



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

DISSERTAÇÃO

**VARIABILIDADE DA VELOCIDADE DO VENTO A 10
METROS PARA A REGIÃO NORDESTE DO BRASIL**

JOSÉ BATISTA CHAVES FILHO

Campina Grande-PB

2016

JOSÉ BATISTA CHAVES FILHO

**VARIABILIDADE DA VELOCIDADE DO VENTO A 10
METROS PARA A REGIÃO NORDESTE DO BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande- UFCG, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Área de concentração: Meteorologia de meso e grande escalas

Sub-área: Modelagem numérica da atmosférica

Orientador: Prof. Dr. Enilson Palmeira Cavalcanti

Campina Grande-PB

2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

C512v Chaves Filho, José Batista.
Variabilidade da velocidade do vento a 10 metros para a região nordeste do Brasil / José Batista Chaves Filho. – Campina Grande, 2016.
73 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2016.
"Orientação: Prof. Dr. Enilson Palmeira Cavalcanti".
Referências.

1. Vento - Energia Eólica. 2. Velocidade do Vento. 3. Nordeste do Brasil. I. Cavalcanti, Enilson Palmeira. I. Título.

CDU 551.556.3:621.548(812/813)(043)

JOSÉ BATISTA CHAVES FILHO

VARIABILIDADE DA VELOCIDADE DO VENTO A 10 METROS PARA A REGIÃO
NORDESTE DO BRASIL

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 31/08/2016

BANCA EXAMINADORA



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



Prof. Dr. MANOEL FRANCISCO GOMES FILHO
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. ROBERTO ALAN FERREIRA ARAÚJO

Campina Geotech Consultoria em Meteorologia

DEDICATÓRIA

A Deus que me deu forças e esperança para que eu pudesse concluir meus objetivos ultrapassando qualquer barreira de dificuldades que ousou surgir no meu caminho.

A meus pais, José Batista e Irene, pelo apoio durante todos esses anos, no qual me ensinaram a vencer na vida com humildade, dedicação e honestidade sempre através dos estudos. A minha irmã e esposa pela confiança e apoio.

Ao meu orientador, prof. Dr. Enilson Palmeira Cavalcanti, por todo o aprendizado, crescimento profissional, durante momentos desafiadores no decorrer do mestrado.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre fazer dos obstáculos encontrados, lições de vida para crescimento pessoal e profissional.

A minha família por toda confiança depositada, compreensão e apoio em todas as decisões que vim a tomar.

A minha esposa, por sua amizade, companheirismo e incentivo, durante o mestrado.

Ao meu orientador, prof. Dr. Enilson Palmeira Cavalcanti, pelo conhecimento repassado, ensinamentos, atenção e as oportunidades que ampliaram minha visão do mundo e das Ciências Atmosféricas.

A todos os docentes que fazem parte da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas (UACA), pela dedicação, sabedoria e empenho na transmissão de conhecimentos e aprendizado ao longo do curso de graduação e mestrado.

A Divanete e Arilene pela atenção durante esses últimos dois anos na secretaria de Pós-graduação da UACA.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) pelo suporte financeiro.

A o professor Dr. Carlos Antônio Costa dos Santos, sempre tentou me ajudar nos momentos mais difíceis, dando conselhos e fazendo as coisas ficarem mais fáceis e simples.

A todos os meus amigos que fiz ao longo dessa saga universitária, Diego, Elder, Leo, Rafinha, dentre os demais, pela amizade durante esses últimos anos, conselhos, críticas, companhia, aprendizados e sentimentos vividos. Enfim a todos os meus

grandes amigos que tive o prazer e a benção de conhecer, nos quais colaboraram direta e indiretamente para a realização deste trabalho.

A todos, meu muito obrigado.

Tenho a impressão de ter sido uma criança brincando à beira-mar, divertindo-me em descobrir uma pedrinha mais lisa ou uma concha mais bonita que as outras, enquanto o imenso oceano da verdade continua misterioso diante de meus olhos”.

(Isaac Newton)

RESUMO

VARIABILIDADE DA VELOCIDADE DO VENTO A 10 METROS PARA A REGIÃO NORDESTE DO BRASIL

Neste trabalho é feito um estudo da variabilidade da velocidade do vento a 10 metros de altura para a região Nordeste do Brasil, utilizando dados de reanálises do [European Centre for Medium-Range Weather Forecasts](#) (ECMWF). Nessa primeira análise esses dados foram comparados com valores observados em estações meteorológicas pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para avaliação da qualidade dos mesmos. Os resultados mostraram um bom desempenho apresentando estatísticas satisfatórias. Para a avaliação da variação sazonal e interanual foram construídos diagramas com séries de dados mais longas (1979 a 2015). Observaram-se variações marcantes entre estações do ano, mais especificamente entre Outono e Primavera. Também se observam variações entre anos de atuação de La Niña, El Niño e gradientes positivo e negativo da anomalia de temperaturas da superfície do mar no Atlântico Tropical. As distribuições espaciais das anomalias da velocidade do vento, para anos de atuação desses fenômenos, mostraram-se coerentes com questões discutidas encontradas na literatura.

Palavras-chave: Energia eólica, velocidade do vento, Nordeste de Brasil.

ABSTRACT

VARIABILITY WIND SPEED 10 METERS FOR THE NORTHEAST REGION OF BRAZIL.

This paper made a wind speed variability of the study at 10 meters to the Northeast region of Brazil using reanalysis data of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). In this first analysis these data were compared with values observed in weather stations belonging to the National Institute of Meteorology (INMET) to evaluate the quality. The results showed a good performance presenting good statistics. For the evaluation of seasonal and interannual variation diagrams were constructed with longer data series (1979-2015). They observed marked variations between seasons, more specifically between autumn and spring. It is also observed variations between years of La Niña activity, El Niño and positive and negative gradients of the anomaly temperature of the sea surface in the tropical Atlantic. The spatial distribution of wind speed anomalies, for years of experience of these phenomena, proved to be consistent with issues discussed in the literature.

Keywords: Wind power, wind speed, Northeast of Brazil.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	12
LISTA DE TABELAS	14
LISTA DE SIGLAS	15
LISTA DE SÍMBOLOS	17
1. INTRODUÇÃO.....	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	26
3.1. Área de estudo e dados	26
3.2 Correção Estatística do Modelo	28
3.3 Índices estatísticos	28
3.4 Análises sazonal e interanual	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1 Resultados dos dados observados com a reanálise do modelo ECMWF	34
4.2 Índices estatísticos	44
4.3 Variação sazonal e interanual da velocidade do vento	52
4.4 Anomalia da velocidade do vento em anos de Dipolo positivo e negativo	57
4.5 Anomalia da velocidade do vento em anos de El Niño e La Niña	61
4.6 Climatologia da velocidade do vento para o outono e primavera.....	65
5. CONCLUSÕES	66
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribuição espacial das estações na região Nordeste do Brasil.....	28
Figura 2. Comparação da velocidade do vento a 10 metros de altura do solo em (m/s), a partir dos dados de médias diárias, observados (linha azul) com os dados do modelo (linha vermelha), para a estação de Palmeira dos Índios - AL, no período de janeiro de 1979 a dezembro de 1981.....	35
Figura 3. Comparação da velocidade do vento a 10 metros de altura do solo em (m/s), a partir dos dados de médias diárias, observados (linha azul) com os dados do modelo (linha vermelha), para a estação de Remanso - BA, no período de janeiro de 1979 a dezembro de 1981.....	36
Figura 4 Comparação da velocidade do vento a 10 metros de altura do solo em (m/s), a partir dos dados de médias diárias, observados (linha azul) com os dados do modelo (linha vermelha), para a estação de Acaraú - CE, no período de janeiro de 1979 a dezembro de 1981.....	37
Figura 5. Comparação da velocidade do vento a 10 metros de altura do solo em (m/s), a partir dos dados de médias diárias, observados (linha azul) com os dados do modelo (linha vermelha), para a estação de São Luís - MA, no período de janeiro de 1979 a dezembro de 1981.....	38
Figura 6 Comparação da velocidade do vento a 10 metros de altura do solo em (m/s), a partir dos dados de médias diárias, observados (linha azul) com os dados do modelo (linha vermelha), para a estação de São Gonçalo - PB, no período de janeiro de 1979 a dezembro de 1981.....	39
Figura 7. Comparação da velocidade do vento a 10 metros de altura do solo em (m/s), a partir dos dados de médias diárias, observados (linha azul) com os dados do modelo (linha vermelha), para a estação de Petrolina - PE, no período de janeiro de 1979 a dezembro de 1981.....	40
Figura 8. Comparação da velocidade do vento a 10 metros de altura do solo em (m/s), a partir dos dados de médias diárias, observados (linha azul) com os dados do modelo (linha vermelha), para a estação de Parnaíba - PI, no período de janeiro de 1979 a dezembro de 1981.....	41
Figura 9. Comparação da velocidade do vento a 10 metros de altura do solo em (m/s), a partir dos dados de médias diárias, observados (linha azul) com os dados do modelo	

(linha vermelha), para a estação de Cruzeta - RN, no período de janeiro de 1979 a dezembro de 1981.....	42
Figura 10. Comparação da velocidade do vento a 10 metros de altura do solo em (m/s), a partir dos dados de médias diárias, observados (linha azul) com os dados do modelo (linha vermelha), para a estação de Aracaju - SE, no período de janeiro de 1979 a dezembro de 1981.....	43
Figura 11. Correlação linear entre os dados observados e os dados do modelo ECMWF para (a) Palmeira dos Índios - AL e (b) Remanso - BA no período de 1979 a 1981.	45
Figura 12. Correlação linear entre os dados observados e os dados do modelo ECMWF para (a) Acaraú – CE e (b) São Luís - MA no período de 1979 a 1981.	46
Figura 13. Correlação linear entre os dados observados e os dados do modelo ECMWF para (a) São Gonçalo – PB e (b) Petrolina - PE no período de 1979 a 1981.....	47
Figura 14. Correlação linear entre os dados observados e os dados do modelo ECMWF para (a) Parnaíba – PI e (b) Cruzeta - RN no período de 1979 a 1981.....	48
Figura 15. Correlação linear entre os dados observados e os dados do modelo ECMWF para Aracaju - SE no período de 1979 a 1981.....	49
Figura 16. Variação da média semanal da velocidade do vento no período de janeiro de 1979 a dezembro de 2015 para as localidades: a) Fortaleza - CE, b) João Pessoa - PB.	54
Figura 17. Variação da média semanal da velocidade do vento no período de janeiro de 1979 a dezembro de 2015 para as localidades: a) Petrolina - PE, b) Ilhéus - BA.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Relação das estações de superfície do INMET para a região de estudo.....	27
Tabela 2 Coeficiente de correlação de Pearson, ou coeficiente de correlação estatística. Fonte: Devore (2006)	30
Tabela 3 Episódios selecionados para avaliação da anomalia da velocidade do vento..	32
Tabela 4 Índices estatísticos para a velocidade do vento em 28 estações espalhadas pelo Nordeste, em que r é a correlação de Pearson, EA é o erro absoluto médio, EQM é o erro quadrático médio e o R^2 é o coeficiente de determinação para o período de 1979 a 1981.	51

LISTA DE SIGLAS

AA – Análise de Agrupamento
ABEEÓLICA - Associação Brasileira de Energia Eólica
ACP – Análise de Componentes Principais
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
ASAS - Alta Subtropical do Atlântico Sul
BRAMS - *Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modeling System*
CBEE – Centro Brasileiro de Energia Eólica
CELPE – Companhia Energética de Pernambuco
CFSR – *Climate Forecast System Reanalysis*
EA – Erro Absoluto Médio
ECMWF – *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*
EQM – Erro Quadrático Médio
EUA – Estados Unidos da América
FORTRAN – *Formula Translation*
GIS – *Geographic Information System*
GREENPEACE – Organização não governamental do meio ambiente
HDF - *High Frequency Data*
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
MATLAB – *Matrix Laboratory*
MERRA – *Modern Era Retrospective-Analysis for Research And Applications*
MEE – Método de Energia Equivalente
NASA – *National Aeronautics and Space Administration*
NCAR - *National Center for Atmospheric Research*
NCEP - *National Centers for Environmental Prediction*
NEB – Nordeste do Brasil
PCD – Plataforma de Coleta de Dados
PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
RAMS - *Regional Atmospheric Modeling System*
RES - Energia Renovável Endógena

UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas

USGS – *United States Geological Survey*

WRF – *Weather Research and Forecasting*

LISTA DE SÍMBOLOS

ϕ_{ci}	Correção estatística do modelo
ϕ_i	Valor da simulação
$\bar{\phi}_i$	Média dos valores simulados
σ_o	Desvio padrão das séries observadas
σ_i	Desvio padrão das séries simuladas
$\bar{\phi}_o$	Média dos valores observados
N	Número de dados
r	Coefficiente de correlação de Pearson
t	t Student
r_c	Coefficiente de correlação crítico

1. INTRODUÇÃO

Uma das grandes preocupações no mundo no século XXI é a questão relativa à energia, percebe-se que é cada vez maior o uso da energia em todo o planeta: a grande maioria da energia utilizada no mundo é de fontes não renováveis, onde se utiliza fonte atômica e mineral. A fonte não renovável encontra-se em quantidades limitadas, exemplo dos combustíveis fósseis (petróleo, carvão e gás natural), já o urânio é a matéria-prima do processo de fusão nuclear para obtenção da energia. Essas fontes são finitas e não tem uma reposição com a mesma velocidade em que é utilizada pela humanidade, se continuar com esse mesmo aumento progressivo no consumo de fontes não renováveis, as reservas mundiais poderão se esgotar dentro de algumas décadas pra frente, além de emitir CO₂ para atmosfera implicando em problemas ambientais extremos. No caso da energia termonuclear além de serem finitas as jazidas dos combustíveis nucleares também produzem uma grande quantidade de rejeitos radioativos, que além de ter o perigo da contaminação também há um gasto considerável para armazenar até que haja o decaimento seguro desses rejeitos. No Brasil, a geração de energia eólica teve início em 1992 segundo (SILVA, 2003), com a instalação de uma turbina na ilha de Fernando de Noronha – PE, em um convênio entre o Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE), companhia energética de Pernambuco (CELPE) e a instituição dinamarquesa FOLKCENTER.

Em relação às fontes de energia renováveis como, por exemplo, a eólica e a solar elas tem uma reposição consideravelmente rápida, além de não emitir o CO₂ assim sendo consideráveis energias limpas, são renováveis e de baixo custo em relação as não renováveis. Um passo nessa direção já foi dado com a criação da Lei Federal 10.482 em abril de 2002, criando o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA). Tendo como meta do programa assegurar que nos próximos 20 anos a partir da criação da lei, ou seja, até 2022, 10% da energia produzida no país seja proveniente de fontes renováveis. E o principal destaque do PROINFA é a energia eólica, pois é uma fonte com grande potencial do uso comercial, especialmente na Europa e Estados Unidos da América (EUA) (CAMARGO, 2005).

Claro que as energias consideradas limpas como, por exemplo, a eólica, ela tem impactos ambientais, dentre esses impactos destacam-se os sonoros e visuais, mas

também existe possibilidade de interferências eletromagnéticas causando perturbações nos sistemas de transmissão de dados e comunicação. A implantação de um sistema de energia 100% renovável é esperado para ser tecnicamente e economicamente viável no futuro (MATHIESEN, 2011) .

No Brasil, a participação de energia eólica na geração de energia elétrica ainda é bastante pequena, porém acredita-se que agora com os incentivos do governo irão aumentar as expectativas em relação a isso, pois é uma tendência mundial. Uma vantagem bastante significativa na geração de energia por meio dos ventos, é que não é vulnerável a pressões econômicas e políticas, como é o petróleo e o gás natural.

Há alguns fatores que delimita melhor o aproveitamento desse tipo de energia, um deles é o espaço físico para serem instalados os aereogeneradores, pois são estruturas enormes. E outro fator fundamental é que para instalação esses locais deve dispor de uma velocidade média anual dos ventos de no mínimo 3,6 m/s (GUERRINI, 2001)

A energia eólica em todo o planeta tem disponibilidade suficiente para abastecer o consumo de energia em quatro vezes o nível de consumação atual, de acordo com GREENPEACE (2013). Estima-se que em 2020 o mundo terá 12% da energia gerada pelo vento, com uma capacidade instalada de mais de 1.200GW (WINDPOWER, 2003). Na Europa existem vários países que estão investindo na questão de energias renováveis, Portugal não tem recursos de petróleo ou gás natural e uma dependência histórica das importações de energia. No entanto, em 2014, quase 60% da eletricidade foi gerada a partir de fontes de energia renováveis (DGEG, 2014) .

O Nordeste do Brasil (NEB) é a maior região do país produtora de energia eólica segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEÓLICA), toda essa área litorânea da região há centros urbanos onde a maioria da população vive. O país está investindo bastante na região do Nordeste, melhorando a infraestrutura principalmente dos grandes centros, trazendo empresas de médio e grande porte, então haja vista que é notório o aumento do gasto de energia com o passar dos anos, e pela escassez de chuvas nessa região é preciso tomar providências para outras alternativas de energia e uma dessas é a eólica, onde vários estudos comprovaram que essa região é propícia para a geração desse tipo de energia, (SILVA et al, 2002; SILVA et al, 2004; OLIVEIRA, 2011).

É de suma importância à identificação do potencial eólico de uma determinada

localidade, isso é um requisito básico e indispensável. O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) disponibiliza registros de velocidades médias horárias do vento obtidas a 10m de altura, em 77 estações meteorológicas.

O vento observado na costa Nordeste do Brasil está associado a circulações de média e grande escala, circulação tipo brisa (marítima/terrestre), ventos alísios que estão associados à Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). Neste contexto, verifica-se um crescente interesse na utilização de energias limpas e renováveis, em especial a energia eólica. Para tanto, se faz necessário conhecer as características da velocidade do vento da região em épocas diferentes do ano, assim como, em diferentes anos.

Portanto, o objetivo geral deste trabalho é verificar as variações sazonais e interanuais da velocidade do vento para a região Nordeste do Brasil a partir de dados observados e dados de reanálises do modelo ECMWF. E como objetivos específicos: 1) Comparar os dados observados da velocidade do vento a 10 metros de altura em relação ao solo com os dados do ECMWF em várias localidades do Nordeste do Brasil; 2) Obter estatísticas que possibilite medir a qualidade desta comparação; 3) Avaliar a variação temporal no período de 01/01/1979 a 31/12/2015; 4) Avaliar a distribuição espacial da anomalia da velocidade do vento em anos de atuação de Fenômenos associados à Temperatura da Superfície do Mar (TSM) dos Oceanos Pacífico e Atlântico Tropicais, como: La Niña, El Niño e Dipolos positivo e negativo, respectivamente.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Souza et al. (1998) analisaram a variabilidade espacial das anomalias de precipitação observadas nos setores Leste e Norte do Nordeste brasileiro para o período de 1912 a 1989, associando aos eventos do padrão de Dipolo de anomalias de TSM na observação do Atlântico tropical, onde foi gerado compostos sazonais para os anos correspondentes para às fases positiva e negativa do Dipolo das anomalias de precipitação. As análises foram para os quadrimestres da estação chuvosa e também para a pré-estação chuvosa. Como resultados obtiveram que na ocorrência da fase positiva do padrão de Dipolo (anomalias positivas de TSM na Bacia Norte e negativas na Bacia Sul do Atlântico), estão associados à ocorrência de precipitações abaixo do normal sobre os estados do setor Norte e Leste, com exceção da zona da mata de Sergipe, Alagoas e Bahia). Já em anos da fase negativa do Padrão de Dipolo (anomalias negativas de TSM na Bacia Norte e positivas na Bacia Sul do Atlântico), observa-se chuvas acima do normal em todos os estados.

Silva et al. (2002) determinaram a potencia eólica da direção média horária de direção predominante do vento em 77 estações climatológicas no Nordeste brasileiro, utilizando dados de direção e velocidade do vento horária registrados em anemógrafos Fuess com 10m de altura da superfície, no período de janeiro de 1977 a dezembro de 1981. Utilizaram o programa FORTRAN 90 para gerar as distribuições de frequências associadas a cada uma das direções, onde foram determinadas as frequências acumuladas por Kimbal e os parâmetros da distribuição de Weibull. Este estudo mostra que os ventos são predominantes de leste com variações de nordeste e sudeste, o método que melhor se ajustou foi o método dos momentos. Dentre os estados estudados o que apresentou maior potencial eólico foi o Rio Grande do Norte e o de menor potencial foi o Maranhão.

Roulston et al. (2003) concentraram as previsões de 1 a 10 dias (previsões de médio alcance) pelo modelo do ECMWF, com resolução cerca de 60km e as previsões emitidas a cada 12 horas. Tiveram como objetivo a exploração de um potencial valor nas previsões da velocidade do vento em um mercado já consolidado, para um melhor aproveitamento dessa energia eólica e uma redução nos custos dessa energia. Utilizaram da técnica do Bootstrap para estimar a média e a variância do rendimento anual. Como resultados as previsões do ECMWF pode ser muito valiosa para os produtores de

energia eólica elevando o lucro líquido em até 20%.

