura 36 tem-se a configuração do Estado da Paraíba para a densidade de potência eólica em W/m^2 . Como era de se esperar, o período considerado de estiagem obteve melhor configuração para a potência eólica, na região, em relação ao período considerado chuvoso, ou seja, os resultados para os meses de setembro e outubro foram superiores aos resultados observados nos meses de março e abril, como pode ser visto comparando a Figura 35 com a Figura 36. Os melhores locais de densidade de potência eólica foram novamente no Planalto da Borborema, como observado no gráfico anterior, mas com alguns focos no Litoral paraibano, onde está localizada a estação de João Pessoa, e no Sertão paraibano, onde temos as estações de São Gonçalo e Patos.

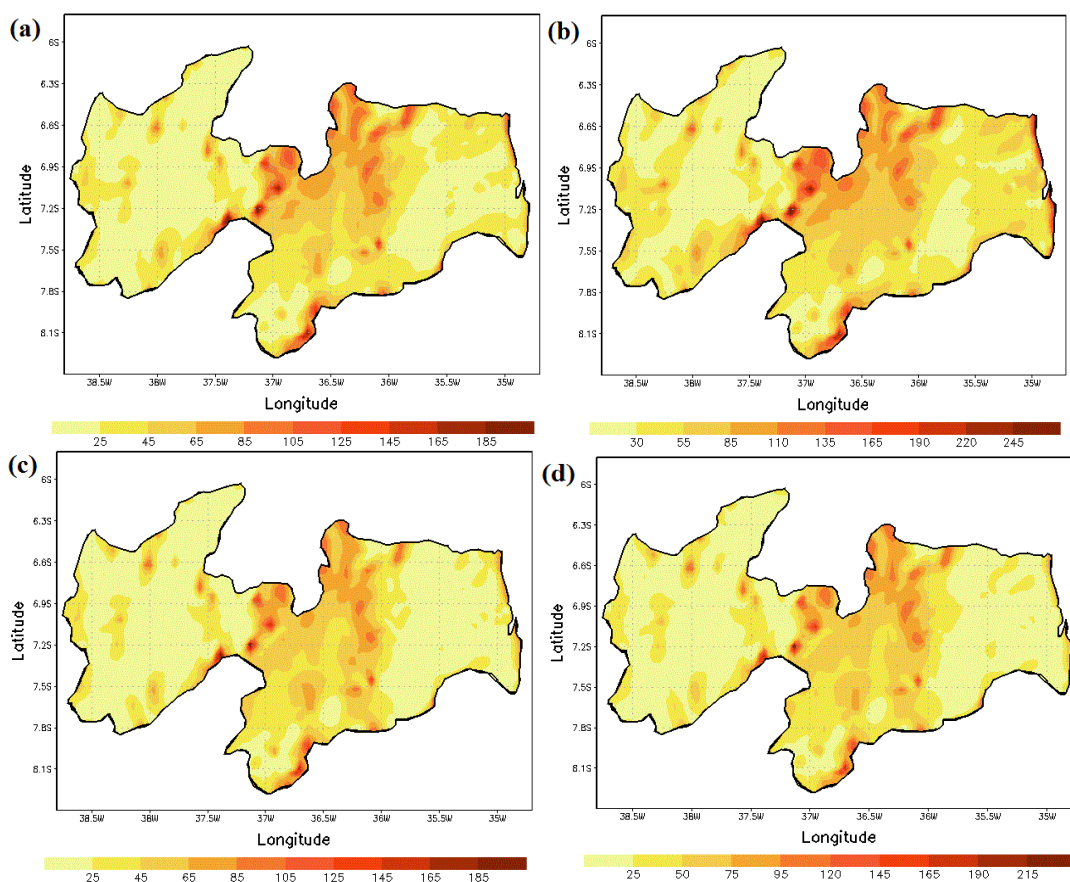


Figura 36. Densidade média de potência eólica em (W/m^2) para o Estado da Paraíba para o seguinte período, (a) setembro de 1977, (b) setembro de 1981, (c) outubro de 1977 e (d) outubro de 1981

6 CONCLUSÕES

Concluiu-se que a direção predominante nas cinco estações é de leste, com variações entre nordeste e sudeste. O maior potencial eólico foi verificado em Campina Grande, enquanto que São Gonçalo se mostrou com baixos valores. As cinco estações analisadas revelaram que existem recursos eólicos disponíveis na região, que poderiam atender a demanda local por energia elétrica.

