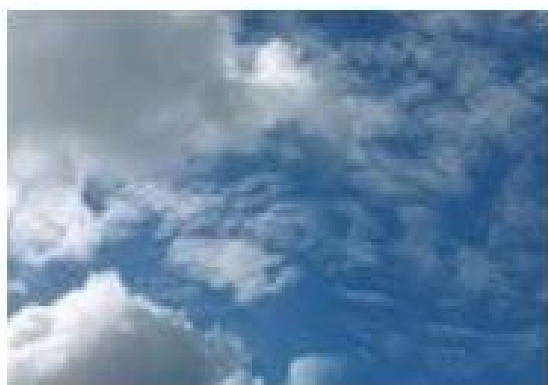


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
METEOROLOGIA**



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Welinagila Grangeiro de Sousa

**Análise da Variabilidade do Vento
no Estado da Paraíba**

Campina Grande, Fevereiro de 2020



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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE DO VENTO
NO ESTADO DA PARAÍBA**

WELINAGILA GRANGEIRO DE SOUSA

ORIENTADOR: MADSON TAVARES SILVA

CAMPINA GRANDE – PB
FEVEREIRO, 2020

WELINAGILA GRANGEIRO DE SOUSA

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE DO VENTO
NO ESTADO DA PARAÍBA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia do Departamento de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Campina Grande, seguindo às exigências para obtenção do Título de Mestre em Meteorologia.

Área de concentração: **Meteorologia de Meso e Grande Escalas**

Subárea: Climatologia

CAMPINA GRANDE – PB

FEVEREIRO, 2020

S725a Sousa, Welinagila Grangeiro de.
 Análise da variabilidade do vento no estado da Paraíba / Welinagila
 Grangeiro de Sousa. - Campina Grande, 2020.
 110 f. : il. color.

 Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de
Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2020.
"Orientação: Prof. Dr. Madson Tavares Silva.
Referências.

 1. Climatologia - Análise Multivariada. 2. Variabilidade da
Velocidade do Vento - Paraíba (Estado). 3. Estimativa da Densidade de
Potência - São João do Cariri-PB. 4. DPE. I. Silva, Madson Tavares. II.
Título.

CDU 551.58(43)

WELINÁGILA GRANGEIRO DE SOUSA

ANÁLISE DA VARIABILIDADE DO VENTO NO ESTADO DA PARAÍBA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 20/02/2020

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. MADSON TAVARES SILVA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



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



Prof. Dr. ROBERTO ALAN FERREIRA ARAÚJO
Departamento de Engenharia Civil
Centro Universitário de Patos

“Só eu sei cada passo por mim dado nessa estrada esburacada que é a vida, passei por coisas que até mesmo Deus duvida, fiquei triste, capiongo, aperreado, porém nunca me senti desmotivado, me agarrava sempre numa mão amiga, e de forças minha alma era munida, pois do céu a voz de Deus dizia assim:

-Suba o queixo, meta os pés, confie em mim, vá pra luta que eu cuido das feridas. ”

Bráulio Bessa

*A minha mãe,
Maria Aparecida (in memorian)
Com AMOR, Dedico.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a **Deus**, pelo seu amor e fortalecimento em todos os momentos de minha vida, não deixando que meus ânimos se abalassem pelas dificuldades;

A minha família e meu namorado pelo apoio e incentivo;

Ao meu Orientador Prof. Dr. Madson Tavares Silva por ter acreditado em mim, por sua dedicação para comigo e pelas oportunidades que vêm me oferecendo, muito obrigada por sua disponibilidade e paciência;

Aos meus Amigos por todo suporte e ajuda, em especial: Lívia, Mariana, Silânia, Fabiana, Monalisa, Gabriella, André, Romero, Kamila e Nikolai;

Ao Prof. Dr. Hugo Morais de Alcântara pela disponibilização dos dados;

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

Ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) pela oportunidade de participar do curso de mestrado;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte Financeiro;

A todos os professores e funcionários da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas;

E a todos que contribuíram direta ou indiretamente na realização deste trabalho. Muito obrigada!

ANÁLISE DA VARIABILIDADE DO VENTO NO ESTADO DA PARAÍBA

RESUMO

Esta pesquisa teve como objetivo investigar o padrão espacial e temporal da variabilidade da velocidade do vento no estado da Paraíba a partir de técnicas de análises multivariadas no período de janeiro de 2000 a dezembro de 2010. Assim como a estimativa da densidade de potência para a localidade de São João do Cariri para o ano de 2007, com intuito analisar as características dessa variável para tal região. Inicialmente avaliaram-se os dados oriundos da reanálises do CFSR com observados do INMET, usados no estudo por meio de métodos estatísticos avaliativos. Onde a reanálise do CFSR mostrou-se representativa quando validadas. O menor coeficiente de determinação foi observado para a localidade de Areia, estando diretamente relacionado aos efeitos orográficos. Observou-se que os menores valores de velocidade do vento sobre a Paraíba decorrem no primeiro semestre, entre o verão e o outono e os maiores valores no segundo semestre, especialmente na primavera. Técnicas multivariadas (Análise Fatorial e Análise de Agrupamento) foram empregadas com o intuito de identificar regiões homogêneas de variabilidade do vento nas microrregiões do estado. Dois fatores foram capazes de explicar quase 100% de toda variância, sendo que o primeiro fator correlacionado com o período de menores velocidades de vento, e o segundo com o período de maiores velocidades. Sete grupos homogêneos de velocidade do vento foram identificados, denotando o interior do estado com os ventos de maiores intensidades quando comparadas as demais regiões. Verificou-se também a variabilidade da velocidade e direção do vento no município de São João do Cariri- Paraíba, assim como extrapolação da mesma para alturas distintas e estimaram-se as densidades de potências eólicas para a região a diferentes níveis. A partir dos resultados obtidos observou-se que os menores valores de velocidade do vento decorrem primordialmente no turno da manhã, e no período chuvoso da localidade, enquanto que os maiores valores se dão a partir das dez horas da manhã seguindo até o início da noite, estando presentes em grandes intensidades nos meses do período seco, para ambos. As direções predominantes foram de sudeste, com variações sazonais durante o período de estudo. O estudo caracterizou o segundo período do ano como o precursor dos maiores valores de densidades de potência eólica disponível.

Palavras-chave: Análise Multivariada. Comportamento. Estimativa. DPE.

WIND VARIABILITY ANALYSIS IN THE STATE OF PARAÍBA

ABSTRACT

This research aimed to investigate the spatial and temporal pattern of the variability of wind speed in the state of Paraíba using multivariate analysis techniques from January 2000 to December 2010. As well as the power density estimate for the locality São João do Cariri for the year 2007, in order to analyze the characteristics of this variable for that region. Initially, the data from the CFSR reanalysis was evaluated with INMET observations, used in the study by means of statistical evaluative methods. Where the CFSR reanalysis was representative when validated. The lowest coefficient of determination was observed for the location of Areia, being directly related to the orographic effects. It was observed that the lowest values of wind speed over Paraíba occur in the first semester, between summer and autumn and the highest values in the second semester, especially in spring. Multivariate techniques (Factor Analysis and Cluster Analysis) were employed in order to identify homogeneous regions of wind variability in the state's micro-regions. Two factors were able to explain almost 100% of all variance, the first being correlated with the period of lower wind speeds, and the second with the period of higher speeds. Seven homogeneous groups of wind speed were identified, denoting the interior of the state with the highest intensity winds when compared to the other regions. The variability of wind speed and direction in the municipality of São João do Cariri- Paraíba was also verified, as well as its extrapolation to different heights and the wind power densities for the region at different levels were estimated. From the results obtained, it was observed that the lowest values of wind speed occur primarily in the morning shift, and in the rainy season of the locality, while the highest values occur from ten o'clock in the morning and continue until the evening, being present in great intensities in the months of the dry period, for both. The predominant directions were southeast, with seasonal variations during the study period. The study characterized the second period of the year as the precursor to the highest values of available wind power densities.

Keywords: Multivariate analysis. Behavior. Estimate. DPE.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1. Fluxograma da dissertação. 27

CAPÍTULO II

Figura 1. Localização do Estado da Paraíba e suas microrregiões. 39

Figura 2. Relevo do estado da Paraíba. 39

Figura 3. Distribuição das estações observacionais (INMET) e pontos de grades (CFSR). 40

Figura 4. Distribuição dos valores médios mensais da velocidade do vento observados (INMET) e estimados (CSFR) para as localidades de Patos (A), Campina Grande (B), Monteiro (C), Areia (D), João Pessoa (E) e São Gonçalo (F) no estado da Paraíba. 50

Figura 5. Variabilidade média mensal da velocidade do vento para o estado da Paraíba no período de janeiro de 2000 a dezembro de 2010. 52

Figura 6. Variabilidade média sazonal da velocidade do vento para o estado da Paraíba no período de janeiro de 2000 a dezembro de 2010. 53

Figura 7. Scree plot - curva de variância de cada fator. 55

Figura 8. Contribuição dos dois fatores, variação temporal. 57

Figura 9. Distribuição das microrregiões relacionadas com os fatores 58

Figura 10. Dendograma decorrente da análise da velocidade do vento para microrregiões do estado da Paraíba no período de janeiro de 2000 a dezembro de 2010. 60

Figura 11. Distribuição espacial dos grupos com base na velocidade do vento na Paraíba. 61

Figura 12. Variabilidade média anual da velocidade do vento no estado da Paraíba. 62

Figura 13. Variabilidade média mensal da velocidade do vento para os grupos. 63

CAPÍTULO III

Figura 1. Localização do Município de São João do Cariri-PB. 75

Figura 2. Variabilidade horária e mensal da velocidade do vento para as alturas de 2, 25 e 50m em São João do Cariri-PB no ano de 2007. 80

Figura 3. Variabilidade horária e mensal da temperatura do ar para as alturas de 2, 25 e 50m em São João do Cariri-PB para o ano de 2007. 81

Figura 4. Variabilidade sazonal da direção do vento para as alturas de 2m (A), 25m (B) e 50m (C) em São João do Cariri-PB para o ano de 2007. 83

Figura 5. Variabilidade da velocidade do vento para as alturas de 100 e 150m em São João do Cariri--PB para o ano de 2007. 85

Figura 6. Densidade de potência (DPE) para a altura de 50m em São João do Cariri-PB no ano de 2007. 87

Figura 7. Densidade de potência (DPE) para a altura de 100 em São João do Cariri-PB no ano de 2007. 88

Figura 8. Densidade de potência (DPE) para a altura de 150 em São João do Cariri-PB no ano de 2007. 89

Figura 9. Distribuição das densidades de frequência para a altura de 100m para a localidade de São João do Cariri-PB no ano de 2007, para o Verão (A), Outono (B), Inverno (C) e Primavera (D). 90

Figura 10. Distribuição das densidades de frequência para a altura de 150m para a localidade de São João do Cariri-PB no ano de 2007, para o Verão (A), Outono (B), Inverno (C) e Primavera (D). 91

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO II

Tabela 1. Padrões usados para avaliar a correlação entre variáveis	44
Tabela 2 - Índices estatísticos obtidos para validação	48
Tabela 3. Teste Kaiser Meyer Olkin – KMO	54
Tabela 4. Variância total explicada pelos fatores antes e após a rotação	56
Tabela 5. Microrregiões com padrões homogêneos de velocidade do vento	59

CAPÍTULO III

Tabela 1. Coeficientes de rugosidade em função do tipo de terreno	78
---	----

LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

AA	Análise de Agrupamento
ABEEOLICA	Associação Brasileira de Energia Eólica do Brasil
ACP	Análise em Componentes Principais
AF	Análise Fatorial
BRAMS	<i>Brazilian Development on the Regional Atmospheric Modeling System</i>
Bsh	Semiárido Quente
CFSR	Climate Forecast System Reanalysis
DPE	Densidade de Potência Eólica
DOL	Distúrbios Ondulatórios de Leste
EM	Erro Médio
EMA	Erro Médio Absoluto
ENOS	El Niño- Oscilação Sul
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
KMO	Kaiser Meyer Olkin
LI	Linha de Instabilidade
MM5	<i>Fifth-Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NCEP	<i>National for Environmental Prediction</i>
NE	Nordeste
NEB	Nordeste Brasileiro
PB	Paraíba
R	R Core Team
r	Coefficiente de Correlação de Pearson
R^2	Coefficiente de Determinação
RMSE	Raiz do Erro Quadrático Médio
SONDA	Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais
SJC	São João do Cariri
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool</i>
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
u	Componente Zonal

v	Componente Meridional
VCAN	Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis
WE	<i>Wind Europe</i>
WRF	<i>Weather Reserch and Forecasting System</i>
WWEA	Associação Mundial de Energia Eólica

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	17
1. INTRODUÇÃO	17
2. JUSTIFICATIVA	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1. Vento	20
3.2. Condições Climáticas que Intervêm na Variabilidade do Vento	22
3.3. Recurso Eólico no Mundo e no Nordeste	24
3.4. Modelagem e Estudos Observacionais	26
4.OBJETIVOS	28
4.1. Objetivo Geral.....	28
4.2. Objetivos Específicos	28
5. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	29
6. REFERÊNCIAS	31
CAPÍTULO 2	37
1. INTRODUÇÃO	39
2. MATERIAL E MÉTODOS	40
2.1. Área de Estudo	40
2.1.1. Clima e Relevo	41
2.2. Dados Utilizados	43
2.2.1. Dados Observados de Velocidade do Vento Provenientes do INMET	44
2.2.2. Dados De Reanálise da Velocidade do Vento Provenientes do CFSR	44
2.3. Análise Estatística.....	41
2.3.1. Erro Médio	45
2.3.2. Erro Médio Absoluto.....	42
2.3.3. Raiz do Erro Médio Quadrático.....	42
2.3.4. Coeficiente de Correlação.....	46
2.3.5. Análise Multivariada	47
2.3.6. Análise Fatorial (AF).....	47
2.3.7. Análise de Agrupamento (AA)	49
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
3.1. Validação	51
3.2. Variabilidade da Velocidade do Vento	54
3.3. Análise Fatorial.....	57

3.4. Análise de Agrupamento	59
4. CONCLUSÕES	67
5. REFERÊNCIAS	67
CAPÍTULO 3	74
1. INTRODUÇÃO	76
2. MATERIAL E MÉTODOS	77
2.1. Área de Estudo	77
2.1.1. Clima e Relevo	78
2.2. Dados Utilizados	79
2.3. Métodos	80
2.3.1. Processamento de Dados	80
2.3.2. Análise descritiva	80
2.3.3. Estimativa da Velocidade	80
2.3.4. Potência Eólica Disponível no Vento	78
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	79
3.1. Variabilidade e Temperatura do Vento a 2, 25 e 50m de Altura	79
3.2. Análise Sazonal da Direção do Vento	82
3.3. Estimativas das Velocidades do Vento a 100 e 150m de Altura	87
3.4. Estimativas das Densidades de Potências a 100 e 150m de Altura	89
4. CONCLUSÕES	91
5. REFERÊNCIAS	952
CAPÍTULO 4	98
CONSIDERAÇÕES FINAIS	98
ANEXO I	100

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

O vento é um elemento do clima gerado pelo movimento de massas de ar na atmosfera, o qual se dá por meio das diferenças de temperatura e dos gradientes de pressão entre regiões diferentes do planeta (SANTOS, 2010). Todavia, a dinâmica das massas de ar é diretamente influenciada pelo movimento de rotação da Terra (AYOADE, 2010). Evidencia-se que para a descrição do vento são essenciais dois dados: velocidade e direção, fato este que o diferencia das demais grandezas escalares (MARIN et al., 2008).

O vento é de suma importância para a climatologia em diferentes níveis, tornando-se assim a variável meteorológica de maior relevância exigindo uma maior carga de estudo voltada a sua compreensão (MARIN et al., 2008). O estudo da variabilidade do vento é muito significativo na elaboração de projetos de diversificadas áreas como arquitetura, hidrologia, agricultura, meio ambiente e energia. No contexto energético, a compreensão do seu comportamento se torna um dos maiores desafios, já que a produção eólica é dependente da sua velocidade, uma variável que não pode ser controlada e que tem grande variabilidade devido a diversos fatores, (SILVA, 2017).

Identificam-se os ventos de acordo com sua localização e a situação em que ocorrem em escala global, como exemplo, a região equatorial abrange todo o cinturão terrestre onde estão os ventos alísios provenientes da convergência de ventos advindos do hemisfério norte com os originados no hemisfério sul (MENDONÇA; DANIO-OLIVEIRA, 2007). O vento conseqüentemente está relacionado localmente à circulação de mesoescala, como sistemas de brisa marítima e terrestre, os quais se dão conforme diferença de temperatura assim como forçantes topográficas (OLIVEIRA; COSTA, 2011).

Cada lugar dispõe de fatores próprios, os quais condicionam a probabilidade e intensidade da velocidade do vento, sendo maior ou menor, tendo em vista que mesmo em um intervalo curto de tempo, não há constância em direção e velocidade. Tomando zonas urbanas como exemplo, pode-se perceber que o modelo de deslocamento das massas de ar, através do efeito do vento, no interior do tecido urbano é uma associação entre séries de fluxos rotacionais e não rotacionais, ascendentes e descendentes, de difícil interpretação e reprodução (ROMERO, 2000).

Segundo Campanhoni (2011) uma peculiaridade de grande importância no deslocamento de massas de ar é a rugosidade do terreno, em decorrência de perda de energia por atrito. Tendo em vista que quanto mais rugosidade maior será o atrito e conseqüentemente menor a velocidade do vento, principalmente na superfície, aumentando a turbulência de seu fluxo.

A geração de energia eólica tem sido um dos grandiosos benefícios diretos que os ventos podem trazer a uma região, particularmente as que não dispõem de rede elétrica, devido à suas propriedades renováveis, pouco poluentes e de baixo custo, quando comparada a outras fontes de energia renovável, com isso a detecção dos regimes de ventos e sua distribuição espacial vêm ganhando espaço (MENDONÇA et al., 2017).

O conhecimento das características sobre a variabilidade espacial e temporal é indispensável num projeto eólico, associados com relevo, aquecimento radiativo, densidade do ar, entre outras particularidades superficiais. A ausência dessas observações em questões, relativas ao vento, pode afetar um projeto de energia eólica. (VIANELLO; ALVES, 2004; LOPEZ, 2012).

No cenário nacional, em algumas regiões como a Nordeste, o vento possui sazonalidade complementar ao ciclo hídrico. Nos meses de maior precipitação os ventos são menos incidentes, em contrapartida nos meses de maior seca os ventos apontam maior intensidade (LIMA; CARVALHO, 2016). A Paraíba, por mais que não esteja entre os maiores geradores de energia eólica, é o maior em empreendimento motivado por fatores geográficos e sazonais (ABEEOLICA, 2016).

O ciclo climático sazonal do vento na região Nordeste do Brasil é marcado em virtude da atuação de sistemas meteorológicos, entre os quais, está o posicionamento da Zona de Convergência Intertropical – ZCIT (VALENÇA, 2010). Na Paraíba, entre os principais sistemas meteorológicos atuantes, além da ZCIT, estão: as Brisas Marítima (Terrestre), Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL), Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) e Linhas de Instabilidade (FERREIRA; MELLO, 2005).

A compreensão da dinâmica dos ventos e a probabilidade de sua ocorrência são primordiais, tendo em vista que interferem na vida cotidiana e dispõe de diferentes aplicações, cujo entendimento do comportamento permite avaliar melhor ações e decisões tomadas (BARROS et al., 2013).

O estudo de diversos fenômenos envolve a análise simultânea de inúmeras variáveis, com isso se faz necessária uma compreensão geral a respeito da relação

existente entre tais variáveis, fato este que pode ser alcançado por meio de técnicas estatísticas (SILVA et al., 2014).

Ademais, o estudo dos ventos pode ser aplicado para diversos tipos de planejamento, inclusive o urbano, em decorrência da dinâmica de circulação atmosférica dentro das cidades demonstrarem grande eventualidade de mudanças durante o processo de ocupação do solo (TOMASINI, 2011). O mesmo autor afirma que independentemente de o vento ser um parâmetro de grande relevância em uma determinada área, a rede observacional ainda deixa a desejar, em relação à forma adequada de medição, sobre estudos de circulação de pequena escala, como na camada interurbana.

Romero (2000) destaca que o vento é um elemento meteorológico que apresenta grande variabilidade, contudo, o comportamento do mesmo a longo e curto prazo focados na sua variabilidade, é muito relevante quando se diz respeito ao seu aproveitamento.

Por ser inconstante, o uso do vento para fins energéticos ainda deve ser visto como complemento. Mesmo onde o vento é mais constante, a exemplo da Paraíba, é essencial considerar as intempéries da natureza, ou seja, a possibilidade de o vento cessar a qualquer momento (FABRES, 2016). Deste modo, é evidente a importância de estudos voltados à velocidade do vento para áreas nas quais a demanda e a oferta de energia vêm crescendo (SILVA, 2017).

Diante disso, surgiu interesse nos estudos com pauta na análise da variabilidade do comportamento, intensidade, direção e densidade de potência do vento no estado da Paraíba, caracterizando o vento para distintas regiões, possibilitando o conhecimento e compreensão da conduta do mesmo dentro do estado.

2. JUSTIFICATIVA

O vento é uma ferramenta que colabora para melhoria das ações da natureza humana, o qual vem adquirido importância econômica como fonte de recurso energético, despertando o interesse de vários países, em virtude da elevada expansão desse tipo de fonte renovável, tanto no contexto nacional quanto mundial.

A disposição geográfica do Nordeste brasileiro é favorecida com a intensidade e constância dos ventos, acarretando em condições propícias para a exploração desse recurso, onde a maior velocidade desse elemento meteorológico é durante o período de menor disponibilidade hídrica (OLIVEIRA; COSTA, 2011). Castro et al. (2010) e

Rampinelli e Rosa Júnior (2012) discutem esse cenário destacando a complementaridade na Região Nordeste como sendo a mais favorável do Brasil, já que os ventos são mais fortes no segundo semestre do ano, isto é, na época de baixa disponibilidade hídrica.

Dentro da região Nordeste destaca-se o estado da Paraíba, o qual está sob a influência direta dos ventos alísios. No entanto se faz necessário o estudo detalhado a respeito da variabilidade da velocidade do vento a fim de identificar regiões propícias ao uso dessa variável, muito embora o vento na região possua um ciclo anual bem definido, está sujeito a interferências de fenômenos meteorológicos (OLIVEIRA; SOUZA 2018).

Todavia no Estado da Paraíba, a demanda de projetos e estudos voltados ao vento, principalmente no que diz respeito a sua variabilidade vem aumentando. Assim, a fim de se buscar entender o comportamento do vento na região paraibana, com intuito de corroborar para o seu aproveitamento, é que se propõe e justificasse o trabalho.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Vento

O vento, dentre diversas definições existentes, pode ser definido como massa de ar em movimento devido ao aquecimento e arrefecimento da superfície terrestre e diferença de pressão, desloca-se da alta para baixa pressão provocando o movimento horizontal do ar. Para equilibrar essas diferenças de pressão o ar desloca-se de uma alta pressão em direção a uma baixa pressão, dando origem ao vento (LYRA et al., 2016).

A radiação solar provoca um aquecimento diferencial de porções de ar, criando os gradientes de pressão, geradores dos ventos que ocorrem tanto em escala local quanto global. Quando as massas de ar se deslocam próximas de uma superfície, elas têm a sua velocidade diminuída devido ao atrito com a superfície rugosa e uma camada limite na superfície é criada (RAMOS, 2011).

Segundo Molion e Bernardo (2002) o vento é resultante de variações de gradiente horizontais de pressão atmosférica produzido em várias escalas espaciais, é uma das variáveis meteorológicas mais relevantes, pois é responsável pelo transporte horizontal (advecção) de calor latente e de calor sensível.

Os ventos que sopram em distintas escalas são influenciados por diferentes aspectos, dentre os quais se destacam a variação de velocidade com a altura, a

rugosidade do terreno, caracterizada pela vegetação, utilização da terra e construções, presença de obstáculos nas redondezas, relevo que pode causar efeito de aceleração ou desaceleração no escoamento do ar e maior turbulência (BRAZ et al., 2017).

Os ventos em grande parte são expressos de acordo com a sua força e a direção e, sofre o efeito Coriolis defletindo-se para esquerda no hemisfério Sul, e para direita no hemisfério Norte, originando os ventos predominantes em cada faixa de latitude, exceto na linha do equador (SANTOS et al., 2012).

Em torno do Equador existem zonas de baixa pressão, de origem principalmente térmica, ou seja, com balanço de radiação solar positivo, e em torno da latitude de 60° ao sul e ao norte do equador, que são condicionadas ao movimento de rotação da terra, provocando um turbilhão polar. Nos pólos ocorrem as zonas de alta pressão, também de origem térmica, porém com balanço de radiação solar negativo, e nas latitudes de 30° em ambos os hemisférios em virtude do acúmulo de ar das correntes destinadas os polos (AYOADE, 2003).

Os ventos podem ser chamados de planetários ou constantes, aqueles que não cessam, sendo eles (AYOADE, 2003):

- Alísios: ocorrem em baixas altitudes soprando dos trópicos para o Equador.
- Ventos do Oeste: sopram dos trópicos para os pólos.
- Polares: ventos frios que sopram dos pólos para as zonas temperadas.

Juntamente aos ventos constantes há também os de origem sazonal, a exemplo dos ventos de monções ou ventos continentais atrelados às estações do ano variando suas direções e intensidades. Existem ainda as brisas em função das diferentes capacidades de refletir, absorver e emitir o calor recebido do sol inerentes à cada tipo de superfície (tais como mares e continentes, estas caracterizam-se por serem ventos periódicos que sopram do mar para o continente e vice-versa. Por fim há ventos locais devido a mecanismos específicos de diferenciais de pressão, sendo o mais conhecido deles os ventos de altitude em montanhas e vales (DUTRA, 2008).

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

3.2. Condições Climáticas que Intervêm na Variabilidade do Vento

As variações na velocidade e direção do vento, a densidade do ar, a topografia e rugosidade do terreno precisam ser levadas em conta para fins de geração de energia eólica. O vento usado para fins energéticos é aquele próximo à superfície terrestre, que conseqüentemente está relacionado localmente à circulação de mesoescala, como sistemas de brisa marítima e terrestre e a forçantes topográficas (OLIVEIRA; COSTA, 2011). Os ventos alísios favorecem significativamente para o aumento e mudança na direção dos ventos locais, quando acoplado aos sistemas de brisas marítimo-terrestres na região do Nordeste (VALENÇA, 2010).

As brisas intervêm no comportamento do vento, uma vez que, quanto menor a umidade assim como os índices de vegetação, menor será o atrito dos ventos e conseqüentemente maior será a velocidade, podendo gerar ventos médios anuais entre 6 e 9 m/s no litoral da região. Assim sendo, a velocidade do vento decai ao passo que se afasta da costa para o interior, em consequência do aumento do atrito e rugosidade de superfície e ao enfraquecimento da contribuição das brisas marinhas (AMARANTE et al., 2001).

A diversidade de parâmetros meteorológicos é instruída pela influência de sistemas meteorológicos predominantes e suas atuações durante o ano na região, e as peculiaridades locais da camada limite, que propiciam em particular à circulação dos ventos algumas características diferenciadas (LIRA et al., 2011).

O ciclo climático sazonal do vento na região Nordeste do Brasil é marcado em virtude da atuação de sistemas meteorológicos. Ocasionalmente, no período que compreende os meses de novembro a janeiro, a incursão advinda de sistemas frontais, por meio do desprendimento dos subtópicos da América do Sul seguindo para setor centro-sul do Nordeste estimulando a precipitação nessa região, visa condicionar ventos soprando com predominância de sudoeste para nordeste e em algumas circunstâncias de sul para o norte (FERREIRA; MELLO, 2005).

O NE sofre a intervenção de sistemas de escala planetária ou macroescala como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que designa particularidades ao clima de grandes áreas. Bem como, os sistemas de mesoescala que fazem menção aos fenômenos locais como as linhas de instabilidade e, os sistemas de microescalas (FERREIRA; MELLO, 2005). As diversas atuações nos sistemas cometidas pelo relevo continental, radiação solar, ação periódica irregular das massas de ar polares, extensa faixa litorânea,

dentre outros, são pormenores que cooperam para a biodiversidade que está intrinsecamente concernente à variabilidade do vento na região (OLIVEIRA; COSTA, 2011; AMARANTE et al., 2001).

A ZCIT consiste em um sistema meteorológico muito significativo, localizada em torno do Equador intervindo diretamente no clima do Nordeste brasileiro. A posição e a intensidade da ZCIT são dominadas por padrões de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) sobre a bacia do oceano Atlântico, afetada por anomalias climáticas como o dipolo de TSM no oceano Atlântico, o El Niño e a La Niña, que modificam a circulação atmosférica impactando os ventos alísios e, por conseguinte a sua velocidade no clima regional e global (OLIVEIRA, 1999; FERREIRA; MELLO, 2005).

Por meio de investigação sobre os efeitos das anomalias *El Niño* e *La Niña* na região Nordeste do Brasil, tomada por ventos alísios de Sudeste, apontou-se que o *El Niño* tem resultância positiva sobre a velocidade do vento para os dados analisados que envolvem o período de 1982 a 2012. Além de, identificar maior distinção de velocidade de vento no mês de abril. Para o mês de setembro durante os anos de *El Niño* a intensidade dos ventos alísios diminui, ao contrário da *La Niña* que contribui na intensidade dos ventos alísios (LIMA et al., 2014). Características similares também foram detectadas em um estudo da velocidade do vento em quatro áreas aeroportuárias distintas nos Estados Unidos (HARPER et al., 2007).

Outro fator significativo é a contribuição da ZCIT no incremento das Linhas de Instabilidade (LI) formadas na costa Norte do NE, com destaque nos meses de fevereiro e março. A LI é fomentada através do alto índice de radiação solar sobre os trópicos formando nuvens alinhadas que se deslocam uniformemente e, provoca um aumento da velocidade do vento. De modo geral, após sua passagem os ventos são mais rápidos (MEDEIROS, 2016).

