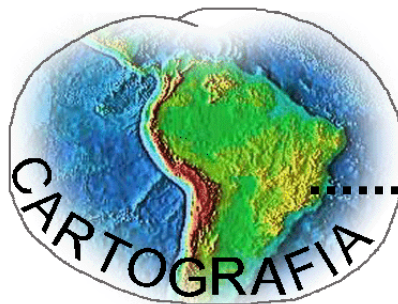


Sergio Carvalho de Melo

Metodologia de Avaliação da  
Atratividade Para Estudo de  
Potencial Eólico

XII Curso de Especialização em Geoprocessamento  
2010



UFMG  
Instituto de Geociências  
Departamento de Cartografia  
Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha  
Belo Horizonte  
cartog@igc.ufmg.br

**SERGIO CARVALHO DE MELO**

**METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DA ATRATIVIDADE PARA ESTUDO DE  
POTENCIAL EÓLICO**

Monografia apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Geoprocessamento, Departamento de Cartografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de especialista em Geoprocessamento.

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Maria Márcia Magela Machado

**BELO HORIZONTE  
2010**

M528m Melo, Sérgio Carvalho de.  
2010 Metodologia de avaliação da atratividade para estudo de potencial eólico [manuscrito] / Sérgio Carvalho de Melo. – 2010.  
viii, 25 f. : il. color.

Monografia (especialização em Geoprocessamento) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2010.

Orientadora: Maria Márcia Magela Machado.

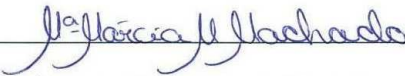
Bibliografia: f. 25.

1. Sensoriamento remoto. 2. Força eólica 3. Ventos -Velocidade . I. Machado, Maria Márcia Magela. II. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 528.8

Aluno: Sergio Carvalho de Melo

Monografia defendida e aprovada em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do título de Especialista em Geoprocessamento, em 23 de novembro de 2010, pela Banca Examinadora constituída pelos professores:



---

Prof.<sup>a</sup>. Maria Márcia Magela Machado



---

Prof. Christian Rezende de Freitas

## **AGRADECIMENTOS**

A professora orientadora Maria Márcia Magela Machado pelo apoio;

Ao incansável Charles Resende de Freitas pela paciência;

Aos colegas da Cemig pela cooperação;

A esposa e aos filhos pela compreensão;

A avó Agostinha Fonseca de Assis (*in memoriam*), grande incentivadora.

## RESUMO

O aproveitamento dos ventos como fonte alternativa de produção de energia elétrica é considerada como a grande solução para substituir outras fontes da matriz energética brasileira, como térmicas e hidráulicas, que são consideradas altamente poluentes ou que provocam grandes impactos ambientais em decorrência de sua implantação. Este trabalho teve como objetivo, propor uma metodologia simplificada para determinação da atratividade para realização de um estudo do potencial eólico, ou seja, uma avaliação preliminar que se limita a indicar a viabilidade de realização de estudos específicos para determinação efetiva desse potencial. Foi utilizada como piloto, área que abrange parte da região Norte de Minas Gerais e Sul da Bahia. A metodologia baseia-se na utilização de ferramentas de geoprocessamento para a manipulação das variáveis: velocidade dos ventos provenientes de registros de estações anemométricas e rugosidade do solo e se desenvolveu em quatro fases principais. Na primeira fase, foi realizada a interpolação dos dados dos registros pontuais de velocidade de dezessete torres anemométricas, medidas a 10 metros de altura e localizadas na área de estudo, utilizando-se a Triangulação de Delaunay. A segunda fase consistiu na elaboração do mapa de rugosidade em função da altura média dos elementos de cobertura do solo, procedimento que envolveu uma classificação supervisionada de Maxver do mosaico de imagens MODIS. Na terceira fase, foram definidos os parâmetros de extrapolação das velocidades, da altura de medição de dez metros para a altura estabelecida para os estudos que foi de sessenta metros. Na fase final, através da Álgebra de Mapas, foram realizadas operações aritméticas entre os mapas resultantes das fases um e dois aplicando-se os parâmetros estabelecidos na fase três, originando um novo mapa que foi reclassificado de acordo com a faixa de atratividade correspondente. Após análise do mapa final reclassificado, foi possível identificar quais áreas apresentam atratividade alta, média e baixa para estudo do potencial eólico, dentro da região de estudo delimitada.