As simulações numéricas para estimar a velocidade do vento na altura de 10 m acima do solo mostrou no geral um desempenho satisfatório tanto para o período chuvoso quanto no período de estiagem, como pode ser visto no capítulo anterior, com boa concordância entre as series de dados simulados, em comparação com os dados observacionais. E como visto em seus índices estatísticos com médias correlações para o período de estiagem e altas correlações para o período chuvoso, ou seja, o modelo simulou melhor o período considerado chuvoso na região.

Em todos os casos, o modelo sentiu dificuldade em reproduzir as variações de pequena escala de tempo. Pode-se concluir com isso que os fatores locais não estão bem representados dentro do modelo, o que poderia ser corrigido com a utilização de um modelo de microescala. Como também a utilização de dados de superfícies de fontes diversas das que foram utilizadas neste trabalho, com melhores resoluções espaciais e com alta qualidade. No entanto, o modelo não foi capaz de reproduzir variações de pequenos intervalos de tempo e em geral tendeu a subestimar os valores de intensidade do vento, principalmente durante o período de estiagem.

Conclui-se que os dados observacionais utilizados neste estudo são de baixa resolução. A obtenção de dados com maior qualidade, ou até mesmo de dados de anemômetros em diversas alturas acima do solo, poderia acarretar melhores índices estáticos, como melhores coeficientes de determinação e melhores coeficientes de correlação de Pearson, melhorando assim os resultados encontrados neste trabalho.

Para trabalhos futuros nessa linha de investigação, previsão de recursos eólicos, propõe-se o uso de um modelo de microescala, como o WAsP, para podemos detectar os fenômenos que ocorrem em intervalos de tempo pequenos, bem como a utilização de melhores dados de superfície no modelo BRAMS, para refazer as simulações, ampliando o período de simulação. Também se pode utilizar dados de grande escala de diversas fontes para inicializar o modelo.

REFERÊNCIAS

- ANTHES, R. A. Cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model. **Monthly Weather Review**, v.105, n.3, p.270-300, 1977.
- ALVES, J. M. B.; FERREIRA F. F.; CAMPOS J. N. B. Movimento Vertical e Índices Atmosféricos Associados às Células de Hadley e Walker em Anos de Contrastes Climáticos: Relação com as Chuvas do Setor Norte do Nordeste do Brasil - SNNEB. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v.20, n.01, p.113-122. 2005.
- BARRETO, A. B.; ARAGÃO, M. R. S.; BRAGA C. C. **Estudo do Ciclo Diário do Vento à Superfície no Nordeste do Brasil**. Congresso Brasileiro de Meteorologia, foz do Iguaçu – PR. 2002. CDROM.
- BASTOS, E. J. B.; CEBALLOS, J. C.; SOBRAL, Z. R.; SIMÕES, F. **Distribuição Estatística da Energia Eólica no Nordeste**. Inventário Energético do Nordeste. 1987.
- BENTO, P. B., CAVALCANTI, E. P. **Comportamento do Vento à Superfície na Paraíba e Correlação com outras Estações do Nordeste do Brasil**. Congresso Brasileiro de Meteorologia, Belo Horizonte. 1994. CDROM.
- BRUNI, A. L. **Estatística aplicada à gestão empresarial**. São Paulo: Atlas, 2007. 396 p.
- CAMELO, H. N. **Estudo da circulação local na região do vale do rio Jaguaribe no estado do Ceará**. CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14, 2006, Florianópolis. Anais XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2006.
- CAMELO, H. N. **Estudo Numérico do Vento Aracati para Caracterização de seu Potencial Eólico**. 94 f. **dissertação** (Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas)-Universidade Estadual do Ceará, 2007.
- CAMPOS, F. G. R. **Geração de Energia a Partir de Fonte Eólica com Gerador Assíncrono Conectado a Conversor Estático Duplo**. 137 f. **dissertação** (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.
- CARVALHO, P. **Geração Eólica**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2003. 146 f.
- CASTRO, R. M. C. **Introdução à Energia Eólica**. Portugal, Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, 2005. 83 f.
- CAVALCANTI, E. P. **Teor e transporte de vapor d'água na atmosfera do Nordeste do Brasil**. Tese de Doutorado-UFPB, Campina Grande-PB, 115p. 2001.
- CHEN, C.; COTTON, W. R. A one dimensional simulation of the stratocumulus capped mixed layer. **Boundary-Layer Meteorology**. v.25, p.289-321, 1983.
- CHOU, S. C.; NETO, A. C. P.; CHAGAS, D. J.; LYRA A. A; PERREIRA, E. B. **Mapeamento eólico para o Nordeste**. CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14, 2006, Florianópolis. Florianópolis. Anais XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2006.