Silva (2003) analisou os principais mecanismos do vento atuantes na região Nordeste do Brasil, dividindo a região em três grandes regiões levando em consideração a atuação de mecanismos de vento em macroescala e mesoescala, e fez uma comparação com países que tem grande potencial e investimento eólico, como os Estados Unidos e países da Europa. Identificou os efeitos mais significativos das características do vento no projeto e na operação das turbinas eólicas. Utilizou o Método da Energia Equivalente (MEE) como método dos parâmetros de Weibull, informando que é um método totalmente adaptado às condições de vento no Nordeste.

Silva et al. (2004), utilizaram o modelo estatístico Weibull para frequência dos dados da velocidade do vento, identificando o potencial eólico e a direção predominante do vento no Nordeste brasileiro. Eles utilizaram dados registrados em anemógrafos Fuess, instalados em 77 localidades no período de janeiro de 1977 a dezembro de 1981, situada a 10m de altura da superfície apresentando figuras que representam a regionalização da densidade de potência média anual das localidades estudadas, onde obtiveram resultados que se adequaram bem a distribuição Weibull.

Camelo (2007) teve como objetivo identificar as ocorrências de vento Aracati (monção ou brisa marítima) no estado do Ceará no período de 2005, e analisou estatisticamente os dados da velocidade do vento a 10 metros de altura do solo. Analisou em quais horários o vento é mais intenso, fazendo uma comparação dos dados observados pelas PCDs com os dados gerados pelo modelo RAMS utilizando métodos estatísticos, e teve como resultado que o vento Aracati mais intenso é no período noturno em localidades próximas do rio Jaguaribe e seus afluentes, mas que na maior parte do estado o vento é mais intenso diurnamente.

Cunha (2008) destaca quais grandezas são importantes e identifica fatores que modificam a estrutura do vento. Avaliou a capacidade que o modelo numérico RAMS prognóstico tem em prever os campos de vento para um mês chuvoso e com pouco vento, para um mês seco e ventos mais intensos com três grades de resolução, avaliando o potencial eólico na serra da Ibiapaba no estado do Ceará. Para análise do modelo utilizou um conjunto de 9 índices estatísticos para que seja minimizados os erros. Utilizou para análise uma coleta de dados (PCDs) de médias horárias, relativos à velocidade e direção do vento a 10 metros da altura do solo no período de 2005. Como

resultado do modelo, em todos os casos o modelo sentiu dificuldades em reproduzir as variações em pequena escala de tempo.

Martins (2008) utilizou dados mensais no período de 1948 a 2007 provenientes de reanálises do NCEP e NCAR, e analisou as correlações entre as anomalias da temperatura da superfície do mar dos oceanos atlântico e pacífico tropical, com as anomalias da umidade específica, divergência do vento e da temperatura do ar para três camadas atmosféricas (955-700, 700-500 e 500-300hpa). Os resultados apresentados para América do Sul teve as correlações positivas e negativas, as correlações negativas em anos de La Niña se encontram mais aquecida e úmida com divergência de massa e inclinação para o Sul, já as negativas em anos de El Niño se encontra menos aquecida e úmida com convergência de massa e inclinação para o Norte. As correlações positivas em anos de La Niña indica que a atmosfera encontra-se menos aquecida, menos úmida e com convergência de massa, já em anos de El Niño o gradiente está direcionado para o norte indicando que a atmosfera encontra-se mais aquecida, mais úmida e apresentando divergência de massa.

Lima et al. (2010) investigou a densidade do potencial eólico em cinco localidades do estado da Paraíba no período de janeiro de 1978 a dezembro de 1981, utilizando dados de observações horárias de direção e velocidade do vento pelo anemógrafos Fuess, com sensores a 10 metros de altura da superfície. Utilizaram o modelo estatístico Weibull que forneceu um bom ajuste, evidenciando que os menores valores da velocidade do vento ocorreram no período chuvoso e os maiores valores no período de setembro a outubro correspondente ao período seco. Também fazem comparações das intensidades do vento com relação às brisas terrestre e marítima. Em relação à direção do vento, foram construídos gráficos de rosa dos ventos e perceberam que os ventos foram predominante de leste, com variações de Nordeste e Sudeste. Foi verificada que a região com maior potencial eólico das cinco localidades estudadas foi Campina Grande, enquanto que São Gonçalo foi à de menor potencial comparada às demais localidades.

Lima et al. (2010) avaliaram e simularam o potencial da energia eólica na cidade de Triunfo no estado de Pernambuco, Brasil, através do programa WAsP obtendo uma velocidade média de 11,83m/s. Dados provenientes do projeto SONDA a uma altura de 50m do solo em um período de trinta meses entre 2004 a 2007. O método de distribuição estatística Weibull foi utilizado para o potencial de densidade do vento

obtendo uma velocidade média de 11,27m/s. Resultou que a direção proveniente do vento nessa localidade é de Sudeste, Eles viabilizaram a extração da energia proveniente do vento para essa localidade onde os resultados foram satisfatórios do ponto de vista econômico.

Papanastasiou et al. (2010) identificaram as principais características da circulação de brisa marítima na costa Leste da Grécia durante o período de Verão, e também verificaram a capacidade que o modelo WRF tem para simulações do fluxo de campo que é fortemente influenciado pela costa e terrenos íngremes, no período de 5 dias, do dia 1 a 5 de julho de 2004 e foram salvos de uma vez a cada hora, já os dados da elevação do terreno foram utilizados do USGS.

Fagbenle et al. (2011) avaliaram o potencial eólico em dois locais no Nordeste da Nigéria, em um período de vinte e um anos (1987-2007), utilizaram dados de médias mensais da velocidade do vento a 10 metros de altura do solo. Foi utilizada a distribuição Weibull como modelo estatístico. Como resultados obtiveram um aumento na velocidade do vento no Verão nas duas localidades e que Maiduguri possui uma melhor perspectiva mensal, enquanto que Potiskum seria melhor em termos de distribuição anual.

Lima (2011) avaliou a capacidade que o modelo numérico BRAMS tem em simular os campos do vento de observações horárias de direção e velocidade em um período de cinco anos, janeiro de 1977 a dezembro de 1981, para ter uma maior precisão na avaliação do potencial eólico em cinco estações no estado da Paraíba, e fez uma comparação com os dados observados para gerar mapas do potencial eólico da região. Os dados originam-se de anemógrafos Fuess, no qual os sensores estão a 10 metros de altura em relação ao solo. O modelo de distribuição Weibull também é usado nesse estudo para ajustar e estimar a densidade da energia eólica na região. Concluiu que a direção do vento é predominante de Leste com variações de Sudeste, Campina Grande é a estação com maior potencial eólico e São Gonçalo o mais baixo potencial. As simulações numéricas mostrou um desempenho satisfatório, assim como os índices estatísticos.

Silva (2011) investigou a variabilidade interanual e sazonal do vento à superfície na área litorânea do Nordeste do Brasil. Utilizou dados horários do vento nos 9 aeroportos das capitais Nordestina entre 2003 e 2009. Utilizou a programação Fortran

para decodificação e controle de qualidade dos dados, Análise em Componentes Principais (ACP), rotação de fatores, Análise de Agrupamento (AA), análise da matriz de dados, são alguns dos métodos utilizados neste trabalho. Observou que as análises do vento médio mensal á superfície, o vento de São Luís é o mais distinto dentre as capitais litorâneas por apresentar ventos de Leste-Nordeste, enquanto que as outras capitais têm ventos de Leste-Sudeste. Detectou também que nos meses menos chuvosos as intensidades dos ventos são maiores. Foi identificada na análise temporal sazonal três grupos distintos, o primeiro se caracteriza por São Luís devido aos ventos de Leste, Nordeste, em seguida vem o segundo grupo constituída por João Pessoa e Maceió, caracterizada por baixas velocidades do vento e por fim o terceiro grupo caracterizado por Fortaleza, Natal, Recife, Aracaju e Salvador, onde tem as maiores velocidades do vento.

Lima et al. (2012) avaliaram a capacidade que o modelo BRAMS teria em simulações dos campos de vento para o potencial da energia eólica no estado da Paraíba. Fazendo uma comparação dos dados simulados pelo BRAMS com os dados observados do INMET, utilizados em observações horárias de direção e velocidade do vento, onde esses sensores estão a 10m de altura da superfície gerando mapas da energia eólica no estado da Paraíba, no período de março e abril de 1977 e 1981. Eles utilizaram o coeficiente de correlação de Pearson para uma interpretação mais refinada e o teste de significância T Student. Também observaram que o vento era predominantemente de Leste, mas com variações de Nordeste e Sudeste, com isso, a comparação dos dados simulados com os dados observados mostrou um desempenho satisfatório, isto é, o modelo simulou bem para o período estudado.

Rocha et al. (2012) analisaram e compararam sete métodos numéricos para saber qual a eficácia dos parâmetros para a distribuição Weibull, utilizando dados da velocidade do vento em duas cidades do Ceará na região Nordeste do Brasil entre agosto de 2004 e abril de 2006. Estatisticamente os métodos que apresentaram melhores ajustes utilizando interações numéricas são: método dos momentos, máxima probabilidades, probabilidade máxima modificada e o método de energia equivalente, mas observou-se que o método de energia equivalente tem um desempenho bastante significativo para estimar os parâmetros de weibull, enquanto que os menos eficazes são o método gráfico e o método fator padrão de energia.

Oliveira (2013) pesquisou o potencial eólico do estado da Paraíba em um período

de 2007 a 2009, dando ênfase às regiões em que o comportamento dos ventos tem um maior favoritismo a geração de energia elétrica, utilizando do modelo BRAMS e WRF com grades aninhadas, onde a grade externa com 16 km de resolução e a grade interna com 4 km, como ferramentas para gerar cenários com condições favoráveis de vento e daí fazer uma análise dos ciclos sazonais e diários. Utilizou alguns índices estatísticos para avaliar os modelos numéricos BRAMS e WRF, para minimizar os erros de interpretação sendo eles: Viés, Erro Absoluto Médio (EA), Erro Quadrático Médio (EQM), índice de correlação. Os dados utilizados como entrada para os modelos foram de reanálise do NCEP/NCAR de resolução 2,5 graus. Tomou como base a variação da ZCIT e escolheu os meses de março e setembro em que os ventos apresentam-se menos e mais intensos respectivamente, as análises foram elaboradas para 50m, 70m e 100m de altura do solo, os modelos mostraram coerência nos resultados. Sobre alguns dos resultados ela concluiu que no mês de março a Paraíba apresenta magnitude relativamente baixa nas três alturas estudadas, com velocidade máxima de 6 m/s para ambos os modelos, já no mês de setembro os modelos apontaram valores máximos duas vezes maior.

Carvalho et al. (2014) usaram o modelo de mesoescala WRF para executar seis simulações dos dados de ventos próximo a superfície, cada um deles usando como condições iniciais e de contorno um conjunto de dados de diferentes reanálises (ERA interim, NASA-MERRA e NCEP), objetivando comparar nas estimativas das simulações da velocidade do vento e de potenciais de produção de energia eólica local, para diferentes condições iniciais e de contorno, além de, usar o modelo estatístico Weibull para avaliar os dados simulados. A localização do estudo foi em Portugal em áreas de alto potencial para a energia eólica com estações de 60m e 80m de altura do solo no período de janeiro a dezembro de 2008. Com esse estudo eles obtiveram conclusões que essas comparações gerou em uma nova reanálise, com uma melhoria considerável nos dados simulados do vento e que o ERA interim mostram os menores erros globais, tanto para a velocidade como para a direção do vento.

Hernández et al. (2014) forneceram informações temporal e espacial a cada hora no período de 2009 e 2010 de dados de 204 estações meteorológicas, sobre o recurso de energia eólica nos estados Mexicanos do Norte (Sonora, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León e Tamaulipas). A avaliação entre os dados de sensores fixos e dados de satélites, foi realizada utilizando uma correlação estatística entre as mais próximas estações

meteorológicas e pontos selecionados. As velocidades de vento foram medidas usando um anemômetros em posições fixas de diferentes alturas, e os dados de vento continuamente registrados foi a cada 10 minutos. Entre as várias funções de distribuição de probabilidade de que foi apresentado, Weibull é mais utilizada. Utilizaram um SIG (ArcGIS) que foi aplicado para preparar os mapas com referência ao WPD a uma altura de 50 m, eles foram interpolados pelo método de krigagem do ArcGIS v10; o método Kriging assume que a distância ou direção entre os pontos de amostra reflete uma correlação espacial. Este estudo destaca o grande potencial da energia eólica nos estados do Norte do México, onde áreas específicas poderiam ser consideradas para a instalação de parques eólicos.

Handri et al. (2015) obtiveram dados da velocidade do vento a partir de medições que foram feitas uma vez a cada seis horas por dia para um período de cinco anos (2008-2012), em cinco locais diferentes da Jordânia; no centro da Jordânia (Queen Alia Airport-Amman), Noroeste (Ras-Muneef), a Leste (Azraq Sul e Safawi) e Sul (aeroporto de Aqaba) entre (29 ° 33 'E e 32 ° 28' E) de latitude e (35 ° 00 'N e 37 ° 08' N) de longitude e várias elevações entre 51 e 1120 m, ou seja, região de deserto, terras áridas, planície e terras com valores baixo de mercado. Todas as medições em todas as estações de observação do vento, utilizaram um anemômetro a uma altura de 10 m acima do nível do solo, utilizaram também o método de distribuição Weibull para a densidade do potencial eólico. Obtiveram como resultados que o valor máximo da velocidade do vento mensal é determinado como 7,05 m/s no aeroporto de Aqaba em setembro e um valor mínimo de 1,15 m/s e ocorreu em Azraq Sul em novembro, o método de distribuição Weibull que ajustou bem nesses resultados apresentados. Concluíram que os resultados mostram que o aeroporto de Aqaba é uma boa região para aproveitar o poder do vento para gerar energia, seguido de perto por Ras-Muneef. Os locais do deserto de Safawi e Azraq no Sul tem potencial de geração de energia eólica moderado, enquanto que o aeroporto Queen Alia é bastante pobre em potencial de energia eólica.

Escalante e Mérida (2015) demonstraram o uso de dados de alta frequência (1 Hz e 5 Hz) exclusivo (HFD) para a reprodução do espectro de potencia mostrada por Van der Hoven em 1957 em três locais diferentes, permitindo assim dar a mesma rotina de computação com um conjunto de dados divididos em vários períodos de tempo. Não havia informações de topografia e outras características de terreno nos conjuntos de

dados, no entanto a metodologia que eles aplicaram não consideram estas características. Usaram cálculos numéricos em matlab como o principal processador de dados e de código. Obtiveram como conclusão que na macroescala os picos de espectro indicam que grandes flutuações ocorrem a cada dois dias nos três locais de estudo.

Quan e Leephakpreeda (2015) avaliaram principalmente os recursos da energia eólica em economia verde na região central da Tailândia, em três estações onde essa região é cercada por altas montanhas com ventos frequentes na direção Sudoeste, no período de 2012 com dados do vento em três níveis: 65m , 90m e 120m. Determinam o coeficiente de atrito com o solo através de uma regressão linear, e para a densidade do potencial eólico eles utilizaram a função de distribuição Weibull. Como resultados eles mostraram que a intensidade dos ventos são maiores no período de abril a agosto, e de menor velocidade é em novembro, podendo ser causado pelas monções de Nordeste e Sudoeste dessa região. Eles também estimaram que em um ano 641 barris de petróleo e 536 toneladas de dióxido de carbono, poderiam ser reduzido através da implantação da energia eólica nessa região. Concluíram que algumas partes da Região central da Tailândia são viáveis para investir em energia eólica.

Sultan e Yassine (2015) observaram que há uma grande escala de potencial eólico na cidade Duqm (Omã). Utilizaram à média das dinâmicas de *downscaling Ensemble* modelo de previsão numérica do tempo, com base no modo de resolução de 2,8 quilômetros, Sistema de Informação Geográfica (GIS) e lógica Fuzzy análise de multi-critérios, foram usados para selecionar o local mais apropriado para a instalação de um parque eólico na cidade. Para fase preliminar, a variabilidade espaço temporal regional do vento foi avaliada com base na abordagem de conjunto NWP aninhada. Foram utilizados dados através da reanálise ERA interim , ECMWF 2006.

Shu et al. (2015) fizeram observações em cinco estações meteorológicas em Hong Kong no período de janeiro de 2005 a novembro de 2010 para monitorar o clima do vento, com anemógrafos instalados em diferentes alturas nessas estações. Utilizaram a função de distribuição Weibull concordando excelentemente com as frequências dos dados de ventos reais, para análises estatísticas das características do vento de cada estação e do potencial da energia eólica para diferentes condições de terrenos. Nisso o modelo de lei de potencia simples é usada para converter as velocidades do vento a várias alturas. Como resultado obtiveram que no outono e inverno tem os maiores valores de parâmetros de escala e os menores valores são no verão especificamente no

mês de agosto sendo o mês com menor potencial de ventos, deixando uma ideia que no verão os ventos são menos variáveis em comparação com as outras estações. Um resultado importante que eles obtiveram foi que os locais mais promissores para o potencial de energia eólica é nas colinas e nas ilhas.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de estudo e dados

O estudo foi realizado na região Nordeste do Brasil, entre os paralelos 01° 02' 30" de latitude Sul e 18° 20' 07" de latitude Sul e entre os meridianos de 34° 47' 30" e 48° 45' 24", a Oeste do meridiano de Greenwich. Limita-se a Norte e a Leste com o oceano Atlântico, ao Sul com os estados de Minas Gerais e Espírito Santo e a Oeste com os estados do Pará, Tocantins e Goiás como mostra a (Figura 1). Segundo os dados do (IBGE, 2012) a população na região Nordeste é aproximadamente 53.081.950 habitantes, ocupando uma área de 1.561.177,8 km², que equivale a 18,3% do território nacional.

Foi utilizado dados de médias diárias da velocidade do vento, de 28 estações climatológicas registrados nos anemógrafos Fuess no Nordeste do Brasil (Tabela 1), para o período de janeiro de 1979 a dezembro de 1981. Os dados das séries temporais foram fornecidos pelo (INMET). Para comparar com os dados observados foi utilizado dados de reanálises ERA-Interim gerado pelo *European Center for Medium-Range Weather Forecast* (ECMWF) com resolução horizontal espaçados em uma grade de 0,25° x 0,25° de latitude e longitude para o mesmo período. Esses dados são das componentes u e v onde os sensores estão a 10 metros de altura em relação à superfície, a unidade utilizada é (m/s) e foram extraídos de pontos específicos entre as latitudes -1° e -19° e as longitudes -34° e -49°, Estes dados estão disponíveis em <http://apps.ecmwf.int/datasets/>.

Também foi utilizado um sistema de Visualização e Análise de Dados em Pontos de Grade (GrADS) – (DOTY, 1995). Ele é um software interativo utilizado nas tarefas de manipulação, visualização e acesso de dados geofísicos. O GrADS trabalha com matrizes de dados com formatos NEtCDF, HDF-SDS, BINÁRIO ou GRIB.

Tabela 1 Relação das estações de superfície do INMET para a região de estudo.

ESTADOS DO NORDESTE	ESTAÇÕES	NÚMERO SINÓTICO	LATITUDE	LONGITUDE	ALTITUDE
Alagoas	Palmeira dos Índios	82992	09°27'S	36°42'W	274,9m
Bahia	Barra	83179	11°05'S	43°10'W	401,6m
	Ilhéus	83348	14°48'S	39°04'W	60,2m
	Jacobina	83186	11°11'S	40°28'W	484,7m
	Remanso	82979	09°38'S	42°06'W	400,5m
	Salvador	83229	13°00'S	38°30'W	51,4m
Ceara	Acará	82294	02°53'S	40°08'W	16,5m
	Fortaleza	82397	03°45'S	38°33'W	26,5m
	Iguatu	82686	06°22'S	39°18'W	217,7m
	Quixeramobim	82586	05°10'S	39°17'W	79,5m
Maranhão	Bacabal	82460	04°13'S	44°46'W	25,1m
	Imperatriz	82564	05°32'S	47°29'W	123,3m
	São Luis	82280	02°32'S	44°13'W	50,9m
	Turialva	82198	01°34'S	45°22'W	44,1m
Paraíba	Campina Grande	82795	07°13'S	35°53'W	547,6m
	João Pessoa	82798	07°06'S	34°52'W	7,4m
	São Gonçalo	82689	06°45'S	38°13'W	233,1m
Pernambuco	Arcoverde	82890	08°25'S	37°05'W	680,7m
	Petrolina	82983	09°22'S	40°28'W	370,5m
	Recife	82900	08°03'S	34°57'W	10m
Piauí	Parnaíba	82287	03°05'S	41°46'W	79,5m
	São João do Piauí	82879	08°21'S	42°15'W	235,3m
	Teresina	82578	05°05'S	42°49'W	74,4m
Rio Grande do norte	Apodi	82590	05°37'S	37°49'W	150m
	Ceara Mirim	82596	05°39'S	35°39'W	61,4m
	Cruzeta	82693	06°26'S	36°35'W	226,5m
	Macau	82594	05°07'S	36°46'W	3,4m
Sergipe	Aracaju	83096	10°57'S	37°03'W	4,7m

Para a escolha de cada localidade por estado, foi considerada além da disponibilidade dos dados ofertados a escolha por 3 mesorregiões de cada estado, para ter uma visão espacial de como a intensidade do vento varia.