As frentes frias também são sistemas que atuam acarretando variações no clima do NE formando nuvens em zonas de confluência entre massas de ar fria e quente, constituindo o segundo principal mecanismo da produção de chuvas no Nordeste Brasileiro (FERREIRA; MELLO, 2005). Medeiros (2016) relata que a atuação dos Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) ocorre de forma muito irregular e, conforme seu posicionamento pode produzir tanto chuvas intensas como estiagens em qualquer área do NEB ou até mesmo em toda a região.

A velocidade do vento é também influenciada pela hora do dia como consequência do balanço de radiação solar junto à superfície terrestre. Por efeito do

balanço positivo de radiação, a velocidade do vento aumenta juntamente com os valores do balanço, onde os dois atingem concomitantemente valores máximos. A maior velocidade do vento é no período da tarde quando há maior saldo de radiação (TUBELIS; NASCIMENTO, 1984).

3.3. Recurso Eólico no Mundo e no Nordeste

O vento é apontado como uma fonte renovável de energia e o seu proveito se dão mediante conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, com o emprego de turbinas eólicas para a geração de eletricidade ou cata-ventos e moinhos para tarefas mecânicas como bombeamento d'água (GORAYEB; BRANNSTROM, 2016). O autor ainda afirma que equiparada a outras matrizes energéticas renováveis a energia eólica é uma das que menos impacta ambientalmente, em virtude de ser limpa em termos tecnológicos e compatível para a geração elétrica em grande escala.

O aproveitamento da energia do vento iniciou por meio do transporte marítimo, com embarcações movidas à vela, há milhares de anos (JABBER, 2013). Em 1976, na Dinamarca foi instalada a primeira turbina eólica comercial conectada a rede elétrica pública, estando a Europa na vanguarda do desenvolvimento tecnológico (ANEEL, 2005). Segundo dados da WE (Wind Europe), no ano de 2015 a demanda de eletricidade de toda a Europa ultrapassou a energia hídrica como fonte de geração de energia no continente, com 15,6% da capacidade total de energia.

No domínio global, estudos advindos da Associação Mundial de Energia Eólica (WWEA) evidenciaram que em 2011 a energia eólica não ultrapassara 1% do total gerado por todas as fontes e que, no entanto, após quatro anos, em 2015, essa percentagem atingira 3%. Nos últimos dez anos a capacidade instalada em energia eólica no planeta vem crescendo 27% ao ano, onde a China é o maior produtor de energia eólica, seguida pelos Estados Unidos, Alemanha e Espanha (VIANA et al., 2015).

A âmbito mundial, o Brasil se sobressai por ter sua matriz de geração de energia elétrica fortemente respaldada em fontes renováveis, com predominância da hidroeletricidade e da biomassa oriunda da cana-de-açúcar. Além dessas, outras fontes renováveis integram a matriz de geração elétrica do país, a exemplo da energia eólica, incorporada recentemente (BEZERRA, 2018).

No cenário nacional mediante pesquisas e dados técnicos demonstrou-se que o regime eólico tem significativa predominância no Brasil, em especial, em algumas regiões como a Nordeste que possui sazonalidade complementar ao ciclo hídrico. Encontra-se, aí, uma particularidade relevante para uma energia que anseia complementar a base hídrica de produção de energia, potencializando-se os benefícios da geração de energia de base eólica e hidráulica conjugada (LIMA; CARVALHO, 2016).

Os estados precursores na quantificação e observação dos ventos, para fins energéticos na década de 90, foram o Ceará e Pernambuco (Fernando de Noronha), onde se deu a instalações dos primeiros anemômetros capazes de obter a velocidade do vento, para que posteriores estimativas do potencial eólico e instalações dos primeiros aerogeradores do Brasil. A Paraíba mesmo não sendo uma das maiores em produção de energia é a maior em empreendimento de geração de energia eólica decorrentes de fatores geográficos e sazonais (ABEEOLICA, 2016). Dos 495 empreendimentos eólicos em funcionamento no país até julho de 2017, cerca de 80% localizam-se no NEB (ANEEL, 2017).

No ano de 2003 a produção de energia eólica no país ganhou pulso após a implantação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (PROINFA- Lei nº 10.438/2002), iniciativa governamental destinada a diversificar a matriz energética nacional e fomentar o mercado interno para o uso dessa fonte (ANEEL, 2005). De início os efeitos desse sistema deixaram a desejar no que diz respeito à capacidade instalada denotando resultados expressivos a partir de 2009, quando foi realizado o primeiro leilão exclusivo de energia eólica. Posteriormente, em 2010, as competições das fontes renováveis se deram respectivamente através de leilões e, em 2011, inseriu-se as termelétricas a gás natural entre projetos competitivos (MOREIRA, 2012).

O crescente aumento da demanda por essa fonte energética no Brasil tem gerado novos desafios tecnológicos e científicos. Prever o vento se torna um dos maiores desafios impostos pela fonte eólica, já que a produção eólica é dependente da sua velocidade, uma variável que não pode ser controlada e que tem grande variabilidade devido a diversos fatores. Dessa maneira, a produção depende, em parte, da capacidade de geração eólica disponível que pode não ser suficiente para garantir um montante fixo de energia ao sistema elétrico (SILVA, 2017).

Em estudo apoiado pela Associação Brasileira de Energia Eólica do Brasil – ABEEOLICA, os autores Simas e Pacca (2013), consentem que a matriz energética

eólica possa colaborar para o desenvolvimento sustentável do país, sendo considerada mais intensiva em empregos que as demais tecnologias tradicionais a combustíveis fósseis. Contudo, outra vantagem no caso brasileiro é que o uso da mesma pode suprir as necessidades energéticas de populações isoladas, levando em conta que turbinas pequenas são capazes de atender às demandas específicas com menores velocidades de vento (ANEEL, 2005).

O potencial energético do vento é proporcional ao cubo de sua velocidade. Desta forma, as pequenas mudanças de magnitudes em sua velocidade levam a grande variabilidade da geração eólica, podendo a vir a ocorrer em diferentes escalas de tempo, ocasionadas por fenômenos meteorológicos ou climáticos (GASCH; TWELE, 2002).

3.4. Modelagem e Estudos Observacionais

Variadas técnicas a respeito dos padrões de vento vêm sendo estudadas, a fim de oferecer informações, principalmente ao que diz respeito à identificação de diferentes regimes de vento, em termos de constância e variabilidade a curto e longo prazo em determinado local (CAMELO et al., 2017). Sendo assim é essencial a confiabilidade das previsões do vento num local ou região de interesse.

Concomitantemente a modelagem atmosférica traz diversos benefícios para as mais variadas atividades econômicas da sociedade (RAMOS et al.; 2013). O mapeamento de áreas com elevado potencial eólico para a exploração comercial é realizado com o uso de modelos atmosféricos que demandam um investimento relativamente baixo (MARTINS et al., 2008; COSTA, 2013).

Na Espanha Jiménez et al. (2008) empregaram a análise multivariada para caracterizar a variabilidade do vento em terreno acidentado observando que ambas as técnicas, ACP e AA, geraram resultados semelhantes detectando padrões nas componentes zonal (u) e meridional (v) do vento de acordo com as características do terreno.

Nos Estados Unidos, Klink (1999) analisou os dados médios de vento do período entre 1961 e 1990 cujo objetivo era obter informações que pudessem ser atribuídas à climatologia de superfície do país. Assim como Jiménez et al. (2008), a autora aponta que a topografia desempenha grande influência no comportamento do vento e alertando para as variações de direção do vento, que são maiores nas estações de transição da primavera e outono.

Por meio das técnicas da ACP e AA, Oliveira Silva et al. (2011) investigou as características do vento na área costeira do Nordeste do Brasil. As técnicas multivariadas identificaram regiões homogêneas e padrões sazonais do vento à superfície, além de meses com características distintas. Em estudo semelhante, Oliveira Silva et al. (2011) evidenciaram regiões homogêneas de vento caracterizadas por velocidades máximas e mínimas, e uma região com padrão de direção diferente das demais.

Silva (2017) investigou a variabilidade interanual e sazonal do vento à superfície na área litorânea do Nordeste do Brasil, através de dados horários de vento dos 9 aeroportos das capitais Nordestina entre 2003 e 2009. Por meio da programação Fortran, Análise em Componentes Principais e Análise de Agrupamento, observou-se que o vento de São Luís é o mais distinto dentre as capitais por apresentar direções de Leste-Nordeste, enquanto as demais têm ventos de Leste-Sudeste. Detectou também que nos meses menos chuvosos as intensidades dos ventos são maiores. Além de identificados na análise temporal sazonal três grupos distintos.

Sousa et al. (2019) aplicou a técnica estatística multivariada, análise fatorial (AF), com o objetivo de analisar a variabilidade da velocidade do vento nas microrregiões do estado da Paraíba. Os dados utilizados para constituir o estudo foram de reanálises provenientes do *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) e observados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) compreendendo o período de janeiro 2000 a dezembro de 2010. Os autores relataram que os menores valores de velocidade do vento sobre o estado decorrem no primeiro semestre e os maiores no segundo semestre

De acordo com Sauer et al. (2006) o Brasil dispõe de ótimos sítios para implantação de parques eólicos, respaldando que as melhores áreas se encontram ao longo da costa. Entretanto, indica que no interior, em especial no Nordeste, no qual está inserido o estado da Paraíba, localizam-se sítios com capacidade de geração de energia eólica.

Faria (2010) a fim de estimar a Densidade de Potência Eólica (DPE) para a região nordeste e investigar as influências ocasionadas pela alteração climática, usou o modelo de mesoescala *Fifth-Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model* (MM5) junto a modelos de microescala, para demonstração de cenários de tempo passado (entre 1980-2000) e futuro (2080-2100). Nas simulações, os valores mais significativos da velocidade do vento, foram observados nas alturas de 80 e 100 metros. Nos cenários

futuros, houve propensão para o aumento do vento. Sendo assim o autor respaldou que a área de estudo indica boa disposição do vento para fins energéticos.

Por meio de análise os autores Lima et al. (2012) verificaram a densidade do potencial eólico em cinco localidades do estado da Paraíba no período de 1978 a 1981, usando dados observacionais de direção e velocidade do vento a 10 m. Através do modelo estatístico Weibull, constatou-se que os menores valores da velocidade do vento ocorreram no período chuvoso e os maiores no período seco, com predominância de leste, com variações de Nordeste e Sudeste

Oliveira (2013) pesquisou o potencial eólico do estado da Paraíba no período de 2007 a 2009 utilizando dados de reanálise do NCEP/NCAR, dando ênfase às regiões em que o comportamento dos ventos são favoráveis a geração de energia, usando do modelo BRAMS (*Brazilian development on the Regional Atmospheric Modeling System*) e WRF (*Weather Research and Forecasting System*). Escolheu os meses de março e setembro em que os ventos se apresentam menos e mais intensos respectivamente, as análises foram elaboradas para 50m, 70m e 100m de altura do solo, os modelos mostraram coerência nos resultados. Verificou-se que no mês de março a Paraíba apresenta magnitude relativamente baixa nas três alturas estudadas, já no mês de setembro os modelos apontaram valores máximos duas vezes maiores.

Favera et al. (2012) com o intuito de verificar a sazonalidade do regime e a DPE do vento para o Rio Grande do Sul, usando dados do Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA) para o período de 2005 a 2011, através da aplicação das funções estatísticas Rayleigh, Weibull e Log Normal, notaram que as maiores DPE encontram-se na Primavera e Inverno.

4.OBJETIVOS

4.1. Objetivo Geral

Investigar o padrão de variabilidade espacial e temporal da velocidade do vento no estado da Paraíba a partir de técnicas de análises multivariadas no período de janeiro de 2000 a dezembro de 2010. Assim como estimativa da densidade de potência eólica para a localidade de São João do Cariri para o ano de 2007.

4.2. Objetivos Específicos

- Validação dos dados de reanálises a partir de dados observados;

- Identificar padrões climatológicos no comportamento da velocidade do vento;
- Detectar regiões homogêneas de vento nas microrregiões do estado da Paraíba, através de técnicas de análise multivariada (análise de agrupamento e análise fatorial);
- Analisar os padrões da velocidade para as alturas de 2, 25 e 50 m a partir de dados do Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA) para a localidade de São João do Cariri;
- Verificar a direção predominante do vento para São João do Cariri, em alturas distintas (2, 25 e 50m);
- Estimar a velocidade do vento para os níveis de 100 e 150m para a região de São João do Cariri;
- Determinar a Densidade Potencia Eólica da região para as alturas de 50, 100 e 150 m.

5. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A devida dissertação será elaborada em forma de quatro capítulos (Figura 1) da seguinte maneira: O **Capítulo I** apresenta a introdução, justificativa e objetivos. O **Capítulo II** apresenta uma análise dos dados provenientes da reanálise do Climate Forecast System Reanalysis (CFSR), validados com os dados observados de seis estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), ambos para o período de 2000 a 2010, verificando a variabilidade da velocidade do vento das microrregiões do estado da Paraíba. O **Capítulo III** por meio dos dados advindos da Bacia Escola e do projeto SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais) para o ano de 2007, os padrões de velocidade do vento para a localidade de São João do Cariri, nas alturas de 2, 25 e 50m a foram analisados, assim como a estimativa da densidade de potência para os níveis de 50, 100 e 150m. No **Capítulo IV** apresenta-se às considerações finais da dissertação. A seguir são apresentadas as publicações que deram origem aos capítulos:

- Capítulo 2 –SO USA, W. G.; SILVA, M.T.; LIMA, S. L.; SIQUEIRA, M. S.; MELO, M. M.M. S.; ANDRADE, A. S. Análise Fatorial Aplicada à Variabilidade do Vento no Estado da Paraíba. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v.9, n.4, p.177-190, 2019.
- Capítulo 2 - SOUSA, W. G.; SILVA, M.T.; LIMA, S. L.; SIQUEIRA, M. S.; ANDRADE, A. S. Análise de Agrupamento Aplicada à Variabilidade do Vento no

Estado da Paraíba. **Anais do I Workshop de Meteorologia e Recursos Naturais**, dezembro de 2019, Campina Grande - CG. 2019.

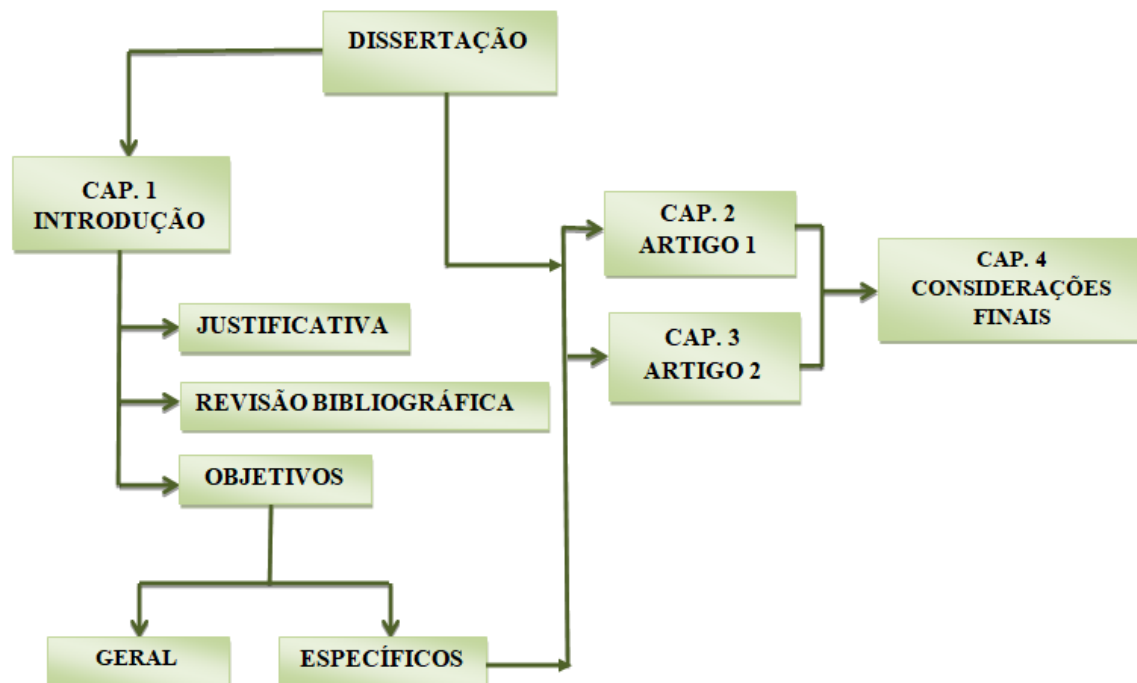


Figura 1. Fluxograma da dissertação.

6. REFERÊNCIAS

ABEEÓLICA. **Associação Brasileira de Energia Eólica**. 2016. Disponível em: <<http://www.abeeolica.org.br/energia-eolica-o-setor/>> Acesso em: 23 de abril de 2019.

AMARANTE, O. A.; BROWER, M.; ZACK, J.; EOLICA, C. S. E.; SOLUTIONS, T. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**, 2001. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br>>. Acesso em: 23 de abril de 2019.

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 2005. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-Energia_Eolica\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-Energia_Eolica(3).pdf) >. Acesso em: 23 de abril de 2019.

ANEEL. **Banco de Informações de Geração: BIG - Capacidade de Geração do Brasil, 2017**. Disponível em:<<http://www2.aneel.gov.br>>.Acesso: 26 Abril 2019.

AYOADE, J. O. **Introdução à Climatologia para os Trópicos**. 13^a Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003.

AYOADE, J. O. **Introdução à Climatologia para os Trópicos**. 4^a Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010.

BARROS, J. D.; FURTADO, M. L. S.; COSTA, A. M. B.; MARINHO, G. S.; SILVA, F. M. Sazonalidade do Vento na Cidade de Natal/RN pela Distribuição de Weibull. **Sociedade e Território**, Natal, v. 25, n.2, p. 78-92, 2013.

BEZERRA, F. D. Energia Eólica Gera Riquezas no Nordeste. **Caderno Setorial ETENE**, v.3, n.40, 2018. Disponível em: < <https://www.bnb.gov.br>>. Acesso em: 24 de abril de 2019.

BRAZ, C. A.; RODIGUES, R. L.; SIQUEIRA, H. V. Geração de Energia Elétrica por Meio de Fontes de Energia Renováveis: Uma Revisão Sistemática. **Gestão Industrial**, v.13, n.1, p. 228-242, 2017.

CAMELO, H. N.; LUCIO, P. S.; JUNIOR, J. B. L.; CARVALHO, P. M. Métodos de Previsão de Séries Temporais e Modelagem Híbrida ambos Aplicados em Médias Mensais de Velocidade do Vento para Regiões do Nordeste do Brasil. **Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 4, p.565-574, 2017.

CAMPANHONI, A. **Implantação dos Edifícios em Águas Claras- DF: Influência no Desempenho Térmico Ambiental dos Espaços Abertos**. 171f. Dissertação - (Mestrado Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de Brasília, 2011.

CASTRO, N. J.; BRANDÃO, R.; DANTAS, G. A. **Considerações Sobre a Ampliação da Geração Complementar ao Parque Hídrico Brasileiro**. Textos de Discussão do Setor Elétrico n.15. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <<http://www.nuca.ie.ufrj.br/gesel/tdse/TDSE15.pdf>>. Acesso em: 09 jul 2019.

COSTA, A. O.; OLIVEIRA, L. B.; LINS, M. P. E.; SILVA, A. C. M.; ARAÚJO, M. S. M.; PEREIRA JR., A. O.; ROSA, L. P. Sustainability Analysis of Biodiesel Production: a Review on Different Resources in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.27, p. 407 - 412, 2013.

DUTRA, R. **Energia Eólica, Princípios e Tecnologias**. Rio de Janeiro: CRESESB, 58p, 2008.

FABRES, E. **Paraíba à Espera de Bons Ventos: Estado tem Produção Interna Inferior a 8%**. 2016. Disponível em :< <https://correiodaparaiba.com.br/geral/paraiba-geral/paraiba-a-espera-de-bons-ventos-estado-tem-producao-interna-inferior-a-8/>>. Acesso em: 05 jul de 2019.

FARIA, B. L. **Modelagem do Potencial Eólico do Nordeste do Brasil Sob Condições Atuais e Dde Aquecimento Global: Uma Interface entre Modelos Numéricos Computacionais de Mesoescala e Microescala**. Dissertação (Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, UFV, Brasil, 2010.

FAVERA, A.C.D.; LUIZ, E.W.; SCHUCH, N.J.; PEREIRA, E.B. Potencial Eólico no Rio Grande do Sul Distribuição Estatística dos Ventos na Região Central do Estado. **Geográfica Acadêmica**, v. 6, n. 1, p. 38-51, 2012.

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. S. Principais Sistemas Atmosféricos Atuantes Sobre a Região Nordeste do Brasil e a Influência dos Oceanos Pacífico e Atlântico no Clima da Região. **Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, 2005.

GASCH, R.; TWELE, J. **Wind Power Plants – Fundamentals, Design, Construction and Operation**. Germany: Earthscan Publications Ltd, 2002. 416 p.

GORAYEB, A.; BRANNSTROM, C. Caminhos para uma Gestão Participativa dos Recursos Energéticos de Matriz Renovável (Parques Eólicos) no Nordeste do Brasil. **Mercator**, v.15, n.1, p. 101-115, 2016.

HARPER, B. R.; KATZ, R. W.; HARRISS, R. C. Statistical Methods for Quantifying the Effect of The el Niño Southern Oscillation on Wind Power in The Northern Great Plains of The United States. **Wind Engineering**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 31, n. 3, p.123–137, 2007.

JABBER, S. Environmental Impacts of Wind Energy. **Journal of Clean Energy Technologies**, v. 1, n. 3, p. 251 – 254, 2013.

JIMÉNEZ, P. A.; GONZÁLEZ-ROUCO, J. F.; MONTÁVEZ, J. P.; NAVARRO, J.; GARCIA-BUSTAMANTE, E.; VALERO, F. Surface Wind Regionalization in Complex Terrain. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 47, p. 308-325, 2008.

KLINK, K. Climatological Mean and Interannual Variance of United States Surface Wind Speed, Direction and Velocity. **International Journal of Climatology**, v. 19, p. 471-488, 1999.

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

LIMA, C. C.; CARVALHO, L. M. O. A Produção de Energia Elétrica, a Exaustão Ambiental da Fonte Hídrica e a Opção Proveniente da Base Eólica Renovável. **Energias Renováveis**, v.5, n.1 p. 65- 90, 2016.

LIMA, C. N. N; FERNANDES, C. A. B. C.; FRANÇA, G. B.; MATOS, G. G. Estimção do Impacto do El Niño/La Niña na Intensidade dos Ventos do Nordeste Brasileiro. In: **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, v. 37, n.2, p. 232-240, 2014.

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.

LIRA, M. A. T.; SILVA, E. M.; ALVES, J. M. B. Estimativa dos Recursos Eólicos no Litoral Cearense Usando a Teoria da Regressão Linear. **Brasileira de Meteorologia**, v.26, n.3, 349 - 366, 2011.

LOPEZ, R. A. **Energia Eólica. Energia e Meio Ambiente**. São Paulo: **Artiliber**. 2012.

LYRA, R. F. F.; Junior, R. S. S.; Moura, M. A. L.; Amorim, M. C. A. L. Prognóstico da Velocidade do Vento Utilizando o Modelo WRF na Região Central de Alagoas. **Ciência e Natura**, v. 38, p. 447- 451, 2016.

MARIN, F. R.; ASSAD, E. D.; PILAU, F. G. **Clima e Ambiente: Introdução à Climatologia para Ciências Ambientais**. Campinas – SP: Embrapa Informática Agropecuária, 2008.

MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B. O Aproveitamento da Energia Eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 1, p. 1 - 13, 2008.

MEDEIROS, R. M. **Análise De Aspectos Climático, Socioeconômico e Ambiental e seus Efeitos na Bacia Hidrográfica do Rio Uruçuí Preto e Entorno**. 171f. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande, 2016.

MENDONÇA, F.; DANI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: Noções Básicas e Climas do Brasil**. São Paulo – SP: Oficina de textos, 2007.

MENDONÇA, I. M.; CASTRO, J. L.; FRACETTI, T. P. Estudos de Viabilidade via Análise Estatística da Velocidade dos Ventos. **Multiverso**, v.2, n.1, p.80-87, 2017.

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. Uma Revisão da Dinâmica das Chuvas no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v. 17, n. 1, p.1-10. 2002

MOREIRA, P. F. **O Setor elétrico Brasileiro e a Sustentabilidade no Século 21: Oportunidades e desafios**. 2 edições, editora international rivers network – Brasil, Brasília, 2012.

OLIVEIRA SILVA, P. K.; SILVA ARAGÃO, M. R.; CORREIA, M. F.; BARBOSA SILVA, A. Detecção de Padrões Homogêneos de Vento. Parte 2: Análise de Agrupamento. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. Especial, ed. Suplementar, p. 347-350, 2011.

OLIVEIRA, G. S. **O el Niño e Você: O Fenômeno Climático**. São José dos Campos, SP, Transtec Editorial, p.116, 1999.

OLIVEIRA, J. L.; COSTA, A. A. Estudo de Variabilidade do Vento em Escala Sazonal sobre o Nordeste Brasileiro Utilizando o Rams: Os Casos de 1973-1974 e 1982-1983. **Brasileira de Meteorologia**, v.26, n.1, p. 53 - 66, 2011.

OLIVEIRA, S. S. **Análise do Potencial Eólico do Estado da Paraíba Utilizando Modelos de Mesoescala**. 129f. Tese (Doutorado em Meteorologia), Universidade Federal de Campina Grande, 2013.

OLIVEIRA, S. S.; SOUZA, E. P. Utilização de Modelos de Mesoescala como Ferramenta Inicial para o Mapeamento Eólico do Estado da Paraíba. **Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 3, p.459-471, 2018.

RAMOS, D. N. S.; LYRA, R. F. DA F.; SILVA JR., R. S. Previsão do Vento Utilizando o Modelo Atmosférico WRF para o Estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 2, p. 163 - 172, 2013.

RAMPINELLI, G. A.; ROSA JÚNIOR, C. G. Análise da Geração Eólica na Matriz Brasileira de Energia Elétrica. **Ciências Exatas e Naturais**, v.14, n.2, p. 273-302, 2012.

ROMERO, M. A. B. **Princípios Bioclimáticos para o Desenho Urbano**. 2 ed. São Paulo: Pro Editores, 2000.

SANTOS, M. O. **Correlações de Longo Alcance em Séries Temporais da Velocidade e da Direção do Vento**. 64f. Dissertação - (Mestrado em Biometria e Estatística) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2010.

SANTOS, M. de O; Stosic, T.; Stosic, B. D. Long-term Correlations in Hourly Wind Speed Records in Pernambuco, Brazil. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 391, n. 4, p. 1546-1552, 2012.

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

SILVA, N. C. N.; FERREIRA, W. L.; CIRILLO, M. A.; SCALON, J. D. O Uso da Análise Fatorial na Descrição e Identificação dos Perfis Característicos de Municípios de Minas Gerais. **Brasileira Biometria**, São Paulo, v.32, n.2, p.201-215, 2014.

SILVA, P. K. O. **Análise e Previsão de Curto Prazo do Vento Através de Modelagem Estatística em Áreas de Potencial Eólico no Nordeste do Brasil**. 168f. Tese - (Doutorado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, 2017.

SIMAS, M.; PACCA, S. Energia Eólica, Geração de Empregos e Desenvolvimento Sustentável. **Estudos Avançados**, v. 27, n. 77, p. 99 – 115, 2013.

SOUSA, W. G.; SILVA, M. T.; LIMA, S. L.; SIQUEIRA, M. S.; MARIA M. M. S. MELO, M. M. M. S.; ANDRADE, A. S. Factory Analysis Applied to Variability Wind in The State of Paraíba. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v.9, n.4, p.177-190, 2019.

TOMASINI, J. **Padrão de Variabilidade do Vento à Superfície, em Lajeado, Rio Grande do Sul, Brasil: Implicações Ambientais**. 59 f. Trabalho Conclusão de Curso - (Engenharia Ambiental) – Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, 2011.

TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F. C. L. **Meteorologia Descritiva: Fundamentos e Aplicações Brasileiras**. 1. ed. São Paulo: Nobel, 1986.

VALENÇA, D. A. A. **Proposição de uma Metodologia para a Avaliação do Aproveitamento da Energia Eólica em Ambiente Urbano**. 130f. Dissertação - (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Pernambuco, 2010.

VIANA, M. B.; TAVARES, W. M.; LIMA, P. C. R. **Sustentabilidade e as Principais Fontes de Energia**, Brasília, 2015. Disponível em: < <http://www2.camara.leg.br>> Acesso em 23 Abril de 2019.

VIANELLO, R.L.; ALVES, A.R. **Meteorologia Básica e Aplicações**. Viçosa: UFV, 3ª edição, p. 255, 2004.

CAPÍTULO 2

ANÁLISE DA VARIABILIDADE DO VENTO NAS MICRORREGIÕES DO ESTADO DA PARAÍBA A PARTIR DE ANÁLISE MULTIVARIADA**RESUMO**

O vento é uma variável meteorológica de suma importância em diversas aplicações. Contudo, se faz necessário uma compreensão detalhada do seu comportamento, a fim de entender os fatores que possam a vir a interferir em sua variabilidade. Neste trabalho técnicas multivariadas (Análise Fatorial e Análise de Agrupamento) foram empregadas com o objetivo de identificar regiões homogêneas de variabilidade do vento nas microrregiões do estado da Paraíba, por meio de dados de reanálises provenientes do *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) validados com dados observados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), ambos compreendendo o período de 2000 a 2010. De acordo com estudo, constatou-se que os menores valores de velocidade do vento sobre a Paraíba decorrem no primeiro semestre e os maiores valores foram obtidos no segundo semestre. Mediante Análise Fatorial (AF), identificaram-se maiores pesos na variação total explicada pelos dois primeiros fatores obtidos após a rotação, representando cerca de 100% da variância total dos dados, cujo primeiro correlacionou-se com o período de menores valores, e o segundo fator com os de maiores valores de velocidade do vento. A Análise de Agrupamento (AA), pelo método Hierárquico, proporcionou o agrupamento das microrregiões em sete grupos homogêneos de velocidade do vento.

