

---

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS E**  
**TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO**

---

**JOSÉ ARIMATÉIA BARROSO NETO**

**IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS PROPÍCIAS PARA INSTALAÇÃO DE PARQUES**  
**EÓLICOS**



**Recife**

**2018**

---

**JOSÉ ARIMATÉIA BARROSO NETO**

**IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS PROPÍCIAS PARA INSTALAÇÃO DE PARQUES  
EÓLICOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.

**Área de Concentração:** Cartografia e Sistemas de Geoinformação.

**Orientador:** Prof. Dr. José Luis Portugal

**Recife  
2018**

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Valdicêa Alves, CRB-4 / 1260

B277i Barroso Neto, José Arimatéia.  
Identificação de áreas propícias para instalação de parques eólicos./ José Arimatéia Barroso Neto - 2018.  
55folhas, Il. e Tab.

**Orientador:** Prof. Dr. José Luis Portugal.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Departamento de Engenharia Cartográfica, 2018.

Inclui Referências.

1. Engenharia Cartográfica. 2. Energia eólica. 3. Velocidade do vento.  
4. Rugosidade. 5. Declividade. I. Portugal, José Luis.(Orientador). II. Título.

UFPE

526.1 CDD (22. ed.)

BCTG/2018-374

## **JOSÉ ARIMATÉIA BARROSO NETO**

### **IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS PROPÍCIAS PARA INSTALAÇÃO DE PARQUES EÓLICOS.**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.

Aprovado em: 13/07/2018

#### **BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. José Luiz Portugal (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Profa. Dra. Lucilene Antunes C. Marques de Sá (Examinadora Interna)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Sergio Monthezuma Santoianni Guerra (Examinador Interno)  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

A minha esposa que tanto me apoia nas  
minhas empreitadas da vida.

Dedico

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha família, em especial minha mãe e meu pai por estarem sempre ao meu lado, me dando todo o suporte necessário para realizar minha jornada acadêmica e profissional.

À minha esposa Camila Gomes por me ajudar a concluir mais uma etapa da minha vida e sempre me apoiar nas minhas decisões diárias dentro e fora da vida profissional e acadêmica.

Aos meus professores, em especial meu Orientador Portugal que vem me guiando desde a graduação até aqui, me dando todo o suporte necessário para conquistar meus objetivos acadêmicos.

Aos meus colegas de turma que apoiaram e fizeram deste período mais interessante e intenso. Em especial a Wedja Oliveira e a Camila Teixeira pelo apoio nessa reta final.

"Há uma força motriz mais ponderosa que o vapor, a eletricidade e a energia atômica: a vontade."

Albert Einstein

## RESUMO

A Energia eólica é uma fonte de energia renovável que tem sido incrementada em diversas regiões do mundo. Em 2016 o Brasil contava com 10,75 GW de potência instalada em 430 parques eólicos. A eficiência desses parques depende de diversas variáveis, citando-se a velocidade do vento, a rugosidade do terreno e a declividade. Essa pesquisa visa determinar o peso que cada uma dessas variáveis tem na produção de energia além de identificar locais adequados para instalação de parques. Os pesos serão calculados por meio de regressão linear. Os locais serão determinados pela operação ponderada das seguintes variáveis: velocidade do vento, derivada de dados MERRA; declividade, derivada de imagem SRTM; rugosidade, derivada de dados do CLC30M A região de estudo é o nordeste brasileiro por contar com 83% dos parques do país. O produto final é um mapa temático identificando as áreas propícias para instalação de parques eólicos.

**Palavras-Chaves:** Energia eólica. Velocidade do vento. Rugosidade. Declividade.

## **ABSTRACT**

Wind energy is a renewable energy source that has been increasing in many regions of the world. In 2016, Brazil had installed capacity of 10,75 GW, in 430 wind farms. The efficiency of these parks depends on several variables how wind speed, roughness and slope. This research aims to determine the weight that each one of these variables has in the production of energy besides identifying suitable places for the installation of parks. The weights will be calculated by means of linear regression. The locations will be determined by the weighted operation of the following variables: wind speed, derived from MERRA data; slope, derived from SRTM image; roughness, derived from CLC30M data The region of study is the Brazilian Northeast, accounting 83% of the country's parks. The final product is a thematic map identifying the propitious areas for installation of wind farms.

**Keywords:** Wind energy. Wind speed. Roughness. Slope.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Evolução do tamanho dos aerogeradores. ....	15
Figura 2 - Parques eólicos em operação.....	17
Figura 3 - Distribuição dos pixels numa janela móvel de 3x3.....	30
Figura 4 - Fluxograma da metodologia.....	34
Figura 5 - Grade do MERRA .....	37
Figura 6 - Camada da velocidade média do vento de 2014 a 2016. ....	38
Figura 7 - Modelo Digital de Elevação.....	39
Figura 8 - Camada do critério declividade.....	40
Figura 9 - Camada do critério rugosidade. ....	42
Figura 10 - Parques eólicos da região nordeste.....	43
Figura 11 - Atribuição dos valores dos critérios aos parques.....	44
Figura 12 - Relação Fator de capacidade x Velocidade do vento. ....	45
Figura 13 - Histograma dos resíduos padronizados.....	48
Figura 14 - Mapa de adequabilidade.....	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parques eólicos da região nordeste em operação em 2016. ....	18
Tabela 2 - Critérios para parques eólicos.....	19
Tabela 3 - Pesos para os critérios.....	19
Tabela 4 - Divisão de valores dos critérios.....	20
Tabela 5 - Critérios e classes definidos.....	22
Tabela 6 - Valores atribuídos aos critérios. ....	23
Tabela 7 - Pesos adotados para os critérios. ....	24
Tabela 8 - Divisão das classes por critérios. ....	24
Tabela 9 - Pesos adotados. ....	25
Tabela 10 - Pesos utilizados. ....	26
Tabela 11 - Pesos comparados ....	26
Tabela 12 - Relação valor matricial e uso do solo.....	31
Tabela 13 - Valores de rugosidade CLC. ....	32
Tabela 14 - Associação valor do pixel x uso do solo x rugosidade. ....	41
Tabela 15 - Resumo do modelo. ....	44
Tabela 16 - Análise de variância. ....	44
Tabela 17 - Estatística descritiva.....	46
Tabela 18 - Resumo do modelo. ....	46
Tabela 19 - Análise de variância. ....	46
Tabela 20 - Coeficientes. ....	46

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1	OBJETIVOS DA PESQUISA .....	14
1.1.1	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>14</b>
1.1.2	<b>Objetivo Específico .....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>15</b>
2.1	VARIÁVEIS INFLUENTES NA PRODUÇÃO DE ENERGIA EÓLICA..	18
2.2	VARIÁVEIS MAIS RELEVANTES .....	27
2.2.1	<b>Velocidade do vento .....</b>	<b>27</b>
2.2.2	<b>Declividade.....</b>	<b>28</b>
2.2.3	<b>Uso do solo .....</b>	<b>30</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>34</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>37</b>
4.1	CAMADA DO CRITÉRIO VELOCIDADE DO VENTO .....	37
4.2	CAMADA DO CRITÉRIO DECLIVIDADE .....	39
4.3	CAMADA DO CRITÉRIO RUGOSIDADE .....	40
4.4	ATRIBUIÇÃO DOS VALORES DE VELOCIDADE DO VENTO AOS PARQUES .....	42
4.5	IMPLEMENTAÇÃO E ANÁLISE DO MODELO DE REGRESSÃO.....	44
4.6	GERAÇÃO DO MAPA DE ÁREAS PROPÍCIAS .....	48
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>50</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>51</b>

## INTRODUÇÃO

A energia elétrica é a principal fonte de luz, calor e força utilizada no mundo. Ela é obtida a partir de outros tipos de energia e chega aos consumidores por meio de sistemas elétricos complexos, compostos de quatro etapas: geração, transmissão, distribuição e consumo.

No que diz respeito a geração, ELLABBAN, ABU-RUB e BLAADJERG (2014), esclarecem que a energia elétrica pode ser obtida por intermédio de recursos renováveis, ou seja, recursos que são naturalmente reabastecidos em uma escala de tempo compatível com a humanidade, como por exemplo: a luz solar, o vento, a chuva, as marés, as ondas e o calor geotérmico.

A maior fonte de energia elétrica brasileira é a hidrelétrica. Essa é classificada como uma fonte renovável, apresentando alguns óbices. Entre esses citam-se danos ambientais, em face da necessidade de construção de grandes lagos artificiais além de dependência de regimes de chuva para recarga de barragens.

Uma alternativa de geração renovável que tem se mostrado eficiente no mundo todo é a eólica. MAHELA e SHAIK (2016) identificam que a energia eólica vem se tornando uma fonte de energia importante na substituição de fontes poluentes.

NUGENT E SOVACOOOL (2014) defendem o uso da energia eólica, que apesar de não ser considerada limpa durante a fabricação do equipamento, após a instalação dos parques eólicos possuem um baixo impacto ambiental. KAPLAN (2015) aponta que energia eólica está ganhando considerável aceitação, devido ao baixo custo de produção, operação e manutenção, além da facilidade de acesso a uma eficiente turbina eólica.

Segundo QUASCHING (2016), a energia eólica é uma forma indireta de energia solar. A irradiação solar causa diferenças de temperatura na Terra dando a origem a ventos. DEVASHISH, THAKUR e PANIGRAHI (2016) desmembram a energia eólica em mecânica e elétrica, sendo a primeira gerada pelos ventos e convertida na segunda.

Em relação a presença de parques eólicos no mundo apenas o continente Antártico não é contemplado. De acordo SAWYER e DYRHOLM (2016), a Ásia é o continente que mais produz energia eólica, sendo a China

responsável pela maior parte desta, superando sozinha a produção de qualquer outro continente. Entre os países do continente Americano, o Brasil é o terceiro maior produtor com 10,75GW, ficando em primeiro lugar os Estados Unidos da América, seguido pelo Canadá.

EMEIS (2018) afirma que ao final do ano de 2016 haviam 487GW de potência gerada por energia eólica, sendo 168,7GW na China, 82,2GW nos Estados Unidos e 50,0GW na Alemanha. Ainda segundo o mesmo autor, a potencia gerada por energia eólica corresponde a 7% da energia total produzida no mundo.

Em 2014 apenas 6,4% da energia gerada no Nordeste brasileiro era advinda de fontes eólicas, praticamente todo o restante era produzido por usinas hidroelétricas. JONG, KIPERSTOK e SÁNCHEZ (2015) concluíram através de estudos de Atlas Eólicos disponíveis na literatura, que a região Nordeste possui capacidade de ser auto suficiente na geração de energia elétrica utilizando apenas a eólica como fonte.

Todos os países que possuem a energia eólica em sua matriz energética registraram aumento na instalação de parques eólicos nos últimos 10 anos (ANEEL – 2016), refletindo a produtividade desse tipo de geração. Para que essa produtividade seja maximizada é necessário implantar os parques eólicos em locais que proporcionem o maior rendimento possível.

NOOROLLAI, YOUSEFI e MOHAMMADI (2016) afirmam que para determinar a localização ideal para instalar um parque eólico, é necessário agregar e analisar uma grande quantidade de dados. Nesse aspecto, se destaca a tecnologia SIG – Sistema de Informação Geográfica, por permitir manipulação e análise de dados, gerando informações úteis para determinação dos locais.

Autores como MILLER e LI (2014), NOORELLAHI, YOUSEFI e MOHAMMADI (2015), JANGIDA et al (2016), JANKE (2010), BASEER, REHMAN e MEYER (2017) e LATINOPOULOS E KECHAGIA (2015) desenvolveram estudos para implantação de parques eólicos em diversos países. Todos eles identificam que a velocidade do vento é variável fundamental. Outras variáveis como a declividade, o uso do solo, e distâncias para determinadas zonas específicas também devem ser consideradas, apesar

de não haver unanimidade. Os mesmos autores consideraram importante, em sua maioria o emprego do SIG para estudos de implantação.

Face ao exposto, essa pesquisa visa identificar, quantificar e localizar variáveis influentes na geração de energia elétrica a partir de fontes eólicas, no nordeste brasileiro.

## 1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

### 1.1.1 Objetivo Geral

Identificar as áreas mais propícias para a instalação dos parques eólicos, no Nordeste brasileiro.