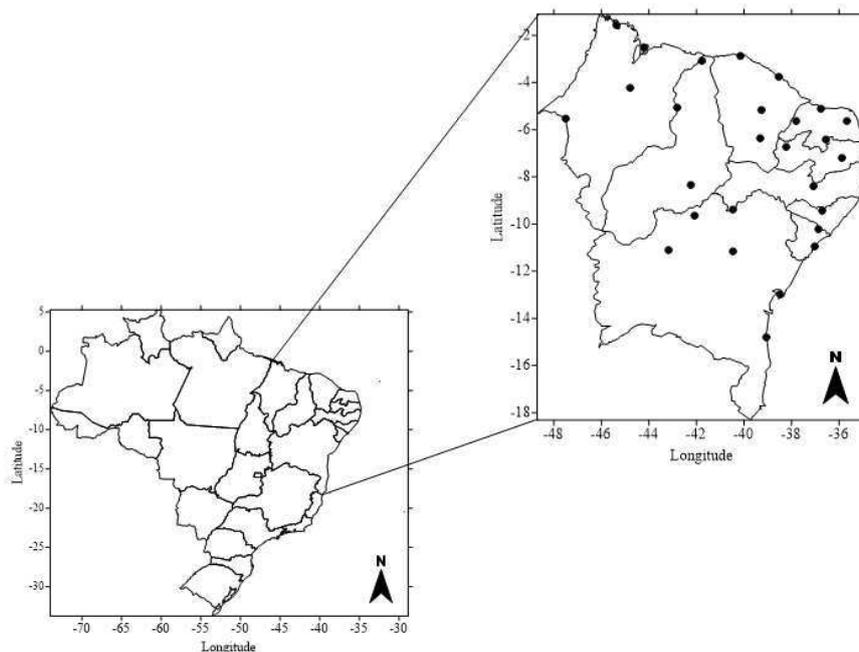


Figura 1. Distribuição espacial das estações na região Nordeste do Brasil.

3.2 Correção Estatística do Modelo

Para ajustar os dados adquiridos pelo ERA interim com os dados observados foi utilizado o método estatístico, segundo Camelo, (2007); Reis Junior et al. (2006) que tem como base a utilização do desvio padrão e da média das séries observadas e simuladas dada como:

$$\phi_{ci} = (\phi_i - \bar{\phi}_i) \frac{\sigma_o}{\sigma_i} + \bar{\phi}_o \quad (1)$$

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 e por fim, $\bar{\phi}_o$ representa a média dos dados observados.

3.3 Índices estatísticos

Para avaliar o desempenho dos modelos numéricos atmosféricos existem diversas

maneiras, e uma delas é comparando às estimativas com os dados observados. Segundo Maria (2007), Weber et al. (1982), Cunha (2008) para avaliar um modelo numérico com eficácia, utiliza-se um conjunto de índices estatísticos, para que possa minimizar os erros nas interpretações, dentre os quais estão o Viés, o Erro Quadrático Médio (EQM), Erro Absoluto Médio (EA) e o índice de correlação.

O Viés é calculado a partir de:

$$Viés = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\phi_i - \phi_o) \quad (2)$$

esse índice aponta a direção média do desvio de valores observados, porém, isso não pode refletir a magnitude do erro. No entanto, um Viés negativo relaciona a uma subestimação do valor observado em média, e um Viés positivo relaciona a uma superestimação do valor observado em média.

O Erro Quadrático Médio (EQM) este índice trabalha com a mesma unidade de medidas das séries, e ele é dado pela soma dos quadrados das diferenças entre as observações e os resultados dos modelos, vale salientar que os resultados serão positivos. Dada por:

$$EQM = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\phi_i - \phi_o)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

O EQM é uma medida quadrática em que quanto mais próximo o valor for de zero a semelhança entre as séries observadas e simuladas será maior.

O Erro Absoluto Médio (EA), só poderá assumir valores positivos por definição, dada por:

$$EA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |\phi_i - \phi_o| \quad (4)$$

Vale salientar que este é um resultado linear que dá a magnitude média dos erros. Então, Quanto menor for o valor do EA, maior será a semelhança entre as séries.

O coeficiente de correlação de Pearson (r) mede o grau da correlação e a direção dessa correlação se é positiva ou negativa entre duas variáveis quantitativas, ele assume os valores entre -1 e 1, dada por:

$$r = \frac{\sum(\phi_i - \bar{\phi}_i) \cdot (\phi_o - \bar{\phi}_o)}{\sqrt{[\sum(\phi_i - \bar{\phi}_i)^2] \cdot [\sum(\phi_o - \bar{\phi}_o)^2]}} \quad (5)$$

em que ϕ_o representa um valor dos dados observados.

Devore (2006) mostra que a correlação de Pearson pode variar de muito forte a muito fraca de acordo com a tabela. Porém, não podemos tirar nenhuma conclusão dos valores dos coeficientes de correlação antes de aplicar um teste estatístico (HUANG e PAES, 2009; MENEZES, 2010; LIMA, 2011), para ter o conhecimento do grau real de ligação entre as variáveis estudadas.

Tabela 2 Coeficiente de correlação de Pearson, ou coeficiente de correlação estatística. Fonte: Devore (2006)

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

No estudo o teste estatístico de significância t Student será utilizado, com os seguintes valores nos parâmetros:

$$t = \frac{r\sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (6)$$

em que N é o número de dados.

O coeficiente de correlação crítico (r_c), que é um valor para qual aceita ou não a hipótese estatística, pode ser extraído a partir da equação (6) e dada por:

$$r_c = \sqrt{\frac{t^2}{(N-2) + t^2}} \quad (7)$$

Temos que, para a variável utilizada neste trabalho, série de dados de 1095 dias. Calculando o índice de correlação crítico r_c . Tem-se $N=1095$ com dois graus de liberdade, $N-2 = 1093$,. Logo temos: Para 99,9995% de significância, ou seja, com erro de 0,15% ($\alpha= 0,0005$), $t= 3,291$; $r_c = 0,10$.

Isso significa que, para os coeficientes de correlação obtidos com 2 graus de liberdade, em termos de significância estatística de que há realmente correlação entre as variáveis é de 99,9995% para r superior ou igual a 0,10.

Diante do resultado obtido pode sugerir ou não a aceitação da hipótese de nulidade. Então se o coeficiente de correlação r calculado for superior ou igual ao valor encontrado com o valor do t crítico para um determinado percentual de significância e grau de liberdade, a tendência observada é verdadeira para aquele nível de significância obtido (BRUNI, 2007; MENEZES, 2010; LIMA, 2011) e a hipótese de nulidade é rejeitada.

3.4 Análises sazonal e interanual

A região Nordeste apresenta boas condições meteorológicas para geração de energia eólica, tanto para áreas costeiras quanto em áreas do interior. Com o intuito de analisar a intensidade do vento e sua variabilidade sazonal e interanual nessa região, utilizou-se dados do ECMWF para um período climatológico de janeiro de 1979 a dezembro de 2015, com resolução horizontal espaçados em uma grade de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ de latitude e longitude. Esses dados correspondem as componentes zonal e meridional do vento para a altura de 10 metros em relação à superfície, a unidade utilizada é m/s e foram extraídos de pontos específicos representativos das estações utilizadas entre as latitudes -1° e -19° e as longitudes -34° e -49° .

Com a obtenção das médias diárias de velocidade do vento, foi elaborado Figuras com médias semanais ao longo de cada ano, este procedimento possibilita uma melhor visualização da distribuição temporal. Na análise sazonal (Verão, Inverno Outono e Primavera) da velocidade do vento. Nesta análise foram destacadas as localidades de

Fortaleza, João Pessoa, Petrolina, Ilhéus, Bacabal e Teresina pertencentes a regiões do Nordeste submetidas a regimes pluviométricos estabelecidos por Kousky (1979), Pereira (2014) essas regiões ficam ao Norte, Costa Leste e Sul com máximos de precipitações centrados nos meses de março, maio e dezembro respectivamente.

Esse processo possibilita também detectar as variações interanuais na velocidade do vento induzidas pelas anomalias das temperaturas oceânicas do Pacífico Tropical (El Niño, La Niña) e Atlântico Tropical (Gradiente positivo e negativo da anomalia).

Esses fenômenos são associados à qualidade da estação chuvosa do Nordeste e, portanto, com implicações na intensidade do vento. Em anos de El Niño e Gradiente positivo a precipitação sobre o Nordeste é reduzida e as áreas afetadas registram chuvas abaixo da média climatológica, conseqüentemente, apresentam velocidades do vento acima da média, já em anos de La Niña e Gradiente negativo estas são intensificadas e as áreas afetadas registram precipitações acima da normal climatologia, conseqüentemente, apresentam velocidades do vento abaixo da média (MARTINS, 2008).

Para uma análise espacial do impacto destes fenômenos foram construídos mapas da anomalia do vento para anos específicos de atuação de La Niña/El Niño e Gradiente positivo/negativo (Tabela 3) escolhidos a partir de classificação feita por Delecluse et al. (1994); Trenberth (1997) e Souza (2003).

Tabela 3 Episódios selecionados para avaliação da anomalia da velocidade do vento.

Oceano Pacífico		Oceano Atlântico	
El Niño	La Niña	Gradiente positivo	Gradiente negativo
1982/83	1988/89	1981	1985
1997/98	2007/08	2005	1994

Os valores de anomalias do vento foram calculados para os anos estabelecidos acima durante o período de Outono e Primavera pela expressão:

$$AV_{i,j} = V_{i,j} - \bar{V}_i \quad (8)$$

em que $AV_{i,j}$ é a anomalia da velocidade do vento médio da estação do ano ($i=Outono$,

Primavera) para os anos da Tabela 3, $V_{i,j}$ é a velocidade do vento médio a 10m da estação do ano ($i=Outono, Primavera$) para os anos da Tabela 2 (j) e \bar{V}_i é a média climatológica da velocidade do vento a 10m para a estação do ano ($i=Outono, Primavera$).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através dos cálculos das médias diárias da velocidade do vento, a um nível de referência de 10 metros de altura em relação ao solo, das comparações analisadas entre os dados observados e os dados de reanálise do ECMWF para cada estação citada, foi possível fazer algumas considerações acerca da intensidade da velocidade do vento no NEB.

Vale ressaltar que a quantidade de dias verificados nesse estudo, não é igual por falta de dados. Algumas localidades tem falta de dados dentro do período estudado que é de 3 anos, e isso acaba comprometendo a correlação e a confiabilidade dos resultados. Mas como o objetivo é tentar abranger ao máximo o NEB, manteve-se todas as estações estudadas para ter uma melhor noção em cada localidade estudada.

4.1 Resultados dos dados observados com a reanálise do modelo ECMWF

No período de 1979 a 1981 foi analisado os aspectos da simulação dos dados no que se refere à representação dos campos de vento das Figuras 2 a 10, mostrando as séries temporais da velocidade do vento e fazendo uma comparação entre os dados observados e o modelo já com a correção estatística. Entre as 28 localidades estudadas selecionaram-se as que tiveram melhor correlação de cada estado do NEB. No eixo-x está o período estudado, no eixo-y está à intensidade da velocidade do vento em m/s.

Na Figura 2 em Palmeira dos Índios, foram registrados picos de 7,0 m/s de velocidade máxima do vento tanto nos dados observados como nos dados do modelo, e extremos de velocidade mínima chegando a ser calma nos dados do modelo. Nesta Figura, observa-se que não há muita concordância entre os dados observados e os dados do modelo, o modelo superestimou a série de dados observados de maneira geral. Em várias situações dessa figura, houve inversões entre o modelo e os dados observados, como por exemplo, de junho a agosto de 1979. Observa-se também que não há um ciclo sazonal bem definido, porém um pequeno aumento nos meses da primavera e uma pequena diminuição da velocidade do vento nos meses do outono. Existem sim extremos, mas que nesse período estudado percebe-se que a velocidade do vento se mantem em torno de 3 a 4 m/s em média.

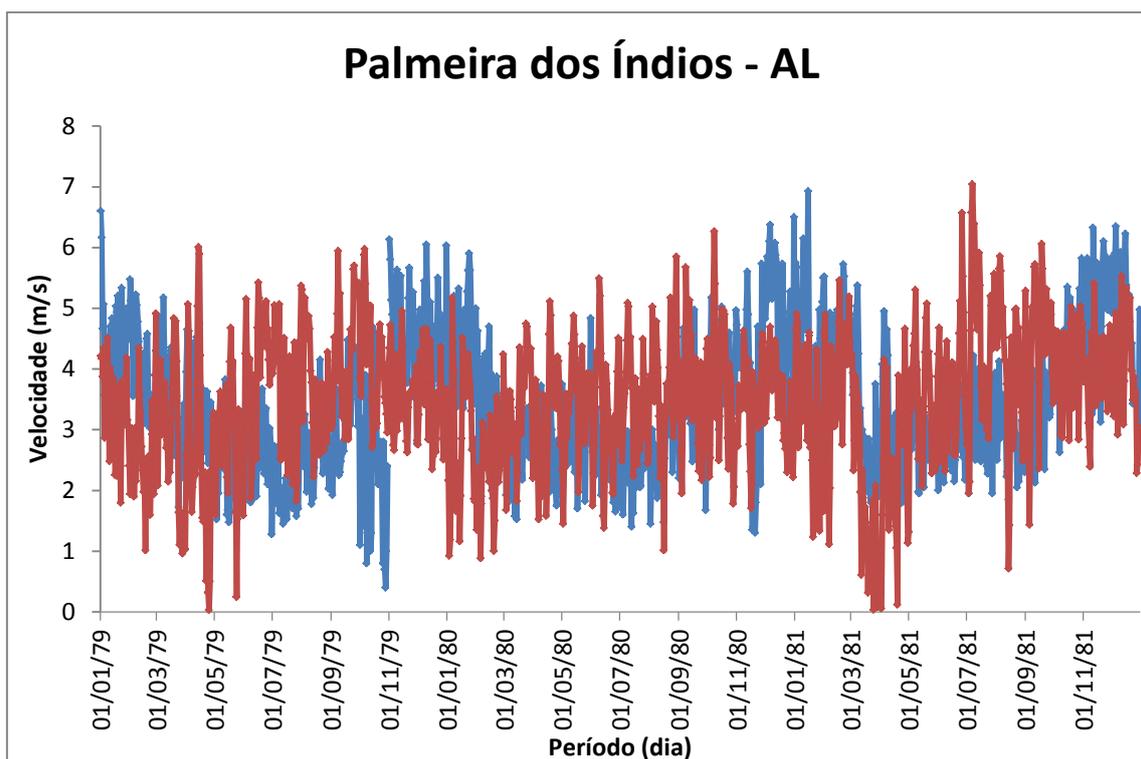


Figura 2. Comparação da velocidade do vento a 10 metros de altura do solo em (m/s), a partir dos dados de médias diárias, observados (linha azul) com os dados do modelo (linha vermelha), para a estação de Palmeira dos Índios - AL, no período de janeiro de 1979 a dezembro de 1981.

Na Figura 3 em Remanso, foram registrados picos de quase 7,0 m/s de velocidade máxima do vento nos dados observados enquanto que nos dados do modelo chegaram a 6,3 m/s aproximadamente, e extremos de velocidade mínima com cerca de 1,2 m/s para ambos. Nesta Figura, observa-se que há concordância entre os dados observados e os dados do modelo. O modelo superestimou a série de dados observados de maneira geral. Percebe-se que o modelo acompanhou bem a sazonalidade dos dados observados. Assim como Palmeira dos Índios nos meses do outono é onde se encontram os ventos mais fracos e os meses da primavera os ventos mais fortes.

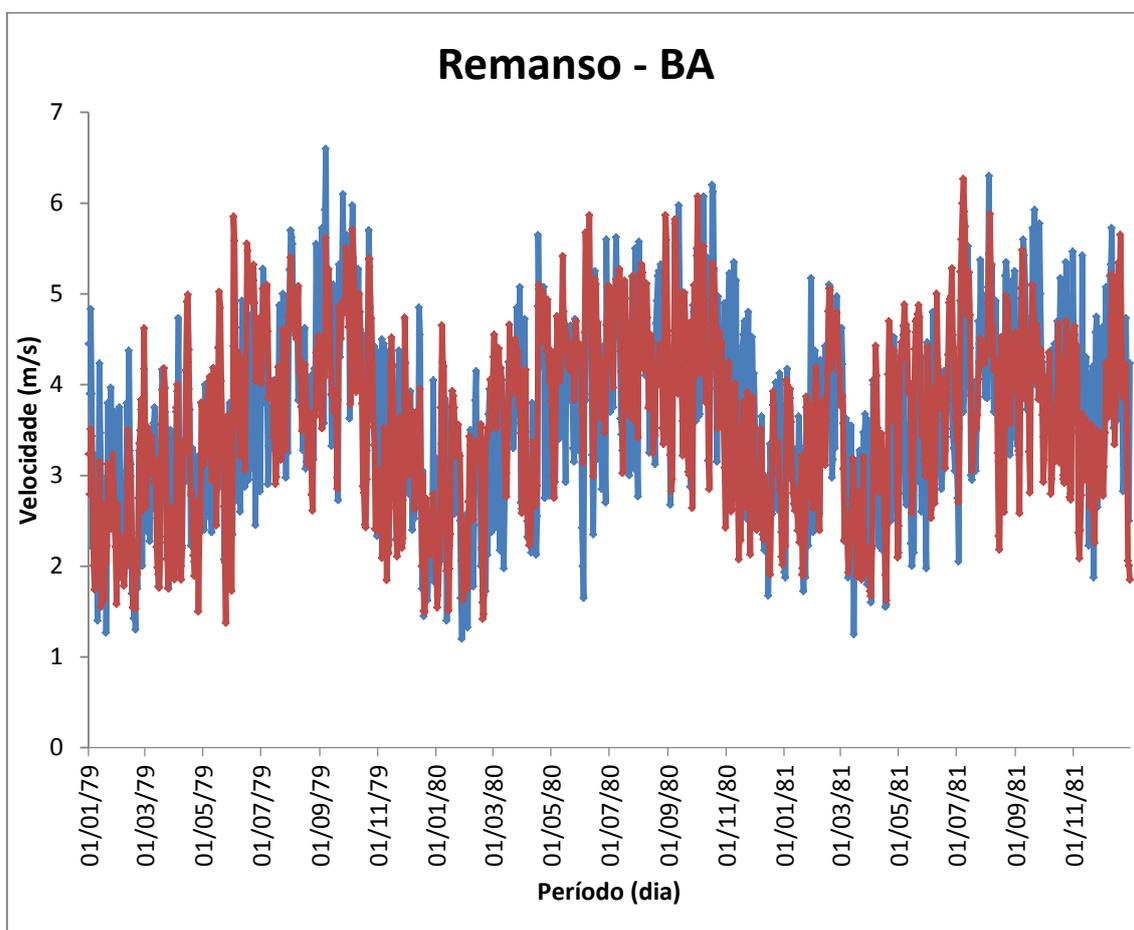


Figura 3. Comparação da velocidade do vento a 10 metros de altura do solo em (m/s), a partir dos dados de médias diárias, observados (linha azul) com os dados do modelo (linha vermelha), para a estação de Remanso - BA, no período de janeiro de 1979 a dezembro de 1981.

Na Figura 4 em Acaraú, foram registrados extremos de um pouco mais que 8,0 m/s de velocidade máxima do vento nos dados observados enquanto que nos dados do modelo chegaram a 7,0 m/s aproximadamente, e extremos de velocidade mínima próximo da calmaria para os dados do modelo, enquanto que nos dados observados 1,5 m/s. Nesta Figura, observa-se que há concordância entre os dados observados e os dados do modelo, mas também há uma inversão entre os dados observados e o modelo no período de maio a agosto de 1981. O modelo também superestimou a série de dados observados de maneira geral. Percebe-se que o modelo acompanhou bem a sazonalidade dos dados observados. Assim como Palmeira dos Índios e Remanso, nos meses do outono é onde se encontram os ventos mais fracos e os meses da primavera os ventos mais fortes.