Palavras-chave: Identificação. Movimento do Ar. Análise Fatorial. Agrupamento.

ANALYSIS OF WIND VARIABILITY IN THE MICROREGIONS OF THE PARAÍBA STATE FROM MULTIVARIATE ANALYSIS

ABSTRACT

Wind is an extremely important meteorological variable in several applications. However, a detailed understanding of its behavior is necessary in order to understand the factors that may interfere with its variability. In this work, multivariate techniques (Factor Analysis and Cluster Analysis) were employed in order to identify homogeneous regions of wind variability in the microregions of the state of Paraíba, using reanalysis data from the Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) validated with data observed from the National Meteorological Institute (INMET), both covering the period from 2000 to 2010. According to a study, it was found that the lowest values of wind speed over Paraíba occur in the first semester and the highest values were obtained in the second half. Through Factor Analysis (PA), greater weights were identified in the total variation explained by the first two factors obtained after the rotation, representing about 100% of the total variance of the data, the first of which correlated with the period of lower values, and the second factor with the highest wind speed values. Cluster Analysis (AA), using the Hierarchical method, provided the grouping of micro-regions into seven homogeneous groups of wind speed.

Keywords: Identification. Air movement. Factor analysis. Grouping.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento a respeito do vento próximo à superfície terrestre, bem como, nos altos níveis da atmosfera é de grande importância para os mais diversos setores da sociedade, devido sua influência direta no tempo e no clima. Sendo está uma das variáveis meteorológicas mais importantes, porém, pouco estudada, possuindo grande variação tanto em curto quanto em longo prazo (LIRA et al., 2014)

O vento é definido como o movimento horizontal do ar, cujo mecanismo inicial se dá em decorrência da diferença de gradientes de pressão atmosférica existente entre regiões, os quais se deslocam sempre de locais de maiores pressões para os de menores. Essas diferenças de pressão ocorrem por causa da distribuição desigual da radiação solar no globo terrestre, além de outros fatores presentes, como por exemplo, continentalidade, oceano, latitude e altitude (WALLACE; HOBBS, 2006). Para Morais (2013), a variabilidade dos padrões de velocidade dos ventos acontece em escala espacial e temporal sendo regulada pela distribuição sazonal.

Um dos maiores obstáculos relacionados ao estudo de variabilidade do vento é a falta de dados observados. Um banco de dados longo e de qualidade é fundamental para estudos dessa natureza. Uma forma de amenizar esse problema é a utilização de dados de reanálise devido à disponibilidade de informações, atendendo, assim, às necessidades da pesquisa (MARIANO et al., 2017).

Uma quantidade significativa de estudos tem sido realizada a fim de avaliar as características do vento, assim como, o potencial eólico em locais específicos, aplicando, por exemplo, funções estatísticas, a fim de fornecer estimativas confiáveis para tomadores de decisões (SHOAIB et al., 2019).

Oliveira (2013) utilizou alguns índices estatísticos para avaliar os modelos numéricos Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modelling System (BRAMS) e Weather Research and Forecasting System (WRF), como ferramentas para gerar cenários com condições favoráveis de vento no estado da Paraíba no período de 2007 a 2009. Shu et al. (2015) buscaram investigar as características do vento em diferentes localizações em Hong Kong, além de estimar o potencial de energia eólica por meio de análise estatística com a ajuda do modelo de distribuição Weibull.

Silva (2017) analisou a variabilidade do vento no litoral do Ceará e na região do Lago de Sobradinho, através de métodos de previsão de vento em curto prazo, empregando modelos estatísticos lineares e não-lineares. Qing (2018) apresenta uma

análise estatística das características do vento na ilha de Santiago, Chile, utilizando dados históricos de velocidade e dados de potência do parque eólico Santiago em 2014.

Sabe-se que o vento é um elemento meteorológico que apresenta grande importância para as atividades humanas, onde alterações em seu comportamento precisam ser compreendidas, principalmente em áreas nas quais a demanda de seu uso é crescente, a exemplo do estado da Paraíba. Contudo, nenhum estudo foi realizado com a finalidade de caracterizar o vento nas microrregiões paraibanas, auxiliando na identificação e compreensão de mecanismos físicos que influenciam em seu regime.

Nesse contexto, esse estudo tenta prover informações sobre o comportamento mensal, sazonal e anual dessa variável, bem como, avaliar a variabilidade do vento nas microrregiões do estado da Paraíba por meio da aplicação da técnica estatística de análise multivariada (Análise Fatorial e Análise de Agrupamento), com propósito de identificar regiões homogêneas de velocidade utilizando dados de reanálise.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de Estudo

O Estado da Paraíba localiza-se na região Nordeste do Brasil com uma área de 56.372 km², correspondente a 0,66% do território nacional, estando posicionada entre os paralelos 6°02'12" e 8°19'18"S, e entre os meridianos de 34°45'54" e 38°45'45"W. Ao norte, limita-se com o Estado do Rio Grande do Norte; a leste, com o Oceano Atlântico; a oeste, com o Estado do Ceará; e ao sul, com o Estado de Pernambuco (FRANCISCO, 2010). Na Figura 1 é retratada a localização da Paraíba juntamente com suas microrregiões.

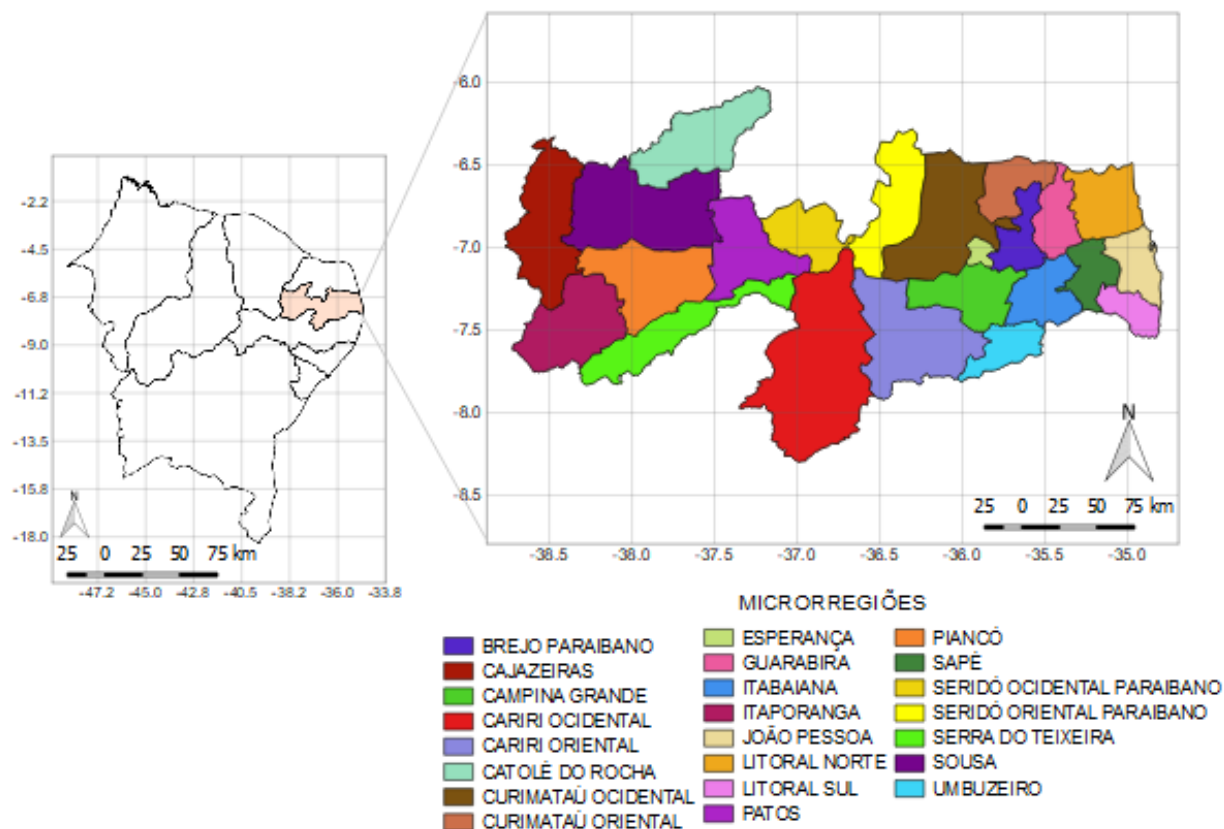


Figura 1. Localização do Estado da Paraíba e suas microrregiões. (Fonte: Adaptado IBGE, 2019).

2.1.1.1. Clima e Relevo

O relevo da Paraíba apresenta-se bastante diversificado em sua forma geral, os quais sofrem distintos processos, atuando sob climas diferentes e sobre rochas pouco ou muito desiguais (PARAIBA, 2006). As características altimétricas do estado foram obtidas por meio do projeto Brasil em Relevo, Figura 2, o qual fornece informações detalhadas do relevo e da topografia, acessível no site da Embrapa.

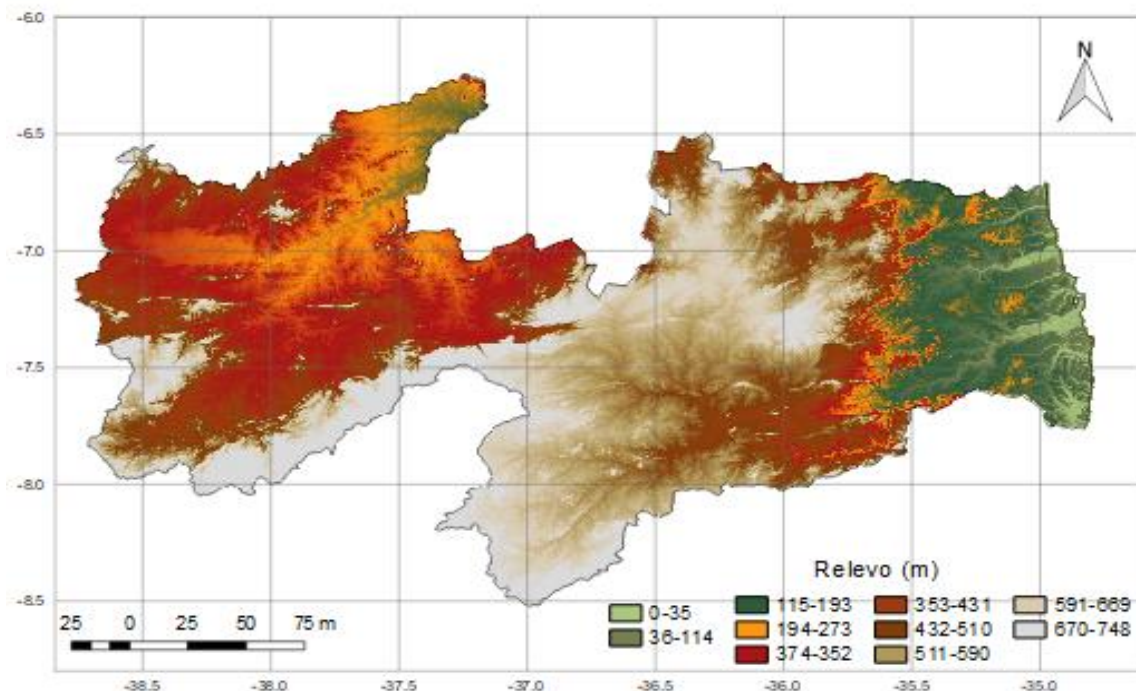


Figura 2. Relevo do estado da Paraíba. (Fonte: Adaptado Brasil em Relevo, 2019).

Situado próximo à linha do Equador, o Estado da Paraíba tem clima quente, com médias de temperatura que variam de 28°C no litoral, 22°C no Planalto da Borborema, chegando a 30°C no interior do Estado. Quanto à geomorfologia, encontram-se dois grupos compostos pelos tipos climáticos mais importantes do Estado: úmido, subúmido e semiárido. São eles: Setor Oriental úmido e subúmido e Setor Ocidental subúmido e semiárido (PARAIBA, 2006).

A cobertura vegetal do estado da Paraíba é bastante variada devido a suas condições ambientais. No litoral ocorrem matas, mangues e cerrados, basicamente constituídos por gramíneas e arbustos, além da floresta Atlântica. Já na região oeste do Estado, área de clima semiárido, a Caatinga é predominante (RODRIGUEZ, 2012).

Na região Nordeste o clima predominante é o semiárido onde a vegetação xerófita abrange cerca de 50% do seu território (BARROS et al., 2012). A caracterização desse clima se dá pelas irregularidades espaciais e temporais do regime de chuvas, com maior ênfase nas mesorregiões do agreste e do sertão. Pesquisas sobre o clima mostram que fenômenos do tipo El Niño - Oscilação Sul (ENOS) e a circulação geral da atmosfera podem ser os responsáveis pela baixa pluviosidade (NOBRE; SHUKLA, 1996).

A complexidade na caracterização climática da região Nordeste ocorre devido domínio dos climas quentes de baixas latitudes, denotando temperaturas médias anuais sempre superiores a 18°C, havendo territórios mais secos, no interior; até mais úmidos, na costa leste da região (SILVA et al., 2008). De acordo com Sales e Ramos (2000), em todo o Nordeste brasileiro assim como no território paraibano, as oscilações de temperatura do ar baseiam-se mais nas condições topográficas locais do que daquelas decorrentes de variações latitudinais.

2.2. Dados Utilizados

Neste estudo foram utilizados dados observados de velocidade do vento obtidos de seis estações observacionais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), assim como dados de reanálises da velocidade do vento do Climate Forecast System Reanalysis (CFSR), ambos para o período de janeiro de 2000 a dezembro de 2010. Na Figura 3 observa-se a distribuição dos pontos de grades para as estações de reanálise, assim como a identificação das estações observacionais inseridas na região da Paraíba, as quais foram usadas para obtenção dos índices de correlação e determinação quando comparadas com os pontos de reanálise próximos.

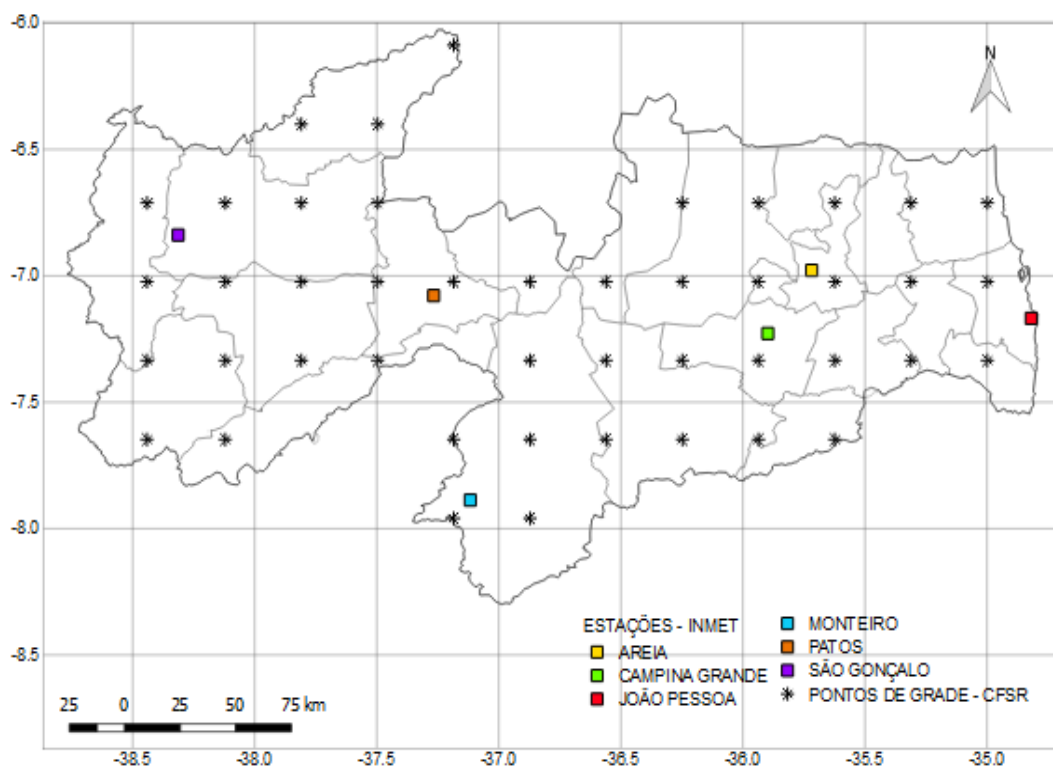


Figura 3. Distribuição das estações observacionais (INMET) e pontos de grades (CFSR).

2.2.1. Dados Observados de Velocidade do Vento Provenientes do INMET

Os dados de velocidade do vento usados neste estudo consistem em registros horários de estações automáticas pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Foram utilizados dados observados a 2m de altura compreendendo o período de janeiro de 2000 a dezembro de 2010 de seis estações meteorológicas, sendo elas: Patos, Areia, Campina Grande, Monteiro, São Gonçalo e João Pessoa, por apresentarem melhor consistência de dados neste período.

2.2.2. Dados de Reanálise da Velocidade do Vento Provenientes do CFSR

Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) é um produto de reanálise pertencente ao National Centers for Environmental Prediction (NCEP) no qual disponibiliza um banco de dados que compreende um período de 36 anos entre 1979 e 2014. Os dados do CFSR possuem resolução vertical e horizontal da atmosfera, apresentando aproximadamente 38 km na horizontal com 64 níveis na vertical e resolução temporal de seis horas (SAHA et al., 2010). Conforme Fuka et al. (2014) embora os dados originais do NCEP-CFSR tenham se baseado em uma etapa de quatro vezes por dia, o site oficial do modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) fornece dados de assimilação diários para aplicação global. No entanto, foram utilizados no estudo dados de velocidade do vento provenientes da reanálise do CFSR a 2m de altura, compreendendo o intervalo de tempo de janeiro 2000 até dezembro 2010.

2.3. Análise Estatística

A análise estatística do trabalho se deu por meio do uso de planilha eletrônica para validação e organização dos dados, assim como do Software R (R Core Team, 2019) para realizar a técnica estatística Multivariada (Análise Fatorial e Análise de Agrupamento).

No que diz respeito à validação foram empregados parâmetros estatísticos, para análise da quantificação dos erros acarretados pelas estimativas, sendo eles o Erro Médio (EM), o Erro Médio Absoluto (EMA) e a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), para análise de confiança se fez uso dos Coeficientes de Determinação (r^2) e Correlação (r) de Pearson.

2.3.1. Erro Médio

O Erro Médio (EM) (Eq. (1)) mede o valor médio de erro de acordo com a diferença entre os valores obtidos nos métodos que se deseja avaliar e os valores do método que se tomou como parâmetro, indicando assim possíveis tendências de subestimativas ou superestimativas do modelo. Este índice é dado nas mesmas dimensões que a variável analisada.

$$EM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i) \quad (1)$$

em que:

O_i é o valor tido como referência para o observado;

S_i é o evento simulado pelo modelo e

N é o número de eventos.

2.3.2. Erro Médio Absoluto

O Erro Médio Absoluto (EMA) estima o valor médio absoluto da diferença entre o simulado e observado de acordo com a Eq. (2), concedendo um valor médio dos erros absolutos. O EMA é apontado como preciso e robusto como medida da habilidade de modelos numéricos em estresir a realidade (FOX, 1981).

$$EMA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |S_i - O_i| \quad (2)$$

em que:

os significados das variáveis são os mesmos da Eq. (1).

2.3.3. Raiz do Erro Médio Quadrático

Fox (1981) relata que a Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE) é a raiz quadrada do erro médio quadrático (MSE). Este parâmetro concede uma medida média da precisão do modelo por meio da raiz quadrada da média do quadrado da diferença entre valores simulados e de referência. Enfatiza que assim como o erro médio quadrático é uma das medidas de diferença ou erro cada vez mais usadas na comparação e avaliação de modelos de simulação, podendo ser usada para substituir os índices

baseados em correlação e tendências e principalmente como medidas para fornecimento de informações de precisão (WILLMOTT, 1985). O RMSE é calculado pela Eq. (3)

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2} \quad (3)$$

em que:

os significados das variáveis são os mesmos da Eq. (2).

2.3.4. Coeficiente de Correlação

De acordo com Aranha (2016), o coeficiente de correlação de Pearson (r) ou coeficiente de correlação mede o grau da correlação linear entre duas variáveis quantitativas. É um índice adimensional com valores situados ente -1,0 e 1,0 inclusive, que reflete a intensidade de uma relação linear entre dois conjuntos de dados, estimado de acordo com a Eq. (4):

O coeficiente de determinação (R^2) é uma medida de ajustamento variável entre 0 e 1, indicando, em percentagem, o quanto o modelo consegue explicar os valores observados. Um ajuste perfeito resulta em $R^2 = 1$, um ajuste muito bom acarreta um valor próximo de 1 e um ajuste fraco ocasiona um valor de R^2 próximo de zero. O coeficiente de determinação se dá através do quadrado do coeficiente de correlação (MARTINS, 2018).

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x}_i)(x_0 - \bar{x}_0)}{\sqrt{[\sum(x_i - \bar{x}_i)^2][\sum(x_0 - \bar{x}_0)^2]}} \quad (4)$$

em que:

x_i representa o valor dos dados estimados e

x_0 representa o valor dos dados observados.

Devore (2006) mostra que a correlação de Pearson pode variar de muito forte a bem fraca de acordo com a Tabela 1:

Tabela 1. Padrões usados para avaliar a correlação entre variáveis.

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

Fonte: Devore, 2006.

2.3.5. Análise Multivariada

Análise multivariada diz respeito a todas as técnicas estatísticas que avaliam simultaneamente várias medições, sendo considerada qualquer análise simultânea de mais de duas variáveis. Contudo essa técnica pode ser utilizada quando há um grande número de atributos a serem analisados, avaliando ao mesmo tempo suas relações e fornecendo informações mais precisas a respeito das variáveis (HAIR et al., 2005).

Esse método possibilita que se faça uma síntese da dimensão de análises com múltiplas respostas, cujo objetivo é simplificar o seu entendimento, visualização e interpretação e ainda reter informações suficientes para uma adequada representação dos resultados. Sendo assim os métodos multivariados são escolhidos mediante os objetivos da pesquisa, destacando-se dois assim dois métodos: a Análise Fatorial (AF) e a Análise de Agrupamento (AA) (NETO, 2004).

2.3.6. Análise Fatorial (AF)

Este tipo de análise tem como princípio constatar fatores não propriamente observáveis, por meio da correlação entre conjuntos de variáveis mensuráveis (CORRAR et al., 2007). O tratamento dos dados mediante essa análise descarta as informações redundantes e separa o sinal de grande escala do ruído associado a cada estação, concedendo uma síntese dos dados, isenta de subjetividade e justificada em um critério estatístico (SCHUNK SILVA; NERY, 2000).

Essa técnica propicia a identificação de dimensões isoladas da estrutura dos dados, e em seguida indica o grau em que cada variável é elucidada por cada dimensão ou fator (MANLY, 2008). A partir da Eq. (5) a composição do modelo de análise fatorial foi estimada.

$$X_i = a_i F + \varepsilon_i \quad (5)$$

em que:

$X = (X_1, X_2, \dots, X_m)$ é um vetor transposto p dimensional de variáveis aleatórias observáveis;

$F = (F_1, F_2, \dots, F_m)$ é um vetor transposto r dimensional com ($r < m$) de variáveis não observáveis ou fatores (ou variáveis latentes);

$\varepsilon_i = (\varepsilon_{i1}, \varepsilon_{i2}, \dots, \varepsilon_{in})$ é um vetor transposto p dimensional de erros aleatórios ou fatores únicos, e

$a_i =$ é a matriz (p, q) de constantes desconhecidas, denominadas cargas fatoriais.

O critério desenvolvido pelo teste Kaiser Meyer Oklin (KMO) foi usado na escolha do número de fatores adequados ao estudo, com base no grau das correlações simples com as correlações parciais de acordo com a Eq. (6) (GARAYALDE et al., 1996).

$$KMO = \frac{\sum_{i \neq j} \sum r_{ij}^2}{\sum_{i \neq j} \sum r_{ij}^2 + \sum_{i \neq j} \sum a_{ij}^2} \quad (6)$$

em que:

$r_{ij}^2 =$ para todo $i \neq j$ é o coeficiente de correlação original entre variáveis;

$a_{ij}^2 =$ é o quadrado dos elementos fora da diagonal da matriz anti-imagem da correlação e este corresponde ao coeficiente de correlação parcial.

Com o objetivo de redistribuir a variância dos primeiros fatores para os demais alcançando um padrão fatorial mais simples e teoricamente mais significativo fez-se uso da técnica de rotação dos fatores a partir do método "Varimax" (HAIR et al., 2005). Sendo necessário aferir se a matriz de correlações é uma matriz identidade e avaliar a provável adequação da análise fatorial. Portanto, foi usado o teste de esfericidade de Bartlett a partir da Eq.(7).

$$X^2 = - \left[n - 1 - \frac{1}{6} (2p + 5) \right] \sum_{i=1}^p \ln \lambda_i \quad (7)$$

em que:

$\lambda_i =$ representa a variância explicada por cada fator;

$n =$ é o número de observações e

$p =$ o número de variáveis envolvidas no processo.

A cumunalidade foi utilizada como critério para validação das variáveis no ajuste do modelo fatorial e foi determinada pela estimativa da variância de X_i explicada através dos fatores comuns e foi determinada seguindo a Eq. (8).

$$h_i^2 = a^2_{i1} + a^2_{i2} + \dots + a^2_{im} \quad (8)$$

Por meio do número de observações que constituem o conjunto de dados analisados torna-se crucial a delimitação ou a seleção das dimensões que venham a descrever com maior grau a variabilidade presente na análise. A técnica de raiz latente como método restritivo para limitar a quantidade de fatores foi usada no devido estudo.

2.3.7. Análise de Agrupamento (AA)

Os mecanismos de análise de dados podem ser divididos em exploratórios ou confirmatórios, fundamentado na disponibilidade de modelos adequados para a fonte de dados, mas um elemento chave em ambos os tipos de procedimentos são os agrupamentos. (JAIN et al. 1999).

Os agrupamentos são um dos métodos de análise de dados mais utilizados para inúmeras aplicações práticas em diversas áreas de pesquisa (AHMAD; STARKEY, 2017). A análise de agrupamentos é uma técnica cuja finalidade é criar grupos (*clusters*) de objetos semelhantes de certo conjunto de entradas (OSIŃSKI, 2005; HÄRDLE; SIMAR, 2007) Esse método reduz a subjetividade, onde os bons clusters têm a característica de que objetos pertencentes ao mesmo cluster são "similares" uns aos outros, enquanto objetos de dois *clusters* diferentes são "dissimilares" (OSIŃSKI, 2005; LIMA, 2015).

Existem diversificados métodos para realizar a análise de agrupamentos, os quais se distinguem pelo tipo de resultado a ser produzido assim como as diferentes formas de definir a proximidade entre um indivíduo e um grupo já formado, ou entre dois grupos quaisquer (LIMA, 2015).

Os métodos de Análise de Agrupamentos podem ser divididos em três grupos básicos, nos quais o primeiro é o dos algoritmos fundamentados em distâncias, o segundo é o dos baseados em distribuições de probabilidades e, por fim, o grupo de algoritmos de agrupamento baseados em densidade (GOLDSCHMIDT et al., 2015).

Outro modo de categorizar os algoritmos de agrupamento é considerar a forma dos agrupamentos gerados, sendo assim os algoritmos podem ser classificados como

agrupamento hierárquico, agrupamento por particionamento, agrupamento baseado em densidade, agrupamento baseado em modelo e agrupamento baseado em grid (FAHAD et al., 2014).

Os métodos de agrupamento hierárquico contribuem com uma série de partições do conjunto de dados com base em processos iterativos, em que seus algoritmos hierárquicos são divididos em duas categorias: métodos aglomerativos e métodos divisivos (PACIFICO; LUDERMIR, 2014).

As regiões homogêneas foram constatadas por meio de uma matriz de dados, organizada da seguinte maneira: as linhas são compostas pelas microrregiões e as colunas pelas médias mensais da velocidade do vento de todo o período.

O método hierárquico aglomerativo de agrupamento foi utilizado no estudo, aplicando-o à matriz de dados utilizando-se o método de Ward, também usado por outros autores em suas pesquisas (LIMA, 2015) com função de agrupamento a Distância Euclidiana que é a soma dos quadrados das diferenças (HAIR et al., 2005).

A medida de dissimilaridade mais utilizada em agrupamentos é a distância euclidiana, mesmo existindo diversas outras medidas. Uma discussão específica de várias medidas de dissimilaridades é retratada em (DURAN; ODELL, 1974). Segundo Wilks (2006) e Bem et al. (2015) esta função é empregada como critério para medir a distância entre dois pontos ou para designar o quanto eles são semelhantes, através da raiz quadrada da soma dos quadrados das diferenças de valores para cada variável, e é calculada de acordo com a Eq. (9):

$$d_{ij} = [X_i - X_j] = \left[\sum_{k=1}^p (X_{i,k} - X_{j,k})^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

em que:

X_{ik} é o valor da variável X_k para o objeto i ;

X_{jk} é o valor da variável X_k para o objeto j e

p variáveis usadas X_1, \dots, X_p

O método de classificação hierárquico de Ward foi utilizado no trabalho, o qual dispõe de uma análise de variância para mensurar a distância entre os grupos (SCHUNK SILVA; NERY, 2000). O método hierárquico de Ward procura por partições que minimizem a perda associada a cada agrupamento (EVERITT, 1974; BUSSAB et al., 1990; MINGOTI, 2005). A perda é calculada mediante diferença entre a soma dos erros

quadráticos de cada padrão e a média da partição em que está contido, conforme Eq. (10):

$$SQD = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \quad (10)$$

em que:

n é o número total de elementos do agrupamento e

x_i é o i -ésimo elemento do agrupamento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Validação

A comparação entre as séries temporais das duas bases de dados compreendendo o período de 2000 e 2010 foi feita para avaliar a concordância entre as estimativas, por meio da obtenção dos parâmetros estatísticos Erro Médio (EM), Erro Médio Absoluto (EMA), Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ), coeficiente de determinação (r^2) e correlação (r).