### 1.1.2 Objetivo Específico

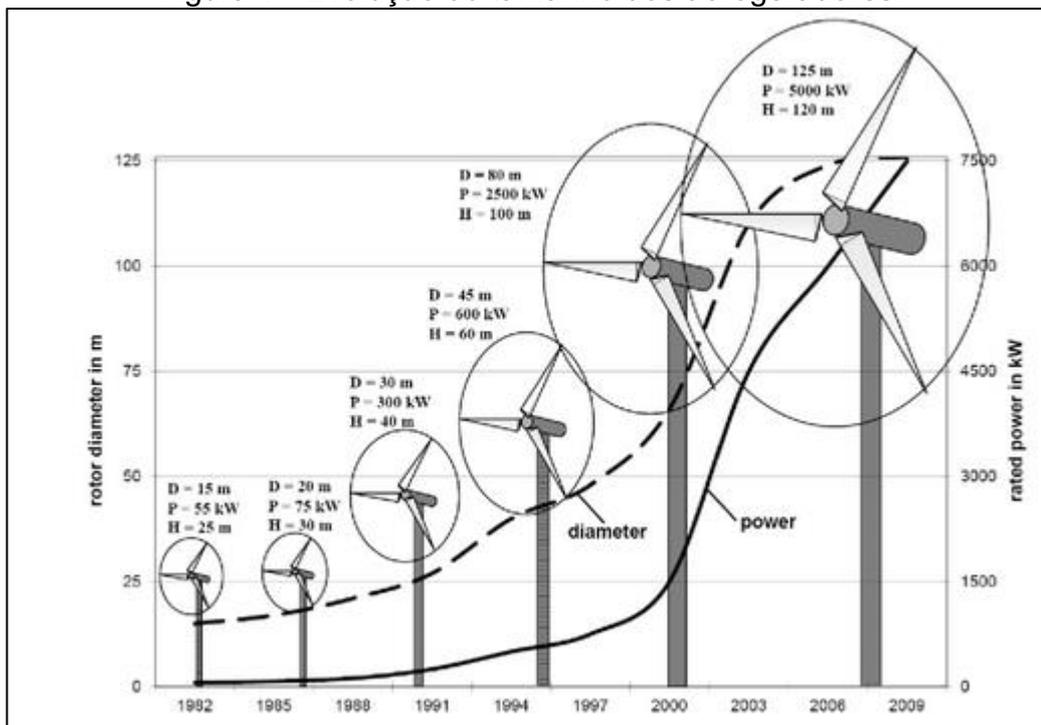
- Estudar as variáveis que influenciam a implantação de um parque eólico;
- Ponderar as variáveis em função da região estudada;
- Gerar mapa temático identificando áreas propícias para a instalação dos parques eólicos.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os primeiros registros de máquinas utilizando energia eólica são de 1700 a.C., onde Hamurabi usou moinhos para irrigação da Mesopotâmia. GASCH e TWELE (2012) apontam que a energia eólica renasceu na Dinamarca em 1980, por conta da crise do petróleo ocorrida entre 1973 e 1978. Essa crise fez com que pequenas companhias de equipamentos rurais desenvolvessem o primeiro aerogerador para uso comercial.

Os aerogeradores utilizados na década de 80 possuíam um diâmetro de rotor de 15 metros e altura de 25 metros. Estes evoluíram até chegar a modelos com mais de 120 metros de altura e 125 metros de diâmetro de rotor, conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Evolução do tamanho dos aerogeradores.



Fonte: GASCH (2012).

No Brasil, segundo TOLMASQUIM (2016), o primeiro aerogerador a entrar em operação foi no arquipélago de Fernando de Noronha em 2001, proveniente de uma parceria entre a UFPE - Universidade Federal de Pernambuco e a CELPE - Companhia Energética de Pernambuco. Nesse mesmo ano se criou o primeiro incentivo para a produção de energia eólica no

país através do PROEÓLICA - Programa Emergencial de Energia Eólica. Esse programa não atingiu os resultados esperados. Os primeiros resultados positivos começaram a aparecer no ano de 2009 quando, segundo RICOSTI (2011), ocorreu o primeiro leilão específico para fontes eólicas. Com isso buscou-se mostrar aos empresários que a energia eólica é competitiva e com potencial de expandir o sistema elétrico.

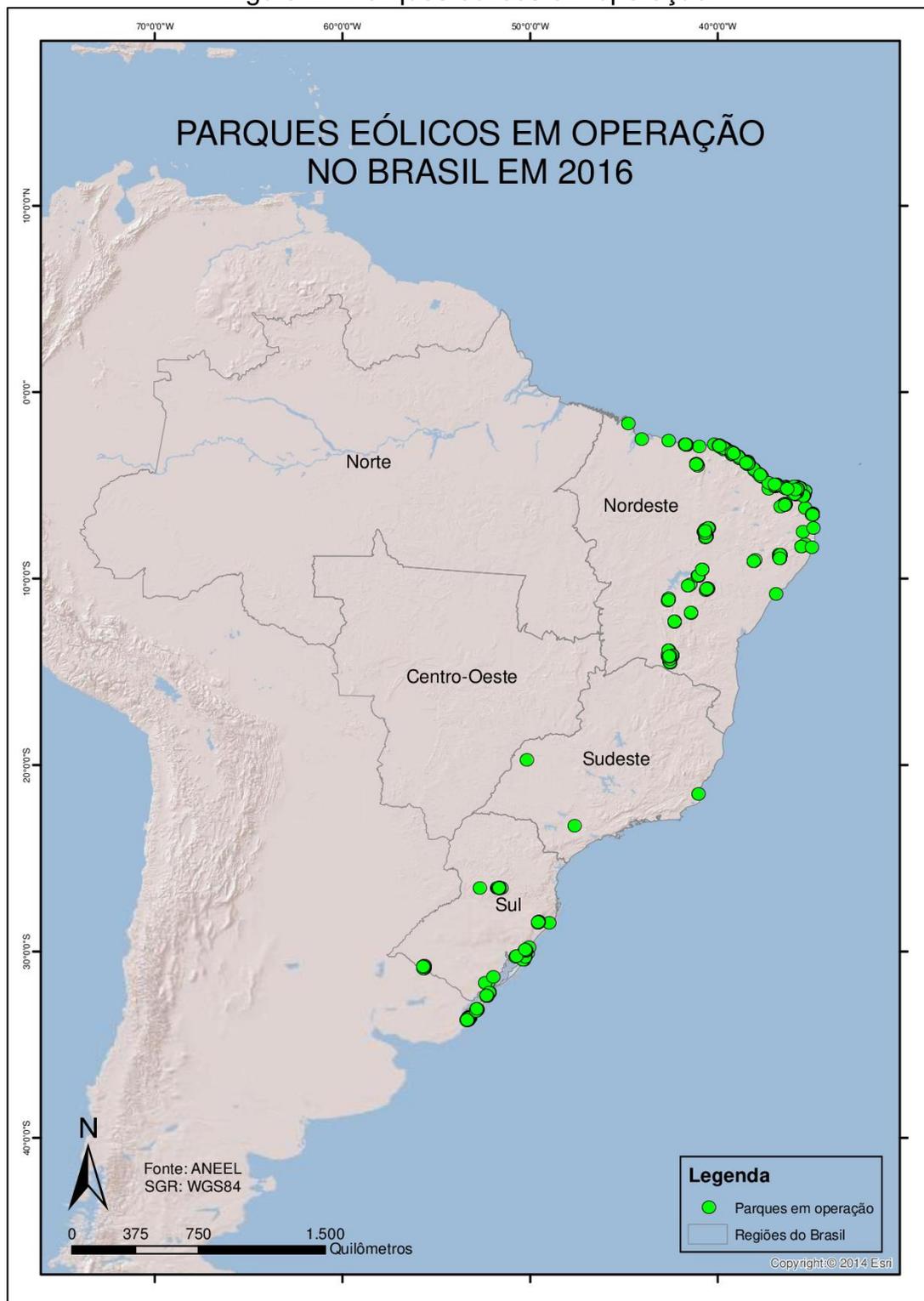
Para atender o crescimento do consumo de energia, a EPE - Empresa de Pesquisa Energética criou o plano decenal (2010-2019). Esse plano tem o intuito de sinalizar aos agentes governamentais os locais mais eficientes para alocação de recursos, para efetivar novas instalações de oferta de energia, qualquer que seja a fonte (RISCOTI, 2011).

De acordo com o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (2016), no Brasil há uma tendência de melhoria da relação custo/benefício da energia eólica no país. Ainda segundo o mesmo ministério essa energia é complementar da energia hidrelétrica.

A ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica (2016) identifica que no país existem mais de 400 parques eólicos em operação, que vão desde pequenos parques com menos de 5 aerogeradores até grandes complexos eólicos que compreendem vários parques com mais de 10 aerogeradores cada. Ao final de 2016, dos 400 parques havia mais de 100 em operação, classificados como do tipo I e II. A Figura 2 identifica a localização desses.

Convém esclarecer que parques do tipo I são aqueles conectados à rede básica de energia. Os do tipo II são aqueles que podem de alguma forma interferir no planejamento ou operação do sistema elétrico. A ONS - Operador Nacional do Sistema - disponibiliza mensalmente os dados detalhados de produção dos parques eólicos em operação do tipo I e II.

Figura 2 - Parques eólicos em operação.



Fonte: Adaptado de ANEEL (2016).

Ainda segundo a ANEEL (2016) a região nordeste conta com 97 parques eólicos do tipo I e II em operação, correspondendo a 83% dos parques do país. A Tabela 1 identifica os quantitativos agregados por estados da região.

Tabela 1 - Parques eólicos da região nordeste em operação em 2016.

<b>Estado</b>	<b>Parques eólicos em operação Tipo I e II</b>
Bahia	21
Ceará	29
Pernambuco	4
Piauí	5
Rio Grande do Norte	38

Fonte: Adaptado de ANEEL (20016).

## 1.2 VARIÁVEIS INFLUENTES NA PRODUÇÃO DE ENERGIA EÓLICA

MILLER e LI (2014) propuseram uma metodologia empregando 5 variáveis para a escolha de áreas prioritárias, para instalação de parques eólicos no estado de Nebraska, nos Estados Unidos da América. São elas a declividade do local, a velocidade do vento a 50 metros de altura, o uso da terra, a densidade populacional, a distância à linhas de transmissão e estradas. Cada variável recebe um valor de adequabilidade que varia de 0 a 4. O valor 0 representa fator impeditivo e a partir desse, em ordem crescente, maior a adequabilidade. A seguir são detalhadas as justificativas dos autores para seleção das variáveis.

- Uso da terra: um parque eólico deve ser instalado em um local que cause o menor impacto possível na utilização da terra, preservando ao máximo sua originalidade;
- Densidade populacional: a instalação de parques eólicos sofre resistência da população por conta de possíveis impactos visuais e sonoros, por isso devem ser buscados locais com menor densidade populacional;
- Linhas de transmissão e estradas: os parques eólicos devem ser instalados próximos a estradas e linhas de transmissão para reduzir custos associados à construção e manutenção dos parques;
- Declividade: a declividade mais acentuada é considerada menos adequada a instalação de parques devido aos custos adicionais na construção, por conta de obras de terraplanagem e porque a declividade

altera o ângulo de ataque do vento, causando um esforço mecânico maior no aerogerador;

- Velocidade do vento: o parque eólico para ter melhor rendimento, deve ser instalado em locais com velocidade média do vento maior possível.

A Tabela 2 mostra os valores definidos pelos autores, para cada uma das variáveis.

Tabela 2 - Critérios para parques eólicos.

Valor de adequabilidade	Declividade(°)	Velocidade do vento (m/s)	Uso da terra	Densidade populacional (hab/m <sup>2</sup> )	Distância a linha de transmissão (km)	Distância a rodovias (km)
4 (Alto)	[0, 7]	>7,5	Agricultura / Seca	[0, 25]	[0, 5]	[0, 1]
3 (Médio)	(7, 16]	(7; 7,5]	Pasto	(25, 50]	(5, 10]	(1, 2,5)
2 (Baixo)	(16, 30]	(6,4; 7]	Arbusto	(50, 100]	(10, 15]	(2,5, 5)
1 (Muito baixo)	(30, 40]	(5,6; 6,4]	Florestas	(100, 150]	(15, 20]	(5, 10]
0 (Inadequado)	>40	>5,6	Água/ Cidade	>150	>20	>10

Fonte: Adaptado de MILLER e LI (2014).