COSTA, A. A., **SISPRECE-Sistema de Previsão de Vento em Alta Resolução Aplicada à Geração de Energia Eólica**, 2007.

COTTON, W. R.; PIELKE, R. A.; WALKO R. L.; LISTON, G. E.; TREMBACK, C. J.; JIANG, H.; McANELLY, R. L.; HARRINGTON, J. Y.; NICHOLS, M. E.; CARRIO, G. G.; McFADDEN, J. P. **Current Status and Future Directions**. *Meteorology and Atmospheric Physycs*. v.82, n.1, p.5-29, 2003.

CUNHA, E. B. A. C. **Investigação do Potencial Eólico de Região Serrana no Ceará**. Dissertação (Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas)-Universidade Estadual do Ceará, 2008.

DEVORE, J. L. **Probabilidade e estatística para engenharia e ciência**. São Paulo: Thomson Pioneira, p. 706, 2006.

DUHDIA. J.; GILL, D.; MANNING, K.; WANG, W.; BRUYERE, C. **PSU/NCAR Mesoscale Modeling System Tutorial Class Notes and Users' Guide** (MM5 Modeling System Version 3. 2005.

FRANK, H. P.; RATHMANN, O.; MOSRTENSEN, N. G.; LANDBERG, J. **Thes numerical wind atlas-the KAMM/WASP method**. Riso-r-1252(EN), Riso National Laboratory Riso, Roskilde, Denmark, 2001.

FREITAS, E. D.; MARTINS, L. D.; DIAS, P. L. S.; ANDRADE, M. F. A Simple Photochemical Module Implemented in RAMS for Tropospheric Ozone Concentration Forecast in the Metropolitan Area of São Paulo-Brazil: Couplig and Validation. **Atmospheric Environment**, Inglaterra, v. 39, n. 34, p. 6352-6361, 2005.

FREITAS, E. D.; ROZOFF, C. M.; COTTON, W. R.; DIAS, P. L. S. Interactions of an Urban Heat Island and Sea Breeze Circulations During Winter Over the Metropolitan Area of São Paulo-Brazil. **Boundary Layer Meteorology**, Netherlands, v. 122, n. 1, p. 43-65, 2007.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia e Meio Ambiente no Brasil**. Revista Estudos Avançados 59 – Dossiê Energia, São Paulo, 2006.

GOMES FILHO, M. F.; CEBALLOS, J. C.; LACERDA, L. M. M. **Um estudo da Intensificação do Vento Próximo à Superfície no Verão do Estado da Paraíba**. Congresso Brasileiro de Meteorologia, Salvador-BA. v.2, p.603-608. 1990.

GONÇALVES, F. F. **Energia eólica distribuída-Estudo da tecnologia e avaliação de viabilidade técnica no Estado da Bahia**. Monografia (Curso de especialização em gerenciamento e tecnologia ambientais no processo produtivo-Ênfase na produção limpa) Universidade Federal da Bahia, 2008.