Os valores para os índices estatísticos calculados podem ser observados na Tabela 2. Com relação ao EM observou-se que os resultados para este índice são predominantemente positivos com exceção de Campina Grande, negativo, expressando a tendência do modelo do CFSR em subestimar os valores observados do INMET, com variações do EM entre -0,40 (Campina Grande) e 1,56 (São Gonçalo). Os resultados para a REMQ dos dados variaram entre 0,50 (Campina Grande) e 1,60 (São Gonçalo).

Tabela 2 - Índices estatísticos obtidos para validação

Localidades	EM	EMA	REMQ	r	r^2
Patos	0,88	0,74	1,03	0,94	0,89
Campina Grande	-0,40	0,44	0,50	0,88	0,77
Monteiro	0,87	0,89	0,97	0,88	0,78
Areia	0,37	1,06	1,29	0,79	0,63
João Pessoa	0,53	0,53	0,63	0,92	0,85
São Gonçalo	1,56	1,56	1,60	0,97	0,94

Os diagramas de dispersão das duas bases de dados da velocidade do vento para o período em estudo são mostrados na Figura 4. Reforçando a avaliação dos resultados obtidos para os parâmetros estatísticos os diagramas permitem verificar que os dados da reanálise do CFSR são representativos em relação ao observado nas estações do INMET utilizadas.

Ressalta-se que, neste processo, os resultados obtidos apresentaram correlações forte e muito forte com os valores de coeficiente de correlação (r) variando entre 0,79 (Areia) e 0,97 (São Gonçalo). Contudo, no que diz respeito ao coeficiente de determinação na representação dos dados velocidade do vento, Areia apresentou o menor coeficiente dentre todas as outras estudadas (0,63), no entanto os efeitos orográficos podem ter vindo a atenuar a capacidade de previsão do modelo. Já a estação com o valor mais satisfatório foi São Gonçalo (0,94).

Não obstante, os meses nos quais denotaram melhor ajuste, ou seja, com valores mais próximos de zero para todas as estações, compreenderam o período chuvoso. Observa-se ainda, que as estações de Patos, Monteiro, Areia, João Pessoa e São Gonçalo os valores estimados superestimaram os observados, onde apenas em Campina Grande os resultados estimados subestimaram os observados, no qual segundo Reboita et al. (2016) este fato pode vir a ser explicado em decorrência do Planalto da Borborema, o qual reduz os valores de velocidade do vento assim como a umidade do ar.

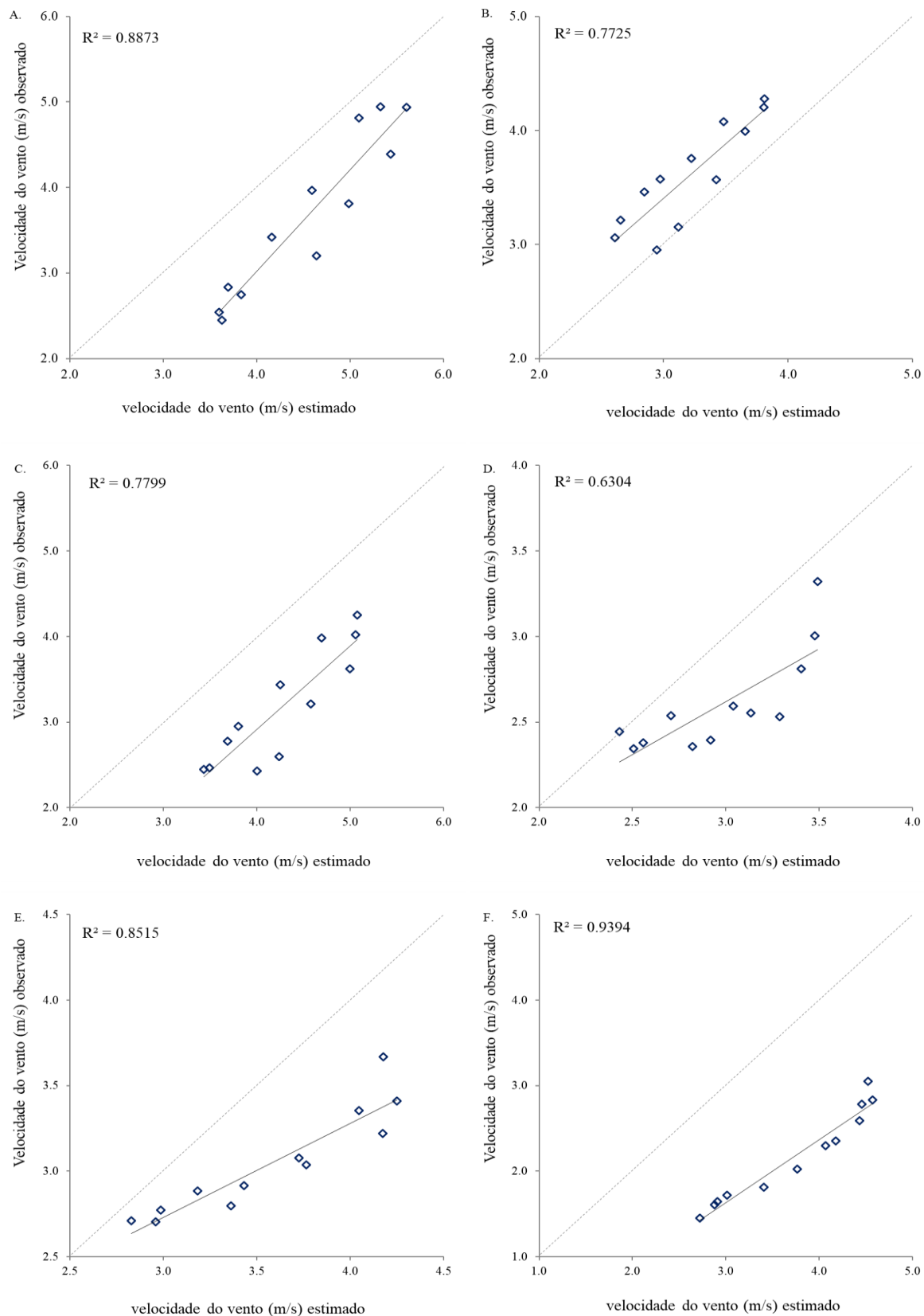


Figura 4. Distribuição dos valores médios mensais da velocidade do vento observados (INMET) e estimados (CSFR) para as localidades de Patos (A), Campina Grande (B), Monteiro (C), Areia (D), João Pessoa (E) e São Gonçalo (F) no estado da Paraíba.

Considerando-se os valores das médias mensais da velocidade do vento e os valores de correlação, de maneira geral os resultados adquiridos pela reanálise do CFSR apresentadas neste trabalho sugerem que o modelo é capaz de representar bem o comportamento do vento de forma satisfatória. A partir de então, os resultados mostrados foram obtidos somente por meio do uso dos dados da reanálise meteorológica do CFSR.

3.2. Variabilidade da Velocidade do Vento

A Paraíba caracteriza-se por dois regimes de chuvas, o primeiro compreende de fevereiro a maio, nas regiões do Alto Sertão, Sertão e Cariri/Curimataú; e o segundo de abril a julho, no Agreste, Brejo e Litoral. Essas regiões homogêneas foram estabelecidas por Braga e Silva (1990) por meio de técnicas objetivas de análise multivariada, distribuídas em mesorregiões, facilitando o estudo do estado.

Na Paraíba as variações do vento podem estar relacionadas tanto a movimentação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) quanto a efeitos de mesoescala, tais como fatores térmicos oceano-continente no litoral assim como variações térmicas no interior. No decorrer dos meses de março e abril, em razão da maior proximidade da ZCIT, provocando forte convecção e chuvas constantes, a intensidade dos ventos tendem a diminuir. Nos meses subsequentes, o retorno da ZCIT para as latitudes equatoriais promove maiores gradientes de pressão atmosférica, favorecendo a intensificação dos ventos, com ápice em setembro (SILVA, 2003).

Na Figura 5 é possível observar a média histórica da variabilidade mensal da velocidade do vento para o estado da Paraíba durante o período estudado, constatando diferentes intensidades do vento ao longo dos meses que abrange o intervalo de 2000 a 2010. As maiores velocidades de vento estão presentes no quadrimestre de agosto a novembro e as menores nos primeiros cinco meses, apresentando os meses com menores intensidades, março e abril, ambos com médias em torno de 3,0 m/s e com maiores intensidades, setembro e outubro, os dois com média em volta de 4,5 m/s. Desta forma, fica evidente que os valores menores ocorrem no período chuvoso das regiões, enquanto que os maiores valores de velocidade do vento ocorrem no período mais seco.

Em estudo análogo Malacarne e Ribeiro (2018) a fim de analisar a frequência e o padrão dos ventos na região da Grande Vitória, observou que ventos mais velozes sopram em setembro e outubro, e continuam no verão, um pouco menos intensos,

seguidos de abril e março com ventos mais fracos. Lima (2011) avaliando o potencial eólico de cinco localidades do Estado da Paraíba constatou o mesmo regime de velocidade do vento citado acima, com presença de ventos máximos no segundo semestre (período seco das regiões) e valores menores ocorrem no primeiro semestre (período chuvoso das regiões).

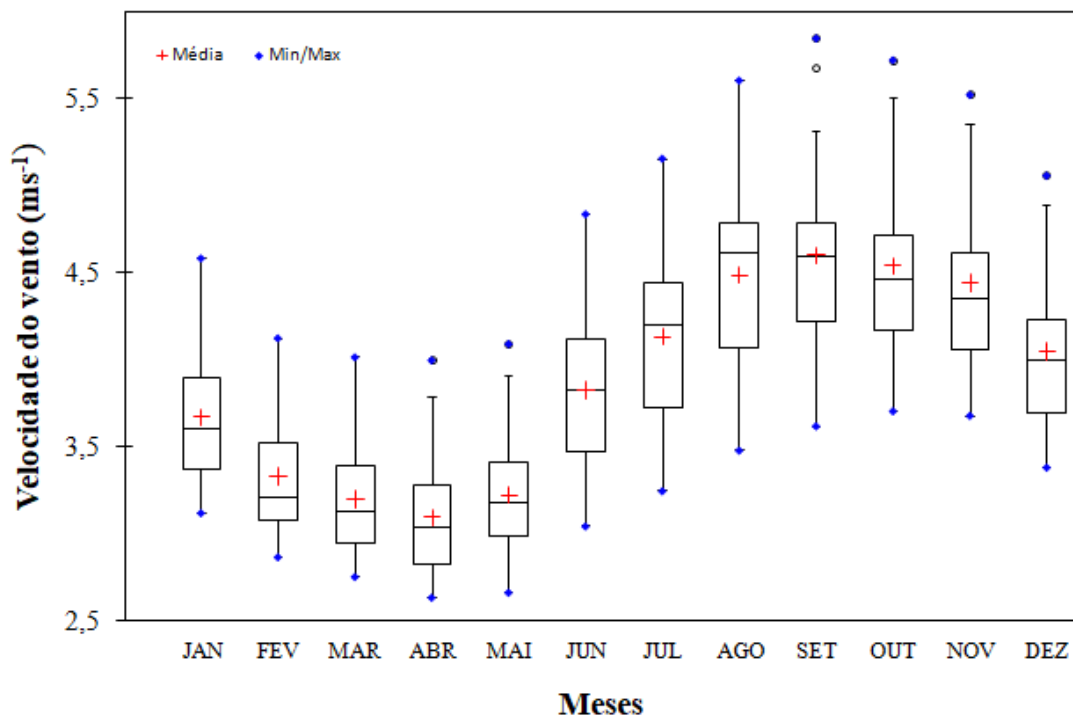


Figura 5. Variabilidade média mensal da velocidade do vento para o estado da Paraíba no período de janeiro de 2000 a dezembro de 2010.

Ao longo do ano a circulação geral da atmosfera sofre algumas alterações, ocasionando variações sazonais na velocidade do vento. Contudo, no que diz respeito a essa variabilidade sazonal tem-se que, de acordo com o exposto na Figura 6, no verão e outono o vento tem as menores intensidades, 3,7 e 3,2 m/s (média) (ambas no terceiro quartil) e amplitudes, 1,4 e 1,3 m/s, ao passo que o inverno e primavera apresentam uma maior intensidade, 4,1 m/s (primeiro quartil) e 4,5 m/s (terceiro quartil) (média) e amplitude 1,9 e 2,0 m/s. Observa-se que o período de menores amplitudes deve-se eventualmente aos fatores atuantes na atmosfera, como baixa intensidade dos raios solares, alta cobertura de nuvens, flutuações irregulares da umidade relativa do ar e oscilação da pressão atmosférica (FRANCISCO et al., 2016).

Os dados demonstram que existe uma sazonalidade bem definida ao longo do período estudado, com maiores velocidades do vento em torno do período mais seco para a região, os quais compreendem o inverno e a primavera. Em estudo similar a fim de verificar a variabilidade do vento em algumas localidades do Nordeste, Filho (2016) denotou que Palmeira dos Índios, Remanso, Acaraú, São Luís, São Gonçalo e Petrolina, nos meses do outono se encontram os ventos mais fracos e os meses da primavera os ventos mais fortes.

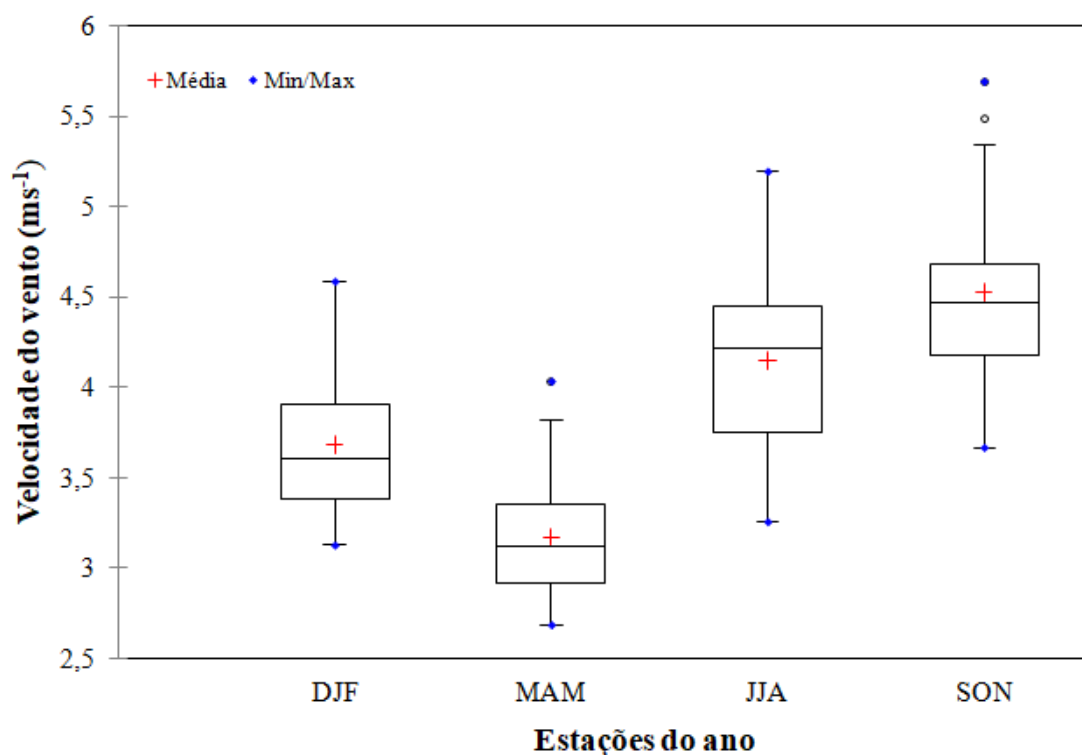


Figura 6. Variabilidade média sazonal da velocidade do vento para o estado da Paraíba no período de janeiro de 2000 a dezembro de 2010.

Nota-se a existência de valores discrepantes tanto no outono quanto na primavera, configurando meses que tiveram velocidades anormais quando comparada com os mesmos meses dos outros anos, sendo as mesmas estações de transição, denotando assim possivelmente mais turbulência que o inverno e verão.

Regime semelhante foi evidenciado por Silva (2017) ao ilustrar o padrão de sazonalidade do vento durante o ano de 2010 para o nordeste, assim como o período de transição entre o intervalo de máximas e o de mínimas intensidades do vento. Em estudo correlato os autores Carneiro e Carvalho (2015) em uma avaliação estatística

para caracterização do potencial eólico para três municípios (Maracanaú-CE, Petrolina-PE e Parnaíba-PI) observaram que nas localidades estudadas existe uma sazonalidade bem definida, com maiores velocidades do vento também em torno do período mais seco (segundo semestre).

3.3. Análise Fatorial

A partir dos resultados obtidos e apresentados na Tabela 3, foi possível analisar mediante teste de Kaiser Meyer Olkin (KMO), os padrões que existem entre as correlações presentes entre os indicadores usados, além de constatar a relação dos grupos de meses (estações) com padrões espaciais semelhantes (microrregiões) no estado paraibano. O Teste KMO indicou um valor de 0,8343, superior ao patamar crítico de 0,60, mostrando assim que existe correlações de acordo com Hair et al. (2005) e, dessa forma, o passo seguinte foi determinar o número de fatores a serem extraídos.

Tabela 3. Teste Kaiser Meyer Olkin – KMO

Indicadores	KMO
JAN	0,9263
FEV	0,9252
MAR	0,8514
ABR	0,7622
MAI	0,8549
JUN	0,8013
JUL	0,7523
AGO	0,8487
SET	0,8489
OUT	0,7950
NOV	0,8997
DEZ	0,7869
KMO	0,8343

Ao observar que os dados estão adequados, foi possível extrair os fatores nos quais irão explicar a variância total do conjunto de dados. Segundo Silva (2014) quando o conjunto de variáveis é transformado em fatores, o método extrai as combinações de variáveis que explicam a variância máxima e, em seguida, as combinações que explicam as menores variâncias. O mesmo autor ressalta que o melhor ajuste dos dados é obtido a partir da explicação da variância pela ordem decrescente dos autovalores que correspondem a quanto o fator é capaz de explicar da variância ou, ainda, quanto da variância total dos dados pode ser associada ao fator.

Na Figura 7 é apresentada a distribuição do Scree plot descrevendo a dispersão da quantidade de fatores, juntamente com a curva de variância de cada fator particularmente, e verificando assim o momento em que a curva tende a decair de forma brusca ou tornar-se horizontal, sendo possível identificar o momento em que se deve parar de extrair os fatores.

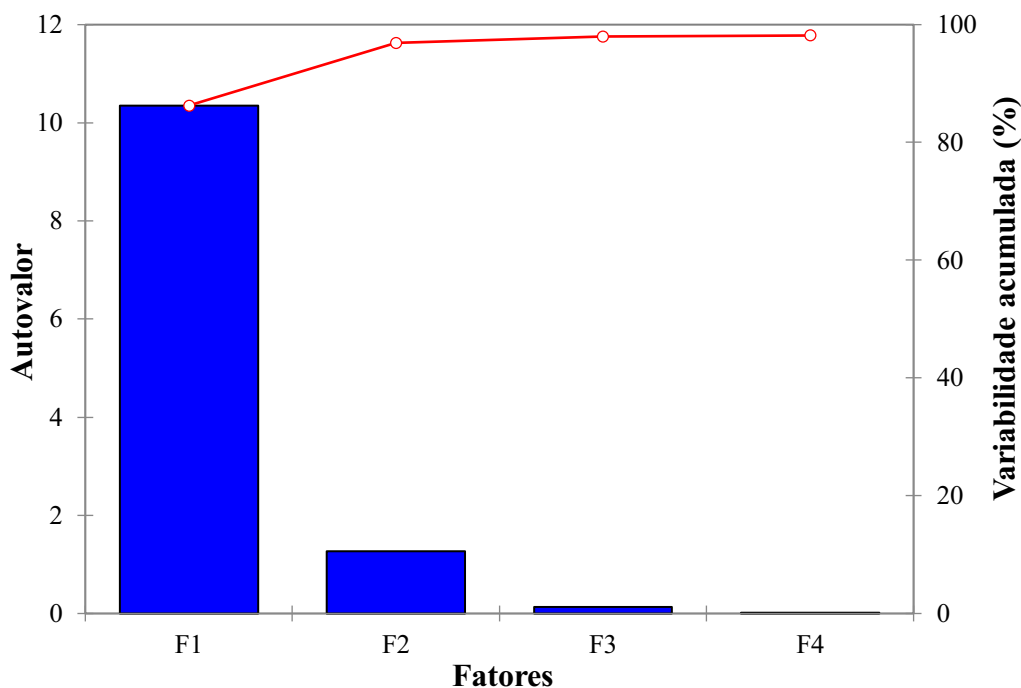


Figura 7. Scree plot - curva de variância de cada fator.

A partir dos resultados identificaram-se de início quatro fatores de maior influência na variável velocidade do vento, (Tabela 4), os quais apresentam capacidade de explicar 98,15% da variabilidade total existente. Cada fator apresenta um conjunto de variáveis que caracteriza a variabilidade da velocidade do vento nas microrregiões do estado da Paraíba de acordo com os valores médios mensais de vento. Por conseguinte, os autovalores obtidos na análise fatorial foram submetidos à rotação VARIMAX com intuito de identificar quais variáveis melhor representam os fatores facilitando a interpretação dos resultados, por meio da rotação dos eixos. Os dois primeiros fatores explicam cerca de 100% da variância total, onde o primeiro representa 53,21% e o segundo 43,67%.

Tabela 4. Variância total explicada pelos fatores antes e após a rotação.

Fatores	Início			Rotação Varimax	
	Autovalores	Variabilidade (%)	% Variância acumulada	Variabilidade (%)	% Variância acumulada
F1	10,35	86,27	86,27	53,21	53,21
F2	1,27	10,61	96,88	43,67	96,87
F3	0,14	1,15	98,03	-	-
F4	0,01	0,12	98,15	-	-

De acordo com os fatores obtidos após a rotação Varimax, Figura 8, o primeiro fator correlaciona-se com o intervalo de outubro a maio com atributos mais significativos, compreendendo a primavera, verão e outono, período de menor variabilidade de vento para a região. Ao estudar a variação da velocidade e direção do vento, bem como determinar a densidade de potência eólica para as estações de São Gonçalo, Monteiro, Patos, Campina Grande e João Pessoa, Lima et al. (2010) destacou que valores menores ocorrem no primeiro semestre do ano, período chuvoso das regiões.

O segundo fator, Figura 8, reteve as melhores correlações no intervalo entre os meses de junho a setembro como mais significantes, abrangendo o inverno e início da primavera, período no qual apresenta as maiores velocidades de vento. Lima et al. (2010) com base nas medições da velocidade média dos ventos para cinco estações no Estado da Paraíba destacou como característica interessante a presença de ventos máximos no segundo semestre do ano, período em que as chuvas cessam na região (final do inverno, primavera e início do verão).

Os autores Lima et al. (2010) por meio da análise fatorial aplicada a diferentes regiões do Nordeste, a fim de avaliar a velocidade do vento, constataram o mesmo padrão de correlação dos fatores com o presente estudo, onde o primeiro fator rotacionado apresentou correlações mais significativas com o período de primavera, verão e início do outono, e o segundo fator com o inverno. Com base no Atlas Solarimétrico do Brasil (2000) a maior quantidade de energia solar para o Estado da Paraíba é verificada entre os meses de agosto e março, o mês de maior incidência é outubro, para os meses de abril a julho menor disponibilidade de energia solar.

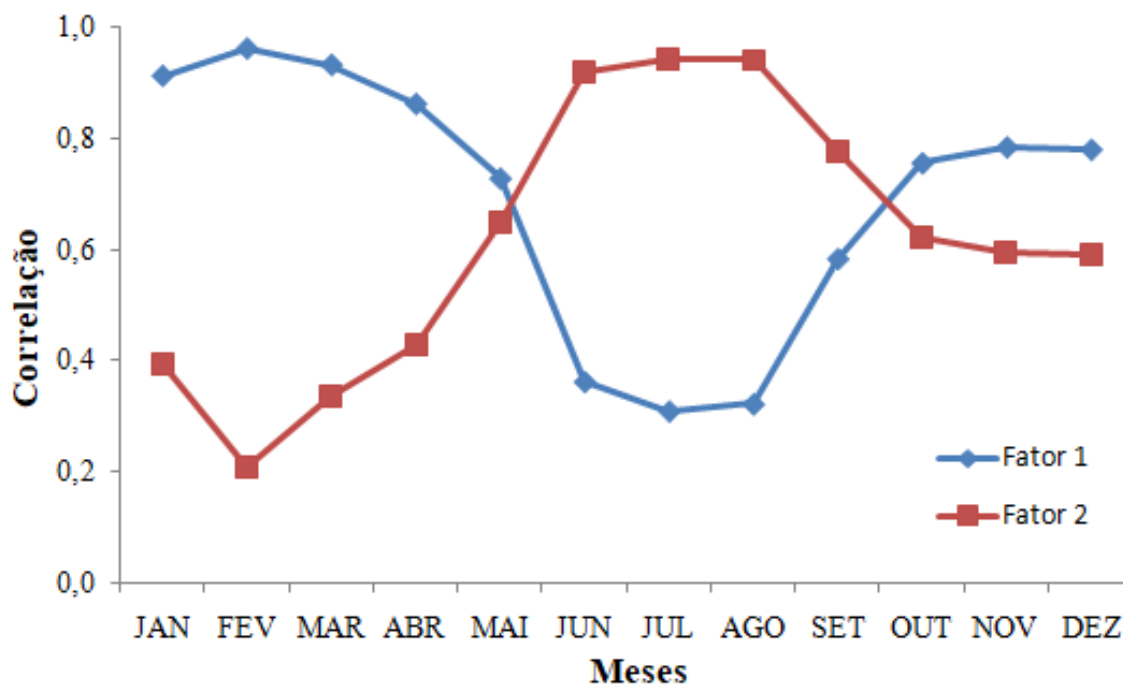


Figura 8. Contribuição dos dois fatores, variação temporal.

O regime de ventos determina a intermitência na geração de energia eólica, sendo esta proveniente em parte da radiação solar que aquece a superfície terrestre possibilitando o aparecimento dos ventos. Contudo, tais fenômenos acontecem de maneira não uniforme devido à incidência dos raios solares e sua variação sazonal, à rotação da Terra, diferença de capacidade térmica de absorção de calor entre os elementos de cada região, entre outros fatores, formando deslocamentos de massa de ar distribuídos de forma característica para cada região do planeta a (MELO et al., 2013).

Marinho e Aquino (2009) retratam a elevada produção de energia elétrica a partir da utilização do potencial eólico da região Nordeste, a qual o estado está inserido, evitando a utilização de recursos hídricos, em especial no segundo semestre do ano, período em que verificam-se as menores vazões afluentes e ao mesmo tempo as maiores velocidades dos ventos que sopram na região.

A configuração espacial dos dois fatores é apresentada na Figura 9. O primeiro fator é bem correlacionado com as microrregiões de Cajazeiras, Cariri Ocidental, Cariri Oriental, Catolé do Rocha, Curimataú Ocidental, Curimataú Oriental, Itaporanga, João Pessoa, Litoral Norte, Piancó, Seridó Oriental e Sousa. O segundo fator apresenta boa correlação com as microrregiões do Brejo Paraibano, Campina Grande, Esperança,

Guarabira, Itabaiana, Litoral Sul, Patos, Sapé, Seridó Ocidental, Serra do Teixeira e Umbuzeiro.

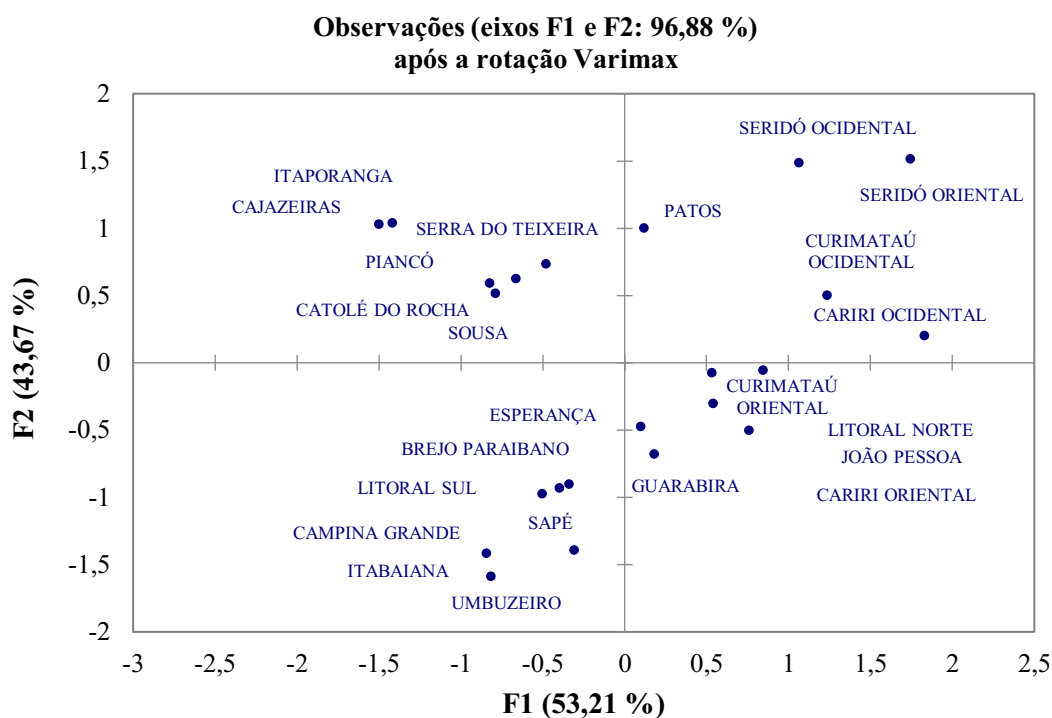


Figura 9. Distribuição das microrregiões relacionadas com os fatores.