Além dos valores de adequabilidade, os autores identificam que as variáveis divergem em importância. Por conta disso as mesmas foram ponderadas de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 - Pesos para os critérios.

Critério	Peso
Velocidade do Vento	3
Declividade	2
Uso da terra	2
Distância a linhas de transmissão	2
Distância a estradas	2
Densidade populacional	1

Fonte: Adaptado de MILLER e LI (2014).

A partir dos dados das Tabelas 2 e 3 são construídos mapas individuais (camadas) para cada critério. A soma dessas camadas gera o mapa com os índices de adequabilidade.

NOORELLAHI, YOUSEFI e MOHAMMADI (2015) propõem, semelhante a MILLER e LI (2014), uma metodologia para apoiar decisões de implementação de parques eólicos, utilizando como área de um estudo a província de Markazi, no Irã. A metodologia emprega 3 critérios, que são a velocidade do vento a 50m de altura, a distância para linhas de transmissão e distância para rodovias principais. Apesar de não explicar as razões para utilizar apenas tais critérios, os autores os dividiram em classes com valores atribuídos, de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 - Divisão de valores dos critérios.

<b>Critério</b>	<b>Classe</b>	<b>Valor</b>
Velocidade do vento	<5,6 m/s	0
	5,6 – 6,4 m/s	2
	6,4 – 6,9 m/s	4
	6,9 – 7,5 m/s	6
	7,5 – 9,5 m/s	8
	>9,5 m/s	10
Distância para linha de transmissão	<250 m	0
	250 – 2000 m	10
	2000 – 4000 m	9
	4000 – 6000 m	7
	6000 – 8000 m	5
	8000 – 10000m	3
Distância para rodovias principais	<500 m	0
	500 – 2000 m	10
	2000 – 4000 m	9
	4000 – 6000 m	8
	6000 – 8000 m	6
	8000 – 10000 m	4
	>10000m	2

Fonte: Adaptado de NOORELLAHI, YOUSEFI e MOHAMMADI (2015).

É importante ressaltar que os valores 0 correspondem a áreas de exclusão e que essas existem não somente em relação aos critérios estabelecidos. Também são consideradas áreas de exclusão as seguintes:

- Altitudes acima de 2000m: em regiões de maiores altitudes, a densidade do ar fica menor comparada a altitudes mais baixas, fazendo com que mesmo com altas velocidades do vento, a produção seja menor;
- Declividade acima de 15%: por razões mecânicas, parques eólicos em locais de declives sofrem esforços do vento que causam danos a sua estrutura, sendo 15% o limite aceitável de declividade;
- Distância de até 500m para o litoral, rios, lagos: esses impeditivos são decorrentes de legislação;
- Distância de até 2000m para cidades: esse impeditivo se relaciona com os ruídos dos parques, que são considerados impróprios para a população por conta da intensidade e continuidade;
- Distância de até 2500m para aeroportos: esse impeditivo é decorrente de legislação e segurança de voo.

A partir dos dados da Tabela 4 são construídos mapas individuais (camadas) para cada critério. A soma dessas camadas, retiradas as áreas de exclusão, gera o mapa com os índices de adequabilidade que variam de 0 a 30.

JANGIDA et al (2016) propõe uma metodologia utilizando como área de estudo a região de Jodhpur, na Índia. São empregados 5 critérios, com pesos diferentes, divididos em 3 classes cada um, como mostra a Tabela 5.

Tabela 5 - Critérios e classes definidos.

<b>Critério</b>	<b>Classe</b>	<b>Valor da classe</b>	<b>Peso</b>
Velocidade do vento a 20m de altitude	2,2 - 3 m/s	3	0,4
	1,9 – 2,2 m/s	2	
	1,6 – 1,9 m/s	1	
Distância para cidades	500 – 1500 m	3	0,03
	1500 – 2500 m	2	
	>2500 m	1	
Cobertura do solo	Agricultura	3	0,3
	Áreas arbustiva	2	
	Florestas	1	
Distância para rodovias	< 100 m	3	0,12
	100 – 500 m	2	
	500 – 1000 m	1	
Declividade	>10%	3	0,15
	11% - 34%	2	
	>30%	1	

Fonte: Adaptado de JANGIDA et al (2016).

A seguir são apresentadas as justificativas para a escolha dos critérios por parte dos autores:

- Velocidade do vento a 20m: a velocidade média do vento é o critério mais importante por ser responsável direto para a geração de energia eólica;
- Distância para áreas residências: por questões de ruído causado pelos aerogeradores, áreas distantes de até 500 metros entre residências e o parque são consideradas de exclusão. A partir desse valor, quanto mais próximos das cidades, mais rentável será o parque;
- Cobertura do solo: esse motivo decorre de questões econômicas de implantação, sendo mais viável em locais sem florestas;
- Distância para rodovias: semelhantemente ao uso do solo, também decorre de questões econômicas porque quanto mais perto de rodovias menores serão os custos de implantação e manutenção;
- Declividade: os locais planos são considerados mais viáveis pelos mesmos motivos citados por MILLER E LI (2014).

A partir dos dados da Tabela 5 são construídos mapas individuais (camadas) para cada critério. A média ponderada dessas camadas é obtida, resultando num mapa de áreas propícias para implantação dos parques. Esse mapa é estratificado em três classes identificando os locais considerados melhores, moderados e piores. A estratificação é realizada pelo método de igual intervalo, desconsiderando as regiões com velocidades de vento abaixo de 1,6 m/s.

JANKE (2010) propõe uma metodologia utilizando como área de estudo uma região no estado do Colorado, Estados Unidos da América. O autor levou em consideração os seguintes critérios, todos eles motivados por questões econômicas: velocidade do vento a 50 metros de altura, cobertura do solo, distância para linhas de transmissão, distância para cidades, densidade populacional e distância para estradas.

O critério de velocidade do vento foi dividido em 7 classes de igual intervalo. A classe com menor velocidade recebeu o valor 1/7, a segunda 2/7 e assim sucessivamente. Observa-se que foram empregados todos os dados de velocidade de vento disponíveis para a estratificação.

O critério cobertura do solo foi dividido em 3 classes. A classe cobertura do tipo floresta recebeu o valor 1/3, a do tipo áreas úmidas, florestas menos densas e vegetação alta o valor 2/3 e as do tipo pasto e vegetação o valor 3/3.

Os demais critérios receberam o valor 0 ou 1 de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6 - Valores atribuídos aos critérios.

<b>Critério</b>	<b>Valor 0</b>	<b>Valor 1</b>
Distância para linhas de transmissão	>1500m	<1500m
Distância para cidades	>1500m	<1500m
Densidade populacional	Valor maior que a média da área de estudo	Valor menor que a média da área de estudo
Distância para rodovias	>1500m	<1500m

Fonte: Adaptado de JANKE (2010).

O autor considera também a ponderação dos critérios com pesos definidos na tabela 7.

Tabela 7 - Pesos adotados para os critérios.

<b>Critério</b>	<b>Peso</b>
Velocidade do vento	3
Distância para linhas de transmissão	2
Distância para cidades	1
Densidade populacional	1
Distância para rodovias	1
Cobertura do solo	1

Fonte: Adaptado de JANKE (2010).

Para cada critério é gerado um mapa (camada). A média ponderada dessas camadas resulta em um mapa de áreas propícias para implantação dos parques. Esse mapa é estratificado em 5 classes sendo a primeira com ponto de corte em 0,6 identificando nenhum atrativo para implantação de parques eólicos. As demais foram espaçadas em 0,1, identificando a classe com intervalo de 0,9 a 1,0 como a mais adequada.

BASEER, REHMAN e MEYER (2017) definem metodologia baseada em 4 critérios subdivididos em 6 classes, com valores variando de 1 a 6. Os critérios escolhidos foram: velocidade média do vento a 50 metros de altura, proximidade a rodovias, proximidade a subestações e proximidade a cidades, conforme mostrado na Tabela 8.

Tabela 8 - Divisão das classes por critérios.

<b>Critério</b>	<b>Classe 6 (Valor 6)</b>	<b>Classe 5 (Valor 5)</b>	<b>Classe 4 (Valor 4)</b>	<b>Classe 3 (Valor 3)</b>	<b>Classe 2 (Valor 2)</b>	<b>Classe 1 (Valor 1)</b>
Velocidade do vento (m/s)	>6	6 – 5,8	5,8 – 5,6	5,6 – 5,4	5,4 – 5,2	5,2 – 5
Proximidade a estradas (m)	<2000	2000 – 4000	4000 – 5500	5500 – 7000	7000 – 8500	8500 – 10000
Proximidade a subestação (m)	<2000	2000 – 4000	4000 – 5500	5500 – 7000	7000 – 8500	8500 – 10000
Proximidade a cidades (m)	2000 – 4000	4000 – 5500	5500 – 7000	7000 – 8500	8500 – 10000	>10000

Fonte: Adaptado de BASEER, REHMAN e MEYER (2017).

Verifica-se que esses autores são os únicos que identificam a distância a subestação como critério. Os demais se referem a distância a linhas de transmissão. Isso ocorre porque no Brasil a ligação a linha de transmissão não

é possível, devendo a ligação acontecer a uma subestação pertencente a malha elétrica brasileira.

Além de valorar os critérios por classes eles são também ponderados, como mostra a Tabela 9.

Tabela 9 - Pesos adotados.

<b>Critério</b>	<b>Peso</b>
Velocidade do vento	60
Proximidade a estradas	13
Proximidade a subestação	13,5
Proximidade a cidades	13,5

Fonte: Adaptado de BASEER, REHMAN e MEYER (2017).

Cada critério gera um mapa (camada) e a partir da média ponderada desses é obtido o mapa de áreas propícias.

A respeito da quantificação dos pesos, verifica-se que os autores superestimaram a velocidade do vento em relação aos outros critérios. Isso aconteceu porque foi utilizado o método chamado “Processo Analítico Hierárquico”. Segundo MA, DEGLORIA e LEMBO (2005), esse processo consiste em atribuir pesos apropriados a critérios de acordo com sua importância relativa.

LATINOPOULOS E KECHAGIA (2015), definem metodologia com 6 critérios ponderados, sem citar seus pontos de corte. Esses critérios e respectivos pesos são mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 - Pesos utilizados.

<b>Critério</b>	<b>Peso</b>
Declividade	0,053
Velocidade do vento	0,361
Uso da terra	0,189
Distância a rodovias	0,215
Distância para áreas naturais	0,137
Distância para áreas proibitivas	0,045

Fonte: Adaptado de LATINOPOULOS E KECHAGIA (2015).

Os critérios adotados pelos autores citados, muitas vezes se repetem, variando-se sobremaneira os pesos. A Tabela 11 faz um resumo dos pesos atribuídos por cada autor.

Tabela 11 - Pesos comparados

<b>Crítérios</b>	<b>Miller e LI</b>	<b>Noorellahi et all</b>	<b>Jangida et all</b>	<b>Janke</b>	<b>Baseer et all</b>	<b>Latinopolos e Kechagia</b>
<b>Velocidade do vento</b>	3	1	0,4	3	60	0,361
<b>Declividade</b>	2	X	0,15	X	X	0,053
<b>Uso do solo</b>	2	X	0,3	1	X	0,189
<b>Distância para rodovias</b>	1	1	0,12	1	13	0,215
<b>Distâncias para linhas de transmissão</b>	1	1	X	2	X	X
<b>Distância para subestações</b>	X	X	X	X	13,5	X
<b>Distância para áreas populosas</b>	1	X	0,03	1	13,5	0,045
<b>Distância para áreas proibitivas</b>	X	X	X	X	X	0,137

Fonte: Próprio autor.

Com base nos dados da Tabela 11 constata-se que os critérios velocidade do vento, declividade e uso do solo são citados por quase todos os

autores e possuem pesos significativamente elevados. Por essa razão, esses serão discutidos com maior profundidade.