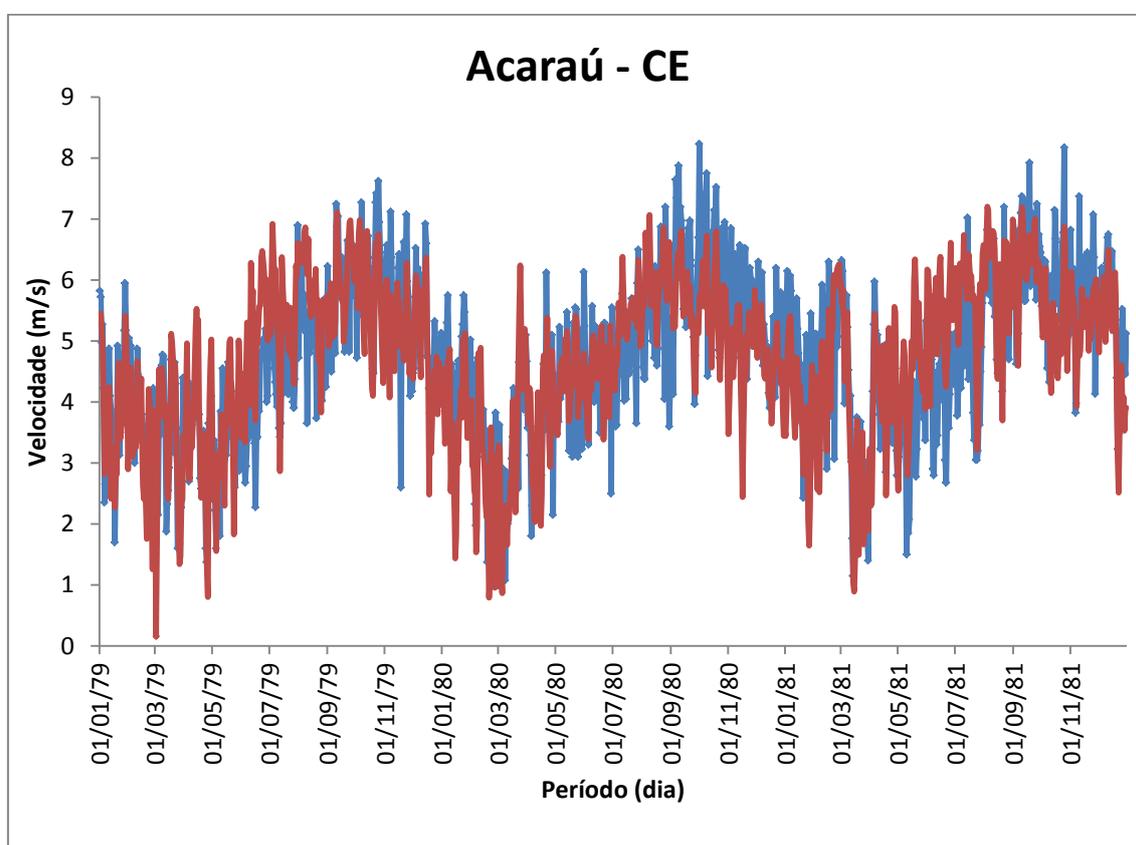


Figura 4 Comparação da velocidade do vento a 10 metros de altura do solo em (m/s), a partir dos dados de médias diárias, observados (linha azul) com os dados do modelo (linha vermelha), para a estação de Acaraú - CE, no período de janeiro de 1979 a dezembro de 1981.

Na Figura 5 em São Luís, foram registrados extremos de um pouco mais que 4,5 m/s de velocidade máxima do vento tanto para os dados observados quanto para os dados do modelo, e extremos de velocidade mínima próximo de 0,5 m/s para os dados do modelo, enquanto que nos dados observados 0,7 m/s. Nesta Figura, observa-se que há concordância entre os dados observados e os dados do modelo para toda a série. O modelo também superestimou a série de dados observados de maneira geral. Percebe-se que o modelo acompanhou bem a sazonalidade dos dados observados. Assim como Palmeira dos Índios, Remanso e Acaraú, nos meses do outono é onde se encontram os ventos mais fracos e os meses da primavera os ventos mais fortes.

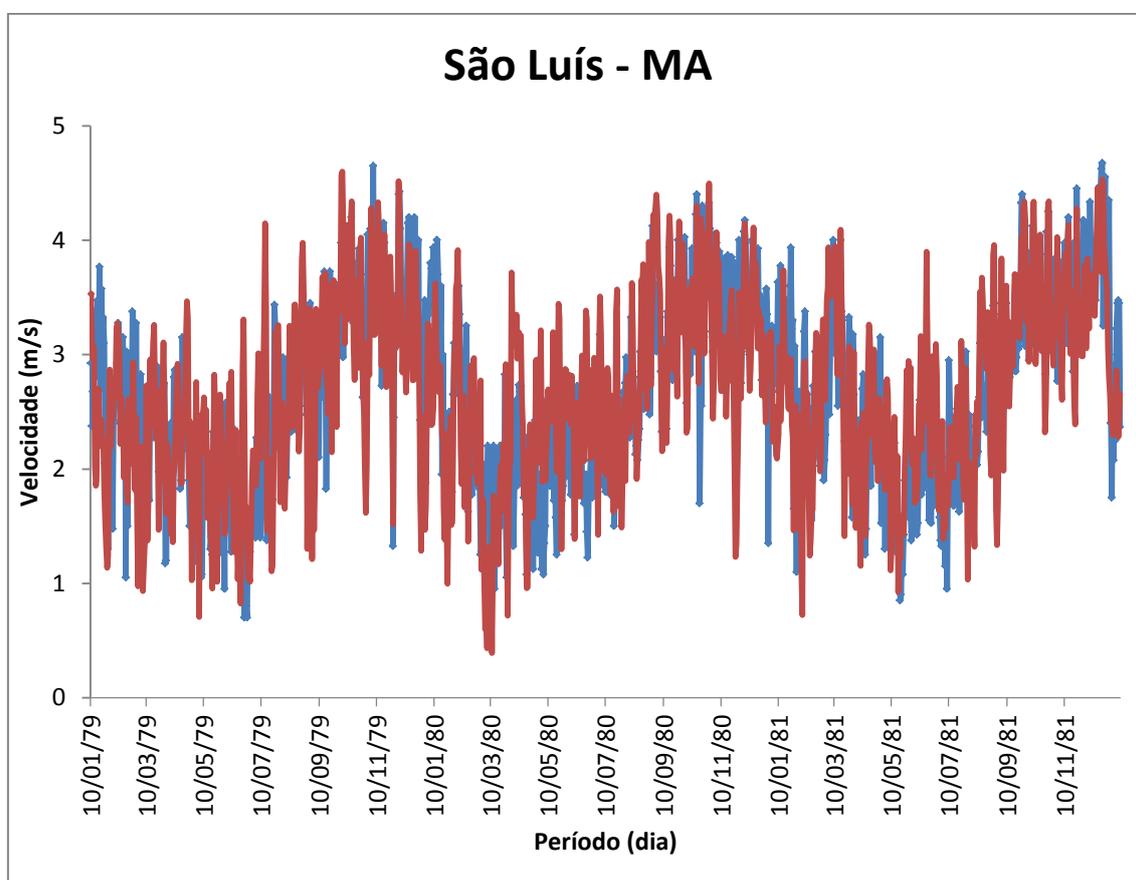


Figura 5. Comparação da velocidade do vento a 10 metros de altura do solo em (m/s), a partir dos dados de médias diárias, observados (linha azul) com os dados do modelo (linha vermelha), para a estação de São Luís - MA, no período de janeiro de 1979 a dezembro de 1981.

Na Figura 6 em São Gonçalo, foram registrados extremos de um pouco mais que 5,0 m/s de velocidade máxima do vento para os dados observados enquanto que para os dados do modelo um pouco menos que 5,0 m/s, e extremos de velocidade mínima próximo de 0,5 m/s para ambos os dados. Nesta Figura, observa-se que há concordância entre os dados observados e os dados do modelo para toda a série. O modelo também superestimou a série de dados observados de maneira geral. Percebe-se que o modelo acompanhou bem a sazonalidade dos dados observados. Assim como Palmeira dos Índios, Remanso, Acaraú e São Luís, nos meses do outono é onde se encontram os ventos mais fracos e os meses da primavera os ventos mais fortes.

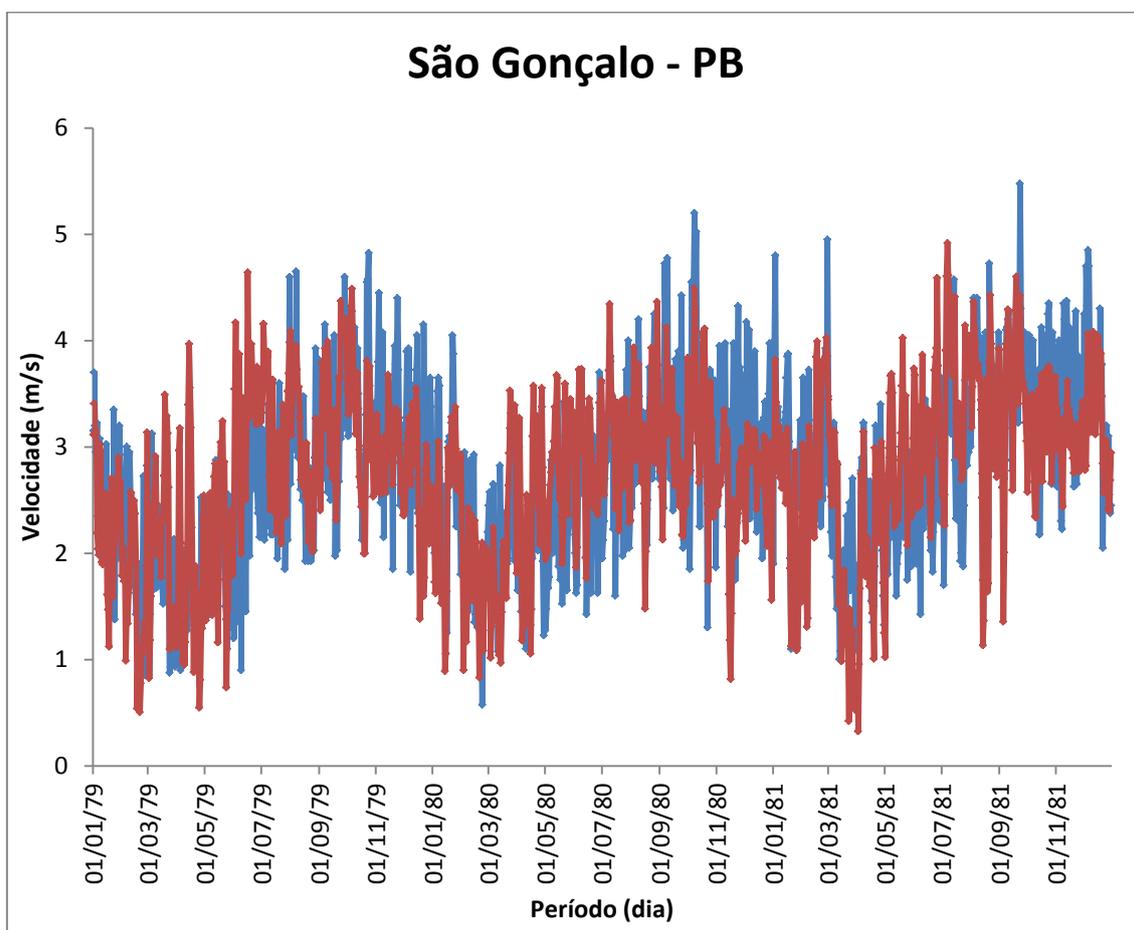


Figura 6 Comparação da velocidade do vento a 10 metros de altura do solo em (m/s), a partir dos dados de médias diárias, observados (linha azul) com os dados do modelo (linha vermelha), para a estação de São Gonçalo - PB, no período de janeiro de 1979 a dezembro de 1981.

Na Figura 7 em Petrolina, foram registrados extremos de um pouco mais que 6,0 m/s de velocidade máxima do vento para os dados observados enquanto que para os dados do modelo um pouco menos que 6,0 m/s, e extremos de velocidade mínima próximo de 1,0 m/s para ambos os dados. Nesta Figura, observa-se que há concordância entre os dados observados e os dados do modelo para toda a série. O modelo também superestimou a série de dados observados de maneira geral. Percebe-se que o modelo acompanhou bem a sazonalidade dos dados observados. Assim como Palmeira dos Índios, Remanso, Acaraú, São Luís e São Gonçalo, nos meses do outono é onde se encontram os ventos mais fracos e os meses da primavera os ventos mais fortes.

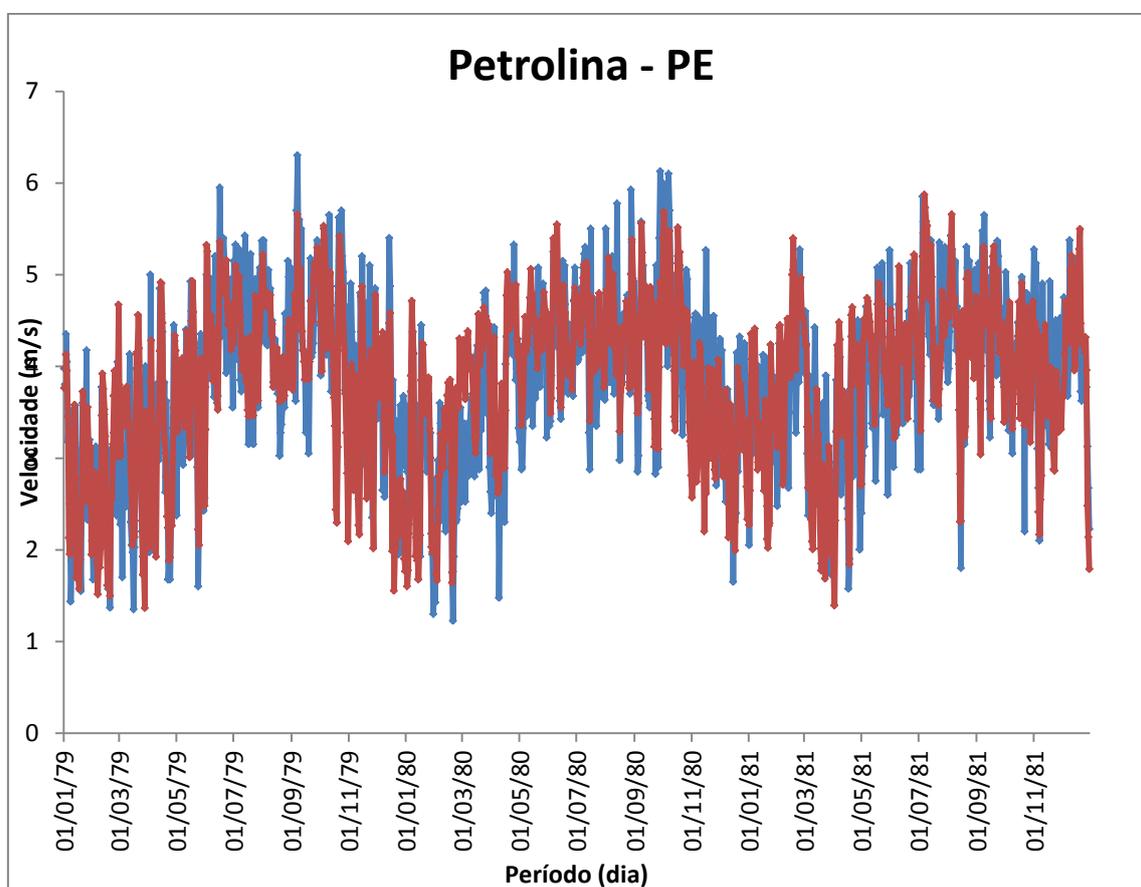


Figura 7. Comparação da velocidade do vento a 10 metros de altura do solo em (m/s), a partir dos dados de médias diárias, observados (linha azul) com os dados do modelo (linha vermelha), para a estação de Petrolina - PE, no período de janeiro de 1979 a dezembro de 1981.

Na Figura 8 em Parnaíba, foram registrados extremos de um pouco mais que 7,5 m/s de velocidade máxima do vento tanto para os dados observados quanto para os dados do modelo, e extremos de velocidade mínima próximo de 1,0 m/s para ambos os dados. Nesta Figura, observa-se que há concordância entre os dados observados e os dados do modelo para toda a série. O modelo subestimou a série de dados observados de maneira geral, diferentemente de todas as outras estações estudadas até aqui. Percebe-se que o modelo acompanhou bem a sazonalidade dos dados observados. Assim como Palmeira dos Índios, Remanso, Acaraú, São Luís, São Gonçalo e Petrolina, nos meses do outono é onde se encontram os ventos mais fracos e os meses da primavera os ventos mais fortes.

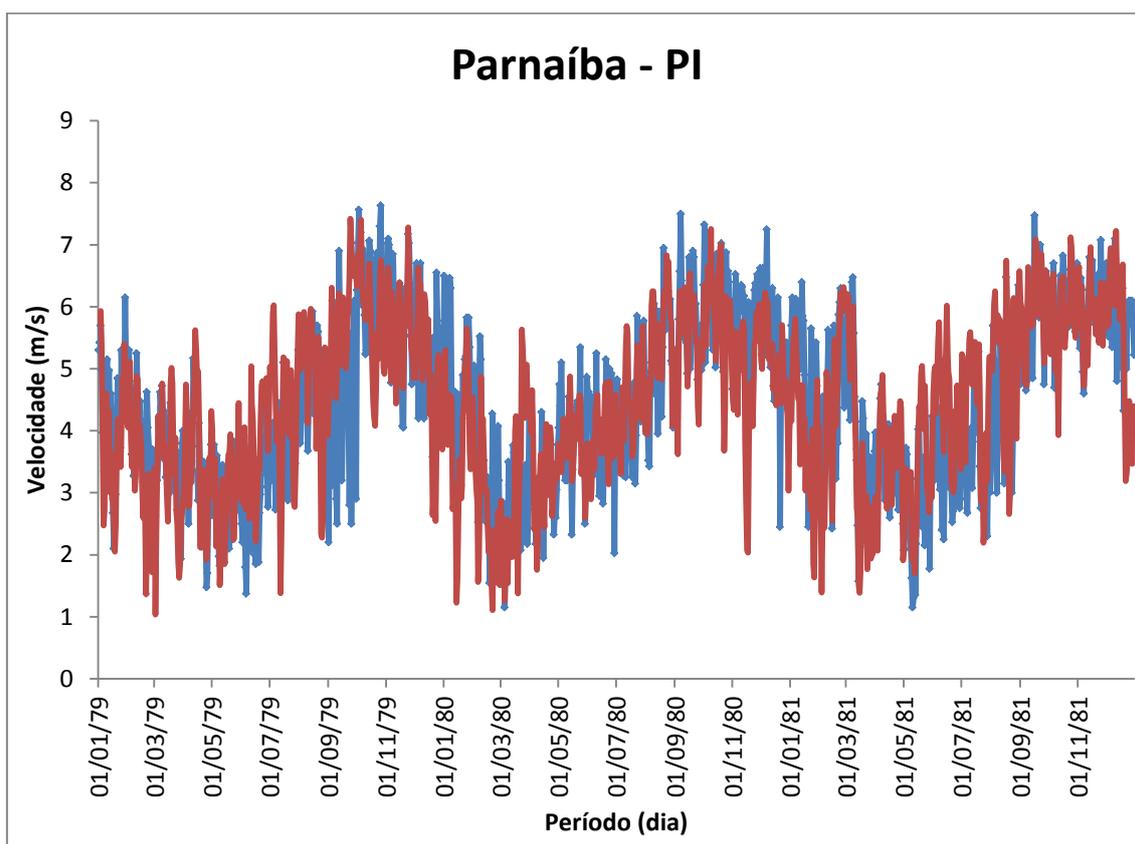


Figura 8. Comparação da velocidade do vento a 10 metros de altura do solo em (m/s), a partir dos dados de médias diárias, observados (linha azul) com os dados do modelo (linha vermelha), para a estação de Parnaíba - PI, no período de janeiro de 1979 a dezembro de 1981.

Na Figura 9 em Cruzeta, foram registrados extremos com cerca de 6,5 m/s de velocidade máxima do vento para os dados observados enquanto que para os dados do modelo cerca de 6,0 m/s, e extremos de velocidade mínima próximo a calmaria para o modelo e cerca de 1,0 m/s para os dados observados. Nesta Figura, observa-se que há concordância entre os dados observados e os dados do modelo para toda a série. O modelo superestimou a série de dados observados de maneira geral. Percebe-se que o modelo acompanhou bem a sazonalidade dos dados observados. Assim como Palmeira dos Índios, Remanso, Acaraú, São Luís, São Gonçalo, Petrolina e Parnaíba, nos meses do outono é onde se encontram os ventos mais fracos e os meses da primavera os ventos mais fortes.