O padrão espacial do fator um, mostra contribuições negativas na faixa que abrange o Sertão da Paraíba (Cajazeiras, Catolé do Rocha, Itaporanga, Piancó e Sousa). Este fator também apresenta contribuições positivas para as microrregiões do Cariri Ocidental, Cariri Oriental Curimataú Ocidental, Curimataú Oriental, João Pessoa, Litoral Norte e Seridó Oriental. As contribuições negativas estão associadas a menores variabilidades da velocidade do vento, enquanto que as contribuições positivas se associam aos maiores valores de variabilidade da velocidade do vento nas devidas localidades.

O padrão espacial associado ao fator dois apresenta em grande parte contribuições (escores) negativas para as microrregiões pertencentes ao Agreste (Brejo Paraibano, Campina Grande, Esperança, Guarabira, Itabaiana, Sapé e Umbuzeiro) e uma pequena porção da Mata Paraibana (Litoral Sul). Estas localidades denotam as menores variabilidades da velocidade do vento para a Paraíba, onde a atenuação do mesmo pode ser explicada em decorrência da topografia com a presença do Planalto da Borborema (MOREIRA, 2002; RODRIGUEZ, 2012). A contribuição positiva desse fator abrange as microrregiões de Patos, Seridó Ocidental e Serra do Teixeira, as quais

retratam os maiores valores de variabilidade da velocidade do vento, sendo razoável supor que fatores ambientais, como temperatura do ar, diferenças de pressão e a orografia dessas localidades são condições influenciadoras na velocidade do vento, produzindo variações em suas velocidades (REBOITA et al., 2016; SHOAIIB et al., 2019).

3.4. Análise de Agrupamento

O método exploratório de agrupamento (cluster) aplicado aos dados de velocidade do vento para o período em estudo identificou regiões homogêneas de velocidades do vento registradas em toda a Paraíba compreendendo o período de janeiro de 2000 a dezembro de 2010

Tabela 5. Microrregiões com padrões homogêneos de velocidade do vento.

Grupos	Microrregiões
G1	Brejo Paraibano, Campina Grande, Litoral Sul e Sapé
G2	Cajazeiras, Catolé do Rocha, Itaporanga, Piancó, Serra do Teixeira e Sousa
G3	Cariri Ocidental, Curimataú Ocidental e Patos
G4	Cariri Oriental, Curimataú Oriental, João Pessoa e Litoral Norte
G5	Esperança e Guarabira
G6	Itabaiana e Umbuzeiro
G7	Seridó Ocidental e Seridó Oriental

Mediante a análise de agrupamento (Figura 10) foi possível delimitar as microrregiões que apresentam padrões homogêneos no comportamento da velocidade do vento (Tabela 5).

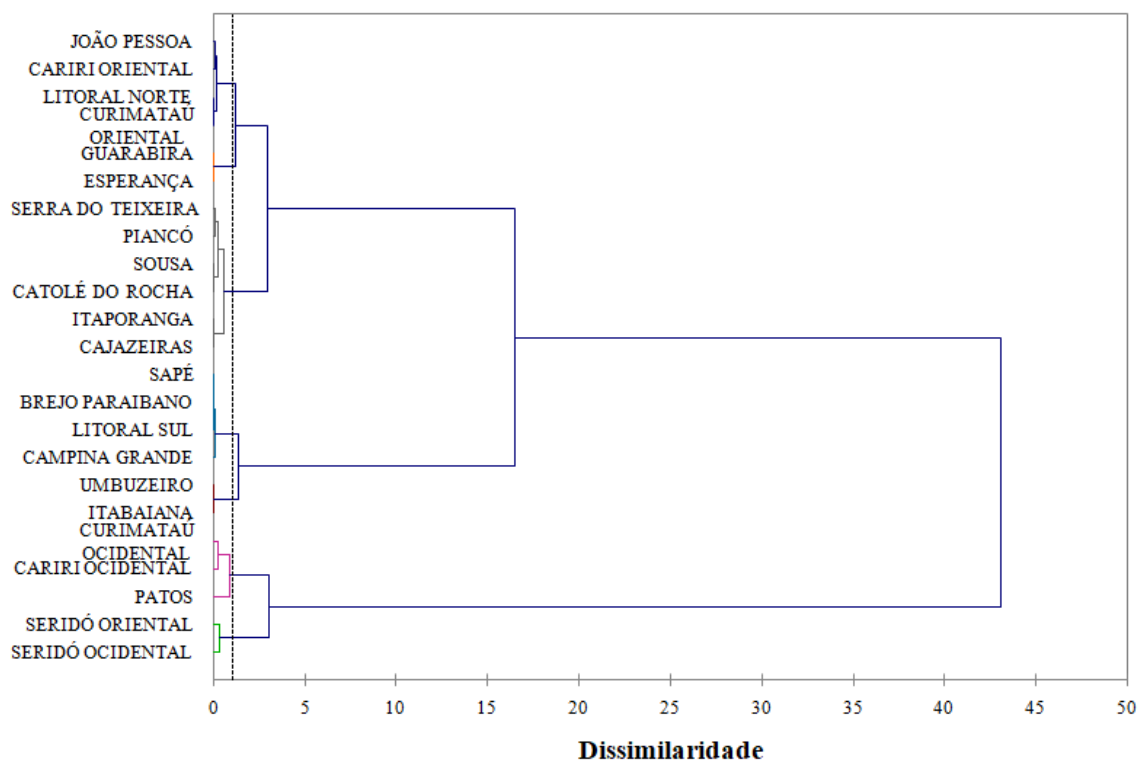


Figura 10. Dendrograma decorrente da análise da velocidade do vento para microrregiões do estado da Paraíba no período de janeiro de 2000 a dezembro de 2010.

Os grupos que mais se destacam quanto às velocidades do vento foram aqueles verificados na porção central e no oeste do estado (G2, G3, G4 e G7). Estes resultados mostram que o interior da Paraíba apresenta os valores de velocidade do vento mais elevados. Oliveira e Souza (2018) ao realizar uma avaliação sobre o potencial eólico na Paraíba verificaram padrões de velocidade similar para as regiões supracitadas, as quais tendem a apresentar ventos mais intensos que as demais regiões do estado. Sendo razoável supor que fatores ambientais, como temperatura do ar, diferenças de pressão e a orografia dessas localidades são fatores influenciadores na velocidade do vento, produzindo variações nas velocidades (REBOITA et al., 2016; SHOAIIB et al., 2019).

Os grupos que apresentam os menores valores médios de velocidade do vento (G1, G5 e G6) estão inseridos em grande parte na região agreste do estado, porção sudeste, sendo está uma região de transição entre a Zona da Mata e o Sertão, além de ser uma região densamente povoada. Além da topografia os ventos são instigados pelo atrito superficial (WHITEMAN, 2000; JONHASSON; CHEN, 2003).

Essas regiões apresentam trechos correspondentes a depressões, com baixas altitudes inicialmente, que logo dá lugar a elevadas altitudes pertencentes à Borborema, expostos aos ventos úmidos do Sudeste, esta porção apresenta áreas bastante secas e

úmidas, com temperaturas mais amenas apresentando uma vegetação intermediária entre a caatinga e a floresta. Estas características podem vir a explicar os motivos pelos quais o vento apresenta seus menores valores nessas regiões (MOREIRA, 2002; RODRIGUEZ, 2012).

Na Figura 11 é apresentada a distribuição espacial dos grupos no estado da Paraíba. Em alguns casos, as microrregiões estão agrupadas no mesmo grupo, mesmo estando em regiões distintas no estado, como exemplo do Grupo 4, que abrange boa parte do Litoral paraibano e Cariri Oriental. Segundo Araujo et al. (2013), apesar das microrregiões se localizarem distribuídas dentro da área da pesquisa, e em alguns casos eles se encontrarem distantes umas das outras, ainda assim se denotam níveis de similaridade satisfatórios nos valores das variáveis em estudo, alocando-as em mesmos grupos. Essa constatação leva a supor que esses valores possuem diferença numérica, mas na análise multivariada dos valores formam conjuntos similares. Enquanto à maior quantidade de microrregiões, o Grupo 2 a oeste do estado destaca-se por abrigar todo o sertão paraibano com exceção de Patos.

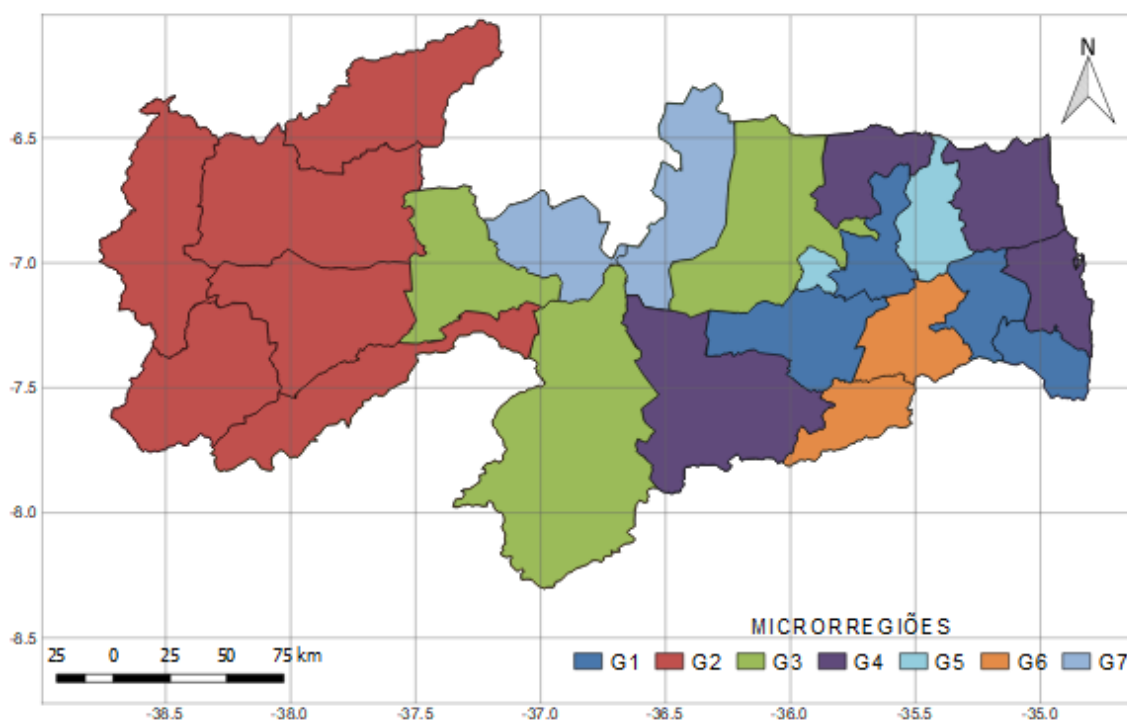


Figura 11. Distribuição espacial dos grupos com base na velocidade do vento na Paraíba.

A variabilidade das velocidades médias anuais de vento dos grupos para o período estudado é apresentada na Figura 12. A velocidade média do vento é mais alta

nos grupos G2 (3,81), G3 (4,38), G4 (3,99) e G7 (4,77 m/s), e menores nos grupos G1 (3,46), G5 (3,75) e G6 (3,20 m/s).

A velocidade mínima varia de 2,64 m/s para o grupo G6 a 2,80 m/s para o G1, enquanto o máximo varia de 5,24 m/s para o G3 a 5,75 m/s para o G7. A variabilidade indicada pelo desvio padrão é maior para o G7 (0,71 m/s) o que indica que os ventos são mais variáveis entre os anos nessas regiões do que nas outras, e menor para o G6 (0,40 m/s) evidenciando que o padrão nesta região tem sido mais estável no decorrer do período analisado.

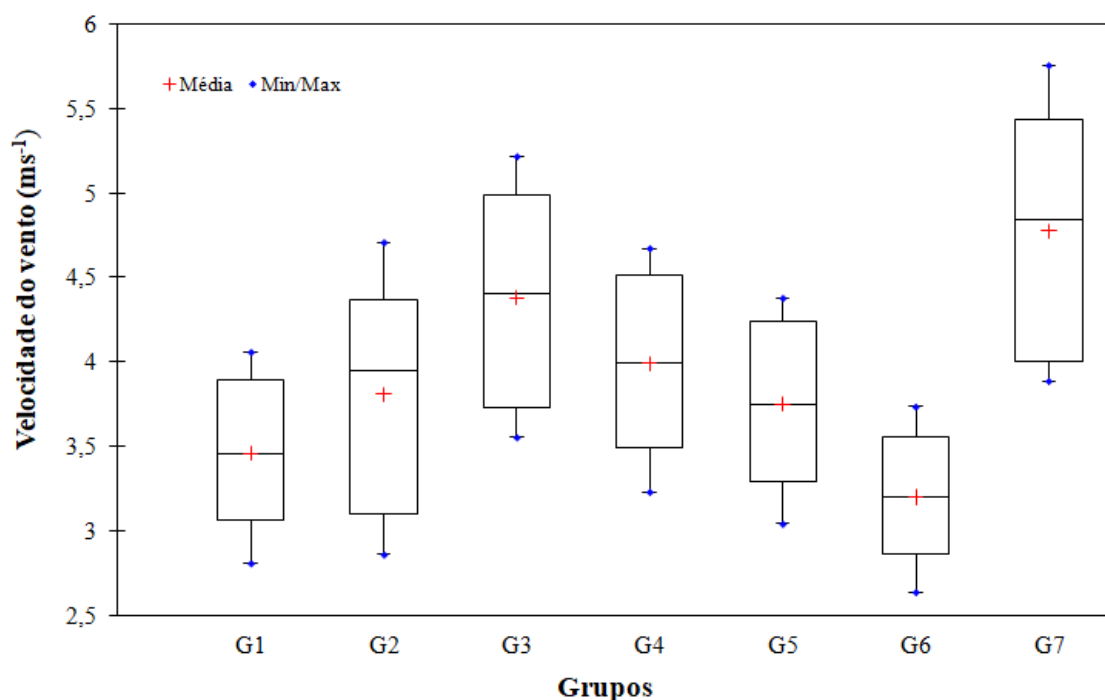


Figura 12. Variabilidade média anual da velocidade do vento no estado da Paraíba.

A Figura 13 exibe a variabilidade das médias mensais da velocidade do vento para cada grupo. A primavera destaca-se por apresentar as maiores intensidades de vento para todos os grupos, essa é a estação seca na qual apresenta a maior radiação solar, conseqüentemente, um gradiente térmico mais elevado favorecendo os ventos nesse período.

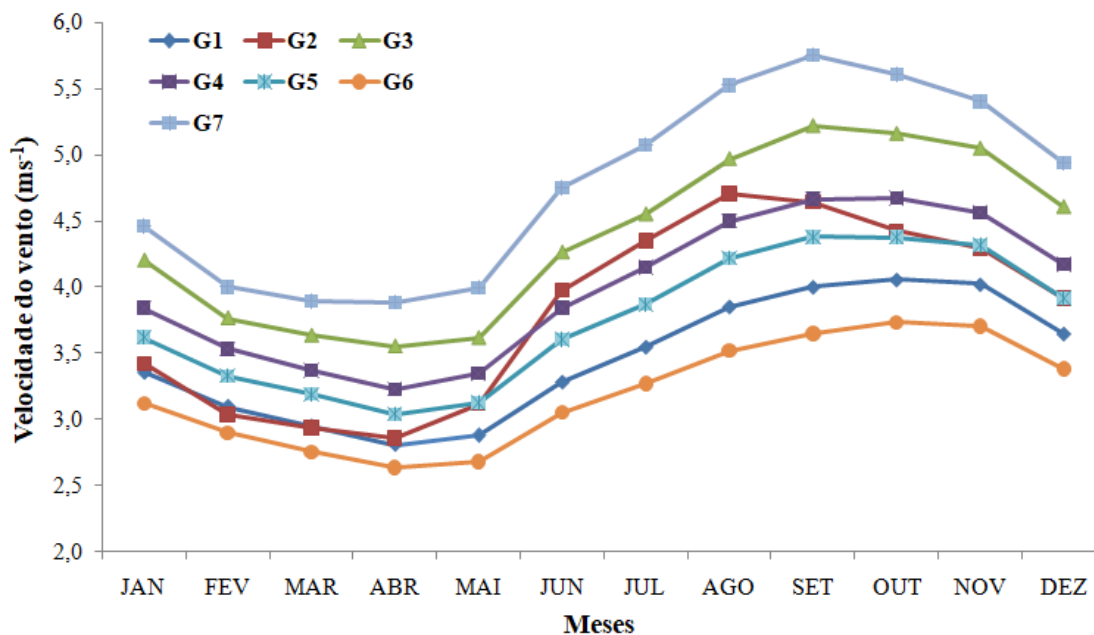


Figura 13. Variabilidade média mensal da velocidade do vento para os grupos.

O G2 tem configuração distinta dos demais grupos em alguns meses do ano, ressaltando que a frequente ocorrência de períodos de estiagens durante a estação chuvosa gera fortes impactos, tendo em vista que o período chuvoso é normalmente de fevereiro-maio para a região na qual o grupo está inserido (sertão), podendo, em alguns anos, até não existir.

Ferreira et al. (2017) afirmam que durante os anos que compreendem o período de 1991 a 2012, a região que abrange o Sertão da Paraíba apresentou a maior incidência de estiagens e secas do Estado, ocasionando as denominadas secas regionais. Em decorrência dessas estiagens a pouca vegetação ou até mesmo inexistência em virtude da baixa precipitação juntamente com as elevadas temperaturas, fatores estes que diminuem a fricção do vento.

Tais fatos podem ser atribuídos, dentre outros fatores, ao efeito da topografia da região, contribuindo diretamente na velocidade do vento. No sertão observam-se locais com magnitudes mais elevadas, particularmente na porção leste-sudeste da região, área esta cuja altitude supera os 700m, na parte central a altitude varia de 200 a 450m. No entanto a velocidade varia em média de 2 a 8m/s em toda mesorregião do Sertão (OLIVEIRA; SOUZA, 2018).

4. CONCLUSÕES

Os dados de reanálises do CFSR mostraram-se representativos quando validados aos observados. Quanto aos coeficientes de determinação verifica-se que o menor valor foi apresentado para o município de Areia, onde os efeitos orográficos podem ter vindo a atenuar a capacidade de previsão do modelo para essa determinada região.

Diante dos resultados, constata-se que os menores valores de velocidade do vento sobre a Paraíba decorrem no primeiro semestre, ou seja, entre o verão e o outono. De antemão os maiores valores foram obtidos entre o inverno e a primavera (segundo semestre), primordialmente na primavera para a qual se alcançaram os valores mais elevados. Com relação ao cenário mensal os meses de março e abril, apresentam velocidades relativamente baixas para o período averiguado, todavia setembro e outubro apontaram valores máximos, revelando a coerência da intensificação e desintensificação dos ventos de acordo com as características sazonais.

Técnicas multivariadas (Análise Fatorial e Análise de Agrupamento) foram aplicadas os dados de velocidades do vento à superfície com o intuito de avaliar sua variabilidade nas microrregiões paraibanas. Os dois primeiros fatores explicam cerca de 100% da variância total, onde o primeiro fator correlaciona-se com o período de menores velocidades de vento para a região, a segunda componente reteve as melhores correlações para o período de maiores velocidades.

A aplicação da análise de agrupamento através do método de Ward e distância euclidiana resultaram em sete grupos homogêneos, denotando que os ventos no interior do estado apresentam maiores intensidades quando comparadas as demais regiões. Ressalta-se que características topográficas ao longo do estado são influenciadoras na velocidade dessa variável climática.

5. REFERÊNCIAS

AHMAD, A. U.; STARKEY, A. Application of feature selection methods for automated clustering analysis: a review on synthetic datasets. **Neural Computing and Applications**, v. 29, n. 3, p. 1-12, 2017.

ARANHA, P. S. **Análise de Correlação de Focos de Queimadas com Variáveis Climáticas no Município de Marabá**. 78p. Dissertação - (Mestrado em Engenharia Elétrica). 2016.

ARAÚJO, E. C.; URIBE-OPAZO, M. A.; JOHANN, J. A. Análise de Agrupamento da Variabilidade Espacial da Produtividade da Soja e Variáveis Agrometeorológicas na Região Oeste do Paraná. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.33, n.4, p.782-795, 2013.

BARROS, A. H. C.; ARAÚJO FILHO, J. C.; SILVA, A. B.; SANTIAGO, G. A. C. F. Climatologia do Estado de Alagoas. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, n. 211. Recife: Embrapa Solos, 32p, 2012.

BEM, J. S.; GIACOMINI, N. M. R.; WAISMANN, M. Utilização da técnica da análise de Clusters ao Emprego da Indústria Criativa entre 2000 e 2010: Estudo da Região do Consinos, RS. **Interações**, Campo Grande, v. 16, n. 1, p. 27-41, 2015.

BRAGA, C. C.; SILVA, B. B. Determinação de Regiões Pluviometricamente Homogêneas no Estado da Paraíba. In: **Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Salvador. Anais... Salvador, p.200-205, 1990.

BUSSAB, W. O.; MIAZAKI, E. S.; ANDRADE, D. **Introdução à Análise de Agrupamentos**. São Paulo: Associação Brasileira de Estatística, p.105, 1990.

CARNEIRO, T. C.; CARVALHO, P. C. M. Caracterização de Potencial Eólico: Estudo de Caso para Maracanaú (CE), Petrolina (PE) e Parnaíba (PI). **Brasileira de Energia Solar**, v. 6, n.1, p.1-10, 2015.

CFSR - **Climate Forecast System Reanalysis**. Disponível em:<<https://globalweather.tamu.edu/>>. Acesso em: 03 jun 2019.

CORRAR, L. J.; PAULO, E.; FILHO, J. M. D. **Análise Multivariada: Para os Cursos de Administração, Ciências Contábeis e Economia**. Ed. Atlas. São Paulo, 2007.

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

DURAN, B. S.; ODELL, P. L. **Cluster Analysis**. Asurvey Springer.1974.

EMBRAPA-Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Brasil em Relevô. Disponível em:<<https://www.cnpem.embrapa.br/projetos/relevobr/download/index.htm>>. Acesso em: 20 Mai. 2019.

EVERITT, B. S. **Cluster Analysis**. London: Heinemann Educational Books, p.121, 1974.

FAHAD, A.; ALSHATRI, N.; TARI, Z.; ALAMRI, A.; KHALIL, I.; ZOMAYA, A. Y.; FOUFOU, S.; BOURAS, A. A survey of clustering algorithms for big data: Taxonomy and empirical analysis. **IEEE transactions on emerging topics in computing**, v. 2, n. 3, p. 267-279, 2014.

FERREIRA; D. M.; OLIVEIRA; L. R.; SILVA, S. A. A Problemática da Semiaridez no Sertão Paraibano. **In: Anais III Workshop Internacional sobre água no Semiriado Brasileiro**, v. 1, 2017.

FILHO, J. B. C. **Variabilidade da Velocidade do Vento a 10 Metros para a Região Nordeste do Brasil**. 75f. Dissertação- (Mestrado em Meteorologia) -Universidade Federal de Campina Grande, 2016.

FOX, D. G. **Judging Air Quality Model Performance**. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 62, p. 599-609, 1981.

FRANCISCO, P. R. M. **Classificação e Mapeamento das Terras para Mecanização do Estado da Paraíba Utilizando Sistemas de Informações Geográficas**. Dissertação- (Mestrado em Manejo de Solo e Água). Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2010.

FRANCISCO, P. R. M.; SANTOS, D.; GUIMARÃES, C. L.; CABRAL, D. E. C.; ARAÚJO, S. R. D. Aptidão Climática da Mamona (*Ricinus communis* L.) para o Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.9 n.3, p.737-75, 2016.

FUKA, D. R.; WALTER, M. T.; MACALISTER, C.; DEGAETANO, A. T.; STEENHUIS, T. S.; EASTON, Z. E. Using the Climate Forecast System Reanalysis as Weather Input Data for Watershed Models. **Hydrological Processes**, v. 28, p.5613-5623, 2014.

GARAYALDE, E. J. G.; SILVA, M. G. A.; TAVARES, SÁ A. Classificação Mesoclimática da Região Sul do Brasil pela Análise de Componentes Principais. **In: Congresso Interamericano de Meteorologia, 1. Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Brasília, 1996.

GOLDSCHMIDT, R.; BEZERRA, E.; P., E. **Data mining: conceitos, técnicas, algoritmos, orientações e aplicações**. Elsevier Brasil, 2015.

HAIR, J. J. F., ANDERSON, R.E., TATHAM, R.L., BLACK, W.C. **Análise Multivariada de Dados**, 5 ed. Porto Alegre, 2005.

HARDLE, W.; SIMAR, L. **Applied Multivariate Statistical Analysis**. 2nd. ed. Berlin: Springer, 2007. 486p.

JAIN, A. K.; MURTY, M. N.; FLYNN, P. J. Data clustering: a review. **ACM computing surveys (CSUR)**, v. 31, n. 3, p. 264-323, 1999.

JONHASSON, B.; CHEN, D. The Influence of Wind and Topography on Precipitation Distribution in Sweden: Statistical Analysis and Modelling. **International Journal of Climatology**, v. 23, n. 12, p. 1523-1535, 2003.

LIMA, F. J. L. **Avaliação do Potencial Eólico no Estado da Paraíba: Um Estudo Observacional e Numérico**. 81f. Dissertação – (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, 2011.

LIMA, F. J. L. **Previsão de Irradiação Solar no Nordeste do Brasil Empregando o Modelo WRF Ajustado por Redes Neurais Artificiais (RNAs)**. Tese - (Doutorado em Meteorologia). São José dos Campos, INPE, 2015.

LIMA, F. J. L.; BRAGA, C. C.; SILVA, E. M. Emprego da Análise de Componente Principal e Agrupamentos a dados de vento em regiões do Nordeste do Brasil. **In: Anais Congresso Brasileiro de Meteorologia (CBMET)**, 2010.

LIRA, M.A.T.; SILVA, E.M.; ALVES, J.M.B.; VERAS, G.V.O. Estimation of wind resources in the coast of Ceará, Brazil, using the linear regression theory. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.39, p.509-529, 2014.

MALACARNE, M.; RIBEIRO, F. K. Análise da Frequência e do Padrão dos Ventos na Região da Grande Vitória entre 2006 e 2016. **Revista Geonorte**, v.9, n.32, p. 137-159, 2018.

MANLY, B. F. J. **Multivariate Statistical Methods: A Primer**. London: Chapman and Hall, 2008.

MARIANO, E. B.; CAVALCANTI, E. P.; BESERRA, E. A. Análise Comparativa da Velocidade do Vento Simulado Pelo BRAMS com Dados Observados e de Reanálises. **Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 2, p.269-276, 2017.

MARINHO, M. H. N; AQUINO, R.R.B. Oferta da energia através da complementaridade sazonal hidro-eólica. **PCH Notícias & SHP NEWS**, v.11, n.40, p. 36-42, 2009.

MARTINS, E. G. M. Coeficiente de Determinação. **Ciência Elementar**, v. 6, n.1, 2018.

MELO, E.C.S.; SILVA ARAGÃO, M.R.; CORREIA, M.F. Regimes do Vento a Superfície na área de Petrolina, submédio do São Francisco. **Brasileira de Meteorologia**, v.28, n.3, p. 229-241. 2013.

MINGOTI, S. A. **Análise de Dados Através de Métodos de Estatística Multivariada: Uma abordagem Aplicada**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.

MORAIS, P. H. L. S. **Variabilidade Espaço-Temporal do Padrão de Ventos do Setor Oeste do Oceano Atlântico Equatorial**. 61.f. TCC - (Bacharel em Oceanografia). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

MOREIRA, E. R. **O Espaço Natural Paraibano**. João Pessoa: DGEOC, 2002.

NETO, J. M. M. Estatística Multivariada- Uma Visão Didática-Metodológica. **Filosofia da Ciência**, p. 1-13, 2004.

NOBRE, P.; SHUKLA, J. Variations of Sea Surface Temperature, Wind, Stress, and Rainfall over the Tropical Atlantic and South America. **Journal of Climate**, v.9, p. 2464- 2479, 1995.

OLIVEIRA, S. S. **Análise do Potencial Eólico do Estado da Paraíba Utilizando Modelos de Mesoescala**. 129f. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, 2013.

OLIVEIRA, S. S.; SOUZA, E. P. Utilização de Modelos de Mesoescala como Ferramenta Inicial para o Mapeamento Eólico do Estado da Paraíba. **Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 3, p.459-471, 2018.

OSIŃSKI, S.; WEISS, D. A concept-driven algorithm for clustering search results. **IEEE Intelligent Systems**, v. 20, n. 3, p. 48-54, 2005.

PACIFICO, L. D. S.; LUDERMIR, T. B. A Group Search Optimization Method for Data Clustering. In: **Intelligent Systems (BRACIS), 2014 Brazilian Conference**. IEEE, p. 342-347, 2014.

PARAÍBA. **Secretaria de Estado da Ciência e Tecnologia e do Meio Ambiente. Agência Executiva de Gestão de Águas do Estado da Paraíba, AESA**. PERH-PB: Plano Estadual de Recursos Hídricos: Resumo Executivo e Atlas. Brasília, DF. 2006.

QING, X. Statistical Analysis of Wind Energy Characteristics in Santiago Island, Cap Verde. **Renewable Energy**, v.115, p.448- 461, 2018.

REBOITA, M. S.; RODRIGUES, M; ARMANDO, R. P.; FREITAS, C.; MARTINS, D.; MILLER, G. Causas da Semiaridez do Sertão Nordestino. **Brasileira de Climatologia**, v. 19, n. 12, 2016.

RODRIGUEZ, J. L. **Atlas Escolar Paraíba: Espaço Geo-Histórico e Cultural**. João Pessoa: Grafiset, 2012.

SAHA, S., et al. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. **American Meteorological Society**, v.91, p.1015–1057, 2010.

SALES, M. C. L.; RAMOS, V. M. Caracterização Ambiental das Áreas sob Influência do Reservatório de Bocaina (PI) com Base na Compartimentação Geomorfológica. **Carta CEPRO**, v.18, n.1, p.149-161, 2000.

SCHUNK SILVA, E.; NERY, J. T. Distribuição Espacial e Temporal da Precipitação na Região Centro Sul do Estado do Paraná. **Anais: Congresso de Biometeorologia**, Maringá, PR, 2000.