### 1.3 VARIÁVEIS MAIS RELEVANTES

#### 1.3.1 Velocidade do vento

A velocidade do vento é a principal variável na produção de energia através de fontes eólicas. Ventos fracos podem não ser suficientes para a geração, assim como ventos fortes podem danificar o aerogerador. De acordo com GRUBB, MEYER e JO-HANSSON (1993), a velocidade ideal para que se instale um aerogerador é entre 7 e 8m/s na altura do rotor. SCHAEFFER et al (2008) definem que no Brasil, a velocidade mínima de vento deva ser de 6m/s podendo chegar até 8,5 m/s. Esses últimos autores identificam que tais velocidades devem ser médias locais e não máximas e mínimas. Também ressaltam que no Brasil os ventos têm direções relativamente constantes, citando-se, por exemplo, o estado de Pernambuco, cujos ventos são oriundos das direções leste e sudeste na maior parte do ano. Em se tratando de uma escala local, a topografia, a rugosidade, assim como obstáculos diversos distribuídos no terreno (prédios, casas, galpões, torres e até mesmo outros aerogeradores) podem alterar a velocidade e direção do vento, comprometendo a implantação do parque.

A situação ideal para obtenção de dados de vento é o emprego de torres de medições anemométricas na região de estudo. Por ser uma opção inviável do ponto de vista prático, APARICIO et al (2017) sugerem que para pesquisas de grandes áreas pode-se empregar modelos de reanálise de dados, sugerindo a utilização do MERRA - Modern Era Retrospective-analysis for Research and Applications. O produto gerado pela tecnologia MERRA é um conjunto de arquivos georreferenciados contendo dados climáticos, entre eles a velocidade e direção do vento com frequência horária.

VIEIRA (2013) identifica que reanálise é uma combinação de modelos meteorológicos, com dados obtidos através de vários satélites, a fim de se chegar ao valor de temperatura, pressão, umidade, velocidade e direção de vento, entre outras variáveis em determinada região. GELARO et al (2017)

afirmam que o MERRA serve tanto para estudar o comportamento meteorológico do passado e presente, como também prever o futuro.

Ainda GELARO et al (2007) identificam que a reanálise MERRA utiliza sensores e de vários satélites para mapear tanto o vento como outros fenômenos físicos. A exemplo do vento, temos os sensores do SSMIS - Special Sensor Microwave Imager/Sounder a bordo de satélites meteorológicos do DMPS – Programa de Satélites de Defesa Meteorológicos, como também outros sensores a bordos dos satélites Meteorological Operational Satellite-A (MetOp-A) ASCAT e WindSAT.

### **1.3.2 Declividade**

DORVAL, MASSON e GAGNON (2017), WITSCHAS et al (2017) e LI et al (2016) estudaram a influência da topografia na velocidade e direção do vento. Os autores concluíram que além de alterar a velocidade, as formas de relevo podem criar barreiras ou canalizar o vento em determinada direção. Também existe tendência da velocidade do vento aumentar com o aumento da altitude.

BABAM e PARRY (2000) identificam que se deve preferencialmente instalar complexos eólicos em locais planos, aceitando-se um valor de declividade máximo de 10%. Isso é definido porque quanto maior for a declividade, maior será o ângulo de ataque do vento no aerogerador, causando significativo desgaste do mesmo. Lembra-se que o ângulo de ataque zero graus (vento horizontal) corresponde a situação ideal para o aerogerador.

A declividade pode ser obtida a partir de Modelos Digitais de Elevação (MDE), dentre esses cita-se o disponibilizado pela Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM). Essa missão teve como principal objetivo gerar um MDE global a partir de um RADAR interferométrico. A partir dela foi imageada 80% da superfície terrestre para as regiões compreendidas entre os paralelos 60°N e 56° S (CHIEN, 2000). Vale destacar que inicialmente os dados SRTM tinham resolução espacial de 30mx30m para os EUA e 90m x 90m para o restante do mundo. A partir de 2015 a resolução de 30m x 30m foi disponibilizada globalmente.

Segundo FELGUEIRAS e CÂMARA (2004), o cálculo de declividade de uma superfície  $z=f(x, y)$  é efetuado a partir de derivadas parciais nas direções  $x$  e  $y$ , conforme exemplificado na Equação 01.

$$D = \arctan \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} \quad \text{Eq.1}$$

Onde:

$D$  é a declividade

$\frac{\partial z}{\partial x}$  é a derivada parcial na direção  $X$

$\frac{\partial z}{\partial y}$  é a derivada parcial na direção  $Y$

O uso de operações de vizinhança é a base para o cálculo da declividade, como também de outras variáveis do relevo, utilizando um MDE. Essas operações de vizinhança são definidas a partir de máscaras ou janelas móveis, que se deslocam sobre toda a superfície do MDE, (VALERIANO, 2010; MORETTI *et al*,1989).

Diversos modelos são empregados nas operações de vizinhança para extrair do MDE a variável declividade. Nesse trabalho será utilizado o sugerido por BURROUGH e McDONELL (1998). Esse método emprega uma janela móvel 3x3, estruturada de acordo com a Figura 3. A partir dessa janela é possível obter as derivadas parciais  $\frac{\partial z}{\partial x}$  e  $\frac{\partial z}{\partial y}$ , de acordo com as equações 2 e 3 em relação ao pixel central ( $Z_5$ ), necessárias para resolver a Equação (1). Os valores  $Z_1, \dots, Z_n$  correspondem as altitudes,  $\partial x$  e  $\partial y$  correspondem as dimensões do pixel nas direções  $x$  e  $y$ , respectivamente.

Figura 3 - Distribuição dos pixels numa janela móvel de 3x3.

$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$
$Z_4$	$Z_5$	$Z_6$
$Z_7$	$Z_8$	$Z_9$

Fonte: Adaptado de MARCONDES (2013).

$$\left[ \frac{\partial z}{\partial x} \right] = \frac{[(Z_3 + 2*Z_6 + Z_9) - (Z_1 + 2*Z_4 + Z_7)]}{8} * \partial x \quad \text{Eq.2}$$

$$\left[ \frac{\partial z}{\partial y} \right] = \frac{[(Z_3 + 2*Z_2 + Z_1) - (Z_9 + 2*Z_8 + Z_7)]}{8} * \partial y \quad \text{Eq.3}$$

### 1.3.3 Uso do solo

SCHAEFFER et al (2008) afirmam que é importante considerar que a progressão e a velocidade dos ventos são influenciadas pelas irregularidades do terreno, características de seu relevo e padrão de vegetação, sendo esta última mensurada pela rugosidade. ALEKSEENKO e ROUX (2017) e BOT, EECEN e BRAND (2017) identificam que a velocidade do vento aumenta em locais com menor rugosidade, como as lâminas d'água, e diminui em locais com maior rugosidade, como as florestas.

Atualmente existem inúmeras fontes de dados sobre cobertura dos solos, entre eles cita-se o produto 30-meter Global Land Cover Dataset (GlobeLand30 ou GLC30m). De acordo com CHEN (2014) este produto é gerado através da síntese de vários tipos de materiais, bem como seus atributos naturais e características na superfície da Terra. Lançado em 2010 pelo Ministério de Ciência e Tecnologia da China para apoiar pesquisas sobre mudanças globais e desenvolvimento de modelos eficientes, o GLC30m teve como resultado um mapeamento de cobertura do solo com resolução espacial de 30 metros para o ano de 2010.

O mesmo autor afirma que a área de abrangência do GLC30m abrange toda a região terrestre entre as latitudes de 80° tanto para o norte como para o sul. As imagens de classificação utilizadas para geração de dados de GLC30m são principalmente imagens multiespectrais de 30m, incluindo imagens multiespectrais Landsat TM e ETM + e imagens multiespectrais do Satélite Ambiental Chinês Diaster Alleviation Satellite (HJ-1).

Além dos satélites informados anteriormente, alguns dados auxiliares foram utilizados para realizar checagens em regiões específicas, como por exemplo o dados do projeto Land Cover Data of Canada, que foi utilizado para checagem dos resultados no Canadá. O produto final do GLC30m passou por um teste de acurácia utilizando 150 mil pontos de controle e chegou-se a um índice Kappa de 0,78, condierando um ótimo resultado, pois segundo CONGALTON (1991), o índice Kappa mede a semelhança entre o que foi classificado e a realidade.

Ao final, o produto é disponibilizado em arquivos no formato matricial contendo um valor multiplo de 10 para cada célula. Cada valor corresponde a uma classificação do solo de acordo com a Tabela 12.

Tabela 12 - Relação valor matricial e uso do solo.

<b>Valor do pixel</b>	<b>Tipo de uso do solo</b>
10	Área cultivada
20	Floresta
30	Pasto
40	Arbusto
50	Áreas úmidas
60	Corpos d'água
70	Tundra
80	Superfícies artificiais
90	Solo exposto
100	Gelo ou neve permanente

Fonte: Adaptado de National Geomatics Center of China (2014).

SILVA, RIBEIRO e GUEDES (2007) afirmam que a rugosidade do terreno pode desempenhar um papel relevante nas características do fluxo de vento e, portanto, é uma variável que não pode ser negligenciada na modelagem de fluxo e avaliação de recursos eólicos. Os mesmos autores que registram que o programa da Comissão Europeia “Corine Land Cover” (CLC)

apresenta um grande avanço na definição dos valores de rugosidade para alguns tipos de terreno. Esses autores apontam que até 2017 o CLC mapeou o uso do solo de 33 países da Europa. Após esse mapeamento foram definidos os comprimentos de rugosidade para cada classe encontrada.

O princípio empregado pelo CLC, para determinar os comprimentos de rugosidade, foi baseado em um amplo estudo da metodologia e teoria do comprimento da rugosidade encontrada no Atlas Eólico Europeu. Os resultados obtidos pelo CLC foram testados em locais de Portugal, a partir de observações de campo, chegando-se a um erro abaixo de 10%.

A Tabela 13 relaciona o uso do solo com os comprimentos de rugosidade com base no CLC.

Tabela 13 - Valores de rugosidade CLC.

<b>Uso do solo</b>	<b>Rugosidade</b>
Tecido urbano contínuo	1,2
Floresta de folhas largas; Floresta conífera; Floresta mista	0,75
Áreas verdes urbanas; Floresta de transição/arbustiva; Áreas queimadas	0,6
Tecido urbano descontínuo; Locais em construção; Unidades industriais ou comerciais; Construções de esporte e lazer; Portos	0,5
Área agroflorestal; Padrões de cultivo complexo; Terra ocupada principalmente por agricultura, com significativa área de vegetação natural	0,3
Colheita anual associada a culturas permanentes; Árvores frutíferas e plantações de bagas; Vinhedo; Compos de oliva	0,1
Redes rodoviárias e ferroviárias e terras associadas	0,075
Terra arável não irrigada; Terra permanentemente irrigada; Pântanos	0,05
Vegetação esclerófila; Mouros e charnecas; Pastagem natural; Pastagens	0,03
Sites de despejo; Sites de extração de minerais; Aeroportos; Rocha desencapada; Áreas de vegetação aparente	0,005
Glaciais e neve perpétua	0,001

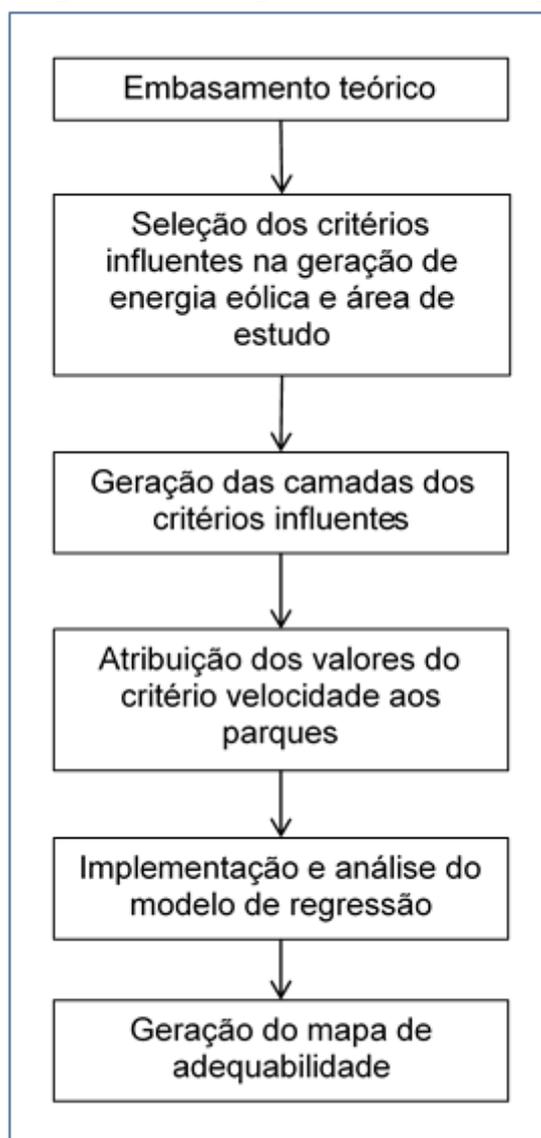
<b>Uso do solo</b>	<b>Rugosidade</b>
Pântanos; Salinas; Áreas intermediárias	0,0005
Praias, dunas e planícies de areia	0,0003
Água	0

Fonte: Adaptado de SILVA et al (2007).