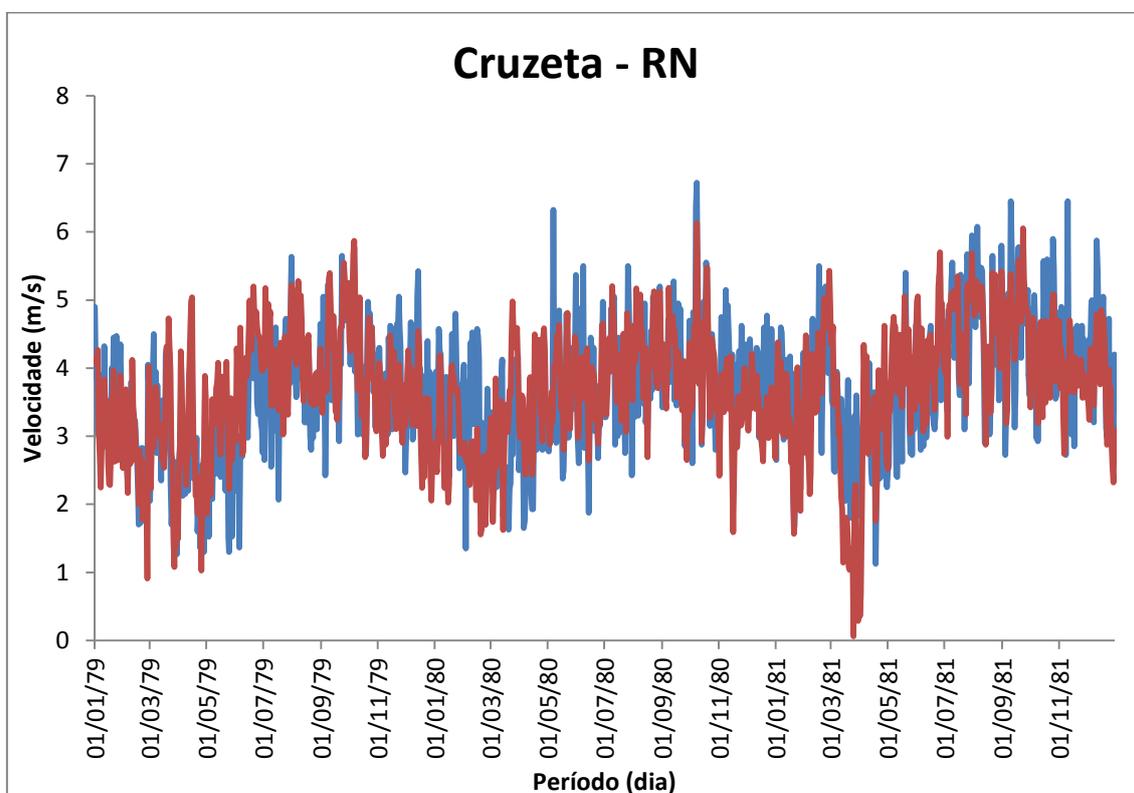


Figura 9. Comparação da velocidade do vento a 10 metros de altura do solo em (m/s), a partir dos dados de médias diárias, observados (linha azul) com os dados do modelo (linha vermelha), para a estação de Cruzeta - RN, no período de janeiro de 1979 a dezembro de 1981.

Na Figura 10 em Aracaju, foram registrados extremos com cerca de 7,5 m/s de velocidade máxima do vento para os dados modelo e enquanto que para os dados observados cerca de 6,7 m/s, e extremos de velocidade mínima de 1,0 m/s para o modelo e cerca de 1,7 m/s para os dados observados. Nesta Figura, observa-se que há concordância entre os dados observados e os dados do modelo para toda a série. O modelo subestimou a série de dados observados de maneira geral. Percebe-se que o modelo acompanhou bem a sazonalidade dos dados observados. Assim como Palmeira dos Índios, Remanso, Acaraú, São Luís, São Gonçalo, Petrolina, Parnaíba e Cruzeta, nos meses do outono é onde se encontram os ventos mais fracos e os meses da primavera os ventos mais fortes, porém não há uma curva bastante acentuada da sazonalidade como nas outras estações, a velocidade do vento fica em média de 4,5 m/s.

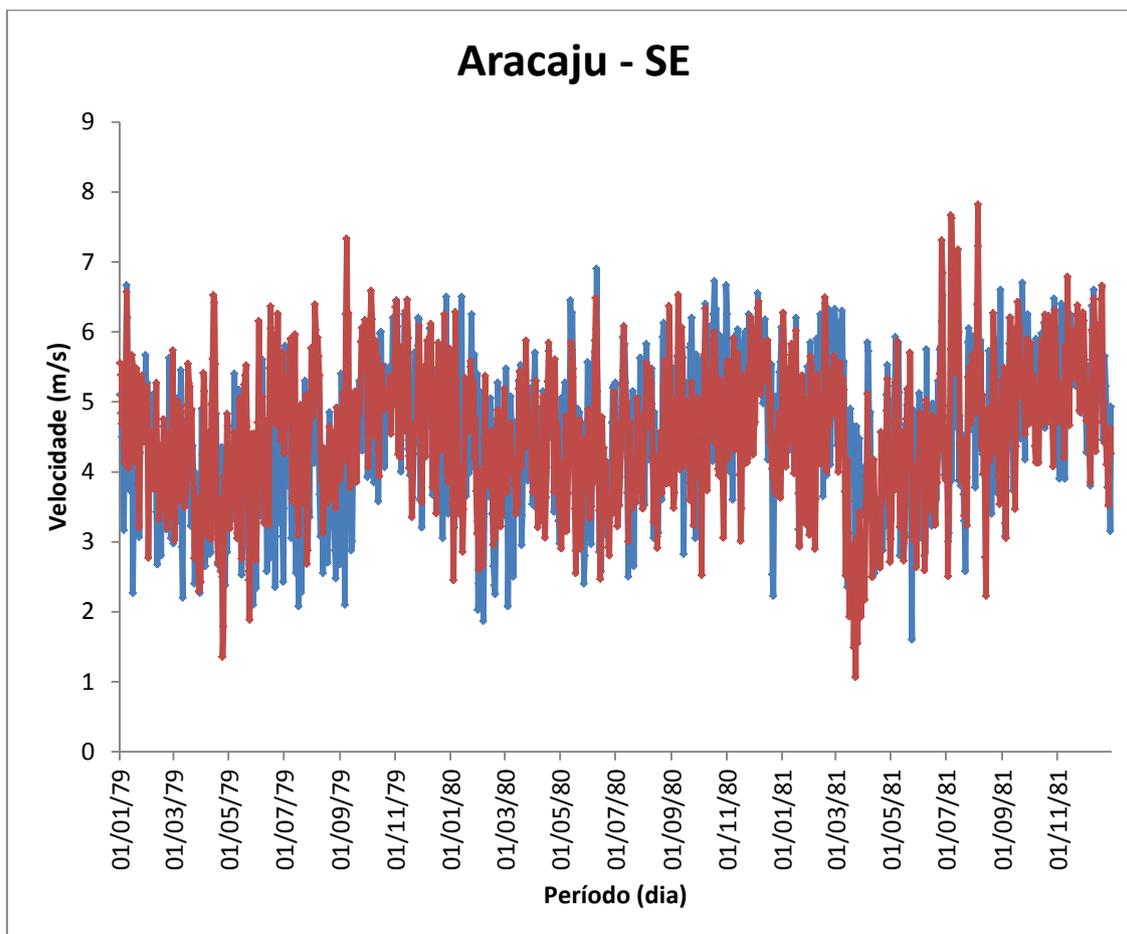


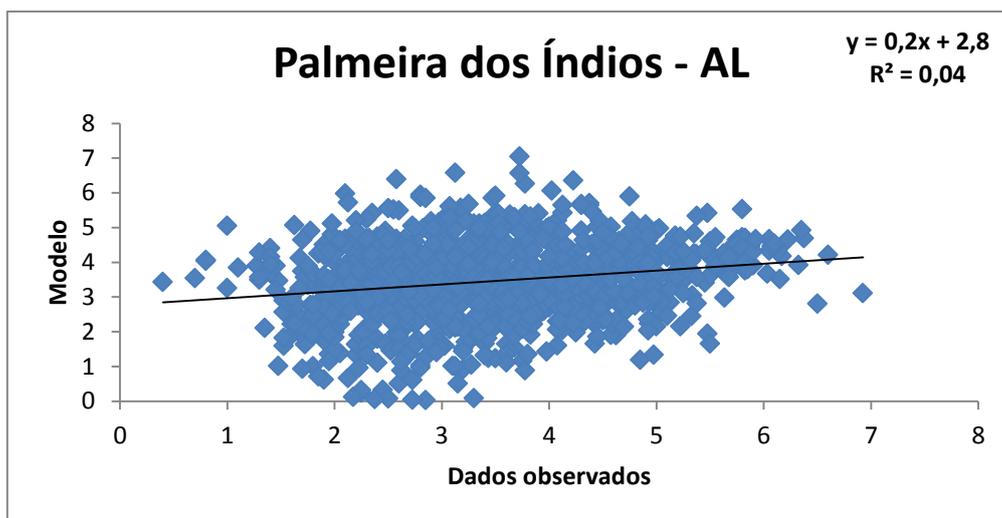
Figura 10. Comparação da velocidade do vento a 10 metros de altura do solo em (m/s), a partir dos dados de médias diárias, observados (linha azul) com os dados do modelo (linha vermelha), para a estação de Aracaju - SE, no período de janeiro de 1979 a dezembro de 1981.

4.2 Índices estatísticos

Estudos envolvendo dados de vento observados e simulados, normalmente querem saber a relação que existe entre eles. O coeficiente de Pearson e os gráficos de dispersão dos dados são apresentados visando quantificar essa relação. Observe que em cada gráfico apresentado encontram-se dispostos o coeficiente de determinação (R^2) e a equação da reta de regressão. Tanto os dados observados como os dados do modelo são para 10 metros de altura em relação ao solo mostrado nas Figuras 11 a 15.

Na Figura 11a, o coeficiente de determinação explica apenas 3,9% da variabilidade dos dados observados. O coeficiente de correlação para Palmeira dos Índios é $r = 0,20$ indicando ser uma correlação fraca. Na Figura 11b, o coeficiente de determinação explica 49,66% da variabilidade dos dados observados. O coeficiente de correlação para Remanso é $r = 0,7$ indicando ser uma correlação forte.

a)



b)

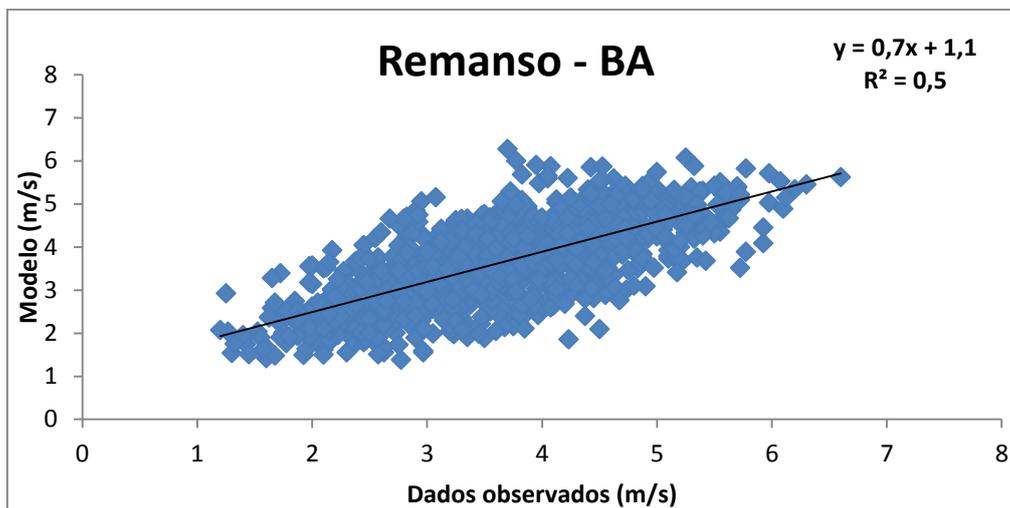
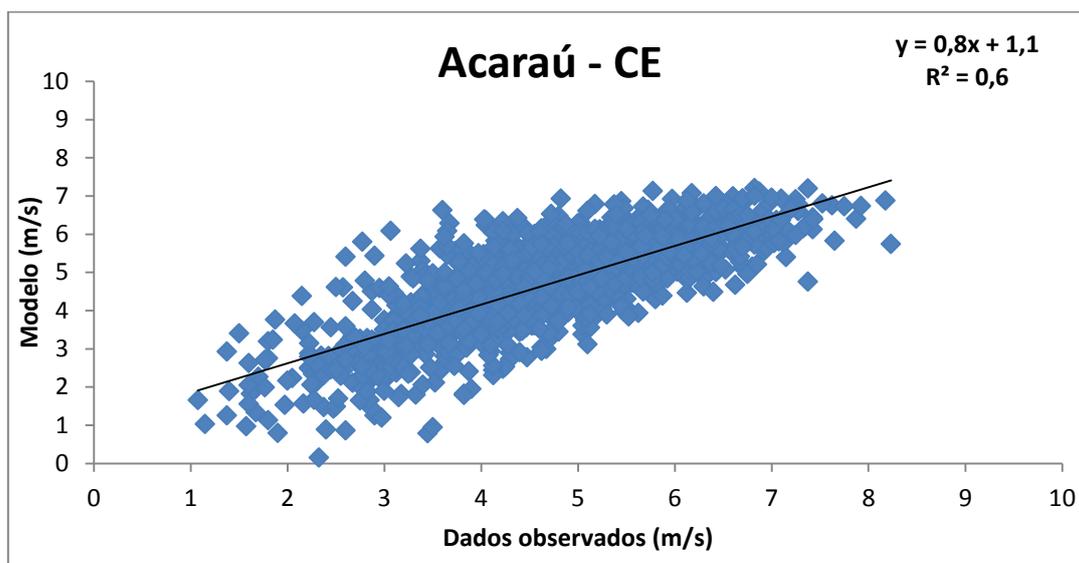


Figura 11. Correlação linear entre os dados observados e os dados do modelo ECMWF para (a) Palmeira dos Índios - AL e (b) Remanso - BA no período de 1979 a 1981.

Na Figura 12a, o coeficiente de determinação explica 59,32% da variabilidade dos dados observados. O coeficiente de correlação para Acaraú é $r = 0,77$ indicando ser uma correlação forte. Na Figura 12b, o coeficiente de determinação explica 51% da variabilidade dos dados observados. O coeficiente de correlação para São Luís é $r = 0,72$ indicando ser uma correlação forte.

a)



b)

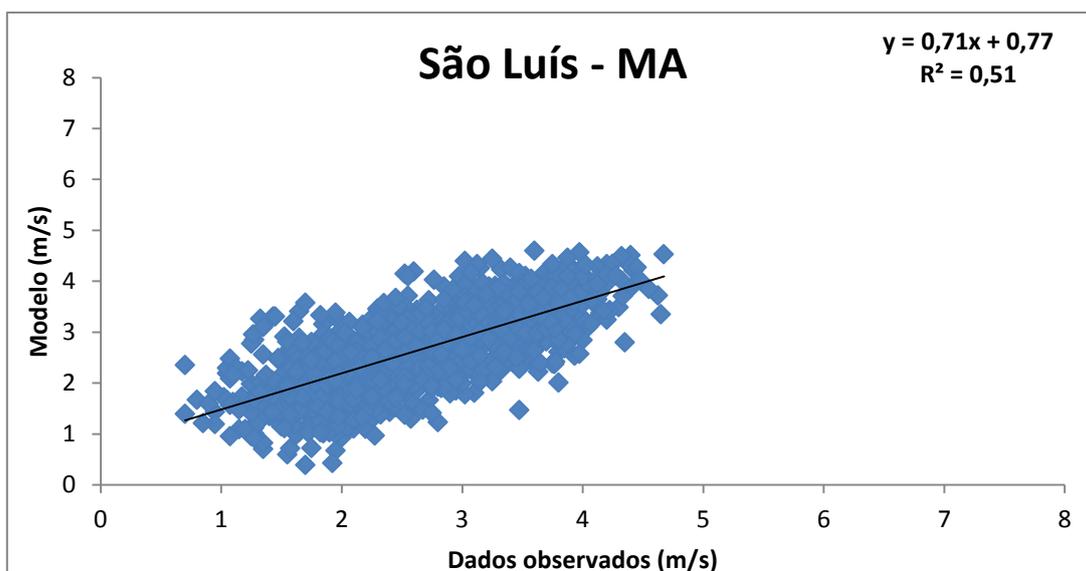
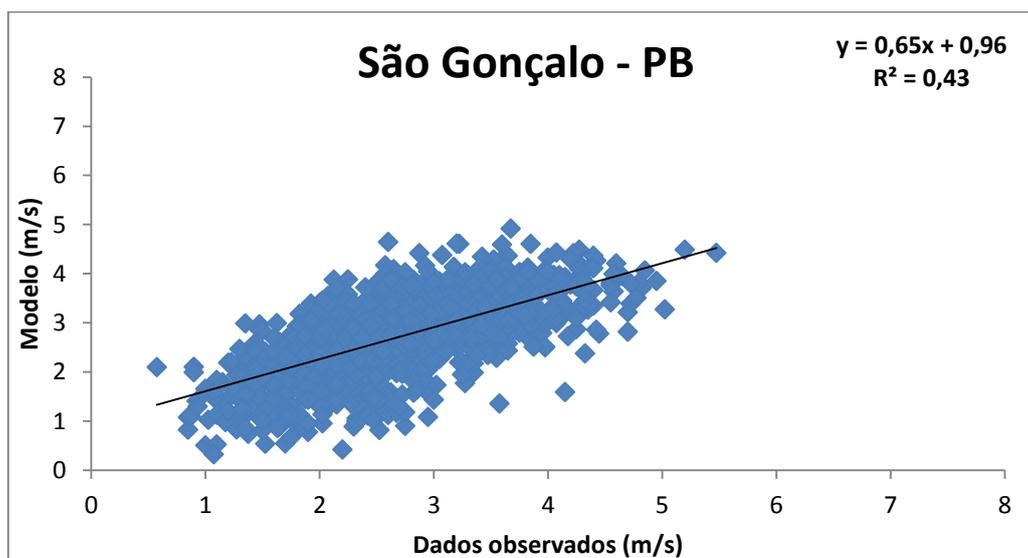


Figura 12. Correlação linear entre os dados observados e os dados do modelo ECMWF para (a) Acaraú – CE e (b) São Luís - MA no período de 1979 a 1981.

Na Figura 13a, o coeficiente de determinação explica 43% da variabilidade dos dados observados. O coeficiente de correlação para São Gonçalo é $r = 0,65$ indicando ser uma correlação moderada. Na Figura 13b, o coeficiente de determinação explica 54% da variabilidade dos dados observados. O coeficiente de correlação para Petrolina é $r = 0,74$ indicando ser uma correlação forte.

a)



b)

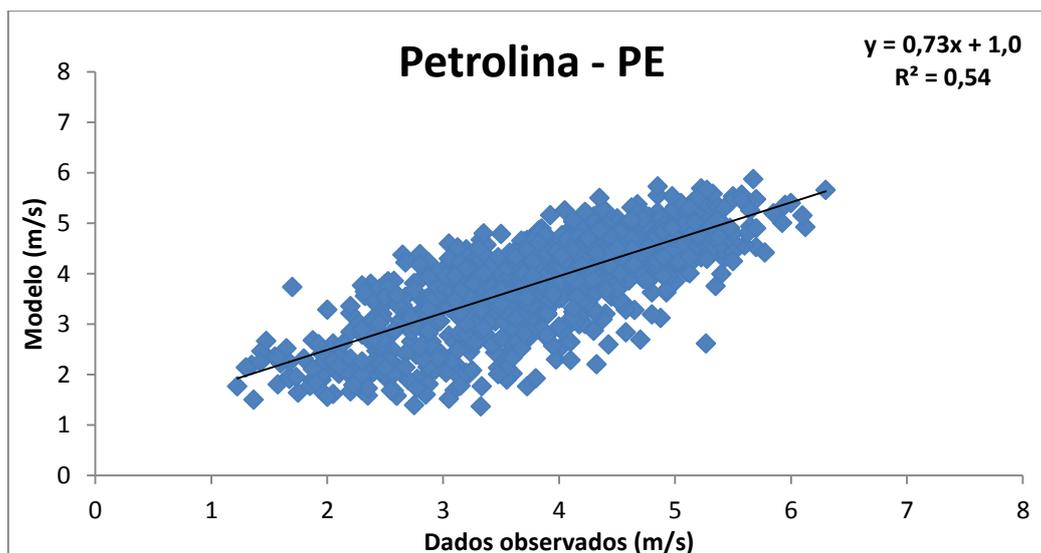
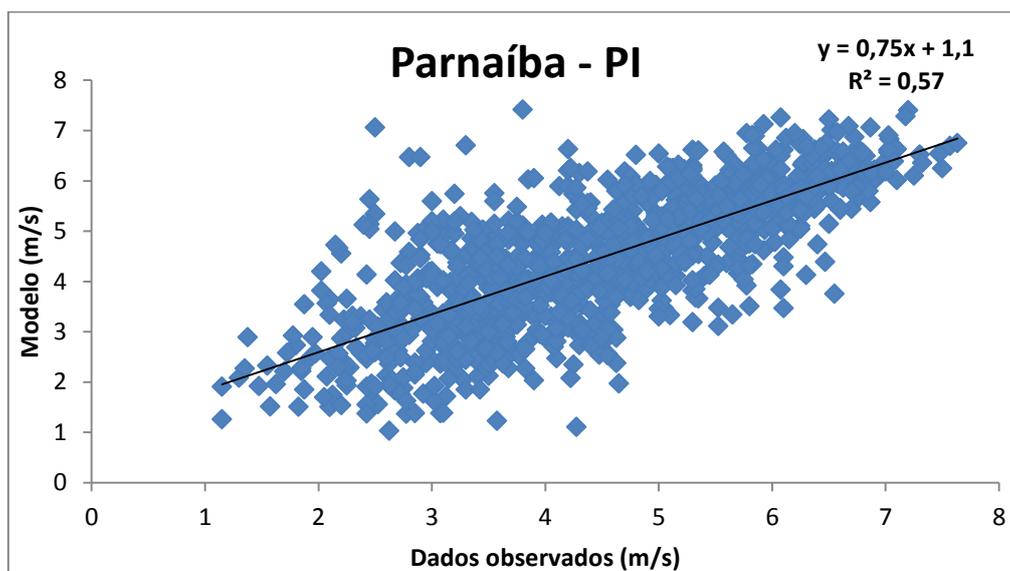


Figura 13. Correlação linear entre os dados observados e os dados do modelo ECMWF para (a) São Gonçalo – PB e (b) Petrolina - PE no período de 1979 a 1981.