SHOAI, M.; REHMAN, S.; KHAN, S.; ALHEMS, L. M. Assessment of Wind Energy Potential Using Wind Energy Conversion System. **Journal of Cleaner Production**, v. 216, p.346-360, 2019.

SHU, Z. R.; LI, Q. S.; CHAN, P. W. Statistical Analysis of Wind Characteristics and Wind Energy Potential in Hong Kong. **Energy Convers Manage**, v.10, p. 644 – 657, 2015.

SILVA, A. B. **Análise em Componentes Principais das Condições Atmosféricas em Episódios de Rajadas de Vento na Região Metropolitana de Salvador**. 87f. Dissertação- (Mestrado em Meteorologia) -Universidade Federal de Campina Grande, 2014.

SILVA, A. M.; COSTA; D. L. C. R.; LINS, C. J. C. Precipitações no Nordeste Brasileiro: Tendências de Variação e Possíveis Implicações na Agricultura. **In: Anais Semana do Meio Ambiente**, v.5, Recife, 2008.

SILVA, G.R. **Características de Vento da Região Nordeste**. 141f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, 2003.

SILVA, P. K. O. **Análise e Previsão de Curto Prazo do Vento Através de Modelagem Estatística em Áreas de Potencial Eólico no Nordeste do Brasil**. 168f. Tese - (Doutorado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande, 2017.

WALLACE, J.M.; HOBBS, P.V. **Atmospheric Science: An Introductory Survey**, 2ed. Academic Press, 2006, 504 p.

WARD, J. H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. **Journal of the American Statistical Association**, v. 58, p. 236 – 244, 1963.

WHITEMAN, D.C. **Mountain Meteorology: Fundamentals and Applications**. Oxford: Ed. Oxford University Press, 2000, 376p.

WILKS, D. S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. 2 ed.; 2006, 649p.

WILLMOTT, C. J. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.

CAPÍTULO 3

**ANÁLISE DA DENSIDADE DE POTÊNCIA EÓLICA PARA MICRORREGIÃO
DO CARIRI ORIENTAL DA PARAÍBA****RESUMO**

A velocidade do vento vem sendo bastante utilizada para fins energéticos. Para tanto, estudos voltados ao seu conhecimento são de suma relevância para melhor proveito de tal recurso. O objetivo do estudo é analisar o comportamento do vento na região de São João do Cariri-PB, localizada na mesorregião da Borborema, a partir dos dados disponibilizados pela estação automática implantada na Fazenda Experimental e do projeto SONDA, para o ano de 2007, buscando estimar a densidade de potência eólica (DPE) para essa localidade. Simulações numéricas aplicadas aos dados de velocidade de vento foram utilizadas para identificar os períodos em que o comportamento dos ventos é mais favorável ao aproveitamento. As direções predominantes dessa variável encontradas na localidade de São João do Cariri foram de sudeste, com variações sazonais. Contudo, tanto os valores das velocidades do vento observadas (2, 25 e 50) e estimadas (100 e 150m), quanto com as estimativas das densidades de potências (50, 100 e 150m) evidenciaram que as menores intensidades de velocidade do vento estão presentes principalmente no período da manhã, assim como no primeiro semestre do ano, enquanto os maiores valores ocorrem a partir das dez horas da manhã estendendo-se ao início da noite, e predominam nos últimos seis meses. Estas determinações denotaram maiores valores de densidades de potência eólica disponível para o segundo semestre do ano (principalmente de agosto a dezembro).

Palavras-chave: Conduta. Velocidade do Vento. Direção. DPE.

WIND POWER DENSITY ANALYSIS FOR MICRO-REGION OF THE ORIENTAL CARIRI OF PARAÍBA

ABSTRACT

Winds are meteorological variables, which are being widely used for energy purposes. Therefore, studies focused on their knowledge are extremely important for the best use of this resource. The objective of the study is to analyze the behavior of the wind in the region of São João do Cariri-PB, located in the Borborema mesoregion, from the data provided by the automatic station implanted in the Experimental Farm and the SONDA project, for the year 2007, seeking estimate the wind power density (DPE) for that location. Numerical simulations applied to the wind speed data were used to identify the periods in which the wind behavior is more favorable to use. The predominant directions of this variable found in São João do Cariri were southeast, with seasonal variations. However, both the observed (2, 25 and 50) and estimated (100 and 150m) wind speed values, as well as the power density estimates (50, 100 and 150m) showed that the lower wind speed intensities are present mainly in the morning, as well as in the first half of the year, while the highest values occur from ten o'clock in the morning extending to the beginning of the night, and predominate in the last six months. These determinations showed higher values of wind power densities available for the second half of the year (mainly from August to December).

Keywords: Conduct. Wind speed. Direction. DPE.

1. INTRODUÇÃO

Oriundo dos gradientes de pressões atmosféricas o vento é um elemento meteorológico, que vem sendo investigado há décadas por diversos autores, com a finalidade de entender melhor o seu comportamento (JING et al., 2020)

Tanto os recursos energéticos quanto suas aplicações demandam pesquisas que forneçam conhecimentos cada vez mais detalhados. Esta prática orienta a um melhor proveito e uso mais sustentável dos recursos naturais, com a finalidade de suprir às necessidades humanas, sem privar as gerações que se beneficiarão dos mesmos recursos (LOPEZ, 2012). Neste âmbito, uma das energias renováveis mais promissoras e de menor impacto sobre o ambiente é através dos ventos (MARIANO et al., 2017).

O Brasil apresenta excelentes sítios para implantação de parques eólicos, sendo que as melhores áreas se encontram ao longo da costa. Contudo, indica que no interior, particularmente do Nordeste, onde o estado da Paraíba está inserido, localizam-se sítios com capacidade de geração de energia eólica (SAUER et al., 2006). O favorecimento geográfico do Nordeste (NE) brasileiro com a intensidade e constância dos ventos Alísios implicam em condições apropriadas para a exploração desse recurso como alternativa energética (OLIVEIRA; COSTA, 2011).

A disponibilidade de informações atualizadas de campos de vento locais e regionais é essencial para uma gestão eficiente e previsão da produção de energia eólica (PEREZ et al., 2014). Para instalação de aerogeradores é primordial um estudo preliminar para se obter o potencial eólico local, como a intensidade da velocidade e direção do vento.

Diversos autores estudaram o potencial eólico existente no território brasileiro. Lima e Filho, em 2010, caracterizaram o regime de ventos na região de Triunfo, Pernambuco. Os dados foram obtidos do Projeto SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais), cuja predominância de vento encontrada foi de Sudeste. Todavia, os valores apresentaram um potencial eólico acima da média encontrada em outros lugares dentro e fora do Brasil.

Por meio de tratamento estatístico de dados de vento para o ano de 2008, Alé et al., (2010), mostraram a caracterização eólica da microrregião de São João do Cariri-PB. Os autores estimaram a velocidade média anual do vento a 100m. Porém, concluíram que o local não é atrativo para um empreendimento eólico de grande porte, todavia poderia ser uma região útil para a instalação de turbinas de pequeno porte.

Resultados similares ao dos autores supracitados foram encontrados por Lima e Filho (2012) ao analisar os recursos eólicos de São João do Cariri-PB, através de dados provenientes do projeto SONDA para o período de 2006 a 2009 aos níveis de 25 e 50m.

Os resultados dos estudos de recursos eólicos dependem da qualidade dos dados disponíveis, esses estudos podem fornecer apenas uma aproximação do potencial geral de energia eólica. Além disso, é importante considerar que o potencial de energia eólica pode variar significativamente para diferentes regiões (HERNANDEZ-ESCOBEDO et al., 2011; MANZANO-AGUGLIARO et al., 2013).

A Paraíba apresenta favoráveis condições meteorológicas e de relevo para o aproveitamento do vento tanto em áreas costeiras quanto em áreas interioranas. Com base nisso, este trabalho objetiva apresentar, por meio de um estudo de caso para a região de São João do Cariri-Paraíba, o comportamento da velocidade do vento a diferentes alturas, bem como, a estimativa da densidade de potência eólica da localidade aos níveis de 50,100 e 150m.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de Estudo

O município de São João do Cariri localiza-se na Mesorregião da Borborema e na Microrregião do Cariri Oriental Paraibano possui uma área total de 653,09 Km², sendo ocupada por 4.344 habitantes e uma densidade demográfica de 6,65 habitantes/Km², segundo o último censo. O município limita-se ao Norte com Gurjão e Santo André; a Oeste com Pararí, Serra Branca e Coxixola; a Leste com Cabaceiras e São Domingos do Cariri e ao Sul com Caraúbas. Está a 186,6 Km de distância da capital João Pessoa (MEDEIROS et al., 2015). Na Figura 1 é retratada a localização da cidade de São João do Cariri-PB.

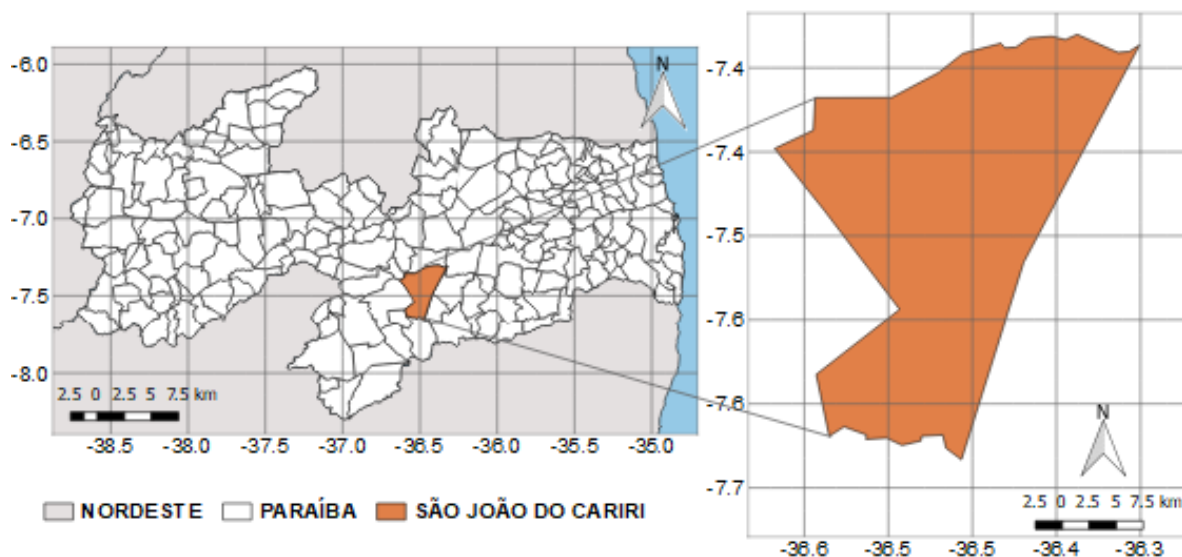


Figura 1. Localização do Município de São João do Cariri-PB.

2.1.1. Clima e Relevo

O clima de acordo com a classificação de Köppen é do tipo Bsh (semiárido quente), com chuvas fortemente variáveis em sua distribuição espacial, temporal e interanual, e uma estação seca que chega a alcançar 11 meses (ARAÚJO et al., 2005). O Cariri Oriental possui média pluviométrica variando de 400 a 500 mm ano⁻¹, e umidade relativa do ar de 70%, aproximadamente. A temperatura varia de 27,2°C no período novembro-março a 23,1°C em julho sendo estes os valores máximos e mínimos, respectivamente (SOUSA et al., 2007).

A geologia da área em que está situado o município está constituída pelo embasamento cristalino de idade Pré-Cambriana, onde predominam gnaisses, migmatitos e granitos. O local em estudo se localiza na zona fisiográfica do Planalto da Borborema, na mesorregião da Borborema e da microrregião do Cariri Oriental, apresentando relevo predominantemente plano e levemente ondulado, onde a área se encontra numa superfície do território paraibano intensamente rebaixado pelos ciclos de erosão iniciados no final do Período Terciário, que dissecaram perifericamente o núcleo nordestino do escudo brasileiro, com altitudes variando entre 400 e 600 m (ANDRADE-LIMA, 1981; ARAUJO et al., 2011).

A vegetação predominante é do tipo caatinga hiperxerófila e segundo Sousa et al. (2007), as espécies mais encontradas são: (*Mimosa tenuiflora* Willd. Poir.), pereiro (*Aspidosperma pyrifolium* Mart.), catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul), angico

(*Anadenanthera columbrina* Vell. Brenan), aroeira (*Myracrodruon urundeuva* Allemão) e cactáceas diversas.

2.2. Dados Utilizados

Foram utilizados dados observados de velocidade e direção do vento para a altura de 2m, com registros de 15 em 15 minutos, todavia utilizou-se apenas os dados dispostos em médias horárias obtidos a partir da estação automática implantada na Fazenda Experimental “Bacia Escola” segundo Araujo et al. (2005), pertencente e disponibilizado pela Universidade Federal da Paraíba, cuja localização insere-se no semiárido paraibano, compreendendo o ano de 2007.

No estudo desta área também foram utilizados os registros provenientes da torre anemométrica situada na Fazenda Experimental, disponibilizados pelo projeto SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais) do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). O projeto SONDA tem como objetivo principal desenvolver uma infraestrutura física e de recursos humanos para a montagem e o melhoramento da base de dados de superfície necessária ao levantamento dos recursos de energia solar e eólica do Brasil, e o consequente planejamento de seu uso (MARTINS et al., 2008).

A rede SONDA de dados, antes de dispor os dados de suas estações, submete-os a um processo de validação que objetiva identificar os dados suspeitos. Os processos de validação dos dados obtidos pelas estações SONDA baseiam-se na estratégia de controle de qualidade de dados adotada pela BSRN (Baseline Surface Radiation Network). Embora a BSRN trate apenas de radiação solar, sua estratégia de controle de dados foi também aplicada aos dados meteorológicos e anemométricos (SONDA, 2019).

Os dados da estação anemométrica (Torre SONDA), disponíveis para os doze meses do ano usadas no estudo (falta de registros no mês de maio), contemplam o ano de 2007, obtidos nas alturas de 25 m e 50 m, com registros de 10 em 10 minutos. Entretanto, nessa análise consideraram-se apenas os dados da velocidade do vento e da sua direção, organizados em médias horárias.

2.3 Métodos

2.3.1. Processamento de Dados

Para a modelagem abordada neste trabalho, utilizaram-se as planilhas eletrônicas do Excel, para estimativa e organização dos dados, assim como do Software R (R Core Team, 2019) através da utilização de dois pacotes sendo eles, openair e dplyr.

2.3.2. Análise Descritiva

Foram feitos os procedimentos de análise descritiva dos dados tomando-se como base porcentagens para a variável analisada. As mesmas foram descritas por meio de tendência central (média, mediana), e dispersão (desvio padrão) assim como a densidade de frequência.

2.3.3. Estimativa da Velocidade

Os dados de vento foram medidos a 2, 25, e 50m de altura. Por esta razão foi utilizada uma expressão logarítmica para estimar a velocidade do vento nas alturas de 100 e 150m. Eq. (1). Maiores detalhes podem ser obtidos em Manwell et al. (2002).

$$V(z) = V(z_r) \frac{\ln \frac{z}{z_0}}{\ln \frac{z_r}{z_0}} \quad (1)$$

em que:

$V(z_r)$ é a velocidade na altura de referência, na qual se utilizou a velocidade a 25 m;

$V(z)$ é a Velocidade na altura almejada;

Z altura desejada;

Z_r altura de referência e

Z_0 é a rugosidade da região.

O valor do coeficiente de rugosidade com relação ao terreno utilizado no estudo foi de 0,15, empregado conforme o critério de Fernandez Diez (2003) apontadas na Tabela 1:

Tabela 1. Coeficientes de rugosidade em função do tipo de terreno.

Descrição do Terreno	Coeficientes
Lugares planos com gelo ou mata	0,08-0,12
Lugares planos (mar, costa)	0,14
Terrenos pouco acidentados	0,15-0,16
Zonas rústicas	0,20
Terrenos acidentados ou bosques	0,20-0,26
Terrenos muito acidentados e cidade	0,25-0,40

Fonte: Fernandez Diez, 2003.

2.3.4. Potência Eólica Disponível no Vento

A energia eólica se dá através da energia potencial existente no vento, que é transformada em energia de movimento circular que passa através das pás ligadas ao rotor e sendo convertida em energia elétrica (MARTINS et al., 2008), consistindo-se assim no princípio de funcionamento básico dos aerogeradores. A equação da Potência disponível do vento é expressa pela Eq. (2) conforme Custódio (2009).

$$P_{disponível} = \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad (2)$$

em que:

$P_{disponível}$ é a Potência disponível do vento perpendicular à velocidade (ms^{-1}) ao cubo;
 A é área dada em metros, formada pelo diâmetro rotacional das pás dos aerogeradores no qual passa o vento e
 ρ (Kg/m^3) é a densidade do ar

No entanto, o Físico Albert Betz determinou um índice que explica o aproveitamento total da energia disponível no vento, que é de aproximados 59%. Tal fator foi designado de Potência de Betz (BETZ, 1926). Esta potência exprime às perdas causadas entre a dissipação de energia mecânica nos aerogeradores, dentre outros fatores. Deste modo, por meio de reorganizações matemáticas sob a Eq. (2), observou-se que a Densidade de Potência Eólica (DPE) pela área da secção transversal, resulta-se na seguinte equação:

$$D_P = \frac{P_{disp.}}{A} = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (3)$$

em que:

ρ (Kg/m³) é a densidade do ar e

V é a velocidade (ms⁻¹).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Variabilidade e Temperatura do Vento a 2, 25 e 50m de Altura

Mediante a Figura 2, observa-se o comportamento horário e mensal da velocidade do vento, para o ano de 2007, para a região de São João do Cariri a níveis próximos a superfície, sendo eles 2, 25 e 50m de altura.

A variabilidade da velocidade do vento ao nível de 2m, (Figura 2), apresenta maiores intensidade no período diurno (09:00 as 18:00 horas) com média em torno de 4,5 m/s. Entretanto, os menores valores de velocidades do vento se dão no intervalo da noite e início da manhã. Ressalta-se ainda que ao longo do ano estudado foram registradas velocidades do vento com médias abaixo de 4,5 m/s.

A influência da superfície é especialmente dominante numa camada que compreende os primeiros 50-100m da atmosfera, onde ocorrem as trocas calores e umidades entre a superfície e o ar atmosférico, devido a disponibilidade de radiação solar (MARTINS et al.,2008).

A tendência de ventos diurnos maiores que os noturnos se dão devido ao processo de aquecimento da superfície fazendo com que haja grande variabilidade ao longo do dia, e que exista predomínio de maiores intensidades no período diurno, sendo assim o potencial eólico também sofre alterações no regime diurno (OLIVEIRA et al., 2004; OLIVEIRA; SOUZA, 2018).

Sendo assim ao verificar a variabilidade da velocidade do vento nos níveis de 25 e 50 m (Figura 2), nota-se que o perfil de velocidade (média horária e mensal) para ambas apresentam comportamento similar. Quanto à variação horária, a maior variabilidade da velocidade do vento é perceptível durante a manhã, porém com as menores médias para os dois níveis. As maiores velocidades do vento ocorrem no período da tarde, onde o pico máximo para ambos os níveis é as 18:00 horas (6,8 m/s para 25 m e 8 m/s para 50 m), corroborando, portanto, ao padrão clássico com

ocorrências das maiores magnitudes de velocidade do vento durante o dia (RAMOS, 2012). Martins et. al. (2008) destaca que em maiores alturas o atrito que o vento sofre é menor e, portanto, alcança velocidades maiores que em alturas menores, aumentando exponencialmente a velocidade em relação ao aumento da altura.

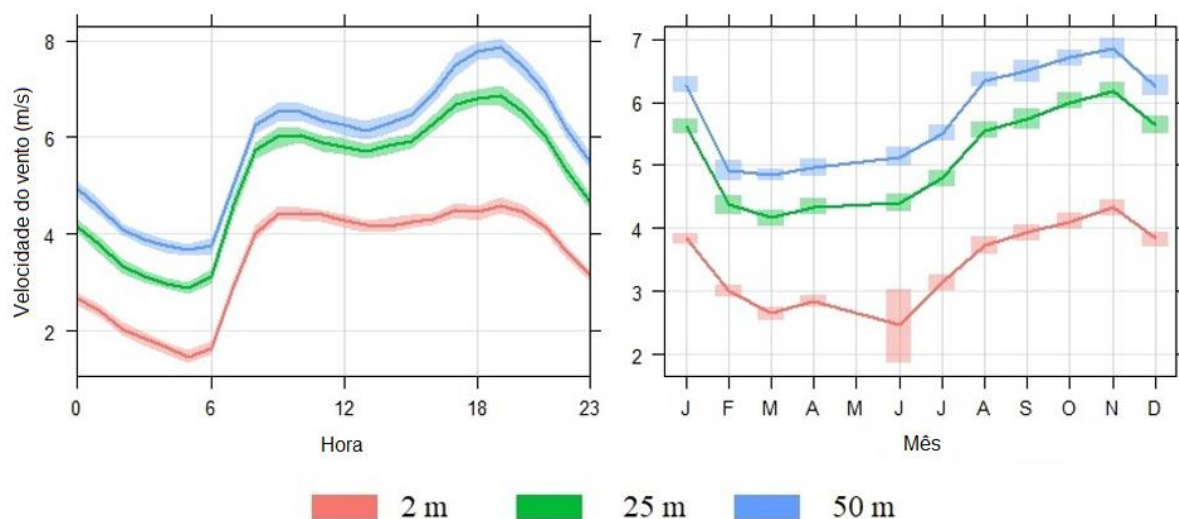


Figura 2. Variabilidade horária e mensal da velocidade do vento para as alturas de 2, 25 e 50m em São João do Cariri-PB no ano de 2007.

Da Nóbrega e De Aquino (2009) afirmam que maiores intensidades de ventos em todo o Nordeste ocorrem no segundo semestre do ano. Em conformidade com os autores citados, Lima e Filho (2012) ao analisar o vento na mesma localidade em evidência para o período 2006 a 2009 obtiveram valores condizentes com os encontrados no estudo atual, com menores valores de velocidade do vento no primeiro semestre (março-abril-maio) e maiores do segundo (novembro). Em estudo correlato para cinco regiões da Paraíba, Lima (2011) constatou resultados símeis, com presença de velocidades do vento máximas no segundo semestre.

Segundo Silva (2011), ventos mais intensos no período noturno, é uma característica típica de regiões mais afastadas do litoral. Este fato pode explicar, portanto, a ocorrência de ventos mais fortes durante o período noturno em São João do Cariri.

Pereira (2013) respalda que quanto maior for à variação de temperatura em determinada região ou local, maior será a circulação de vento. A magnitude destas variações é diretamente dependente das condições climáticas e das condições locais (OLIVEIRA, 2011).

Partindo do pressuposto, a variação média horária e mensal da temperatura do ar em São João do Cariri no ano de 2007 é apresentada na Figura 3. As quatro estações do decorrente ano apresentam variações de temperatura, principalmente durante o dia, em que os ventos são comumente mais fortes a partir de certa hora, caracterizando uma alta variação nas intensidades dos mesmos durante o ano em algumas alturas.

Verifica-se que a temperatura do ar a 2m de altura começa a aumentar a partir das 6:00 horas, com valores “elevados” entre os horários de 12:00 e 18:00 horas, em que o maior gradiente térmico é as 15:00 horas (31°C), de acordo com o verificado na figura 3. A temperatura varia bastante com a altitude e essa diferença em seu comportamento tem origem na forma com que cada uma de suas camadas é aquecida (REBOITA et al., 2016).

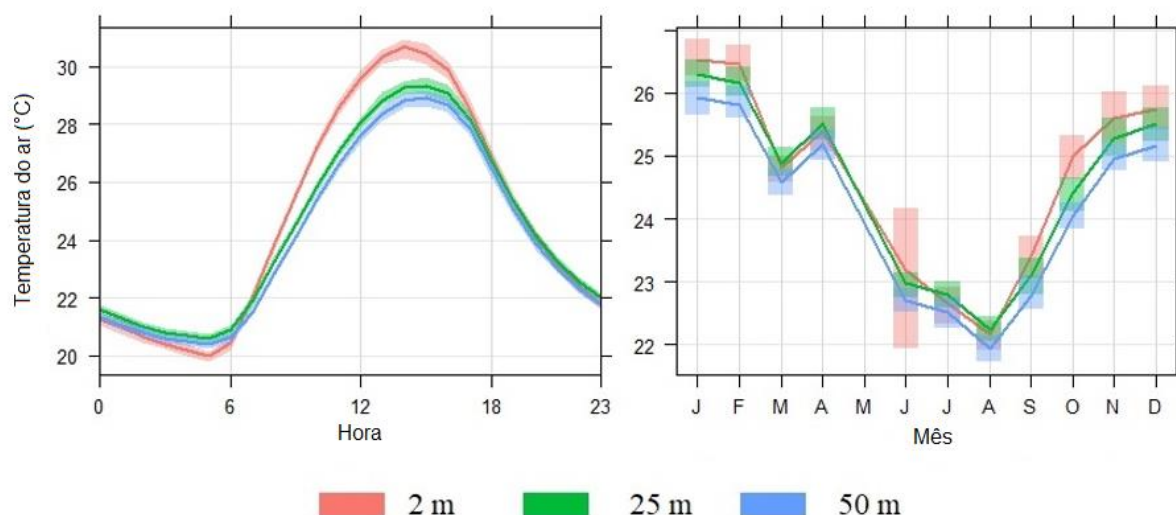


Figura 3. Variabilidade horária e mensal da temperatura do ar para as alturas de 2, 25 e 50m em São João do Cariri-PB para o ano de 2007.

Sendo assim aos níveis de 25 e 50 m verifica-se um comportamento de aumento dos valores da temperatura do ar, ocasionado possivelmente pela maior disponibilidade de radiação solar, e para o período de 7:00 às 18:00 horas, o processo de aquecimento das camadas superiores da superfície resultam numa maior disponibilidade de calor armazenado por volta das 18:00 horas para ambos níveis, em que registra-se 29 °C para 25 m e 28,5 °C para 50 m, em concordância associa-se o horário no qual registra-se um aumento repentino da intensidades de velocidade do vento para as mesmas alturas (Figura 2).

Observa-se ainda que os valores mínimos de temperatura do ar para as três alturas são registrados nos meses de maio, junho, julho e agosto, sendo o pico mínimo observado no mês de agosto (em torno de 22°C). No decorrer dos outros meses a temperatura começa a se elevar significativamente. Os valores máximos encontram-se entre os meses de outubro a fevereiro, cujo valor máximo é no mês de janeiro com 26,5°C para 2m, 26,2°C para 25m e 25,8 °C para a altura de 50m. Os valores máximos de temperatura ar estão diretamente relacionados à alta radiação solar.

Variações da temperatura em função da altura são responsáveis pela intensidade de turbulência, quanto mais próximas a superfícies mais intensas, devido fatores naturais. À medida que aumenta de altura a mesma é instigada principalmente pela convecção (MONTANHER; MINAKI, 2018).

3.2. Análise Sazonal da Direção do Vento

Outro aspecto fundamental para estudar o vento, além da sua velocidade, é a sua direção. É essencial ter o conhecimento do mesmo para determinar a otimização do aproveitamento e conseqüentemente a sua maximização na geração de energia.

Na Figura 4 é possível observar as possíveis direções sazonais do vento para o município de São João do Cariri nas três alturas em estudo no ano de 2007. Nota-se que para o nível de 2m a predominância de direção do vento em todas as estações é entre 100 e 150° (Lés-Sudeste e Sul-Sudeste). Para a altura de 25m, a direção sazonal dominante para todo o ano está entre 150 e 200° (Sul-Sudeste e Sul - Sudoeste). A 50m de altura as direções são similares a de 25m (Sul-Sudeste e Sul - Sudoeste), com maior predomínio também de 150 a 200° para todas as estações.

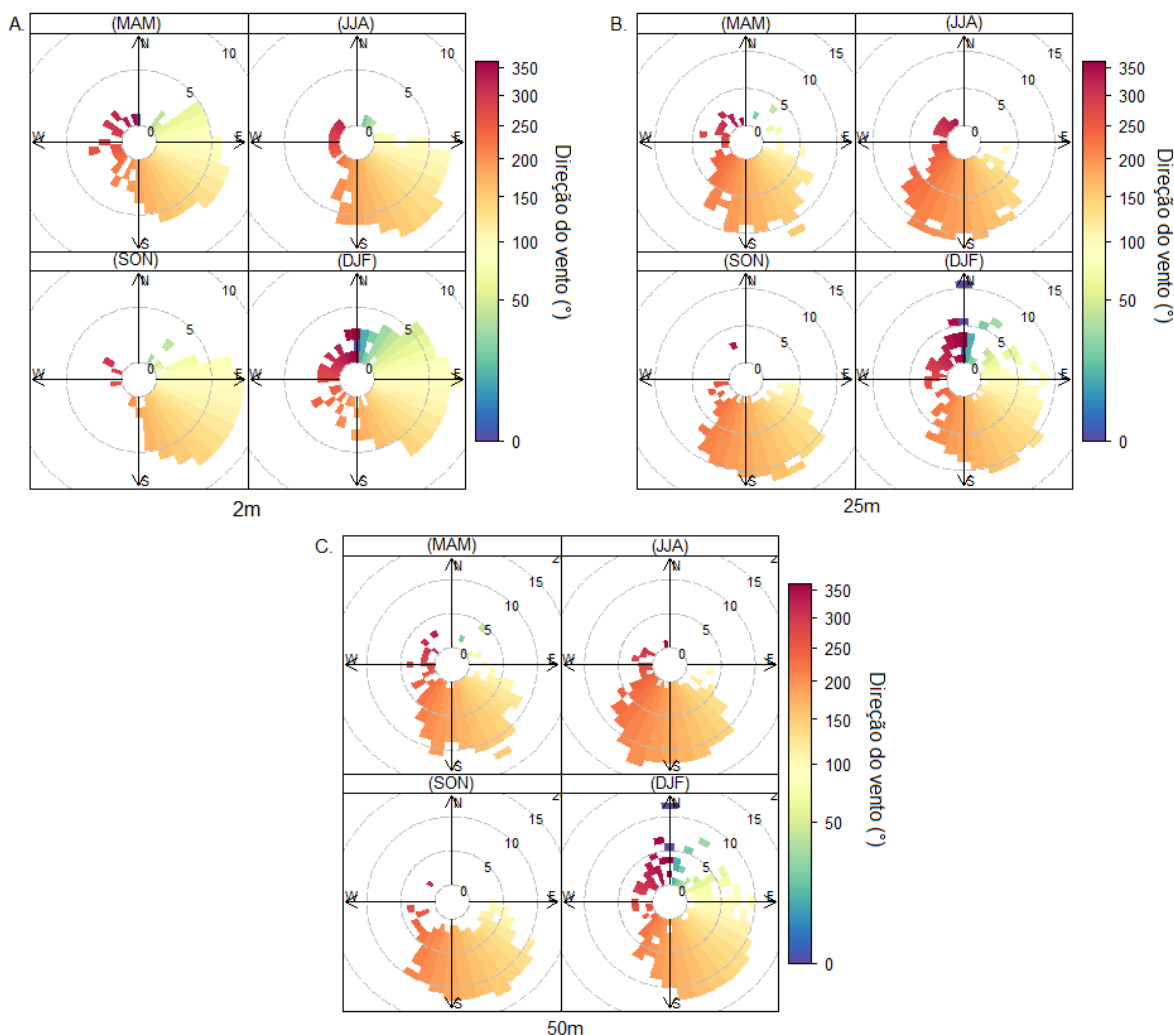


Figura 4. Variabilidade sazonal da direção do vento para as alturas de 2m (A), 25m (B) e 50m (C) em São João do Cariri-PB para o ano de 2007.