GOUVÊA, M. L. **Cenário de Impacto das Propriedades da Superfície sobre o Conforto Térmico Humano na Cidade de São Paulo**. Dissertação (Curso de Ciências Atmosféricas, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas) Universidade de São Paulo, 2007.

GRELL, G.A., DEVENYI, D. A new approach to parameterizing convection using ensemble and data assimilation techniques. **Geophysical Research Letters**. v. 29, 1693, 2002.

HUANG, G.; PAES, A. T. Posso usar o teste t de Student quando preciso comparar três ou mais grupo? **Einstein: Educação Continuada em Saúde**, v. 7, n. 2, p. 63-64, 2009.

JUANG, H. M. H.; KANAMITSU, M. The NMC Nested Regional Spectral Model. **Monthly Weather Review**, Boston v.122, n.1, p.3-26. 1994.

JUSTUS, C. G. e MIKHAIL, A. Height Variation of Wind Speed and Wind Distribution. **Geophysical Research Letters**. v. 03, p.261-264, 1976.

KUO, H.L. On formation and intensification of tropical cyclones through latent heat release by cumulus convection. **Journal of the Atmospheric Sciences**. v.22, n.1, p.40, 1965.

KUO, H.L. Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection on large-scale flow. **Journal of Atmospheric Sciences**. Boston, USA. v.31, p.1232-1240. 1974.

LANDBERG, L.; MYLLERUO, L.; RATHMANN, O.; PETERSEN, E. L.; JONGENSEN, B.H.; BAGGER, J.; MORTESEN, N. G. Wind Resource Estimation-An Overview. **Wind Energy**. v.6, p.261-271, 2003.

LEAL JUNIOR, J, B. V. **Estudo da variabilidade temporal do vento no estado do Ceará para identificação de padrões de circulação local**. Florianópolis. Anais XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2006.

LEITE, M. L., FILHO, J. S. V., Avaliação da Velocidade Média e Direção Predominante do Vento em Ponta Grossa-PR. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. v.14, n.02, 157-167. 2006.

LIRA, M. A. T. **Estimativa dos recursos eólicos no litoral cearense usando a teoria da regressão linear**. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas)-Universidade Estadual do Ceará, 2009.

MAGALHÃES, E. L.; RODRIGUES, M. C. **Fontes Alternativas de Energia**. São Paulo: Universidade de São Paulo Instituto de Geociência, 2007.

MANWELL J. F.; MCGOWAN J. F.; ROGERS A. L. **Wind energy explained**. New York: Wiley, p.569, 2002.

MARIA, P. H. S.; COSTA, A. A; SOMBRA, S. S. **Simulação de ventos em alta resolução no litoral do Ceará**. Florianópolis. Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2006.

MARIA, P. H. S **Modelagem numérica em alta resolução para previsão de geração de energia eólica no Ceará**. 123 f. Dissertação de Mestrado-UECE Fortaleza, CE, 2007.

MARQUES, J. **Turbinas Eólicas: Modelo, Análise e Controle do Gerador de Indução com Dupla Alimentação**. 2004. 158 f. **dissertação** (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, 2004.

MELLOR, G., YAMADA, T. Desenvolvimento of a turbulence closure model for use in geophysical fluid problems. **Reviews of Geophysics and Space Physics**, v. 20, p. 851-857, 1982.

MENEZES, H. E. A. **Influência da Zona de Convergência Secundária do Atlântico Sul Sobre a Ocorrência de Precipitação no Leste do Nordeste Brasileiro.** Tese de Doutorado-UFPG, Campina Grande-PB, 103p. 2010.

MOLINARI, J. A general form of Kuo's cumulus parameterization. **Monthly Weather Review** v.113, p.1411-1416, 1985.

MOLINARI, J., CORSETTI, T. Incorporation of cloud-scale and mesoscale downdrafts into a cumulus parameterization: Results of one- and three-dimensional integrations. **Monthly Weather Review**, v. 113, p. 485-501, 1985.

MOLION, L. C. B. e BERNARDO, S. O. **Variabilidade do vento para cidade de Maceió-AL.** CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11, 2000, Rio de Janeiro. Anais XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2000.