Na Figura 14a, o coeficiente de determinação explica 57% da variabilidade dos dados observados. O coeficiente de correlação para Parnaíba é $r = 0,75$ indicando ser uma correlação forte. Na Figura 14b, o coeficiente de determinação explica 50% da variabilidade dos dados observados. O coeficiente de correlação para Cruzeta é $r = 0,71$ indicando ser uma correlação forte.

a)



b)

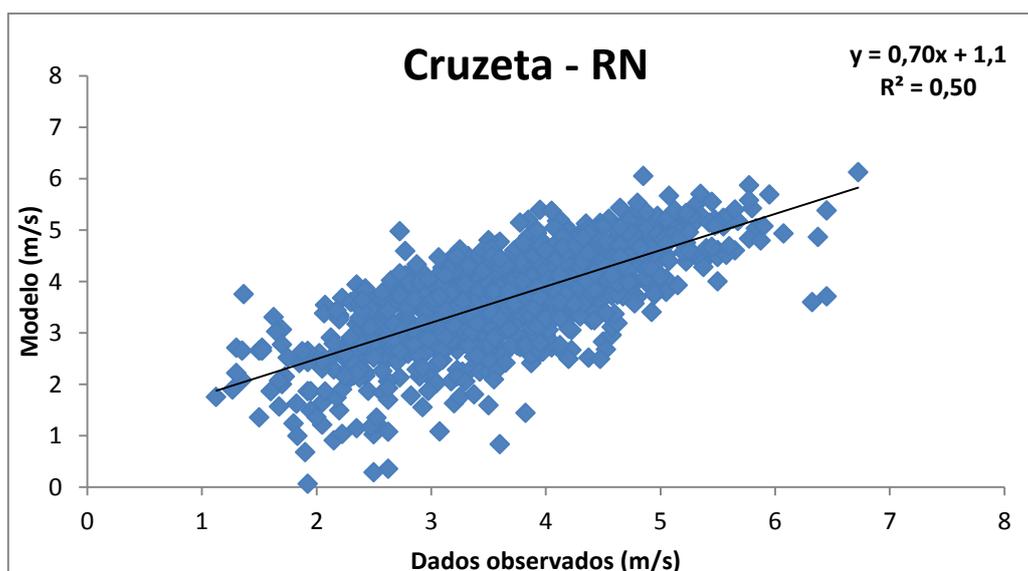


Figura 14. Correlação linear entre os dados observados e os dados do modelo ECMWF para (a) Parnaíba - PI e (b) Cruzeta - RN no período de 1979 a 1981.

Na Figura 15, o coeficiente de determinação explica 36,6% da variabilidade dos dados observados. O coeficiente de correlação para Aracaju é $r = 0,60$ indicando ser uma correlação moderada.

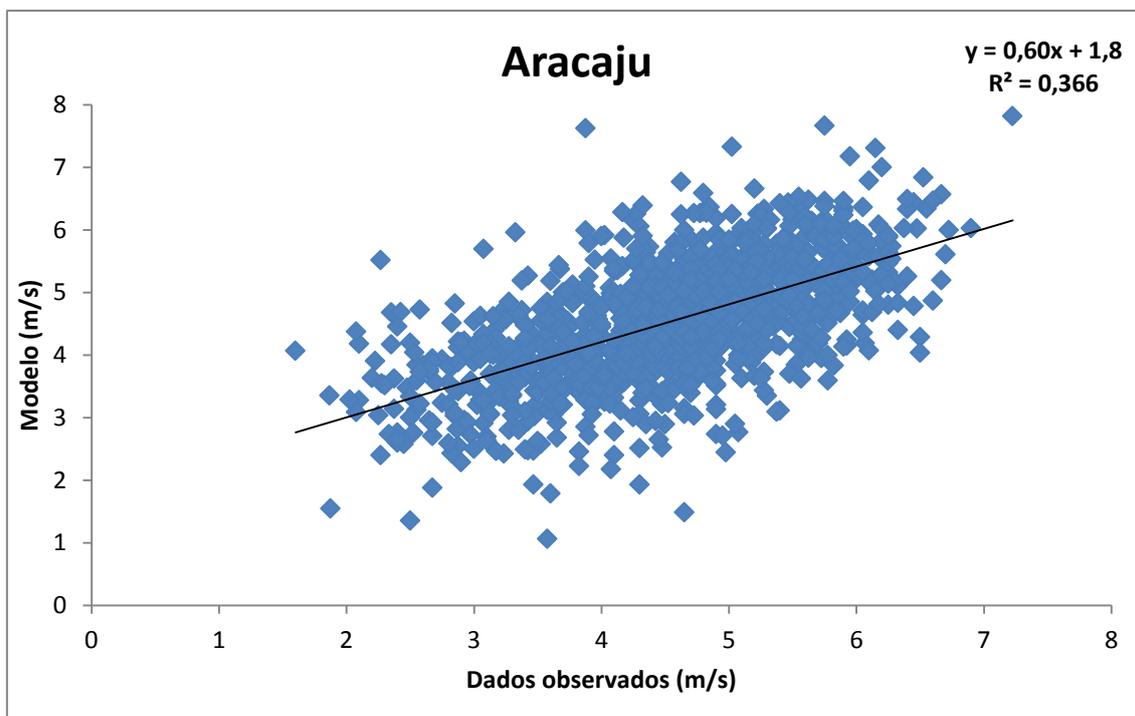


Figura 15. Correlação linear entre os dados observados e os dados do modelo ECMWF para Aracaju - SE no período de 1979 a 1981.

Observa-se que na maioria dos casos, as estações com maiores valores do coeficiente de correlação e determinação se encontram no litoral e próximo ao Rio São Francisco (Tabela 4), o menor valor entre todas as estações estudadas encontra-se em Palmeira dos Índios - AL com $r = 0,2$ e $R^2 = 0,04$.

Tendo como objetivo a avaliação do desempenho dos resultados das simulações entre os dados observados e os dados de reanálise do ECMWF são significativas, utiliza-se o teste do t Student. Então, de acordo com o valor de t para uma série de 1095 dias ($N=1095$) com 2 graus de liberdade, e do coeficiente de correlação crítico (r_c) igual a 0,10, verifica-se que os coeficientes de correlação (r) encontrados são superiores ao valor do r_c para um nível de significância de 99,99%. Logo todos os coeficientes de

correlação adquiridos apresentam significância estatística ao nível de 99,99%. Portanto, pode-se concluir que existem evidências estatísticas bastante significativas para dizer que as séries de dados do modelo e as séries de dados observados estão bem correlacionadas.

De acordo com os resultados obtidos quanto aos erros, são mostrados na Tabela 4. Fazendo uma análise dos resultados do Viés, observa-se que na maioria das estações o modelo superestimou os dados observados, com exceção de 6 estações: Bacabal, Turiaçu, Campina Grande, Parnaíba, Macau e Aracaju, onde elas subestimaram os dados observados. Percebe-se que os maiores resultados estão nas estações do litoral como João Pessoa (3,1 m/s) e Fortaleza (3,3 m/s).

Pode-se observar que para os valores do erro quadrático médio e do erro absoluto, quanto mais próximo o valor for de zero melhor serão esses valores. Analisando todas as estações, a que obteve o melhor valor de erro quadrático médio foi Bacabal no estado do Maranhão com 0,6 m/s, enquanto que Fortaleza no estado do Ceará obteve um valor muito alto para o erro quadrático médio de 3,5 m/s. Em relação ao erro absoluto, novamente Bacabal foi à estação que obteve o melhor valor, enquanto que Fortaleza novamente obteve o pior valor em relação às outras estações. Outro fator observado foi que na maioria dos casos, as estações que se encontram no litoral são as que obtiveram os maiores valores dos erros.

Já em relação aos coeficientes de correlação, observa-se um fator bastante importante é a qualidade dos dados observados, em algumas estações que havia falta de dados o valor da correlação diminuiu bastante, mesmo assim os resultados apresentados foram bastante satisfatórios. Destaca-se dois estados com as melhores e piores correlações: o pior estado é Alagoas, onde tinha somente uma estação com dados que deu para trabalhar, Palmeira dos Índios apresentou a pior correlação dentre todas as outras estudadas com apenas 20% de correlação, configurando ser fraca. Já o estado com as correlações mais satisfatórias foi Pernambuco, com correlações de moderada a forte. Em relação ao t student observa-se que todas as estações estudadas apresentam significância estatística para o nível de 99,99%, onde o $r_c = 0,10$.

Tabela 4 Índices estatísticos para a velocidade do vento em 28 estações espalhadas pelo Nordeste, em que r é a correlação de Pearson, EA é o erro absoluto médio, EQM é o erro quadrático médio e o R² é o coeficiente de determinação para o período de 1979 a 1981.

ESTADOS	ESTAÇÕES	VIÉS(m/s)	EA(m/s)	EQM(m/s)	r(m/s)	R ² (m/s)
Alagoas	Palmeira dos Índios	0,67	1,16	1,43	0,20	0,04
Bahia	Barra	1,10	1,42	1,77	0,20	0,04
	Ilhéus	1,20	1,34	1,69	0,53	0,28
	Jacobina	0,06	0,87	1,15	0,46	0,21
	Remanso	0,30	0,81	1,02	0,70	0,50
	Salvador	1,02	1,08	1,24	0,59	0,34
Ceara	Acaraú	2,59	2,61	2,84	0,77	0,59
	Fortaleza	3,28	3,28	3,46	0,67	0,45
	Iguatu	2,10	2,13	2,35	0,45	0,20
	Quixeramobim	1,00	1,18	1,43	0,57	0,32
Maranhão	Bacabal	-0,12	0,46	0,59	0,32	0,10
	Imperatriz	0,31	0,50	0,62	0,45	0,20
	São Luís	1,86	1,88	2,08	0,72	0,51
	Turialva	-0,22	0,56	0,71	0,69	0,48
Paraíba	Campina Grande	-0,11	0,92	1,08	0,22	0,05
	João Pessoa	3,15	3,16	3,45	0,53	0,29
	São Gonçalo	1,76	1,79	1,99	0,65	0,43
Pernambuco	Arcoverde	2,02	2,13	2,81	0,48	0,23
	Petrolina	1,00	1,25	1,44	0,74	0,54
	Recife	2,87	2,87	3,02	0,66	0,44
Piauí	Parnaíba	-0,05	0,74	0,96	0,75	0,57
	São João do Piauí	1,22	1,36	1,65	0,64	0,41
	Teresina	0,54	0,70	0,87	0,48	0,23
Rio Grande do Norte	Apodi	2,32	2,47	2,72	0,30	0,10
	Ceara Mirim	2,59	2,65	2,87	0,49	0,25
	Cruzeta	1,26	1,31	1,47	0,71	0,50
	Macau	-0,15	0,93	1,21	0,38	0,15
Sergipe	Aracaju	-0,59	0,82	1,01	0,60	0,37

Levando-se em consideração os valores das médias diárias da velocidade do vento e os índices obtidos nas análises estatísticas, de maneira geral os resultados adquiridos nos dados de reanálise do ECMWF apresentadas neste trabalho sugerem que o modelo é capaz de representar bem o comportamento do vento de forma satisfatória, apesar das dificuldades de falha nos dados observados.

4.3 Variação sazonal e interanual da velocidade do vento

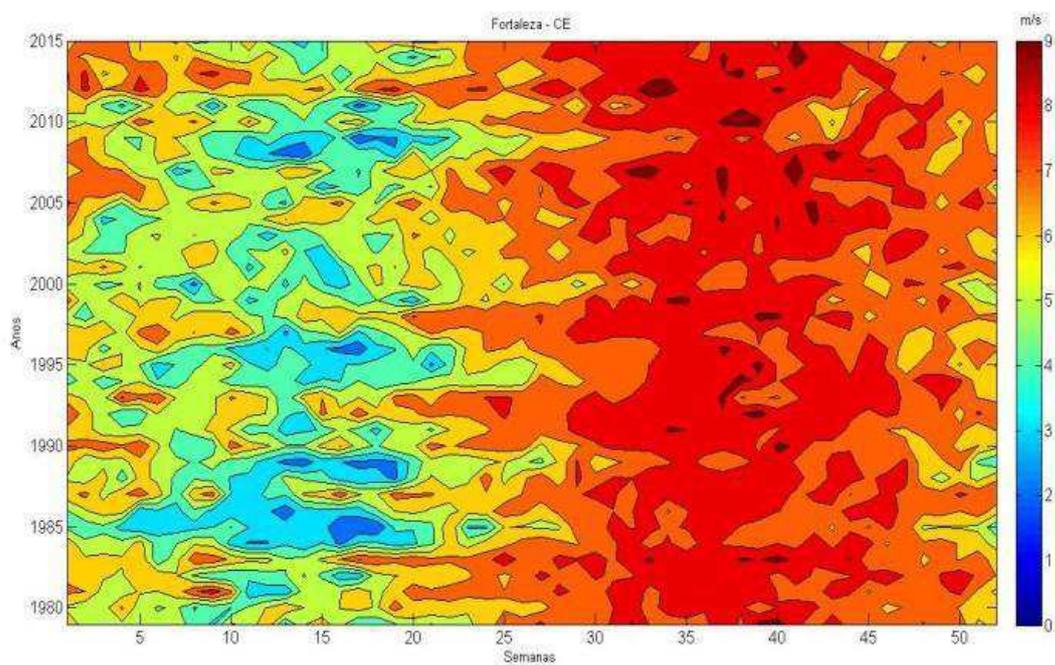
As Figuras 16 e 17, mostram como está a distribuição sazonal e interanual dos dados das médias semanais da velocidade do vento a 10 metros de altura do solo, no período de janeiro de 1979 a dezembro de 2015. As Figuras estão na mesma escala, onde no eixo-x estão as médias semanais dentro do ano e no eixo-y estão os anos em estudo. A intensidade da velocidade do vento está caracterizada nas barras no lado direito de cada Figura, variando da cor vermelha indicando que a velocidade do vento está mais intensa e na cor azul menos intensa, onde a unidade está em m/s. Dentre as 28 localidades estudadas foram selecionadas 4, nas quais duas localidades como sendo as com maior intensidade da velocidade do vento, outras duas localidades ficam intermediárias, dentre essas 4 localidades escolhidas foi selecionada ao menos uma para cada região do Nordeste, ou seja, Sul do nordeste, região costeira e região Norte do Nordeste.

Para análises das localidades com maior intensidade da velocidade do vento (Figuras 16a e 16b), dentre os estados estudados a localidade que aponta maior intensidade do vento é a cidade de Fortaleza – CE, para maiores detalhes consultar Silva et al (2004), que analisou a distribuição espacial da densidade de potência eólica para o Nordeste do Brasil, no período de 1977 a 1981, e obtiveram praticamente o mesmo resultado desse presente estudo, só que usando técnicas diferentes e em um período bem menor que o presente estudo. Nota-se que há uma sazonalidade para todos os anos em estudo, tendo como destaque os períodos chuvoso e seco, segundo (ARAÚJO, 2012) em que nessas localidades se caracterizam entre os meses de fevereiro e maio como período chuvoso para Fortaleza que fica considerada na parte Norte do Nordeste e de maio a julho para João Pessoa que é localizada na parte costeira, e de agosto a outubro como sendo o período mais seco nas duas localidades.

Observa-se que as duas Figuras tem comportamentos bem semelhantes apesar de está em localidades diferentes, ambas tem sua sazonalidade bem definida, porém percebe-se que na (Figura 16a) a intensidade da velocidade do vento é maior no período seco com velocidades em torno de 8 m/s e chegando até 9 m/s e menor no período chuvoso, com velocidades em torno de 3 m/s e chegando até 1,5 m/s, já na (Figura 16b) a intensidade da velocidade do vento é maior no período seco, porém um pouco menos intensa que a (Figura 16a) chegando a ter velocidade em boa parte de 6,5 m/s, mas que

também chega a 9 m/s em alguns períodos, já no período chuvoso em boa parte fica em torno de 5 m/s e que em um pequeno período de tempo chega a 1,5 m/s. Outra situação bastante semelhante entre essas duas Figuras, é em anos de El Niño e La Niña, observa-se em ambas as Figuras os anos de 1982-1983, 1990-1993, 1997-1998 que segundo (MARTINS, 2008) são anos de El Niño forte, observa-se bem que há uma intensidade maior da velocidade do vento ao longo do ano do que os demais anos estudados, ou seja, percebe-se que em anos de El Niño a intensidade do vento tem uma tendência a ser mais forte que os anos considerados normais, pois há uma divergência de ar atmosférico na região. Percebe-se também que nos últimos anos de estudo, 2013-2015 o Nordeste está passando por um período de estiagem grande, e os dados de ambas as Figuras estão tendo uma modificação em relação a anos considerados normais com esse fenômeno climático. Já em anos de La Niña a situação é o inverso do El Niño, a intensidade do vento é menor comparada com anos considerados normais, pelo fato de ter chuvas acima da média para região Nordeste, que segundo (Martins, 2008), os anos de La Niña forte são 1988-1989 e nas Figuras mostraram que existe essa concordância do vento ser menos intenso nesses anos de La Niña que os demais anos considerados normais.

a)



b)

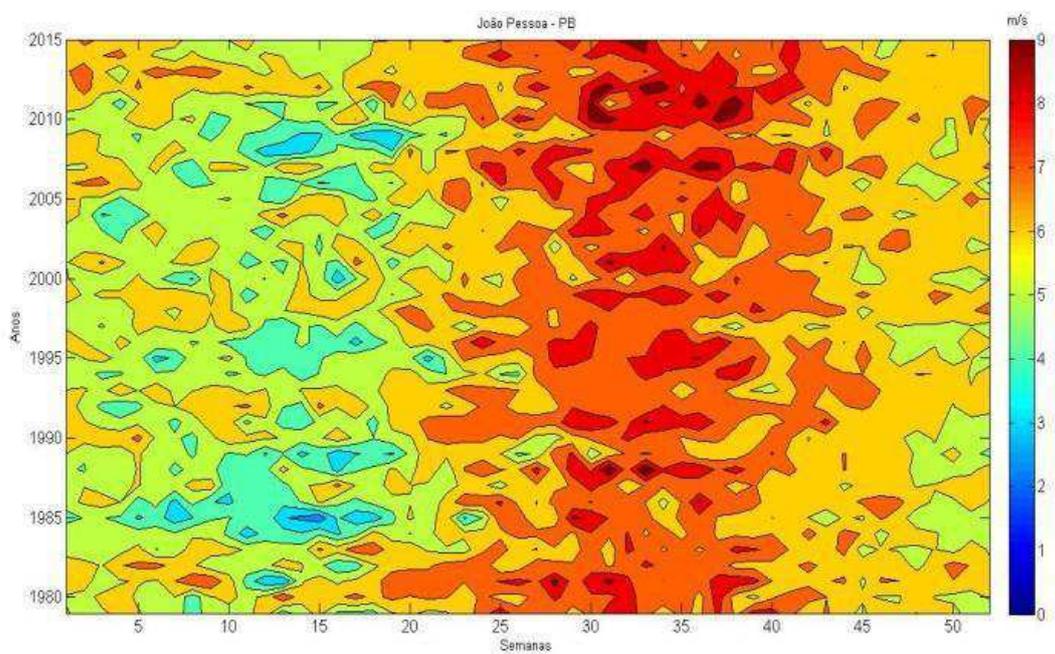
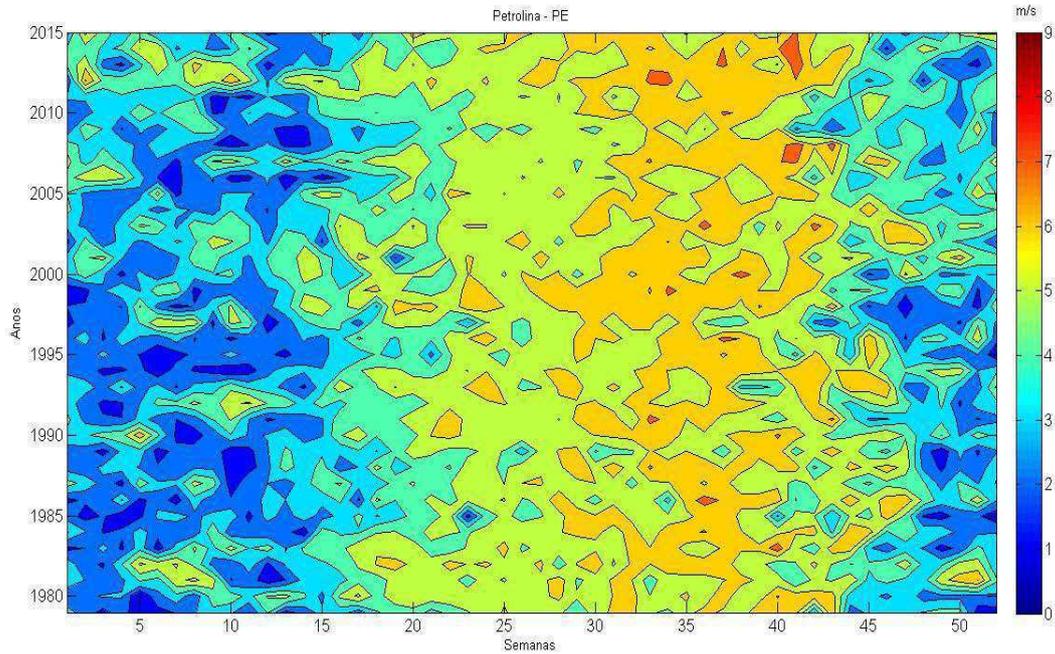


Figura 16. Variação da média semanal da velocidade do vento no período de janeiro de 1979 a dezembro de 2015 para as localidades: a) Fortaleza - CE, b) João Pessoa - PB.