Mediante análise evidencia-se que para os três níveis avaliados na região de São João do Cariri, há maior variabilidade na direção se comparada à direção predominante, nas estações de verão e outono.

Conforme Foley et al. (2012), as variações na direção dos ventos podem acontecer na mesma escala de tempo das variações na velocidade. Variações sazonais na direção dos ventos podem ser pequenas, em torno de 30° , ou ultrapassar 180° . Também podem ocorrer variações bruscas na direção em função do comportamento turbulento do ar em decorrência da altura.

Ao estudar o regime de direção para São João do Cariri-PB no período 2006 a 2009, Lima e Filho (2012) obtiveram resultados de direções semelhantes às encontradas nas três alturas analisadas, sendo predominantemente de sudeste, com variações sazonais.

Lima et al. (2010) ao observar a variação mensal média da direção do vento para cinco regiões do estado da Paraíba (São Gonçalo, Monteiro, Patos Campina Grande e João Pessoa) identificaram resultados semelhantes ao encontrado, em que a direção do vento nas regiões variaram entre os ângulos de 20° e 180° no período em estudo. Em estudo análogo para o Submédio São Francisco Lopes et. al. (2017), encontraram uma frequência predominante na direção sudeste dos ventos na região.

3.3. Estimativas das Velocidades do Vento nos Níveis de 100 e 150m

Conforme ascensão na atmosfera, o atrito é reduzido concedendo ao vento maior velocidade, por isso, a importância de se analisar o regime dos ventos em vários níveis diferentes.

A partir da velocidade média do vento no local a 25m de altura, estimaram-se as velocidades do vento para as alturas de 100 e 150m, com o intuito de verificar o comportamento do mesmo nestes níveis de alturas que segundo a CEMIG (2010) são consideradas de interesse para o aproveitamento energético, já que sofre menores alterações em virtude das condições de relevo, presença de obstáculos e estabilidade térmica vertical.

Como a produção de energia é muito dependente das velocidades de vento, a avaliação da variabilidade da mesma é de suma relevância (PAULA et al., 2017). Silveira et al. (2011) ressalta que à medida que a altura aumenta a força de atrito contrária à direção do fluxo de ar é reduzida, aumentando a intensidade das velocidades do vento.

Na figura 5 é observada a variação horária e mensal da velocidade do vento para as duas alturas nas quais foram estimadas (100 e 150m). Percebe-se que a maior variabilidade da velocidade do vento ocorre no período diurno, tanto para 100 quanto para 150m de altura. A intensidade do vento possui maior oscilação no período diurno devido à grande variabilidade térmica no local.

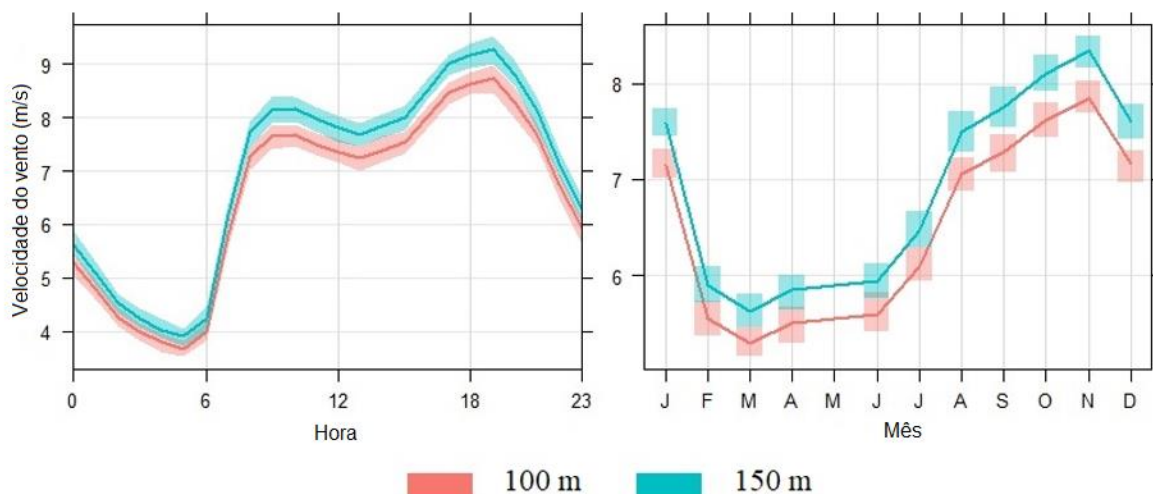


Figura 5. Variabilidade da velocidade do vento para os níveis de 100 e 150m em São João do Cariri-PB para o ano de 2007.

Nota-se que a velocidade do vento começa a decair no intervalo da madrugada estendendo-se até as 6:00 horas da manhã (com média em torno de 3m/s para as duas alturas), desde a qual percebe-se um aumento repentino. Contudo, os valores mais elevados de velocidade do vento compreendem o intervalo de tempo das 9:00 as 19:00, cujo maior pico é visto às 19:00 horas, chegando a atingir 8,8 m/s para 100m e 9,5m/s para 150m de altura.

Em níveis mais próximos da superfície terrestre, o intervalo de maior magnitude do vento ocorre durante o dia, do amanhecer ao final da tarde, sendo o forte gradiente térmico gerado pelo aquecimento superficial o principal mecanismo para esta condição. No entanto, com o acréscimo da altura, há uma variação neste ciclo, onde o vento no período noturno passa a ganhar velocidade (ARYA, 2001; LYRA; PEREIRA, 2007).

Arya (2001), afirma que para elevações superiores a 50 metros, os efeitos da superfície no vento já são menores, e mecanismos de escala sinótica, atuam com maior intensidade. Comumente, a evolução diurna do vento é invertida em níveis elevados (de 100 metros acima), com maiores velocidades no período noturno.

As variabilidades da velocidade do vento em alguns parques eólicos instalados no interior da Bahia denotam semelhanças com as características do vento em São João do Cariri, onde os ventos sopram com menor intensidade a partir do início da manhã e com maior intensidade após o pôr do sol (AMA, 2013).

Ao que diz respeito à variabilidade mensal para alturas em pauta, os maiores valores compreendem o quadrimestre de agosto a novembro, com médias oscilando de 7

a 8m/s para 100m e 8,5 a 9m/s para 150m, (Figura 5). A contar de dezembro as velocidades do vento começam a decair, com menores valores presentes no semestre de fevereiro a julho, variando de 5,3 a 5,9 m/s para 100m e 5,7 a 6,2m/s para 150m. Na época chuvosa (fevereiro a maio) a ocorrência de precipitação pode alterar as intensidades médias horárias da velocidade do vento.

Valores médios semelhantes foram encontrados por Mariano (2017) ao analisar a velocidade dos ventos nas regiões do Agreste, Borborema e para o Sertão da Paraíba, nas alturas de 10, 70 e 100m. Em que, nos níveis de 70 e 100 metros os valores foram mais intensos. Analisando o ciclo diário da velocidade do vento para o estado do Ceará Lima et al. (2011), observaram valores baixos no período da madrugada (entre 1:00 e 7:00 horas locais) e altos valores no período compreendido entre 10:00 e 18:00 horas locais. Valores máximos são observados no horário da noite onde há circulações locais de mesoescala, como as brisas terrestres.

Oliveira e Sousa (2018) ao analisar o comportamento do vento nas mesorregiões da Paraíba, destacaram a Borborema como a região onde o vento apresenta-se mais intenso, com áreas específicas ao norte e ao sul (onde se encontra São João do Cariri).

Segundo Rüncos et al. (2005) para tornar o vento viável de exploração em uma determinada área são necessárias velocidades do vento de 3,0 m/s para turbinas pequenas e de 6,0 m/s para grandes turbinas. Abaixo desses valores o conteúdo energético do vento não justifica o seu aproveitamento. Portanto, com base nos valores médios estimados para os dois níveis, São João do Cariri teoricamente dispõe de condições de vento favoráveis ao aproveitamento do vento para fins energéticos.

3.4. Estimativas das Densidades de Potências a 100 e 150m de Altura

Em grande parte dos locais do planeta o vento sopra mais intensamente durante o dia que a noite, em consequência das diferenças de temperaturas, todavia é mais turbulento e submetido a variações de sentido durante o dia (OLIVEIRA, 2011).

Os maiores valores da DPE estão compreendidos entre os meses de agosto a dezembro nas alturas e pauta, (Figuras 6, 7 e 8). Segundo Silva et al. (2016) durante o inverno, que vai de junho a setembro, o nordeste brasileiro apresenta uma elevada densidade de potência, onde, essa característica ainda persiste entre os meses de setembro a dezembro devido a influência dos ventos de sudeste durante essa estação.

Analisando separadamente a densidade de potência para cada nível verifica-se que a 50m, Figura 6, os valores médios são de 150 W/m^2 , se mostrando em torno da média encontrada por Mariano (2017), ao verificar a DPE para a região da Borborema (onde São João do Cariri está inserido) a altura de 70m (182 W/m^2). Esse valor médio é identificado em todo o ano, porém se faz mais presente no primeiro semestre principalmente no turno da tarde. Ao que diz respeito aos valores mais elevados (de 300 a 500 W/m^2), percebe-se sua presença a partir do mês de agosto até meados de fevereiro, variando das 09:00 as 22:00 horas. Todavia, os máximos valores estão presentes nos meses de outubro, novembro e dezembro (todos no intervalo das 18:00 as 21:00 horas).

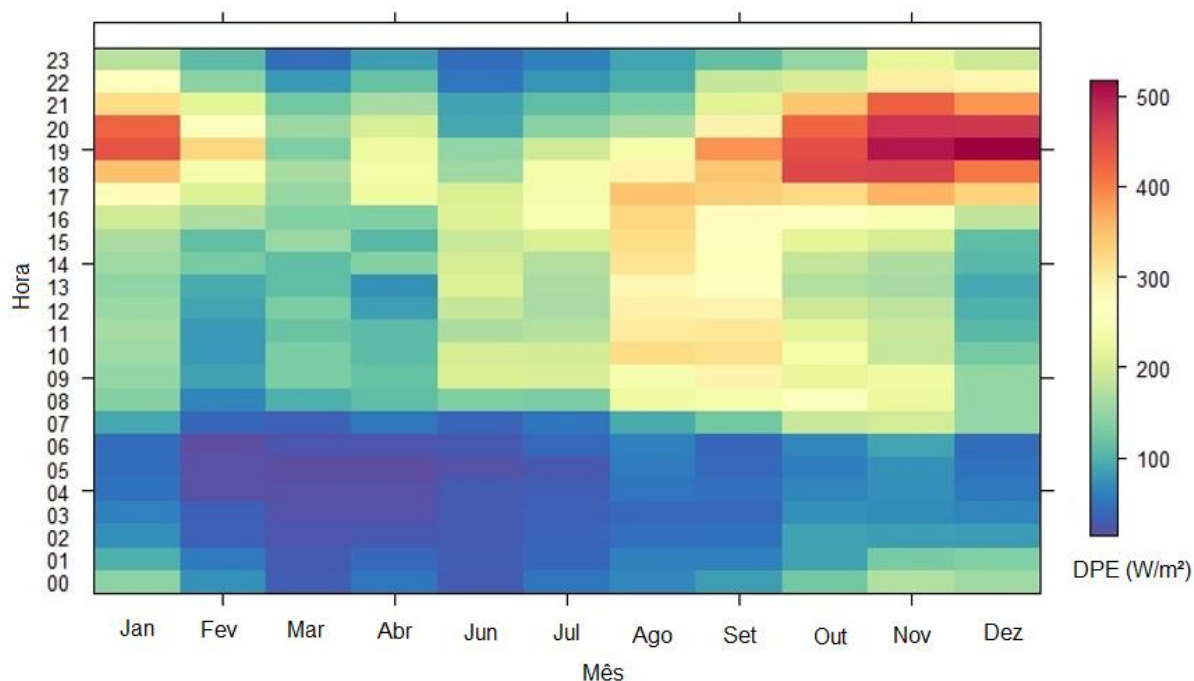


Figura 6. Densidade de potência (DPE) para o nível de 50m em São João do Cariri-PB no ano de 2007.

Para o nível de 100m, Figura 7, a densidade de potência média encontrada (230 W/m^2) mostrou-se bem próxima também a observada por Mariano (2017), 224 W/m^2 , em relação à mesma altura para a mesorregião onde se encontra a localidade analisada.

Os menores valores de DPE (abaixo de 200 W/m^2) compreendem o intervalo de horário das 00:00 as 07:00 horas) em todo o ano de 2007. Os valores máximos (500 a 700 W/m^2) têm início desde agosto a janeiro. Contudo nos meses de agosto e setembro esses valores variam do período da manhã até a noite (09:00 as 20:00 horas),

diferentemente dos demais meses, onde esses máximos encontram-se a partir do fim da tarde (17:00 as 21:00 horas), devido aos maiores valores de velocidade do vento, como já mencionado.

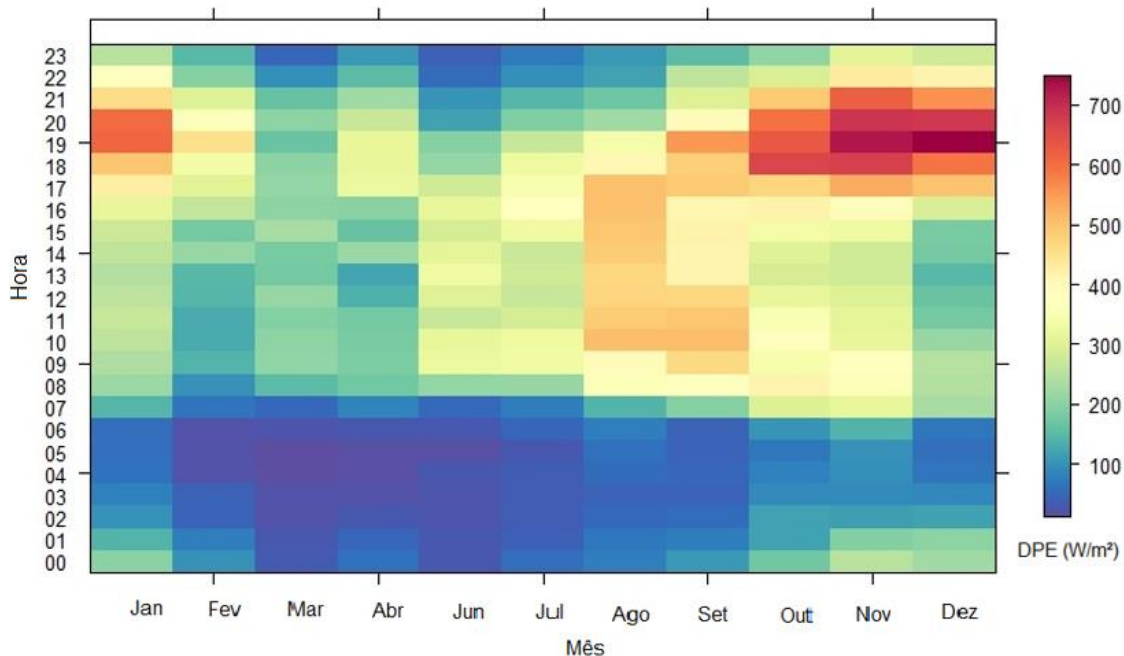


Figura 7. Densidade de potência (DPE) para o nível de 100 em São João do Cariri-PB no ano de 2007.

Em estudo equivalente Lima et al. (2010) ao expressar a densidade de potência eólica para ventos a 110m para algumas estações, dentre elas a de Patos, observou valores médios semelhantes os valores encontrados para a região de São João do Cariri. Os mesmos exprimem que no interior da Paraíba supõe-se que exista grande influência orográfica em todas as regiões, cujos valores baixos de potência são observados em alturas próximas a superfície.

A 150m de altura, Figura 8, a DPE média foi de 276 W/m², os valores mínimos (de 100 a 200 W/m²) variam durante todo o dia no primeiro semestre do ano, no entanto, no segundo semestre mostram-se mais frequentes nos horários que abrangem a madrugada até início da manhã (00:00 as 07:00 horas). Os valores máximos (500 a 900 W/m²) iniciam-se em agosto chegando até janeiro. Entretanto os seus regimes horários seguem o mesmo padrão das alturas anteriormente analisadas.

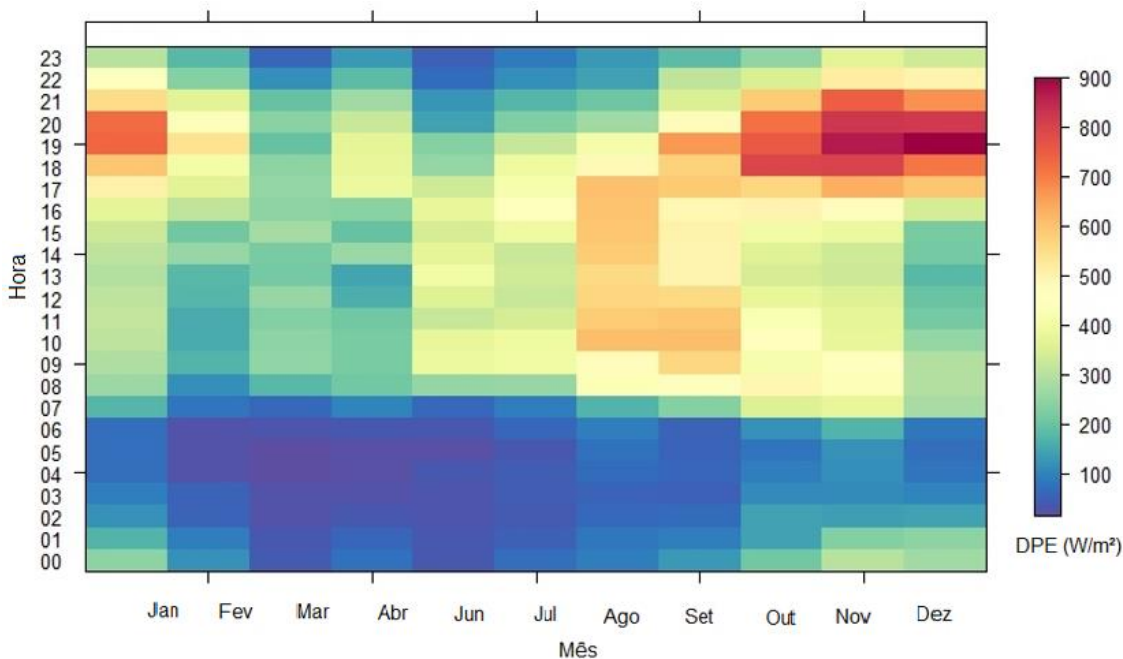


Figura 8. Densidade de potência (DPE) para o nível de 150 em São João do Cariri-PB no ano de 2007.

Vale salientar que a produção de energia eólica máxima no segundo semestre, de acordo com a DPE, coincide com o período de estiagem na região e consequentemente com o período de menor disponibilidade hídrica na produção de energia hidroelétrica em anos de seca (BECKER et al., 2011). Desse modo, a energia eólica, se devidamente explorada, poderá suprir essa deficiência. Em contrapartida, no primeiro semestre, meses de menores potências eólicas, ocorrem maiores disponibilidades de energias hidroelétricas, principalmente em anos chuvosos.

Observou-se um padrão similar entre distintas regiões do Nordeste em estudo realizado por Pinto et al. (2017) ao verificar o comportamento do vento em todo o NE, com valores mais acentuados nos meses de agosto a janeiro e menores valores de fevereiro a julho.

Outra informação obtida com o tratamento dos dados é a distribuição de frequência das densidades de potências sazonais do vento para as alturas de 100 e 150 m. Nas Figuras 9 e 10 observam-se as densidades de frequência da DPE para determinadas faixas. A curva sobreposta às faixas de DPE denota a distribuição de probabilidade caracterizando a amplitude da distribuição.

Analisando separadamente as densidades de ocorrência para cada altura, observa-se que a 100 m (Figura 9), na estação do verão, a maior densidade se dá entre os intervalos de 0 a 140 W/m^2 , totalizando cerca de 45% dos acontecimentos para o

intervalo, no outono as maiores repetições com quase 70% variam de 0 a 180 W/m², no inverno os valores mais frequentes variam de 0 a 150 W/m² com 52%, porém na primavera as maiores incidências se dão entre 0 e 170 W/m², com 34% dos episódios nesse intervalo. Ressalta-se que as maiores variabilidade estão presentes nas estações do verão (0 a 1373 W/m²) e primavera (0 a 1630 W/m²).

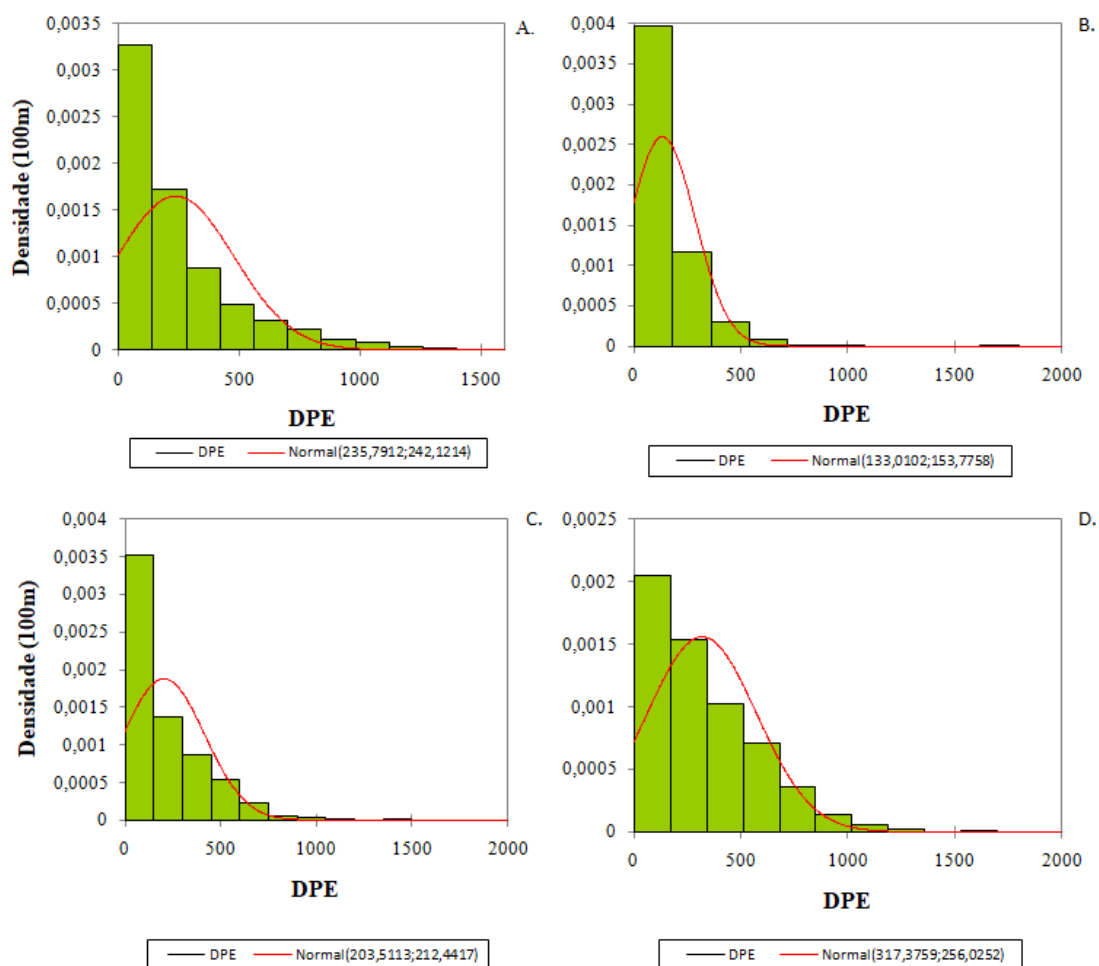


Figura 9. Distribuição das densidades de frequência para a altura de 100m para a localidade de São João do Cariri-PB no ano de 2007, para o Verão (A), Outono (B), Inverno (C) e Primavera (D).

Para a altura de 150m, Figura 10, a maior variabilidade se deu no verão (0 a 1646 W/m²) e na primavera (1 a 1956 W/m²), assim como a altura de 100m. O verão apresentou maior densidade entre os intervalos de 0 a 170 W/m², somando 46% dos acontecimentos para o intervalo, os menores acontecimentos para essa estação foram entre 1360 a 1530 W/m² com apenas uma ocorrência. No outono as maiores repetições variam de 0 a 210 W/m², com 70% das observações, contudo os menores valores se

fazem presentes no intervalo 840 a 2100 W/m². Já no inverno os valores mais sucessíveis variam de 0 a 180 W/m² com predominância de 52%, cujos valores mínimos acontecem entre 1260 a 1800 W/m². Por último a primavera tem maiores incidências de 0 e 200 W/m², com 34% das ocorrências nesse intervalo, e mínimas entre 1400 e 2000 W/m².

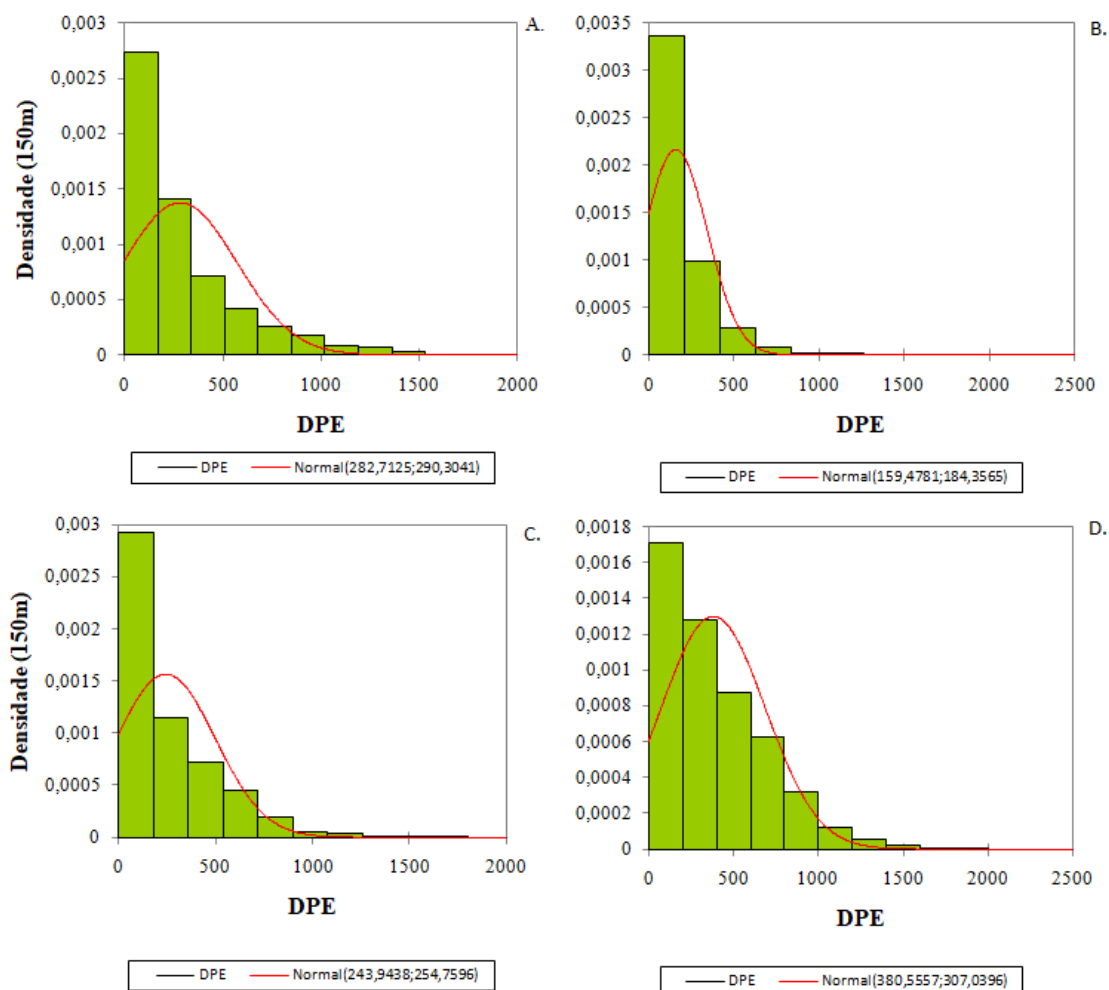


Figura 10. Distribuição das densidades de frequência para a altura de 150m para a localidade de São João do Cariri-PB no ano de 2007, para o Verão (A), Outono (B), Inverno (C) e Primavera (D).