MUNIZ, A. L. **Energia Eólica no Mundo: Perspectivas.** Audiência Pública "Fonte Alternativa de Energia". Brasília, 2007.

OLIVEIRA, J. L. **Influência da circulação geral e da variabilidade interanual sobre o potencial eólico do Nordeste brasileiro.** 2007. Dissertação (Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas) – Universidade Estadual do Ceará, 2007.

PIELKE, R. A.; COTTON, W. R.; WALKO, R. L.; TREMBACK, C. J.; LYONS, W.; GRASSO, L.D.; NICHOLS, M. E.; MORAM, M. D.; WESLEY, D. A.; LEE, T. J.; COPELAND, J. H. **A Comprehensive Meteorological Modeling System-RAMS.** **Meteorology and Atmospheric Physics.** v.49, p. 69-91, 1992.

REIS JUNIOR, D.S. **Previsão sazonal de vazões no estado do Ceará.** In: **VIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste.** Gravataá-PE: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2006. P. 20. 2006.

ROBALLO, S.T.; FISH, G. Escoamento atmosférico no centro de lançamento de Alcântara (CLA): parte 1-aspectos observacionais. **Revista Brasileira de Meteorologia.** v.23, n.4, p.509-510, 2008.

SACRAMENTO, Elissandro M. **Estudo preliminar sobre o potencial eólico das regiões serranas do Ceará.** Congresso Brasileiro de Meteorologia, Florianópolis. 2006.

SANSIGOLO, C. A. Distribuição de Probabilidade de Velocidade e Potência do Vento. **Revista Brasileira de Meteorologia.** v.20, n.02, p.207-214. 2005.

SAUER, I. L.; QUEIROZ, M. S.; MIRAGAYA, J. C. G.; MASCARENHAS, R. C.; JÚNIOR, A. R. Q. **Energia Renováveis: Ações e Perspectivas na Petrobras.** Bahia Análise e Dados. Salvador. v.16, n.01, 9-22. 2006.

SILVA, B. B.; ALVES, J. J. A.; CAVALCANTI, E. P.; DANTAS, R. T. Potencial Eólico na Direção Predominante do Vento no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** v.6, n.3, 431-439, 2002.

SILVA, B. B.; ALVES, J. J. A.; CAVALCANTI, E. P.; VENTURA, E. D. Variabilidade espacial e temporal do potencial eólico da direção predominante do vento no nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.19, n.2, 189-202, 2004.

SOUZA, E.P. **Estudos teóricos e numéricos da relação entre convecção e superfície heterogêneas na região Amazônica**. 121 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade de São Paulo, 1999.

SOUZA, E. P.; SILVA, E. M. Impactos da Implementação de uma Parametrização de Convecção Rasa em um Modelo de Mesoescala: Descrição e Testes de Sensibilidade do Esquema. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 18, n. 1, p.33-42, 2003.

TEICHRIB, C.A. **Sensibilidade do BRAMS para descrição de chuva e temperatura, no Nordeste do Rio Grande do Sul, para diferentes resoluções espaciais**. Dissertação de Mestrado – UFSM/CCNE/PPGF. Santa Maria – RS, 79p, 2008.

VAN DER AUWERA, L.; MELET, L. M. The Use of the Weibull 3- Parameters Model for Estimating Mean Wind Power Densities. **Journal of Applied Meteorology**, v.19, n.07, 819-825, 1980.

WALKO, R.L.; TREMBACK, C.J.; HERTENSTEIN, R.F.A. **The regional atmospheric modeling system. Version 3b. User's Guide**, Fort Collins, USA. ASTER Division, 121p. 1995.

WALKO, R.L., COTTON, W.R., MEYERS, M.P., HARRINGTON, J.Y. New RAMS cloud microphysics parameterization part I: The single-moment scheme. **Atmospheric Research**, v. 38 (14), p. 29-62, 1995.

WEBER, R. L.; BUCKNER, M.; WEBER, J. Statistical Performance of several mesoscale atmospheric dispersion models. **Journal of Applied Meteorology**, NOAA Central Library, Department of Commerce, v. 21, n. 11, 1633-1644, 1982.