## METODOLOGIA DA PESQUISA

A metodologia empregada para a identificação de áreas propícias para instalação dos parques eólicos está esquematizada na Figura 4.

Figura 4 - Fluxograma da metodologia.



O embasamento teórico foi desenvolvido no item anterior. A partir dele identificaram-se conceitos básicos de energia eólica, além do detalhamento das variáveis influentes na produção desse tipo de energia.

A seleção dos critérios influentes na geração de energia eólica, nessa pesquisa, foi influenciada pela disponibilidade dos dados, e também, pela relevância da energia eólica. Em função disso, serão considerados como

critérios a velocidade do vento, a declividade e a rugosidade para a seleção das áreas mais propícias para a implantação de parques eólicos. A região de estudo será o Nordeste brasileiro que contabiliza 83% da produção nacional.

A geração das camadas dos critérios influentes corresponderá a uma grade para cada variável, com resolução espacial de 30m x 30m. A velocidade do vento será obtida a partir dos dados MERRA, e depois, interpolados. A declividade será obtida a partir de imagens SRTM. A rugosidade será obtida no a partir da associação do GLC30M com o CLC.

A atribuição dos valores dos critérios aos parques será efetivada pela combinação de cada uma das camadas com a posição espacial dos parques;

A implementação da regressão terá como variável dependente o fator de capacidade dos parques e variáveis independentes a velocidade do vento, a declividade e a rugosidade. Salienta-se que, o fator de capacidade dos parques corresponde a relação entre a potência nominal instalada e a potência efetiva durante a geração, expresso em forma de porcentagem. A análise da regressão se dará pela investigação do coeficiente de determinação  $R^2$ , dos coeficientes das variáveis independentes, dos coeficientes das variáveis independentes padronizados e dos níveis de significâncias de todos estes coeficientes.

A geração do mapa de adequabilidade se processará pela soma das camadas, ponderadas pelos respectivos coeficientes obtidos no tópico anterior.

Os materiais e recursos tecnológicos empregados são:

- Windographer: programa para processamento e aquisição de dados brutos de fontes eólicas;
- Matlab: programa para processamento de dados através da criação de scripts;
- Excel: editor de planilhas utilizado para organizar dados;
- ArcGIS 9.3: programa de SIG utilizado na análise dos dados e na produção de documentos cartográficos.
- Notebook: Processador i5, 8gb de RAM, placa de vídeo de 1gb dedicada;
- Tabela ONS: dados de produção de parques eólicos, disponibilizados gratuitamente em [www.ons.org.br](http://www.ons.org.br);

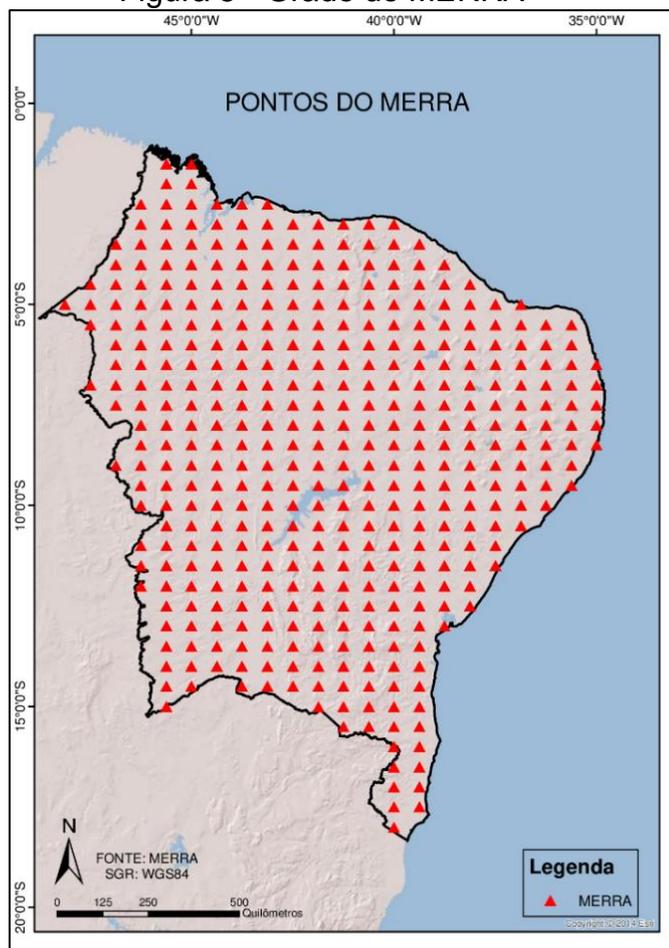
- Imagem GLC30M: dados brutos de uso e ocupação do solo, disponibilizados gratuitamente em <http://globallandcover.com/GLC30Download/index.aspx> ;
- Imagem SRTM: dados brutos de elevação do terreno, disponibilizados gratuitamente em <https://lta.cr.usgs.gov/> .

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 1.4 CAMADA DO CRITÉRIO VELOCIDADE DO VENTO

Face a inviabilidade de emprego de torres anemométricas na região de estudo, a velocidade do vento foi obtida a partir dos dados do MERRA. Essa opção está de acordo com RITTER et al (2015) que demonstra que os dados provenientes da reanálise MERRA possuem boa correlação com dados medidos através de anemômetros. Esses dados são disponibilizados com frequência horária, desde janeiro de 1980 até a data da consulta, simulando estações distribuídas em todo globo. No caso dessa pesquisa foram consultados 409 pontos, localizados no Nordeste brasileiro, com distribuição espacial apresentada na Figura 5. Destaca-se que esses dados são espaçados em  $2/3^\circ$  de longitude e  $1/2^\circ$  de latitude.

Figura 5 - Grade do MERRA

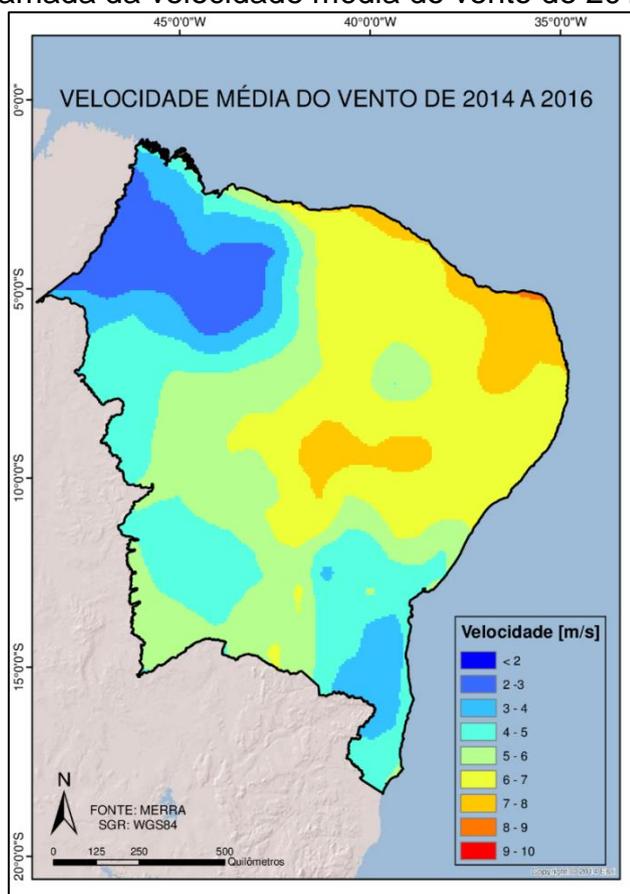


Para a leitura dos dados MERRA foi utilizado o programa Windgrapher. Este gerou um arquivo texto com informações de velocidade do vento de hora em hora além de outras informações não empregadas nessa pesquisa. Para eliminar informações desnecessárias, calcular a velocidade média do vento no período de 2014 a 2016 (3 anos) e compatibilizar essa velocidade com as coordenadas dos 409 pontos empregou-se o programa Matlab. O arquivo de saída desse programa foi materializado por uma nuvem de pontos tridimensionais (latitude, longitude e velocidade média do vento).

A nuvem de pontos foi interpolada pelo método do inverso do quadrado da distância, como sugerido por KESKIN e al (2015). Esses autores indicam que esse interpolador é ideal para dados de velocidade do vento, principalmente os provenientes do MERRA.

A superfície resultante da interpolação é constituída por uma grade com resolução de 30m x 30m, que corresponde a camada do critério velocidade do vento, materializada na Figura 6.

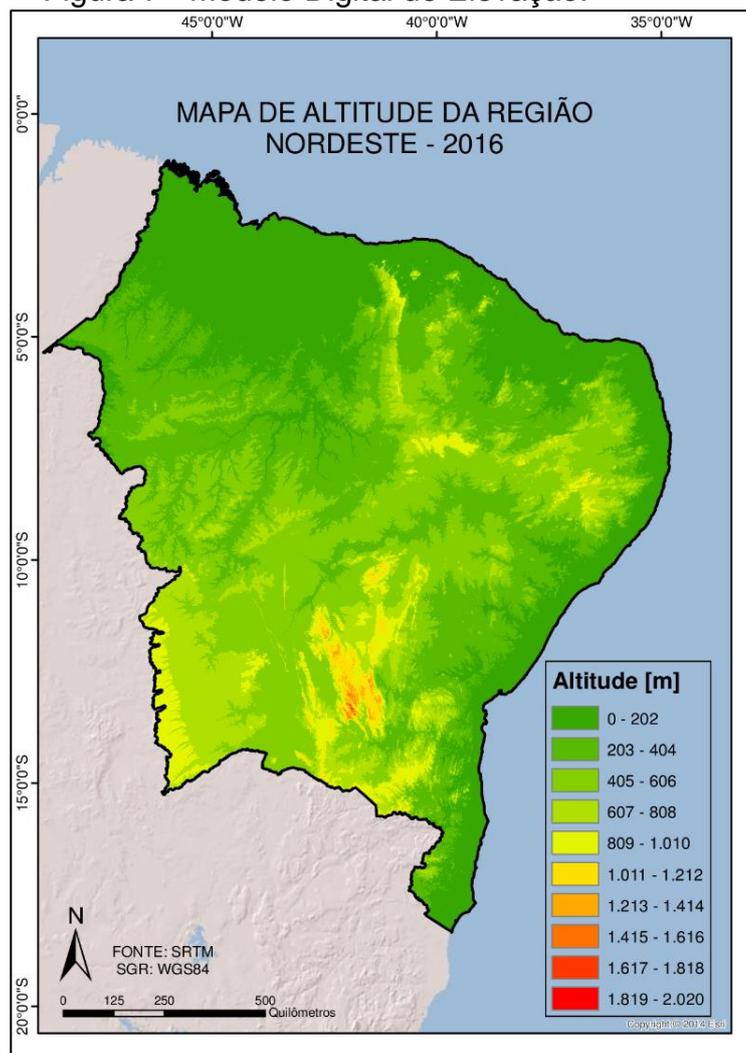
Figura 6 - Camada da velocidade média do vento de 2014 a 2016.