4. CONCLUSÕES

Deve ser destacado que os resultados do presente trabalho têm caráter necessariamente preliminar permitindo avaliar características importantes da variação, horária, mensal, sazonal da direção e da velocidade do vento em diferentes alturas, sendo de grande pertinência ao que se refere à utilização dessa variável.

Quanto ao padrão de distribuição da velocidade do vento para as alturas próximas a superfície, as mesmas apresentaram comportamento congênere, com mínimas nos meses iniciais do ano, e máximas no último semestre. As direções dominantes encontradas foram de sudeste, com variações sazonais, para os níveis próximos a superfície.

Nessa conjuntura, as simulações geradas para as velocidades do vento a 100 e 150m de altura deixaram evidente que valores menores ocorrem principalmente no intervalo da manhã assim como para o período chuvoso da região (fevereiro a maio), enquanto que os maiores valores ocorrem a partir das dez horas da manhã até o fim da tarde e início da noite, e predominam nos meses de setembro a novembro (período seco).

No tocante a estimativa da densidade de potência nessa localidade aos níveis de 50, 100 e 150m foi possível constatar que os meses de maior DPE, foram de agosto a janeiro (final do inverno, primavera e início do verão), compreendendo o período de estiagem na região. Enquanto que as menores densidades de deram durante a manhã em todo o ano de 2007, destacando-se nos primeiros seis meses do ano.

Estas determinações mostraram, portanto, que os resultados obtidos com as simulações geradas integram uma base de dados de grande valia na avaliação do comportamento do vento nesta localidade para estudos futuros.

5. REFERÊNCIAS

ALÉ, J. A. V., OLIVEIRA, C. P., LOPES, A. M. G. Caracterização Eólica de Microrregião Utilizando Torre Meteorológica e Ferramenta Computacional. **Anais: Seminário Nacional Sobre Engenharia do Vento – SENEV**, Belo Horizonte, MG, 2010.

AMA- **Acompanhamento de Medições Anemométricas**. Caracterização do Recurso Eólico e Resultados Preliminares de sua Aplicação no Sistema Elétrico, 2013. Disponível: <<http://epe.gov.br/sitespt/publicacoesdadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao232/topico212/Informa%C3%A7%C3%B5es%20contidas%20na%20base%20de%20dados%20AMA.pdf>>. Acesso em: 05 Jan 2020.

ANDRADE-LIMA, D. A., 1981. **Domínios da Caatinga**. Instituto de Ecologia Humana/ fundação Ford, Recife.

ARAÚJO, K. D.; ANDRADE, A. P.; RAPOSO, R. W. C.; OLIVEIRA ROSA, P. R. O.; JR, E. P. Análise das Condições Meteorológicas de São João do Cariri no Semiárido Paraibano. **Revista do Departamento de Geociências**, v. 14, n. 1, p. 61-72, 2005.

ARAÚJO, K. D.; Dantas, R. T.; Andrade, A. P.; Parente, H. N. Cinética de Evolução de Dióxido de Carbono em Área de Caatinga em São João Do Cariri-PB. **Árvore**, v.35, n.5, p.1099-1106, 2011.

ARYA, P. **Introduction to Micrometeorology**. Academic Press, v. 2, 2001

BECKER, C. T.; MELO, M. M. M. S.; COSTA, M. N. M.; RIBERO, E. P. R. Caracterização Climática das Regiões Pluviometricamente Homogêneas do Estado da Paraíba. **Brasileira de Geografia Física**, v. 01, p.286-299, 2011.

CEMIG, **Companhia Energética de Minas Gerais**. Atlas Eólico de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2010.

CUSTÓDIO, R.S. **Energia Eólica para Produção de Energia Elétrica**. 577p. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2009.

DA NÓBREGA, M. M. H.; DE AQUINO, R. R. B. Oferta de Energia Através da Complementaridade Sazonal Hidro-Eólica. **PCH Notícias & SHP News**, v. 40, p. 24-28, 2009.

FERNÁNDEZ DIEZ, P. **Energía Eólica**. Universidad de Cantabria. . p.01-20, 2003

FOLEY, A.M.; LEAHY, P.G.; MARVUGLIA, A.; McKEOGHY, E.J. Current Methods and Advances in Forecasting of Wind Power Generation. **Renewable Energy**. v.37, p. 1-8. 2012.

HERNANDEZ-ESCOBEDO, Q.; MANZANO-AGUGLIARO, F.; GAZQUEZ-PARRA, J.A.; ZAPATA-SIERRA, A. Is The Wind a Periodical Phenomenon? The Case of Mexico. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.15, n.1, p. 721-728, 2011.

JING, H.; LIAO, H.; MA, CUNMING.; TAO, Q.; JIANG, J. Field Measurement Study of Wind Characteristics at Different Measuring Positions in a Mountainous Valley. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v.112, 2020.

LIMA, F. J. L. **Avaliação do Potencial Eólico no Estado da Paraíba: Um Estudo Observacional e Numérico**. 81f. Dissertação – (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, 2011.

LIMA, F. J. L.; CAVALCANTI, E. P.; SOUZA, E. P. Avaliação do Potencial Eólico em Cinco Regiões do Estado da Paraíba. **Geografia**, v. 27, n. 1, p. 138-153, 2010.

LIMA, L. A.; FILHO, C. R. B. Wind Energy Assessment and Wind farm Simulation in Triunfo – Pernambuco, Brazil. **Renewable Energy**, v. 35, n.12, p.2705-2713, 2010.

LIMA, L. A.; FILHO, C. R. B. Wind Resource Evaluation in São João do Cariri (SJC)– Paraíba, Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.16, p. 474–480, 2012.

LOPES, I.; CERQUEIRA JÚNIOR, E. P. DE; MELO, J. M. M. DE; LEAL, B. G. Wind Power Generation Potential in the San Francisco Submiddle. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 2 n. 4, p.330-340, 2017.

LOPEZ, R.A. **Energia Eólica**. Energia e Meio Ambiente. São Paulo: Artiber. p. 312-332, 2012.

LYRA, G. B.; PEREIRA, A. R. Dificuldades de Estimativa dos Parâmetros de Rugosidade Aerodinâmica pelo Perfil Logaritmo do Vento Sobre Vegetação Esparsa em Região Semi-Árida. **Brasileira de Geofísica**, v. 25, n. 2, p. 187-197, 2007.

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

MANZANO-AGUGLIARO, F.; ALCAYDE, A.; MONTOYA, A. ZAPATA-SIERRA, C. Scientific Production of Renewable Energies Worldwide: An Overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.18, p. 134-143, 2013.

MARIANO, E. B. 86f. **Simulação do Modelo Brams para Instalação de Parque Eólico no Nordeste Setentrional Oriental do Brasil**. Tese-(Doutorado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, 2017.

MARIANO, E. B.; CAVALCANTI, E. P.; BESERRA, E. A. Análise Comparativa da Velocidade do Vento Simulado pelo BRAMS com Dados Observados e de Reanálises. **Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 2, p. 269-276, 2017.

MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B. O Aproveitamento da Energia Eólica. **Brasileira de Ensino de Física**, v. 1, p. 1 - 13, 2008.

MARTINS; F.R.; GUARNIERI, R.A.; PEREIRA, E.B. O Aproveitamento da Energia Eólica. **Brasileira de Ensino de Física**, vol.30, n.1, 2008.

MEDEIROS, R. M.; SANTOS, D. C.; FRANCISCO, P. R. M.; FILHO, M. F. G. Análise Hidroclimática da Região de São João do Cariri-PB. **Educação Agrícola Superior**, v.30, n.2, p.59-65, 2015.

MONTANHER, O. C.; CÍNTIA MINAKI, C. Condicionantes Geográficos da Temperatura do Ar no Estado do Paraná. **Ra'e Ga**, v.45, p. 250 -267, 2018.

OLIVEIRA, L. S. 115f. **Regras e Boas Práticas para Instalação de Torres Anemométricas Voltadas para Estudo de Potencial Eólico**. Tese (Mestrado em Planejamento Energético). Rio de Janeiro. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

OLIVEIRA, J. L.; COSTA, A. A. Estudo de Variabilidade do Vento em Escala Sazonal sobre o Nordeste Brasileiro Utilizando o Rams: Os Casos de 1973-1974 e 1982-1983. **Brasileira de Meteorologia**, v.26, n.1, p. 53 - 66, 2011.

OLIVEIRA, P. J. ROCHA J. P.; FISCH, G.; GILBERTO FISCHI; KRUIJT, B.; RIBEIRO, J.B.M. Efeitos de um Evento de Friagem nas Condições Meteorológicas na Amazônia: Um Estudo de Caso. **Acta Amazônica**. v.34, n.4. 2004

OLIVEIRA, S. S.; SOUZA, E. P. Utilização de Modelos de Mesoescala como Ferramenta Inicial para o Mapeamento Eólico do Estado da Paraíba. **Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 3, p.459-471, 2018.

PAULA, L. P.; CARDOSO, F. A. C.; CARDOSO, R. B.; CUNHA, G. P. Q.; VIEIRA, E. M. Modelagem Espacial da Velocidade do Vento a 50, 75 E 100 Metros de Altura para o Estado de Minas Gerais, Brasil, Empregando Geoestatística. **Brasileira de Geografia Física**, v.10, n.04, p.1281-1295, 2017.

PEREIRA, R. C. 132f. **Impactos da Inserção de um Sistema De Micro-Geração Eólica Distribuída para um Alimentador Radial Real e Suas Unidades Consumidoras**. Dissertação-(Engenharia Elétrica), Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

PEREZ, A. A.; SALAS, J. C. P.; ROSA, J. J. G. DE LA; FERNÁNDEZ, J. M. S. Regional Wind Monitoring System Based on Multiple Sensor Networks: A Crowdsourcing Preliminary Test. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 127, p. 51 - 58, 2014.

PINTO, L. I. C.; LIMA, F. J. L.; MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B. Análise de Agrupamento na Otimização de Futuras Aplicações de Modelagem Numérica na Estimativa e Previsão de Recurso Eólico. **Brasileira de Geografia Física**, v.10, n.06, p.1698-1711, 2017.

R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Viena, Áustria: R Foundation for Statistical Computing. Disponível em: <http://www.r-project.org>. Acesso em: 15 Set 2019.

RAMOS, D. R. S. **Mapeamento Eólico do Estado de Alagoas Utilizando Ferramentas Computacionais e Dados Observados**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2012.

REBOITA, M. S.; RODRIGUES, M; ARMANDO, R. P.; FREITAS, C.; MARTINS, D.; MILLER, G. Causas da Semiaridez do Sertão Nordeste. **Brasileira de Climatologia**, v. 19, n. 12, 2016.

RÜNCOS, F.; CARLSON, R.; KUO-PENG, P.; VOLTOLINI, H.; BATISTELA, N.J. Geração de Energia Eólica Tecnologias Atuais e Futuras. **Eletricidade Moderna**,v. 1, Mar. 2005.

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

SILVA, A. R. **Caracterização do Vento e Potencial Eólico no Estado de Alagoas**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2011.

SILVA, A. R.; PIMENTA, F. M.; ASSIREU, A. T.; SPYRIDES, M. H. C. Complementarity of Brazil's Hydro and Offshore Wind Power. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 56, p. 413-427, 2016.

SILVEIRA, I. C.A.; SCHIMIDT, A. C. K.; CAMPOS, E. J. D.; GODOI, S. S.; IKEDA, Y. A Corrente do Brasil ao Largo da Costa Leste Brasileira. **Brasileira de Oceanografia**, v. 48, n. 2, p. 171-183, 2011.

SONDA-Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais. Disponível em:<<http://sonda.ccst.inpe.br/>>. Acesso em: 09 Nov 2019.

SOUSA, R. F.; BARBOSA, P. M.; TERCEIRO NETO, P. C.; CARVALHO, A. P.; SOUSA JÚNIOR, S. P.; ALENCAR, M. L. S. Geotecnologia no Estudo da Evolução Espaço-Temporal da Cobertura Vegetal do Município de São João do Cariri-PB. **Ambiental**, v.4, n.2, p.60-67, 2007.

CAPÍTULO 4

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Avaliando a variabilidade da velocidade do vento em todas as microrregiões do estado da Paraíba, compreendendo de início o intervalo de tempo de 2000 a 2007, assim como um estudo de caso apenas para o ano de 2007, a respeito da densidade de potência eólica em níveis mais elevados para a localidade de São João do Cariri, obtiveram-se resultados satisfatórios.

Os dados do CFSR utilizados no estudo foram devidamente validados com dados observados do INMET por meio de métodos estatísticos avaliativos. A velocidade do vento estimada pelo CFSR apresentou resultados representativos para as estações selecionadas para validação. Ao que diz respeito aos coeficientes de determinação, a localidade de Areia denotou o menor valor, estando diretamente relacionado aos efeitos orográficos nos quais o município está sujeito.

A partir da análise da variabilidade da velocidade do vento no estado constatou-se que os menores valores decorrem no primeiro semestre, entre o verão e o outono e os maiores valores entre o inverno e a primavera (segundo semestre), especialmente na primavera foram alcançados os valores mais intensos. Quanto ao cenário mensal os meses de março e abril, denotaram velocidades baixas para o recorrido período, porém os meses de setembro e outubro indicaram valores máximos, salientando a sazonalidade da região (intensificação e desintensificação dos ventos).

Avaliou-se a variabilidade da velocidade do vento nas microrregiões do estado através da Análise Fatorial e Análise de Agrupamento, onde dois fatores foram capazes de explicar quase 100% de toda variância, sendo que o primeiro fator está correlacionado com o período de menores velocidades de vento para a região, e o segundo componente com o período de maiores velocidades. Entretanto as regiões homogêneas de velocidade do vento foram agrupadas em sete grupos, denotando o interior do estado com os ventos de maiores intensidades quando comparadas as demais regiões.

Os resultados da análise e simulações da variabilidade da velocidade do vento realizadas para o município de São João do Cariri permitiu observar que velocidade do vento tanto para as os níveis próximos a superfície quanto para níveis mais elevados (simulados), apresentaram comportamento congênere, com mínimas nos meses iniciais

do ano, e máximas no último semestre. As direções dominantes encontradas foram de sudeste, com variações sazonais, para os níveis perto da superfície.

Nesse contexto, os resultados obtidos com as simulações para as velocidades do vento a 100 e 150m de altura deixaram evidente que valores menores ocorrem principalmente no intervalo da manhã assim como para o período úmido da região (fevereiro a maio), enquanto que os maiores valores ocorrem a partir das dez horas da manhã até o fim da tarde e início da noite, e predominam nos meses de setembro a novembro (período seco).

No que concerne a estimativa da densidade de potência eólica nessa localidade aos níveis de 50, 100 e 150m constatou-se que os meses de maior DPE, se deram entre o final do inverno, primavera e início do verão (agosto a janeiro), compreendendo o período de menor disponibilidade hídrica na região. Enquanto que as menores densidades de potência foram obtidas durante o turno da manhã em todo o ano de 2007, com maior frequência nos primeiros seis meses do ano. Caracterizando o segundo período do ano como o precursor dos maiores valores de DPE disponível.

Sendo assim, de forma geral os métodos estatísticos usados no trabalho se mostraram satisfatórios no estudo da avaliação da variabilidade espacial e temporal da velocidade do vento em todo o estado paraibano. As estimativas geradas para a localidade de São João do Cariri apresentaram um bom desempenho, formando uma base de dados de grande valia na identificação do comportamento do vento para tal localidade estando disponível para ser usada em estudos futuros mais detalhados.

ANEXO I

Comandos desenvolvidos no ambiente R (R CORE TEAM, 2016).

#####

Titulo: "Variabilidade do Vento e Densidade de Potência"

Autor: Welinagila Grangeiro de Sousa

#####

PACOTES

```
install.packages("openair")
```

```
install.packages("dplyr")
```

```
library(openair)
```

```
library(dplyr)
```

#####

#leitura dos dados de velocidade do vento

```
dados<-read.csv("dados2007-3.csv", header=TRUE, sep=";")
```

#####

dados

#####Variabilidade temporal da velocidade do vento#####

#TimePlot

#2, 25 e 50m de altura

```
timePlot(dados, pollutant = c("ws2", "ws25", "ws50"), date.breaks = 12,
         group = F, avg.time = "hour", statistic = "mean")
```

#####100 e 150 de altura#####

```
timePlot(dados, pollutant = c("ws100", "ws150"), date.breaks = 12,
         group = F, avg.time = "hour", statistic = "mean")
```

#####2, 25, 50, 100 e 150m de altura#####

```
timePlot(dados, pollutant = c("ws2", "ws25", "ws50", "ws100", "ws150"), date.breaks =
12,
         group = F, avg.time = "hour", statistic = "mean")
```

#####Vento timePlot#####

```
timePlot(dados, pollutant = c("ws2", "ws25", "ws50"), date.breaks = 12,
         group = F, avg.time = "day", statistic = "mean")
```

```

timePlot(dados, pollutant = c("ws2", "ws25", "ws50"), date.breaks = 12,
        group = F, avg.time = "month", statistic = "median")

#####temperatura do ar timePlot#####
timePlot(dados, pollutant = c("temp2", "temp25", "temp50"), group = T, avg.time =
"day")

#####Temperatura TimeVariation#####
timeVariation(dados, pollutant = c("temp2"))
timeVariation(dados, pollutant = c("temp25"))
timeVariation(dados, pollutant = c("temp50"))
timeVariation(dados, pollutant = c("temp2", "temp25", "temp50"))

#####Vento TimeVariation 2, 25 e 50#####
timeVariation(dados, pollutant = c("ws2", "ws25", "ws50"))

#####Vento TimeVariation 100,150#####
timeVariation(dados, pollutant = c("ws100", "ws150"))
timeVariation(subset(dados, ws2 > 1 & wd2 > 0 & wd2 < 360),
        pollutant = c("temp2"), ylab = "Temperatura do ar (°C)")
timeVariation(subset(dados, ws25 > 1 & wd25 > 0 & wd25 < 360),
        pollutant = c("temp25"), ylab = "Temperatura do ar (°C)")
timeVariation(subset(dados, ws50 > 1 & wd50 > 0 & wd50 < 230),
        pollutant = "temp50", ylab = "Temperatura do ar (°C)")
summaryPlot(dados, clip = T, date.breaks = 12, col.trend = "darkgoldenrod2")

#####Análise da variabilidade vento (tempos)#####
myplot <- timeVariation(dados, pollutant = "ws2")
plot(myplot, subset = "day.hour")
plot(myplot, subset = "day")
plot(myplot, subset = "month")
myplot <- timeVariation(dados, pollutant = "ws25")
plot(myplot, subset = "day.hour")
plot(myplot, subset = "day")

```



```

plot(myplot, subset = "month")
myplot <- timeVariation(dados, pollutant = "ws50")
plot(myplot, subset = "day.hour")
plot(myplot, subset = "day")
plot(myplot, subset = "month")
#####Percentis vento#####
smoothTrend(dados, pollutant = "ws2", avg.time = "month",
             statistic = "percentile", percentile = c(15, 50, 75, 95),
             date.breaks = 12)
smoothTrend(dados, pollutant = "ws25", avg.time = "month",
             statistic = "percentile", percentile = c(15, 50, 75, 95),
             date.breaks = 12)
smoothTrend(dados, pollutant = "ws50", avg.time = "month",
             statistic = "percentile", percentile = c(15, 50, 75, 95),
             date.breaks = 12)
#####Frequência de observações vento#####
timeProp(dados, pollutant = "ws2", avg.time = "month",
          proportion = "wd2", date.breaks = 12)
timeProp(dados, pollutant = "ws25", avg.time = "month",
          proportion = "wd25", date.breaks = 12)
timeProp(dados, pollutant = "ws50", avg.time = "month",
          proportion = "wd50", date.breaks = 12)
##### trendLevel vento#####
trendLevel(dados, pollutant = "ws2")
trendLevel(dados, pollutant = "ws25")
trendLevel(dados, pollutant = "ws50")
##### trendLevel direção vento#####
trendLevel(dados, pollutant = "wd2")

```

```

trendLevel(dados, pollutant = "wd25")
trendLevel(dados, pollutant = "wd50")
##### trendLevel temperatura#####
trendLevel(dados, pollutant = "temp2")
trendLevel(dados, pollutant = "temp25")
trendLevel(dados, pollutant = "temp50")
#####Influência da direção do vento#####
polarPlot(dados, pollutant = "ws2",
          x = "ws2", wd = "wd2")
polarPlot(dados, pollutant = "ws25",
          x = "ws25", wd = "wd25")
polarPlot(dados, pollutant = "ws50",
          x = "ws50", wd = "wd50")
polarPlot(dados, pollutant = "temp2",
          x = "ws2", wd = "wd2", type = "month")
polarPlot(dados, pollutant = "temp25",
          x = "ws25", wd = "wd25", type = "month")
polarPlot(dados, pollutant = "temp50",
          x = "ws50", wd = "wd50", type = "month")
#####Densidade de Potência#####
#####Densidade de Potência (dpe) 50, 100 e 150#####
timePlot(dados, pollutant = c("dpe50", "dpe100", "dpe150"), date.breaks = 12,
         group = F, avg.time = "hour", statistic = "mean")
#####Frequência de observações dpe#####
polarFreq(dados, pollutant = "dpe50", type = "season",
          statistic = "median", min.bin = 1)
timeProp(dados, pollutant = "dpe50", avg.time = "month",
         proportion = "ws50", date.breaks = 12)

```

```

timeProp(dados, pollutant = "dpe100", avg.time = "month",
         proportion = "ws100" , date.breaks = 12)
timeProp(dados, pollutant = "dpe150", avg.time = "month",
         proportion = "ws150" , date.breaks = 12)
#####Análise da variabilidade dpe (tempos)#####
#####50#####
myplot <- timeVariation(dados, pollutant = "dpe50")
plot(myplot, subset = "day.hour")
plot(myplot, subset = "day")
plot(myplot, subset = "month")
#####100#####
myplot <- timeVariation(dados, pollutant = "dpe100")
plot(myplot, subset = "day.hour")
plot(myplot, subset = "day")
plot(myplot, subset = "month")
#####150#####
myplot <- timeVariation(dados, pollutant = "dpe150")
plot(myplot, subset = "day.hour")
plot(myplot, subset = "day")
plot(myplot, subset = "month")
#####trendLeve dpe#####
trendLevel(dados, pollutant = "dpe50")
trendLevel(dados, pollutant = "dpe100")
trendLevel(dados, pollutant = "dpe150")
#####
#Leitura do arquivo com dados 2metros
#####
dados2<-read.csv("dados2.csv", header=TRUE, sep=";")

```

```

dados2

daily2 <- timeAverage(dados2, avg.time = "day",
                      statistic = "mean")

daily2

summaryPlot(daily2, type = "density", date.breaks = 12,
            col.data = "lightblue", print.datacap = F,
            auto.text = T)

hora2 <- timeAverage(dados2, avg.time = "hour",
                    statistic = "mean")

hora2

summaryPlot(hora2, type = "density", date.breaks = 12

#####Rosa dos ventos (variabilidade diária e horária)#####

windRose(daily2)

windRose(daily2, angle = 30, width = 0.6, grid.line = 20,
         ws.int = 2, breaks = 6, type = "season")

windRose(daily2, angle = 30, width = 0.6, grid.line = 20,
         ws.int = 2, breaks = 6, type = "weekday")

windRose(hora2)

windRose(hora2, angle = 30, width = 0.6, grid.line = 20,
         ws.int = 2, breaks = 6, type = "season")

#####Influência da direção do vento#####

#polarFreq (quantidade de observações)

polarFreq(dados2)

#Frequência (variabilidade mensal e sazonal)

#####direção#####

polarFreq(dados2, pollutant = "wd", type = "season",
         statistic = "median", min.bin = 1)

#####velocidade#####

```

```

polarFreq(dados2, pollutant = "ws", type = "season",
          statistic = "median", min.bin = 1)
polarFreq(dados2, pollutant = "ws", type = "month",
          statistic = "frequency", min.bin = 1)
polarFreq(dados2, pollutant = "ws", type = "month",
          statistic = "mean", min.bin = 1)
pollutionRose(daily2, angle = 20, width = 1.1, grid.line = 20,
              pollutant = "ws", type = "month")
pollutionRose(daily2, angle = 20, width = 1.1, grid.line = 20,
              pollutant = "ws", type = "season")
pollutionRose(hora2, angle = 20, width = 1.1, grid.line = 30,
              pollutant = "ws", type = "month", auto.text
              = F)
#####direção#####
pollutionRose(hora2, angle = 20, width = 1.1, grid.line = 20,
              pollutant = "wd", type = "season")
#####Frequência (variabilidade sazonal)#####
percentileRose(dados2, pollutant = "ws", statistic = "frequency")
percentileRose(dados2, type = c("season", "daylight"),
              pollutant = "ws")
#####
#Leitura do arquivo com dados 25metros
#####
dados25<-read.csv("dados25.csv", header=TRUE, sep=";")
dados25
daily25 <- timeAverage(dados25, avg.time = "day",
                    statistic = "mean")
daily25

```

```

summaryPlot(daily25, type = "density", date.breaks = 12,
            col.data = "lightblue", print.datacap = F,
            auto.text = T)

hora25 <- timeAverage(dados25, avg.time = "hour",
                    statistic = "mean")

hora25

summaryPlot(hora25, type = "density", date.breaks = 12)

#####Rosa dos ventos (variabilidade diária e horária)#####

windRose(daily25)

windRose(daily25, angle = 30, width = 0.6, grid.line = 20,
        ws.int = 2, breaks = 6, type = "season")

windRose(daily25, angle = 30, width = 0.6, grid.line = 20,
        ws.int = 2, breaks = 6, type = "weekday")

windRose(hora25)

windRose(hora25, angle = 30, width = 0.6, grid.line = 20,
        ws.int = 2, breaks = 6, type = "season")

###3###Influência da direção do vento#####

#polarFreq (quantidade de observações)

polarFreq(dados25)

#####Frequência (variabilidade mensal e sazonal)#####

#####direção#####

polarFreq(dados25, pollutant = "wd", type = "season",
        statistic = "median", min.bin = 1)

#####velocidade#####

polarFreq(dados25, pollutant = "ws", type = "season",
        statistic = "median", min.bin = 1)

polarFreq(dados25, pollutant = "ws", type = "month",
        statistic = "frequency", min.bin = 1)

```

```

polarFreq(dados25, pollutant = "ws", type = "month",
          statistic = "mean", min.bin = 1)

#####direção#####
pollutionRose(daily25, angle = 20, width = 1.1, grid.line = 20,
              pollutant = "wd", type = "season")

#####velocidade#####
pollutionRose(daily25, angle = 20, width = 1.1, grid.line = 20,
              pollutant = "ws", type = "month")
pollutionRose(hora25, angle = 20, width = 1.1, grid.line = 20,
              pollutant = "ws", type = "month")
pollutionRose(hora25, angle = 20, width = 1.1, grid.line = 20,
              pollutant = "ws", type = "season")
pollutionRose(hora25, angle = 20, width = 1.1, grid.line = 20,
              pollutant = "ws", type = "season")

#####Frequência (variabilidade sazonal)#####
percentileRose(dados25, pollutant = "ws", statistic = "frequency")
percentileRose(dados25, type = c("season", "daylight"),
              pollutant = "ws")

#####
#Leitura do arquivo com dados 50metros
#####
dados50<-read.csv("dados50.csv", header=TRUE, sep=";")
dados50
daily50 <- timeAverage(dados50, avg.time = "day",
                    statistic = "mean")
daily50
summaryPlot(daily50, type = "density", date.breaks = 12,
            col.data = "lightblue", print.datacap = F,

```

```

auto.text = T)

hora50 <- timeAverage(dados50, avg.time = "hour",
                      statistic = "mean")

hora50

summaryPlot(hora50, type = "density", date.breaks = 12)

#####Rosa dos ventos (variabilidade diária e horária)#####

windRose(daily50)

windRose(daily50, angle = 30, width = 0.6, grid.line = 20,
         ws.int = 2, breaks = 6, type = "season")

windRose(daily50, angle = 30, width = 0.6, grid.line = 20,
         ws.int = 2, breaks = 6, type = "weekday")

windRose(hora50)

windRose(hora50, angle = 30, width = 0.6, grid.line = 20,
         ws.int = 2, breaks = 6, type = "season")

#####Influência da direção do vento#####

#polarFreq (quantidade de observações)

polarFreq(dados50)

#####Frequência (variabilidade mensal e sazonal)#####3

#####direção#####

polarFreq(dados50, pollutant = "wd", type = "season",
         statistic = "median", min.bin = 1)

#####velocidade#####

polarFreq(dados50, pollutant = "ws", type = "season",
         statistic = "median", min.bin = 1)

polarFreq(dados50, pollutant = "ws", type = "month",
         statistic = "frequency", min.bin = 1)

polarFreq(dados50, pollutant = "ws", type = "month",
         statistic = "mean", min.bin = 1)

```


#####direção#####

```
pollutionRose(daily50, angle = 20, width = 1.1, grid.line = 20,  
  pollutant = "wd", type = "season")
```

#####vento#####

```
pollutionRose(daily50, angle = 20, width = 1.1, grid.line = 20,  
  pollutant = "ws", type = "month")
```

```
pollutionRose(daily50, angle = 20, width = 1.1, grid.line = 20,  
  pollutant = "ws", type = "season")
```

```
pollutionRose(hora50, angle = 20, width = 1.1, grid.line = 20,  
  pollutant = "ws", type = "month")
```

```
pollutionRose(hora50, angle = 20, width = 1.1, grid.line = 20,  
  pollutant = "ws", type = "season")
```

```
pollutionRose(hora50, angle = 20, width = 1.1, grid.line = 20,  
  pollutant = "ws", type = "season")
```

#####Frequência (variabilidade sazonal)#####

```
percentileRose(dados50, pollutant = "ws", statistic = "frequency")
```

```
percentileRose(dados50, type = c("season", "daylight"),  
  pollutant = "ws")
```