Para as análises das localidades com intensidades da velocidade do vento intermediárias desse estudo foi selecionado dois locais com características bem diferentes (Figuras 17a e 17b). A Figura 17a que representa a cidade de Petrolina – PE se encontra as margens do Rio São Francisco no alto sertão do estado, localizando-se na parte semiárida do Nordeste, provavelmente deve sofrer influência da brisa lacústica e da topografia local. Observa-se que existe uma sazonalidade durante todo o período. Observa-se que no período chuvoso os valores da velocidade do vento são menores, ficando entre 1 m/s e 3 m/s. Já para o período considerado seco para essa região os valores da velocidade do vento estão mais intensos, ficando entre 5 m/s a 7 m/s. Percebe-se também para essa localidade que existe mudanças na intensidade da velocidade do vento em anos de El Niño e La Niña. Nos anos que o El Niño teve forte influência 1982-1983, 1990-1993, 1997-1998, observa-se um aumento significativo da intensidade do vento dos demais anos considerados normais, deve ser pelo fato de ter uma chuva abaixo da média para essa região. Em anos de La Niña considerada forte 1988-1989, percebe-se que a intensidade do vento é menor em relação aos anos considerados normais. Já a Figura 17b que representa a cidade de Ilhéus – BA tem uma característica totalmente diferente das Figuras 16a, 16b, 17a. Em relação à sazonalidade já não é tão evidente como das Figuras anteriores, pelo fato de sofrer influência por dois regimes das chuvas, pelas ondas de leste e pelas frentes frias oriundas das latitudes médias do Hemisfério Sul. Em relação aos fenômenos de El Niño de La Niña, eles não têm muita influência para essa localidade como tem para as localidades estudadas anteriormente. Observa-se também muitos pontos isolados das velocidades com maior intensidade do vento

a)



b)

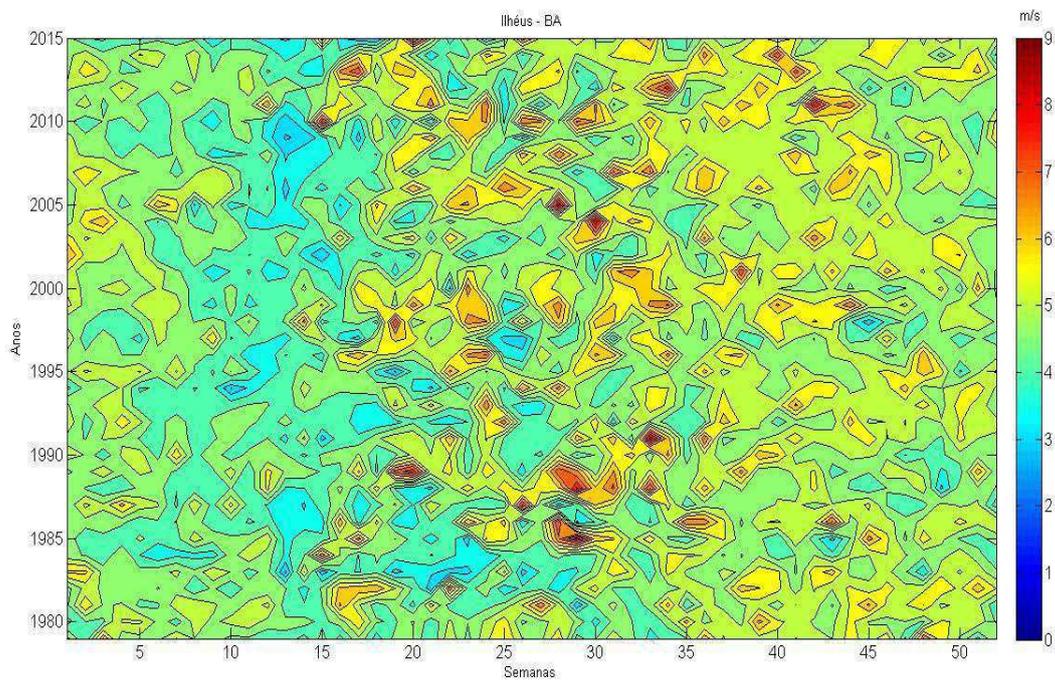


Figura 17. Variação da média semanal da velocidade do vento no período de janeiro de 1979 a dezembro de 2015 para as localidades: a) Petrolina - PE, b) Ilhéus - BA.

4.4 Anomalia da velocidade do vento em anos de Dipolo positivo e negativo

Segundo (NOBRE, 1996) em anos que as TSM sobre o oceano Atlântico Tropical Norte (entre 5°Norte e 20°Norte) está menos aquecido do que a média e o oceano Atlântico Tropical Sul (entre a linha do equador e 15° de Latitude Sul) estão um pouco mais altas do que a média de longo período durante março-abril-maio, existe formação de um gradiente meridional de anomalias de TSM no sentido de Norte para Sul. Então sobre essa situação observa-se que a Pressão do Nível Médio do Mar (PNM) fica mais alta do que a média sobre o oceano Atlântico Norte e mais baixa do que a média sobre o oceano Atlântico Sul, os alísios de Nordeste ficam mais intensos do que a média e os alísios de Sudestes ficam mais fracos em relação à média. As Figuras 18 e 19 mostram o gradiente meridional de anomalias para um dos trimestres dos anos de 1981, 1984, 1985, 1993, 1994, 2004 e 2005. A unidade é em m/s, e esses períodos escolhidos estão de acordo com a Tabela 2.

Então de acordo com (NOBRE, 1996), os anos em que a anomalia do gradiente meridional da TSM é abaixo da média, está implicando diretamente com o gradiente meridional de anomalia negativa do vento. Observa-se nas Figuras 18a, 18b, 18c e 18d, há uma diminuição da intensidade do vento em relação a média em praticamente todo o Nordeste, principalmente na parte Norte, tanto no trimestre de maio a junho como no trimestre de setembro a dezembro. No trimestre escolhido da Figura 18b foi a que obteve maior impacto, onde os valores chegam a 2 m/s negativos em relação à média na região leste do Ceará passando por quase todo estado do Rio Grande do Norte e uma parte da Paraíba. Já no trimestre da Figura 22a observa-se uma grande área passando pelos sertões do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco até o norte da Bahia em que a anomalia foi positiva, com um aumento de 0,3 chegando até 0,5m/s. Então nas quatro Figuras apresentadas indica que há uma relação direta entre os anos com gradiente meridional de anomalias negativa e a intensidade do vento ser abaixo da média.

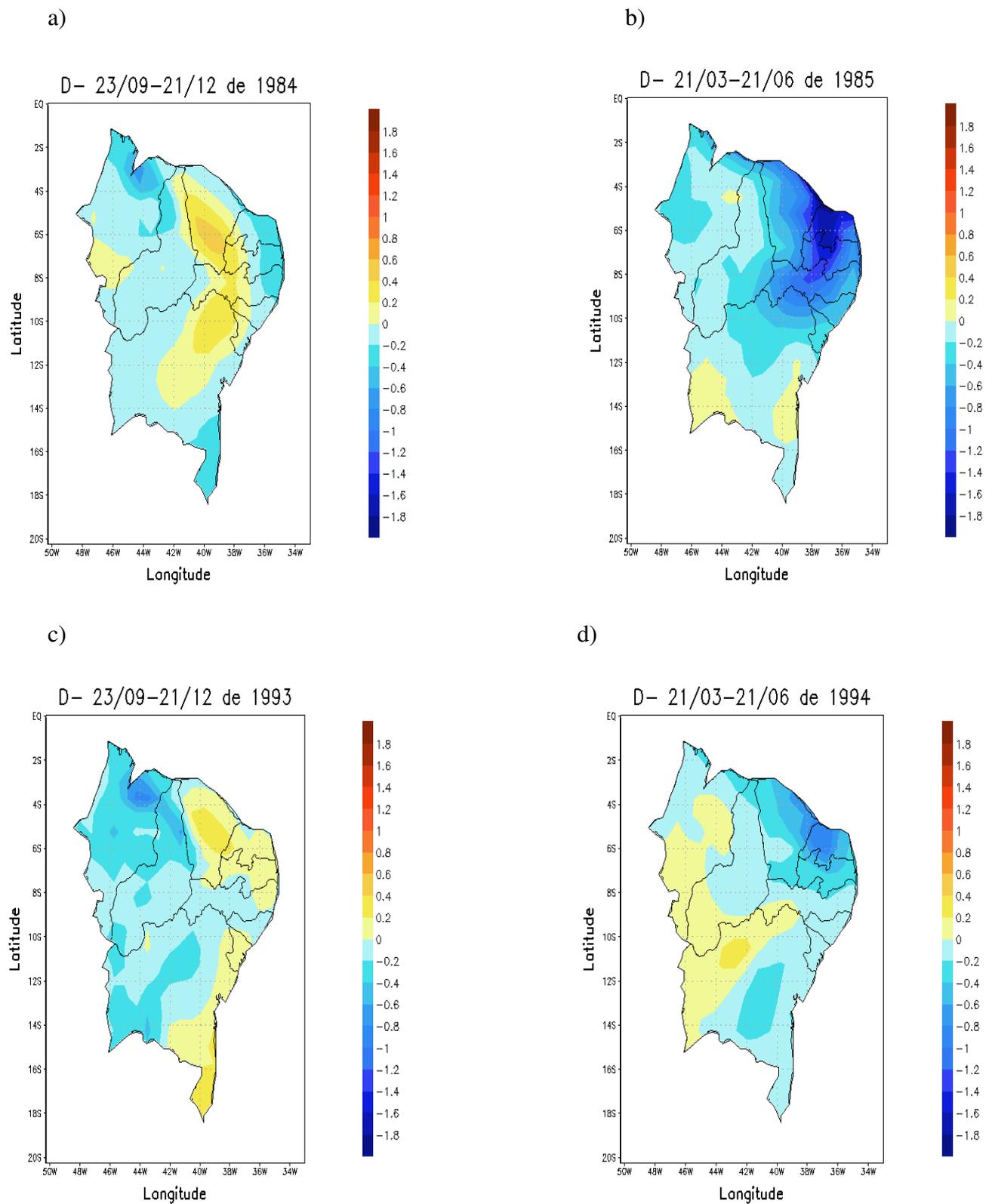


Figura 18. Distribuição espacial da anomalia do vento para anos de gradiente de anomalia negativo da TSM: (a) Primavera de 1984; (b) Outono de 1985; (c) Primavera de 1993; (d) Outono de 1994.

Observa-se nas Figuras 19a e 19b que há uma anomalia positiva do vento em regiões diferentes para cada trimestre. Na Figura 19a a anomalia positiva se encontra em praticamente toda parte Norte, com valores chegando até 0,7 m/s, por outro lado praticamente toda parte Sul está com anomalia negativa, com valores que chegam a -0,5 m/s. Já a Figura 19b está com anomalia negativa em toda parte Oeste do Nordeste e em uma pequena parte passando entre Rio Grande do norte, Paraíba, Pernambuco e chegando até o norte de Alagoas com valores chegando até -1,0 m/s.

As Figuras 19c e 19d mostram um comportamento bem diferente das Figuras 19a e 19b. Em praticamente todo o Nordeste observa-se que há anomalia positiva, com alguns locais que os valores chegam até 0,8 m/s. Especificamente olhando para o estado do Ceará observa-se que na Figura 19c boa parte do estado está com anomalia negativa, já na Figura 19d a anomalia está positiva, percebe-se que a Figura 19c está no período chuvoso para essa região e a figura 20d está no período seco da região.

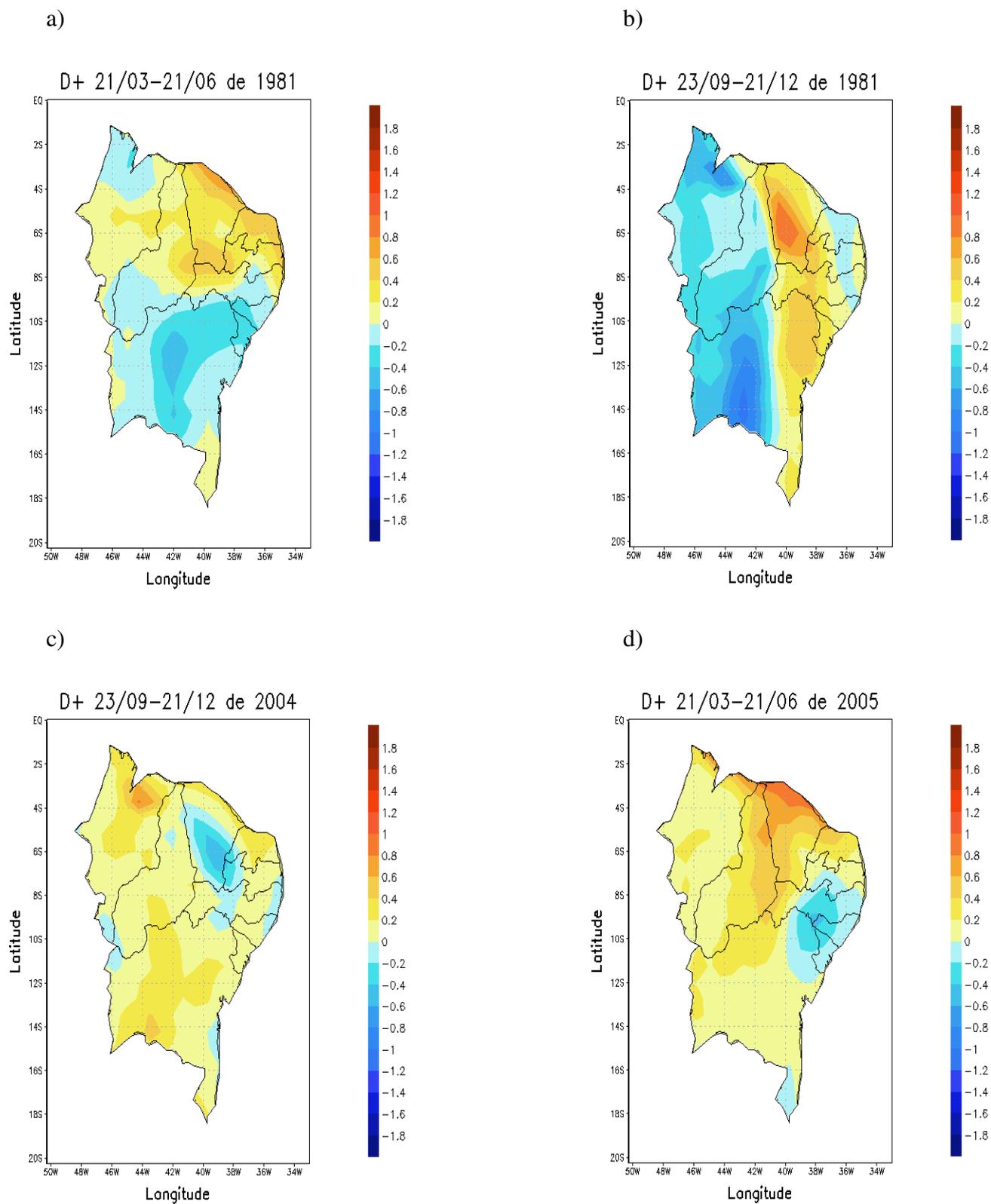


Figura 19. Distribuição espacial da anomalia do vento para anos de gradiente de anomalia positivo da TSM: (a) Outono de 1981; (b) Primavera de 1981; (c) Primavera de 2004; (d) Outono de 2005

4.5 Anomalia da velocidade do vento em anos de El Niño e La Niña

Na Figura 20a, pode-se observar que praticamente todo o lado Oeste do Nordeste está com valores negativos, já no lado Leste os valores de anomalias são positivos. Na Figura 20b observa-se o que antes predominava valores negativos em todo o Leste da região, nessa Figura já tem uma boa parte com valores positivos, e mais intensos no litoral Norte. Já a parte Sul da região o que antes era positivo se tornou negativo. Há um núcleo de anomalia positiva com valores que chegam até 1,6 m/s, que parte do litoral norte passando por todo estado do Ceará até chegar o sertão de Pernambuco.

Na Figura 20c, observa-se que praticamente todo o NEB está com anomalia negativa, exceto uma pequena parte do Norte, passando pelo Maranhão, Piauí e outra parte bem no meio da Paraíba chegando até o litoral Norte da Bahia. A região com os valores mais negativos estão no sertão de Pernambuco e uma parte do vale de São Francisco da Bahia, com valores chegando a -1,4 m/s. Porém na Figura 20d nota-se um padrão totalmente diferente da Figura 20c, observa-se que praticamente todo o NEB está com anomalia positiva, exceto na parte Norte do Maranhão e Piauí e também no extremo Oeste baiano. Nota-se que desde o Ceará até o Sul da Bahia os valores é de anomalia positiva, e um núcleo entre o Ceará e Rio Grande do Norte com valores de aproximadamente 1,6 m/s.

Estas análises sugere que há um favorecimento de anomalia positiva para anos de El Niño forte, devido a circulação de Walker onde os movimentos descendentes inibem a formação de grandes cumulonimbus no NEB (MARTINS, 2008).