## 1.5 CAMADA DO CRITÉRIO DECLIVIDADE

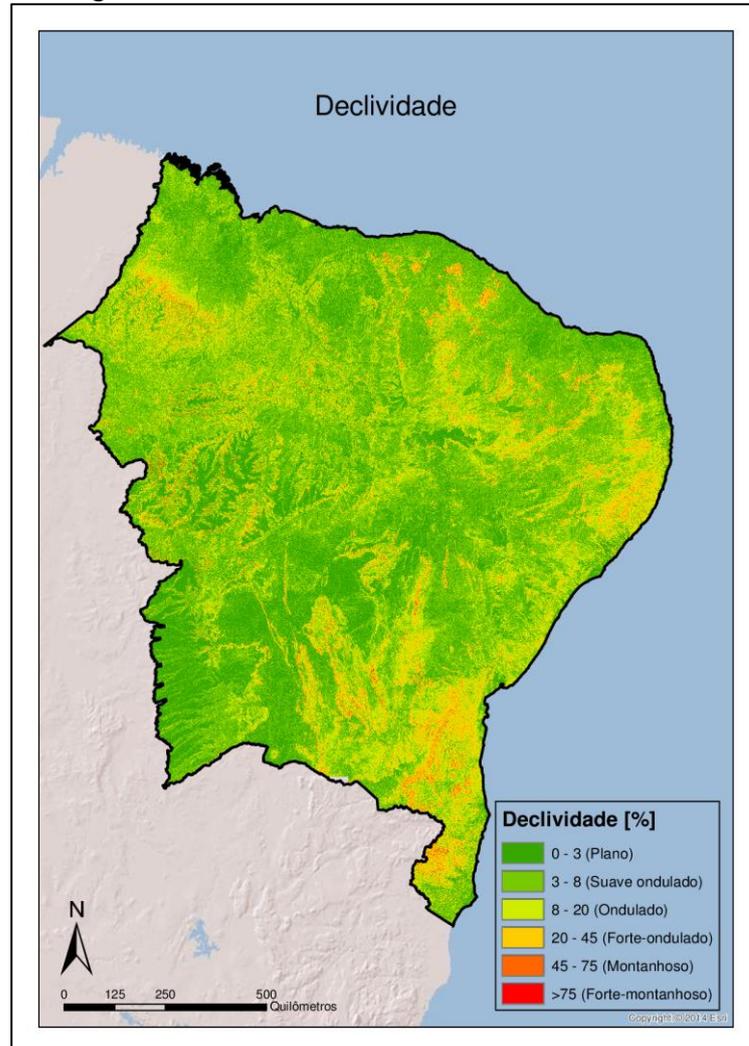
Para a obtenção da camada declividade empregou-se o MDE disponibilizado pela missão SRTM, com resolução espacial de 30m x 30m, como mostrado na Figura 7.

Figura 7 - Modelo Digital de Elevação.



A partir do MDE, foi gerado o mapa de declividade de acordo com o modelo proposto por BURROUGH e McDONELL (1998). A superfície resultante desse modelo é constituída por uma grade com resolução de 30m x 30m, que corresponde a camada do critério declividade, materializada na Figura 8.

Figura 8 - Camada do critério declividade.



## 1.6 CAMADA DO CRITÉRIO RUGOSIDADE

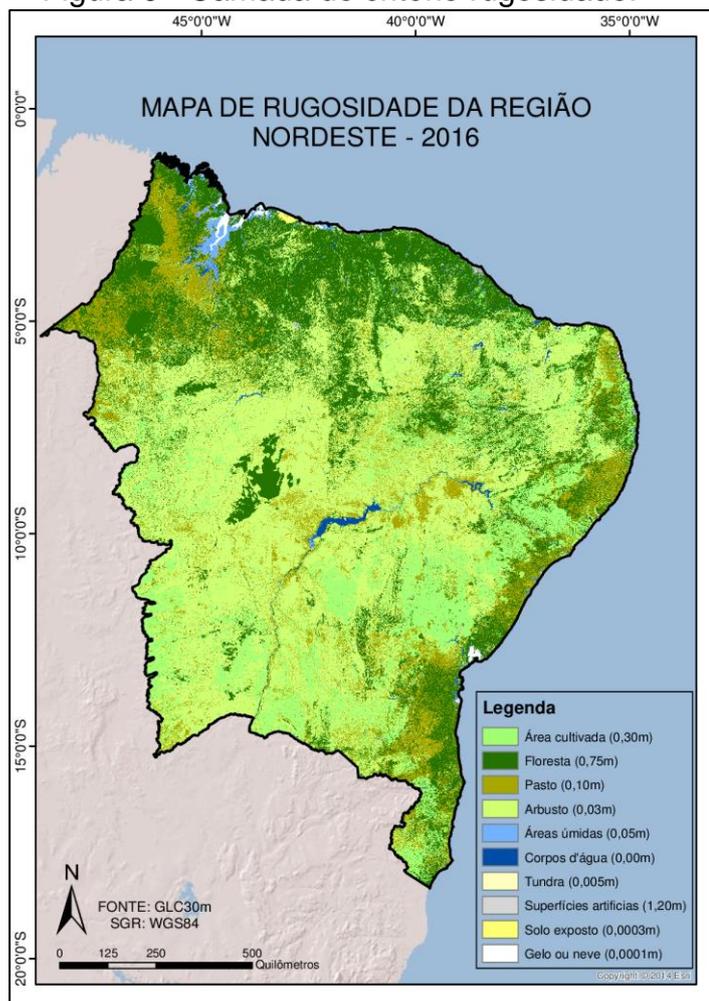
Inicialmente foi obtida a imagem de uso do solo GLC30M. Essa imagem tem resolução espacial de 30m x 30m e o valor do pixel corresponde a determinado tipo de cobertura. O valor do pixel dessa imagem foi associado ao valor de rugosidade do CLC, para os tipos de uso do solo existentes na região de estudo. Essa associação é mostrada na Tabela 14.

Tabela 14 - Associação valor do pixel x uso do solo x rugosidade.

<b>Valor do pixel</b>	<b>Tipo de uso do solo</b>	<b>Rugosidade (m)</b>
10	Área cultivada	0,30
20	Floresta	0,75
30	Pasto	0,10
40	Arbusto	0,03
50	Áreas úmidas	0,05
60	Corpos d'água	0,00
70	Tundra	0,005
80	Superfícies artificiais	1,20
90	Solo exposto	0,0003

A superfície resultante da associação identificada na Tabela 14 é constituída por uma grade com resolução de 30m x 30m, que corresponde a camada do critério rugosidade, materializada na Figura 9. Observa-se que a rugosidade é medida em metros ou centímetros, pois ela representa a altura do cisalhamento do vento em um determinado tipo de cobertura do solo (WEBB, OSKIN e BROWN ,2014).

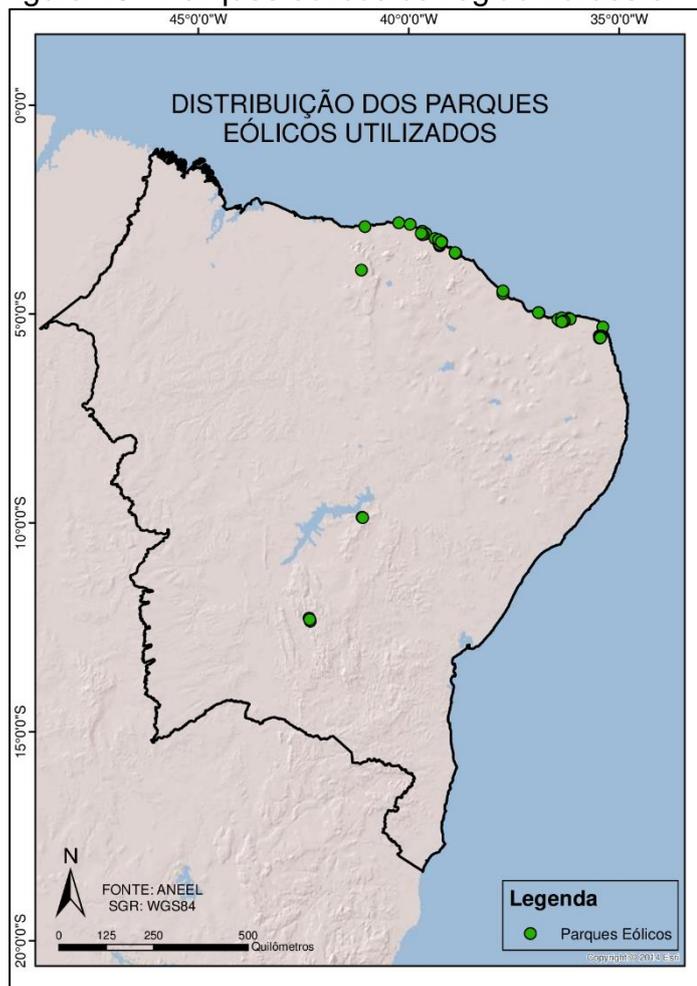
Figura 9 - Camada do critério rugosidade.



## 1.7 ATRIBUIÇÃO DOS VALORES DOS CRITÉRIOS AOS PARQUES

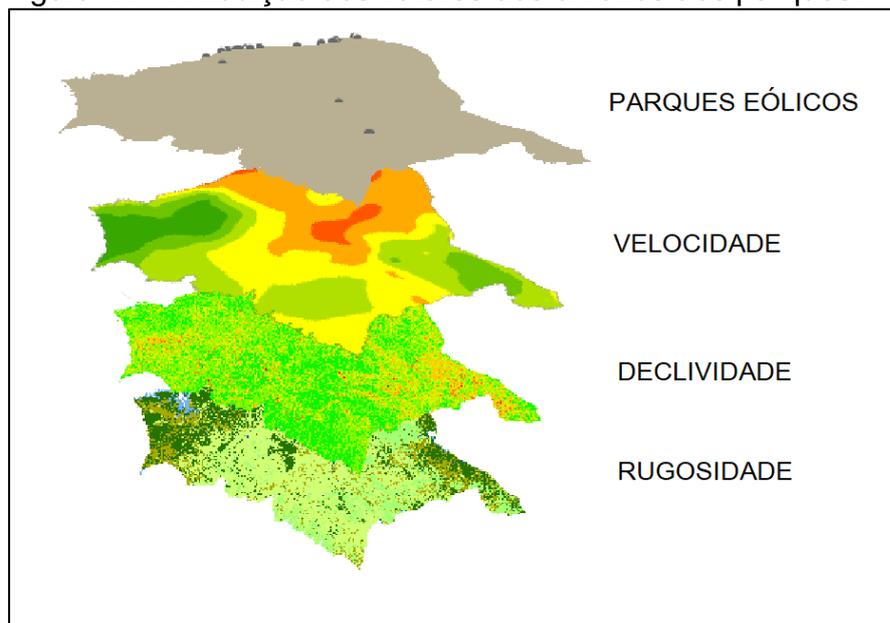
Foram empregados nesse trabalho os parques que tinham informações completas de fator de capacidade entre os anos de 2014 a 2016, totalizando 33 parques eólicos, materializados por uma estrutura vetorial do tipo ponto, como mostrado na Figura 10. O atributo dos pontos corresponde ao fator de capacidade de cada parque, que coincide com a variável dependente desse estudo.

Figura 10 - Parques eólicos da região nordeste.



A camada vetorial de parques é sobreposta às camadas raster velocidade do vento, declividade e rugosidade. Dessa forma os valores dos pixels das camadas raster são extraídos para os pontos da camada vetorial. Ao final, a camada vetorial passa a conter como atributos de cada parque o fator de capacidade assim como os critérios velocidade do vento, declividade e rugosidade. Essa operação é esquematizada na Figura 11.

Figura 11 - Atribuição dos valores dos critérios aos parques.



## 1.8 IMPLEMENTAÇÃO E ANÁLISE DO MODELO DE REGRESSÃO

O primeiro modelo implementado foi linear, com 33 observações, incorporando como variáveis independentes a velocidade do vento, a rugosidade, a declividade e como variável dependente o fator de capacidade. As tabelas 15 e 16 identificam os resultados mais significantes para análise.

Tabela 15 - Resumo do modelo.

Modelo	R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajustado	Desvio padrão da estimativa
1	,472 <sup>a</sup>	,223	,143	7,33565227

Tabela 16 - Análise de variância.

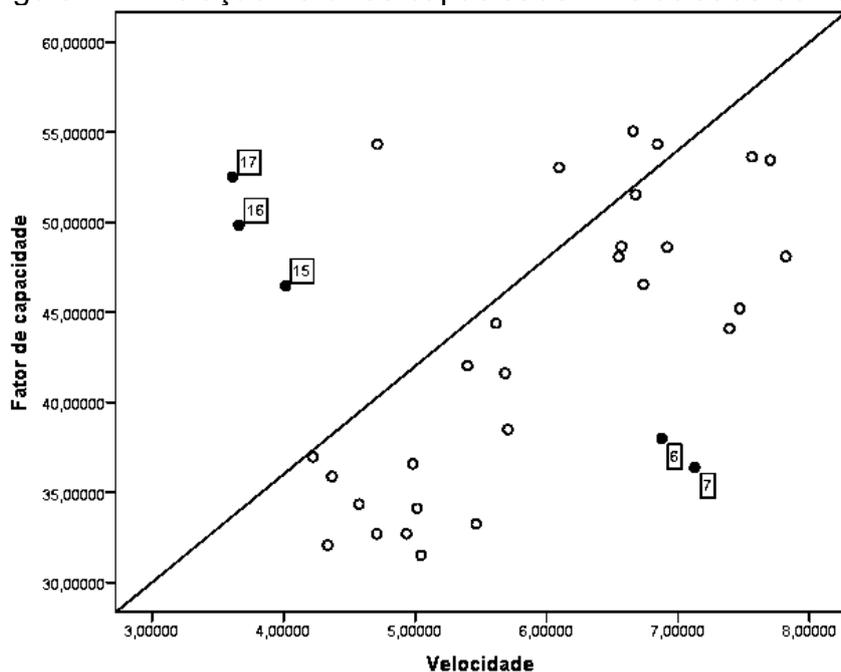
Modelo		Soma dos quadrados	df	Quadrado médio	F	Sig.
1	Regression	448,364	3	149,455	2,777	,059 <sup>b</sup>
	Residual	1560,542	29	53,812		
	Total	2008,906	32			

Observa-se na Tabela 15 que o coeficiente de determinação R<sup>2</sup> é de 0,223. Esse valor indica que somente 22,3% da variabilidade do fator de

capacidade é explicado pela variabilidade das variáveis independentes. Quanto ao nível de significância do coeficiente observa-se que equivale a 94,1% (1-0,059), como consta na Tabela 16.

Devido ao baixo poder explicativo do modelo empregado procurou-se identificar *outliers* nos dados. Sabendo-se que, a velocidade do vento é a variável de maior peso no fator de capacidade o gráfico da Figura 12 mostra o relacionamento dessas duas variáveis.

Figura 12 - Relação Fator de capacidade x Velocidade do vento.



De acordo com a Figura 12, constata-se que os parques 15 (Santo Antônio de Pádua), 16 (São Cristóvão) e 17 (São Jorge) apresentam fatores de capacidade altos com baixas velocidades de vento e os 6 (Praia do Morgado) e 7 (Volta do Rio) o inverso. Por conta disso, esses parques são excluídos e um novo modelo linear, com 26 equações, é realizado. As Tabelas 17, 18, 19 e 20 mostram os resultados desse novo modelo.

Tabela 17 - Estatística descritiva.

	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>N</b>
FC	42,8521605	8,01248885	27
Rugosidade	,3704481	,37322612	27
Declividade	6,0113726	3,76436941	27
Veloc. vento	5,9643701	1,13741836	27

Tabela 18 - Resumo do modelo.

<b>Modelo</b>	<b>R</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup> ajustado</b>	<b>Desvio padrão da estimativa</b>	<b>Durbin-Watson</b>
1	,856 <sup>a</sup>	,734	,699	4,39746156	1,368

Tabela 19 - Análise de variância.

<b>Modelo</b>	<b>Soma dos quadrados</b>	<b>df</b>	<b>Quadrado médio</b>	<b>F</b>	<b>Sig.</b>	
1	Regressão	1224,433	3	408,144	21,106	,000 <sup>b</sup>
	Resíduo	444,766	23	19,338		
	Total	1669,199	26			

Tabela 20 - Coeficientes.

<b>Modelo</b>	<b>Coeficientes</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Coeficientes padronizados</b>	<b>t</b>	<b>Sig.</b>
1	Constante	8,913	4,626	1,927	,066
	Rugosidade	4,284	2,335	-,200	,080
	Declividade	-,210	,238	-,099	,385
	Velocidade	6,168	,789	,876	,000

Observa-se na Tabela 18 que o coeficiente de determinação  $R^2$  é de 0,734. Esse valor indica que 73,4% da variabilidade do fator de capacidade é explicado pela variabilidade das variáveis independentes. O nível de significância do coeficiente é de quase 100% (1-0,000...), como consta na Tabela 19. Esse modelo apresentou valores com melhor qualidade, tanto em relação ao  $R^2$ , quanto em relação ao nível de significância.

Em relação ao sinal dos coeficientes das variáveis independentes, como mostra a Tabela 20, verifica-se que a rugosidade e a declividade são negativas, confirmando uma relação inversa entre as variáveis e o fator de capacidade, o que é esperado de acordo com a bibliografia. O mesmo não acontece com a velocidade do vento uma vez o sinal positivo aponta uma relação direta com a

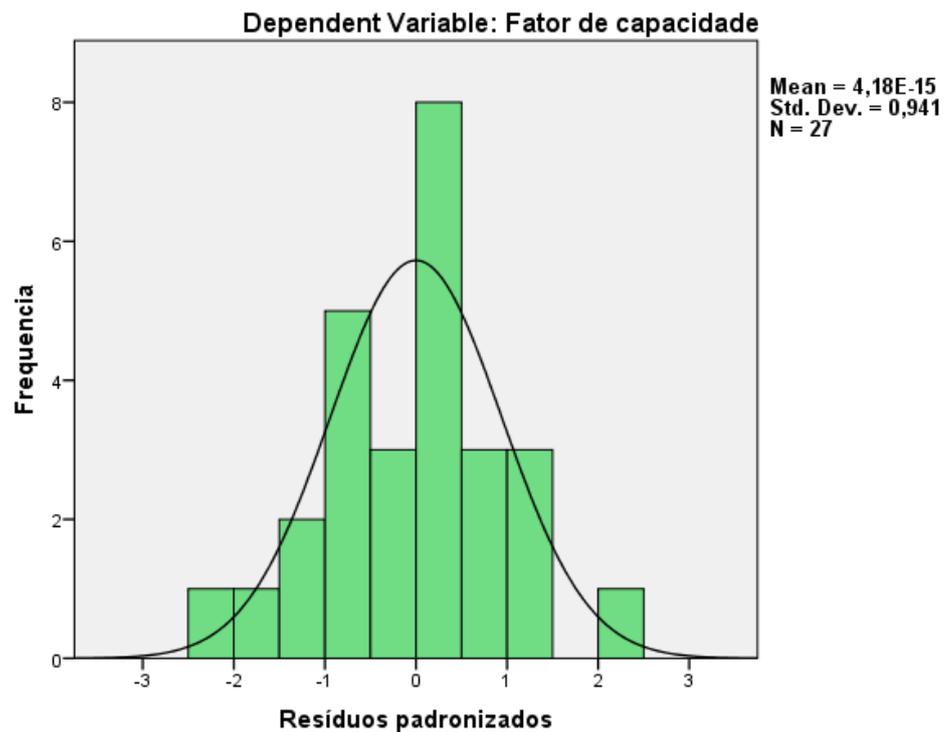
variável dependente, também esperado de acordo com a bibliografia. Em termos práticos pode-se afirmar que: (i) aumentando-se de 1 unidade a velocidade do vento, o fator de capacidade aumentará 6,168 unidades; (ii) aumentando-se de 1 unidade a declividade, o fator de capacidade diminuirá 0,21 unidades e (iii) aumentando-se de 1 unidade a rugosidade, o fator de capacidade diminuirá 2,84 unidades.

Em relação aos coeficientes padronizados observa-se que a velocidade do vento tem peso bem maior (0,876) do que a declividade (-0,099) e a rugosidade (-0,200). Ressalta-se que esse fato é concordante com a bibliografia consultada.

Em relação ao nível de significância dos coeficientes das variáveis independentes observa-se que a velocidade do vento apresentou valor de 100% (1-0,000), a rugosidade de 92% (1-0,008), o intercepto de 93,4% (1-0,066) e a declividade de 61,5% (1-0,385). Mesmo apresentando baixa significância estatística, a declividade foi incorporada no modelo porque é recorrentemente citada na literatura como influente. Além disso, sua inclusão possibilitou um  $R^2$  de 0,734 contra 0,724 em caso de não inclusão.

O modelo de regressão deve também ser analisado em relação aos resíduos. O coeficiente de Durbin-Watson de 1,368 conforme a Tabela 18, confirma independência dos resíduos porque esse valor está no intervalo [1 – 3]. A Figura 13 mostra o histograma dos resíduos padronizados do modelo. Nela observa-se uma distribuição normal, com média praticamente 0 e desvio padrão quase 1. Assim, podemos concluir que são atendidos os pressupostos da regressão, que deve apresentar resíduos independentes com distribuição normal de média zero e variância constante.

Figura 13 - Histograma dos resíduos padronizados.

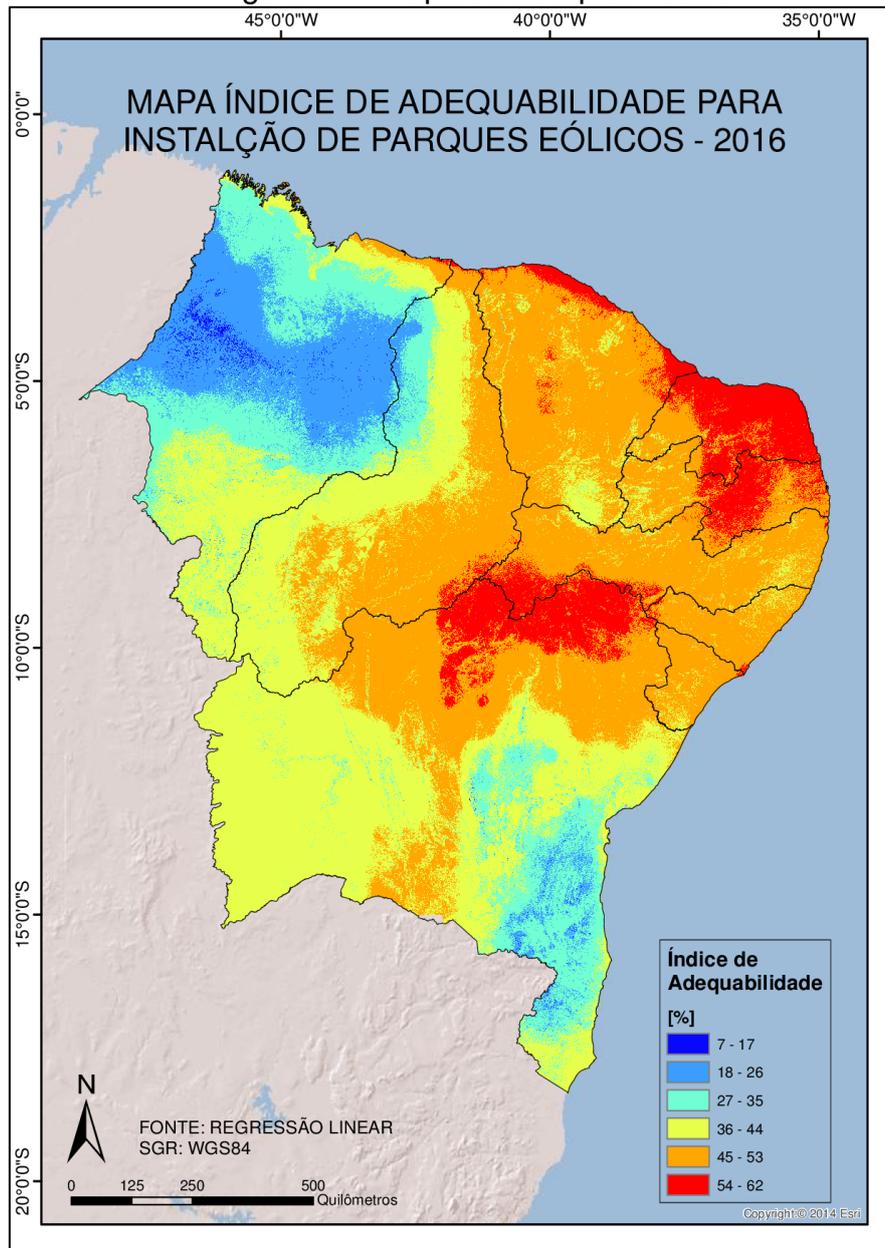


### 1.9 GERAÇÃO DO MAPA DE ÁREAS PROPÍCIAS

O mapa de áreas propícias para implantação de parques eólicos, mostrado na Figura 14, é gerado empregando-se os coeficientes da regressão aplicado a cada uma das camadas dos critérios das variáveis influentes, segundo a Equação 4.

$$\text{Mapa áreas propícias} = 8,913 - 4,284 * \text{camada critério rugosidade} - 0,21 * \text{camada critério declividade} + 6,168 * \text{camada critério velocidade} \quad \text{Eq. 4}$$

Figura 14 - Mapa de adequabilidade.