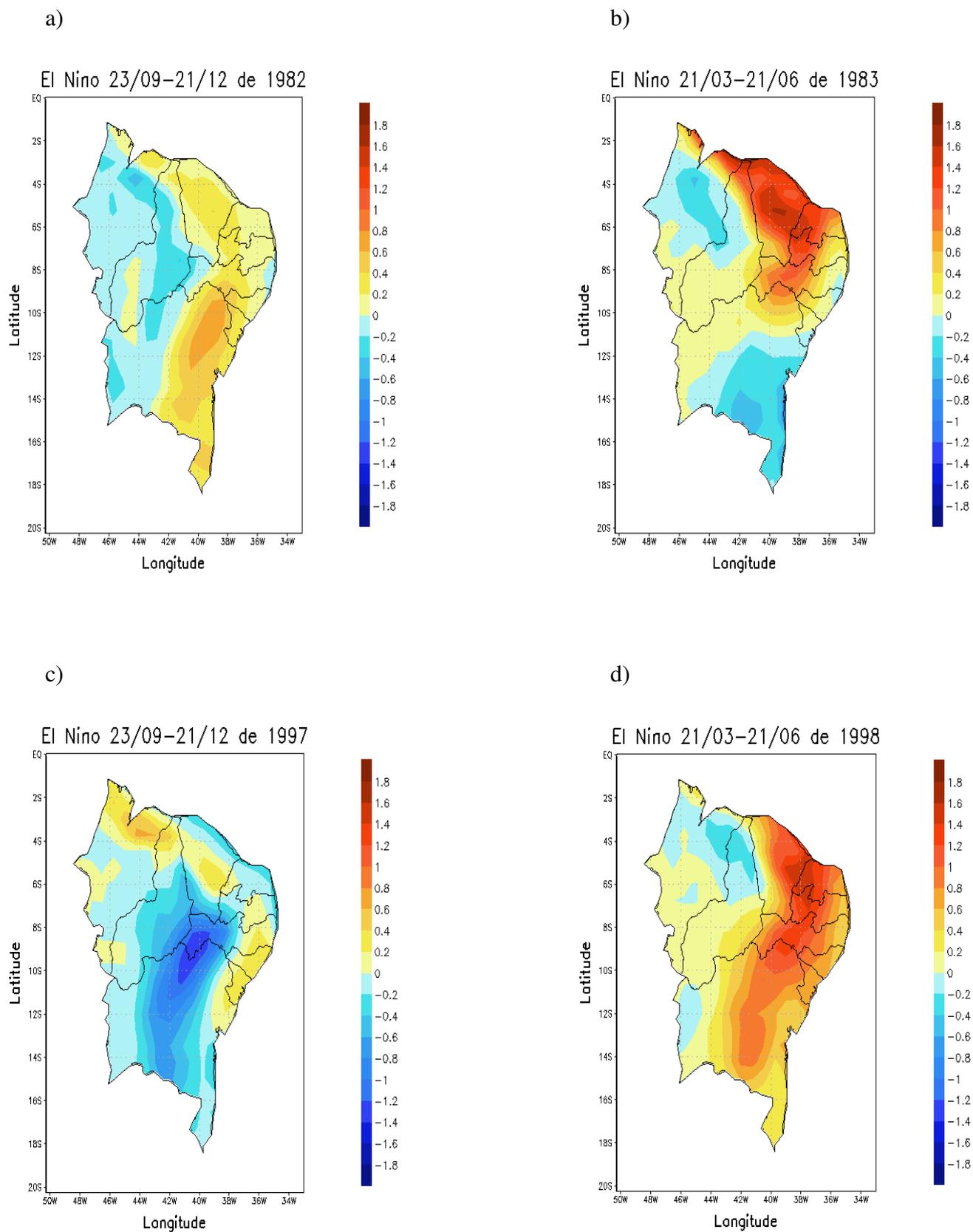


Figura 20. Distribuição espacial da anomalia do vento para anos de El Niño forte: (a) Primavera de 1982; (b) Outono de 1983; (c) Primavera de 1997; (d) Outono de 1998

Na Figura 21a, pode-se observar que todo o NEB está com anomalia negativa, com valores chegando a $-0,8$ m/s no litoral norte da Bahia e parte do litoral Sul de Sergipe. Já para a Figura 21b observa-se valores de anomalia negativa no litoral Norte do Rio Grande do Norte de $-1,3$ m/s, e valores de anomalia positiva em toda parte Sul do NEB e uma pequena região do Sul Piauí chegando a $0,5$ m/s.

Diferentemente do que ocorreu nas Figuras 21a e 21b, as Figuras 21c e 21d mostram anomalias positiva em praticamente todo o NEB, com algumas exceções: Uma na Figura 21c que a anomalia está negativa em praticamente todo o estado do Ceará, sertão do Rio Grande do Norte, Paraíba e uma parte de Pernambuco, com valores de $0,1$ m/s e outra na Figura 21d que a anomalia negativa está em todo o litoral dos estados de Sergipe e Bahia.

Estas análises sugere que há um favorecimento de anomalia negativa para anos de La Niña forte, devido à circulação de Walker onde os movimentos ascendentes favorecem a formação de grandes cumulonimbus no NEB.

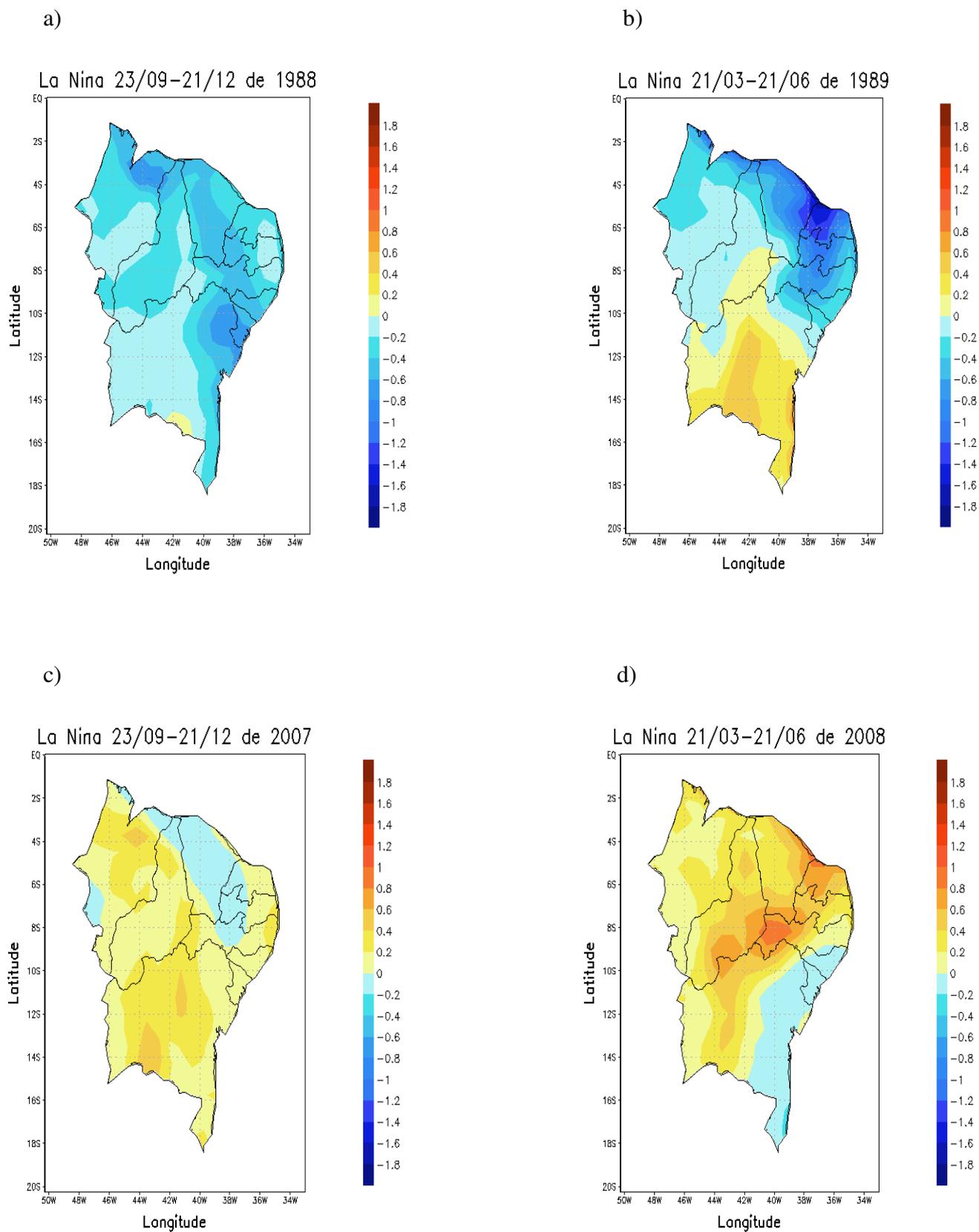


Figura 21. Distribuição espacial da anomalia do vento para anos de La Niña forte: (a) Primavera de 1988; (b) Outono de 1989; (c) Primavera de 2007; Outono de 2008.

4.6 Climatologia da velocidade do vento para o outono e primavera

Na Figura 22a, cujo período é do outono e é nesse período onde chove nessa região, observa-se que a intensidade da velocidade do vento para todo o NEB é menor que na Figura 22b, no qual representa a climatologia do vento para a primavera e é nessa estação que é considerada a seca para o NEB.

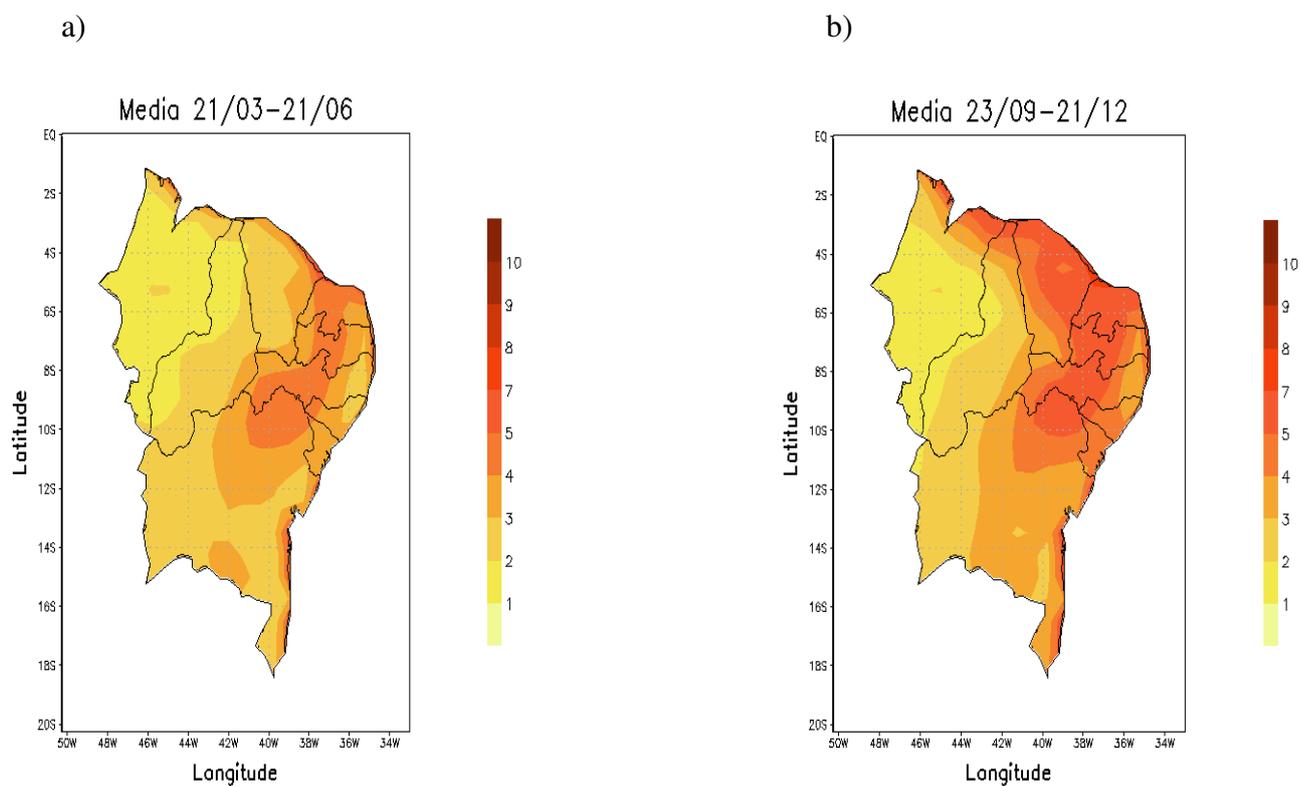


Figura 22. Climatologia do vento para o NEB nas estações do (a) outono; (b) primavera, de 1979 a 2015.

5. CONCLUSÕES

Os dados deste trabalho mostraram que a velocidade média do vento a 10 m de altura do solo teve um bom ajuste entre os dados observados e a reanálise do ECMWF.

1 – Todas as correlações mostraram um nível de significância de 99,99% ($\alpha=0,01$).

2 – A variação da velocidade do vento em relação às estações do ano obteve mínimo no outono e máximo na primavera.

3 – Em anos de La Niña a velocidade do vento é menos intensa que em anos considerados normais. Em anos de El Niño a velocidade do vento é mais intensa que o normal.

5 – Em anos de gradiente positivo a velocidade do vento é mais forte. Em anos de gradiente negativo a velocidade do vento é mais fraca.

Os resultados deste trabalho sugerem estudos futuros na avaliação da potencia eólica do Nordeste do Brasil para 60m e 100m de altura, tendo em vista o bom ajuste entre os dados observados e a reanálise do ECMWF para 10m de altura.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, W. S. ; SOUZA, F. A. S. ; BRITO, J. I. B. ; LIMA, L. M. . Estudo Pluvial no Nordeste do Brasil Utilizando Análise Multivariada. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 03, p. 448-466, 2012.

BRUNI, A.L. **Estatística aplicada à gestão empresarial**. São Paulo: Atlas, 396 p, 2007.

CAMARGO, A. S. G. **Análise da operação das usinas eólicas de Camelinho e Palmas e avaliação do potencial eólico de localidades no Paraná**. 206f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) — Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2005.

CAMELO, H. N. **Estudo Numérico do Vento Aracati para Caracterização de seu Potencial Eólico**. 94f. dissertação (Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas)-Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2007.

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

CARVALHO, D; ROCHA, A; GÓMEZ, G. M; SANTOS, S. C. WRF wind simulation and wind energy production estimates forced by different reanalyses: Comparison with observed data for Portugal. **Article Applied Energy**, V.117, P. 116-126, 2014.

DELECLUSE, P.; SERVAIN, J.; LEVY, C.; LODYC; ARPE, K.; BERGTSSON, L. On the connection between the 1984 Atlantic warm event and the 1982-1983 ENSO. **Tellus**, v. 46A, p. 448-464, 1994.

DGEG, Renováveis: **Estatísticas Rápidas, Direção Geral de Energia e Geologia**. Disponível em: < <http://www.dgeg.pt/>> acesso 15 de dezembro 2014.

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

DOTY, B. **The grid analysis and display system – GrADS**. Norwich, UK: University of East Anglia, 1995. 148p.

FAGBENLE. R.O.; J. KATENDE.; O. O. AJAVI.; J. O. OKENIVI. **Assessment of**

wind energy potential of two sites in North-East, Nigeria. Article Renewable Energy, V. 36, P. 1277-1283, 2011.

GREENPEACE. **Wind force 12: a blueprint to achieve 12% of the world's electricity from wind power by 2020.** London: EWEA, 2004. Disponível em: <http://www.ewea.org/documents/WF12-2004_eng.pdf>. Acesso 31 maio 2005.

GREENPEACE. **Revolução energética a caminho do desenvolvimento limpo,** 2013. Disponível em:> http://www.greenpeace.org/brasil/Global/brasil/image/2013/Agosto/Revolucao_Energetica.pdf>. Acesso 02 de junho 2015.

GREENPEACE. **Manifesto pela energia limpa.** Disponível em <www.greenpeace.org/brasil>. Acesso 09 abril 2015.

GUERRINI, I.M. **Fontes Alternativas de Energia,** 2001. Disponível em <http://fisica.cdcc.sc.usp.br/olimpiadas/01/artigo1/fontes_eletrica.html>. Acesso 23 janeiro 2016.

HANDRI D. A; SAAD S. A; MOHAMMAD L. A. Evaluation of wind energy potential and electricity generation at five locations in Jordan. **Sustainable Cities and Society,** V. 15, P. 135-143, 2015.

HERNÁNDEZ, E. Q; SALDAÑA, F. R; RODRÍGUEZ, G. E. R; MANZANO, A. F . Wind energy resource in Northern Mexico. **Renewable and Sustainable Energy Reviews,** V. 32, P. 890-914, 2014.

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

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo demográfico 2010.** 2012. Disponível em:< <http://www.ibge.gov.br/>> . Acesso 10 outubro 2015.

KOUSKY, V. E. Frontal influences on Northeast Brazil. **Monthly Weather Review,** v. 107, p. 1140-1153, 1979.

LIMA, F. J. L; CAVALCANTI, E. P; SOUZA, E. P; SILVA, E. M. Evaluation of the Wind Power in the State of Paraíba Using the Mesoscale Atmospheric Model Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modelling System. ISRN **Renewable**

Energy, v. 2012, p. 1-16, 2012.

LIMA, F.J.L. **Avaliação do potencial eólico no Estado da Paraíba: um estudo observacional e numérico**. 80f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, 2011.

LIMA, L.A.; BEZERRA FILHO, CELSO ROSENDO. **Wind energy assessment and wind farm simulation in Triunfo – Pernambuco, Brazil**. Article Renewable Energy, V. 35, P. 2705-2713, 2010.

ESCALANTE, S. M. A; MÉRIDA, W. Regarding the influence of the Van der Hoven spectrum on wind energy applications in the meteorological mesoscale and microscale. **Renewable Energy**, V. 81, P 286-292, 2015.

MARIA, P.H. S. **Modelagem numérica em alta resolução para previsão de geração de energia eólica no Ceará**. 123f. Dissertação (Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas) – Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2007.

MARTINS, A. C. S. **Relação das anomalias de TSM do pacífico e atlântico tropicais com anomalias de temperatura, umidade e vento para a América do Sul**. 75p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Universidade Federal de Campina Grande, 2008.

MATHIESEN B. V; LUND, H; KARLSSON, K. 100% renewable energy systems, climate mitigation and economic growth. **Applied Energy**. V.88, P.488–501, 2011.

MENEZES,H. E. A. **Influência da Zona de Convergência Secundária do Atlântico Sul Sobre a Ocorrência de Precipitação no Leste do Nordeste Brasileiro**. 103p, Tese (Doutorado em Meteorologia) Universidade Federal de Campina Grande, 2010.

NOBRE, P. **A variabilidade interanual do Atlântico tropical e sua influencia no clima da America do Sul**. *Climanalise* (São José dos Campos), v. on line, p. Especial 10anos, 1996.

OLIVEIRA, S. S. **Análise do potencial eólico do estado da Paraíba utilizando modelos de mesoescala**. 129p, Tese (Doutorado em Meteorologia), Universidade Federal de Campina Grande, 2013.

PAPANASTASIOU, D. K; MELAS, D; LISSARIDIS, I. Study of wind field under sea breeze conditions; an application of WRF. **Article Atmospheric Research**, V. 98, P. 102-117, 2010.

PEREIRA, R. C. G; CAVALCANTI, E. P. Regimes pluviométricos da região Nordeste do Brasil: uma análise dos dados climatológicos de 1961 a 1990 utilizando ACP. **Revista de Geografia**, v. 31, p. 248-257, 2014.

QUAN, P. ; LEEPHAKPREEDA, T. Assessment of wind energy potential for selecting wind turbines: An application to Thailand. **Article Sustainable Energy Technologies and Assessments**, V. 11, Pages 17-26, 2015.

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

ROCHA, P. A. C; SOUSA, R. C; ANDRADE, C. F; SILVA, M. E. V. Comparison of seven numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy generation in the northeast region of Brazil. **Applied Energy**, v. 89, p. 395-400, 2012.

ROULSTON. M. S; KAPLAN, D. T; HARDENBERG, J; SMITH, L. A. Using medium-range weather forecasts to improve the value of wind energy production. **Article Renewable Energy**, V. 28, P. 585-602, 2003.

SILVA, B. B; ALVES, J. J. A; CAVALCANTI, E. P; DANTAS, R. T. Potencial eólico da direção predominante do vento no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n.3, p. 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, p. 189-202, 2004.

SILVA, G. R. **Características de Vento da Região Nordeste: Análise, Modelagem e Aplicações em projetos de Centrais Eólicas**. 141p, Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 2003.

SILVA, P. K. O. **Análise multivariada aplicada ao vento na área costeira do nordeste do Brasil**. 80p, Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Universidade

Federal de Campina Grande, 2011.

SHU, Z. R; LI, Q. S; CHAN, P. W. Statistical analysis of wind characteristics and wind energy potential in Hong Kong. **Article Energy Conversion and Management**, V. 101, P. 644-657, 2015.

SOUZA, E. B. ; ALVES, J. M. B. ; NOBRE, P. . Anomalias de precipitação nos setores norte e leste do nordeste brasileiro em associação aos eventos do padrão de dipolo observados na bacia do atlântico tropical. **Revista Brasileira de Meteorologia**, V. 13, P. 45-55, 1998.

SOUZA, E. B. **Variabilidade Pluviométrica Intrasazonal sobre a Amazônia Oriental e Nordeste Brasileiro durante o outono austral: Mecanismos Atmosféricos de baixa e alta frequência**. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Universidade de São Paulo, 2003.

SULTAN, A; YASSINE, C. Assessment of large-scale wind energy potential in the emerging city of Duqm (Oman). **Article Renewable and Sustainable Energy Reviews**, V. 47, P. 438-447, 2015.

TRENBERTH, K.E. The definition of El Niño. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, n. 12, p. 2771-2777, 1997.

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.

WINDPOWER **monthly news magazine**. [Knebel]: Windpower Monthly, v. 19, 2003.