Fonte: Próprio autor.

O mapa da Figura 14 foi estratificado em intervalos iguais mostrando o índice de adequabilidade para implantação de parques eólicos em porcentagem indo do azul (menos adequabilidade) ao vermelho (maior adequabilidade).

## CONCLUSÃO

Esta dissertação cumpriu o objetivo proposto de identificar as áreas mais propícias para a instalação dos parques eólicos, no Nordeste brasileiro. Para tal, foi necessário baser em variáveis mencionadas na bibliografia consultada, que são a velocidade do vento, a declividade e a rugosidade do terreno.

Para chegar ao resultado apresentado foi necessário a criação de uma fórmula com as variáveis citadas a cima. Inicialmente utilizou-se uma regressão linear com todos os parques eólicos do Nordeste brasileiro. Porém o resultado não foi satisfatório, sendo necessário uma análise de velocidade e fator de capacidade para determinar quais pontos estariam fora da curva, nos deixando com 26 parques eólicos aptos para estarem na regressão linear apresentada.

Se tivéssemos mais variáveis disponíveis poderíamos ter melhorado o coeficiente de determinação fazendo ele superar o atual que é de 73,4%. Apesar disso, o trabalho apresenta um bom parâmetro para uma primeira aproximação.

Já a distribuição geográfica dos parques, notadamente concentrada no litoral dos estados do Rio Grande do Norte e Ceará, não enviesa o estudo porque os dados extraídos dos mesmos não sofrem interpolação. Apesar disso, ressalta-se que o parâmetro rugosidade apresentou pequena variação porque a cobertura do solo pouco muda no litoral nordestino.

Finalmente, entende-se que o litoral norte do Ceará, grande parte do Rio Grande do Norte, área central da Paraíba e uma área que compreende a fronteira entre Pernambuco e Bahia são as mais propícias para a exploração de parques eólicos no Nordeste brasileiro.

## REFERÊNCIAS

AFANASYEVA, S.; SAARI, J.; KALKOFEN, M.; PARTANEM, J.; PYRHÖNEN, O.; **Technical, economic and uncertainty modelling of a wind farm project**. ELSEVIER – Energy Conversion and Management, 2016.

ALEKSEENKO, E.; ROUX, B.; **Numerical simulation of the wind influence on bottom shear stress and salinity fields in areas of *Zostera noltei* replanting in a Mediterranean coastal lagoon**. ELSEVIER – Progress in Oceanography, 2017.

ANEEL; **Agência Nacional de Energia Elétrica**. [www.aneel.org.br](http://www.aneel.org.br). Acessado em 2016.

APARICIO G.; MONFORTI, F.; VOLKER, P.; ZUCKER, A.; CARERI, F.; HULD, T.; BADGER, J.; **Simulating European wind power generation applying statistical downscaling to reanalysis data**. ELSEVIER – Applied Energy, 2017.

BABAM, S. M. J.; PARRY, T.; **Developing and applying a GIS-assisted approach to locating wind farms in the UK**. Pergamon, Renewable Energy, 2000.

BASEER, M. A.; REHMAN, S.; MEYER, J. P.; ALAM, M.; **GIS-based Site Suitability Analysis for Wind Farm Development in Saudi Arabia**. Journal Energy, 2017.

BRASIL. **Lei 12.615, de 25 de Maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa.

BOT, E. T. G.; EECEN P. J.; BRAND, A. J.; **The influence of wind farms on the wind speed above the wind farms**. ECN, Unit Wind Energy, 2017.

BURTON, T.; JENKINS, N.; SHARPE, D.; BOSSANYI, E.; **Wind Energy Handbook**. Editora Wiley, 2001.

BURROUGH, R.; McDONELL, PA.; **Principles of geographical information systems**. Oxford, Oxford University Press, 1998.

CHANG, T.; LIU, F.; KO, H.; CHENG, S.; SUN, L.; KUO, S.; **Comparative analysis on power curve models of wind turbine generator in estimating capacity factor**. ELSEVIER – Energy, 2014.

CHEN, L.; **30-meter Global Land Cover Dataset - GlobeLAND30: Product Description**. National Geomatics Center of China, 2014.

CONGALTON, R. G.; **A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data**. Remote Sensing of Environment, 1991.

DEVASHISH; THAKUR, A.; PANIGRAHI, R. R. B. S.; **A Review on Wind Energy Conversion System and Enabling Technology.** International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES), 2016.

DORVAL, J.; MASSON, C.; GAGNON, Y.; **On the Improvement of Wind Power Predictions Based on Terrain Characteristics and Measurements of the Annual Energy Production.** Journal of Flow Control, Measurement & Visualization, 2017.

DRAPER, N. R.; SMITH, H.; **Applied Regression Analysis – Wiley Series in Probability and Statistics.** Third Edition, 2014.

ELLABBAN, O.; ABU-RUB, H.; BLAADJERG, F.; **Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology.** ELSEVIER - Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014.

EMIS, S.; **Wind Energy Meteorology: Atmospheric Physics for Wind Power Generation.** Second Edition, Springer International Publishing AG, 2018

EPE – Empresa de Pesquisa Energética, Ministério de Minas e Energias; **Instruções para Solicitação de Cadastramento e Habilitação Técnica com Vistas à Participação nos Leilões de Energia Elétrica.** Brasil, Rio de Janeiro, RJ, 2009.

FELGUEIRAS, C. A.; CÂMARA, G. **Modelagem Numérica de Terreno.** INPE, 2004.

GASCH, R.; TWELE, J.; **Wind Power Plants: Fundamentals, Desing, Construction and Operation. Second Edition.** Editora Springer, 2012.

GELARO, R., MCCARTY, W. SUÁREZ, M. J., TOLDING, R.; **The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2).** American Meteorological Society, 2017

GRUBB, M. j.; MEYER, N. L.; In JO-HANSSON; T. B et al. **Wind Energy: Resources, Systems and Regional Strategies.** Washington, DC., Island Press, 1993.

JANGIDA, J.; BERA, A. K.; JOSEPHB, M.; VISHAL SINGHC, SINGHA, T. P.; PRADHANA, B. K.; DASA, S.; **Potential zones identification for harvesting wind energy resources in desert region of India – A multi criteria evaluation approach using remote sensing and GIS.** ELSEVIER - Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016.

JANKE, J. R.; **Multicriteria GIS Modeling Wind ans Solar Farms in Colorado.** ELSEVIER – Renewable Energy, 2010.

JONG, P.; KIPERSTOK, A.; SÁNCHEZ, A. S.; DARGAVILLE, R.; Torres, E. A.; **Integrating Large Scale Wind Into the Electricity Grid In The Northeast of Brazil.** ELSEVIER – Energy, 2015.

KESKIN, M.; DOGRU, A. O.; BALCIK, F. B.; GOSKEL, C.; ULUGTEKIN, N.; SOZEN, S.; **Comparing Spatial Interpolation Methods for Mapping Meteorological Data in Turkey.** Springer - Energy Systems and Management, 2015.

LATINOPOULOS, D.; KECHAGIA, K.; **A GIS-based multi-criteria evaluation for wind farm site selection. A regional scale application in Greece.** ELSEVIER – Renewable Energy, 2015.

LI, S. W.; HU, Z. Z.; TSE, K. T.; WEERASURIYA, A. U.; **Wind direction field under the influence of topography: part II: CFD investigations.** Geomechanics and Engineering – Wind and Structures, 2016.

KAPLAN, Y.; **Overview of wind energy in the world and assessment of current wind energy policies in Turkey.** ELSEVIER - Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015.

MA, J., SCOTT, N., DEGLORIA, S. AND LEMBO, A.; **Siting analysis of farm-based centralized anaerobic digester systems for distributed generation using GIS.** Biomass and Bioenergy Journal, 2015.

MAHELA, O. M.; SHAIK, A. B.; **Comprehensive overview of grid interfaced wind energy generation systems.** ELSEVIER - Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016.

MARCONDES, M. S., **Análise do erro altimétrico do MDE ASTER-2 na declividade.** Dissertação de Mestrado, UFPE, 2013

MORETTI, E; KOFFLER, N. F; TEIXEIRA, A. L. A. **Técnicas digitais para mapeamento de declividade e orientação de vertentes baseada no uso de sistemas de informação geográfica.** Boletim de Geografia Teorética, vol. 19, nº37\38, pg. 29-52, 1989.

MILLER, A.; LI, R.; **A Geospatial Approach for Prioritizing Wind Farm Development in Northeast Nebraska, USA.** ISPRS International Journal of Geo-Information; 2014.

National Geomatics Center of China; **30-meter Global Land Cover Dataset (GlobeLand30) – Product Description.** 2014.

NOORELLAHI, Y.; YOUSEFI, H.; MOHAMMADI, M.; **Multi-criteria Decision Support System for Wind Farm Site Selection Using GIS.** ELSEVIER – Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2015.

NOVAIS, C. S.; **Validação das estimativas de produção de energia elétrica de parques eólicos em Portugal.** ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal, 2017.

NUGENT, D.; SOVACOOOL, B. K.; **Assessing the lifecycle greenhouse gas emissions from solar PV and wind energy: A critical meta-survey.** ELSEVIER - Energy Policy, 2014.

PAMUCAR, D.; GIGOVI, L.; BAJI, Z.; JANOŠEVI, M.; **Location Selection for Wind Farms Using GIS Multi-Criteria Hybrid Model: An Approach Based on Fuzzy and Rough Numbers.** Sustainability - Energy Sustainability, 2017

PINHEIRO, E. S.; **Comparação Entre Dados Altimétricos Shuttle Radar Topography Mission, Cartas Topográficas e Gps: Numa Área Com Relevo Escarpad.** Revista Brasileira de Cartografia, Abril, 2006.

QUACHNING, V.; **Understanding Renewable Energy Systems.** Second Edition, Routledge Edition, 2016.

RICOSTI, J. F. C.; **Inserção de Energia Eólica no Sistema Hidrotérmico Brasileiro.** Dissertação de Mestrado, Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, 2011.

RITTER, M.; SHEN, Z.; CABRERA, B. L.; ODENING, M.; **Designing an index for assessing wind energy potential.** ELSEVIER - Renewable Energy, 2015.

SAWYER, S.; DYRHOLM, M.; **Global Wind Report 2016.** Global Wind Energy Council, 8th National Renewable Energy Forum, Ullanbaatar, Mongolia, 2017

SCHAEFFER, R., SZKLO, A. S., LUCENA, A. F. P., SOUZA, R. R., BORBA, B. S., COSTA, I. V., JÚNIOR, A. O. P., CUNHA, S. H. F.; **Mudanças Climáticas e Segurança Energética no Brasil.** Rio de Janeiro: Nova Brasileira, 2008.

SILVA, J.; RIBEIRO, C.; GUEDES, R.; **Roughness Length Classification Of Corine Land Cover Classes.** Maia – Portugal, MEGAJOULE – Consultants, 2007.

SIYAL, S.; Mörtberg, U., Mentis, D., Welsch, M., Babelon, I. and Howells, M.; **Wind energy assessment considering geographic and environmental restrictions in Sweden: A GIS-based approach.** ELSEVIER – Energy, 2015.

SULTAN, S. S.; GOUR, A.; PANDEY, M.; **Wind Power Potential Assessment of Complex Terrain at RGPV Hill Top.** IJIRST –International Journal for Innovative Research in Science & Technology, 2015.

TOLMASQUIM, M. T.; **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica.** EPE: Rio de Janeiro, 2016.

VALERIANO, M. M; ROSSETTI, D. F. **TOPODATA: seleção de coeficientes geoestatísticos para refinamento unificado de dados SRTM.** São José dos Campos, INPE -2010.

VIEIRA, S. M., **Avaliação do Potencial Eólico no Nordeste Brasileiro Considerando os Cenários de Mudanças Climáticas Globais.** UFC, Dissertação de Mestrado, Ceará, 2013.

WEBB, N.; OSKIN, G. S.; BROWN, S.; **The effect of roughness elements on wind erosion: The importance of surface shear stress distribution.** Journal of Geophysical Research, 2014.

WITSCHAS, B.; RAHM, S.; DÖRNBRACK, A.; WAGNER, J.; RAPP, M; **Airborne Wind Lidar Measurements of Vertical and Horizontal Winds for the Investigation of Orographically Induced Gravity Waves.** American Meteorological Society, 2017.