Palavras-chave: potencial eólico, geoprocessamento, velocidade dos ventos, rugosidade do Solo

## SUMÁRIO

<b>1) INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2) OBJETIVOS.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1) OBJETIVO GERAL .....</b>	<b>3</b>
<b>2.2) OBJETIVO ESPECÍFICO .....</b>	<b>3</b>
<b>3) CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS.....</b>	<b>3</b>
<b>4) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>4</b>
<b>5) FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....</b>	<b>5</b>
<b>6) MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>7</b>
<b>6.1) DADOS DE VELOCIDADE DOS VENTOS .....</b>	<b>7</b>
<b>6.2) ELABORAÇÃO DE MAPA DE VELOCIDADES.....</b>	<b>8</b>
<b>6.3) ELABORAÇÃO DE MAPA DE RUGOSIDADE DO SOLO.....</b>	<b>10</b>
<b>6.4) PARÂMETROS DE EXTRAPOLAÇÃO DE VELOCIDADE .....</b>	<b>13</b>
<b>6.5) ELABORAÇÃO DE MAPA DE ATRATIVIDADE.....</b>	<b>19</b>
<b>7) RESULTADOS OBTIDOS.....</b>	<b>20</b>
<b>8) CONCLUSÕES .....</b>	<b>24</b>
<b>9) BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>25</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	3
FIGURA 2 - LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES .....	7
FIGURA 3 - MAPA DE VELOCIDADE .....	10
FIGURA 4 - COMPOSIÇÃO 543 - SENSOR MODIS .....	11
FIGURA 5 - IMAGEM MODIS CLASSIFICADA .....	13
FIGURA 6 - ESTAÇÃO CAETITÉ.....	15
FIGURA 7 - ESTAÇÃO ITIRUÇU .....	15
FIGURA 8 - ESTAÇÃO LENÇÓIS .....	15
FIGURA 9 - ESTAÇÃO BARREIRAS .....	15
FIGURA 10 - ESTAÇÃO ARAÇUAÍ .....	15
FIGURA 11 - ESTAÇÃO ITABERABA .....	15
FIGURA 12 - ESTAÇÃO ITAMARANDIBA .....	16
FIGURA 13 - ESTAÇÃO ESPINOSA.....	16
FIGURA 14 - ESTAÇÃO JANAÚBA .....	16
FIGURA 15 - ESTAÇÃO ITAMBACURI.....	16
FIGURA 16 - ESTAÇÃO MONTES CLAROS.....	16
FIGURA 17 - ESTAÇÃO MINAS NOVAS .....	16
FIGURA 18 - ESTAÇÃO PIRAPORA .....	17
FIGURA 19 - ESTAÇÃO PEDRA AZUL.....	17
FIGURA 20 - ESTAÇÃO TEÓFILO OTONI .....	17
FIGURA 21 - ESTAÇÃO SÃO FRANCISCO .....	17
FIGURA 22 - ESTAÇÃO SALINAS .....	17

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CLASSIFICAÇÃO DA RUGOSIDADE DO SOLO – SILVA E WIND ENERGY ASSOCIATION .....	6
TABELA 2 - ESTAÇÕES DE REFERÊNCIA.....	8
TABELA 3 - REGISTROS DE VELOCIDADES DO VENTO.....	9
TABELA 4 - TEMAS E VALORES DE RUGOSIDADE ATRIBUÍDOS.....	12
TABELA 5 - EXTRAPOLAÇÃO DE VELOCIDADES PARA 60 METROS.....	19
TABELA 6 - GRAUS DE ATRATIVIDADE.....	20



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Eletrobrás – Centrais Elétricas Brasileiras

PUC – Pontífice Universidade Católica

Cemig – Companhia Energética de Minas Gerais

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito

CEPEL- Centro de Pesquisa de Energia Elétrica

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

Mesomap – Sistema integrado de modelagem de dados meteorológicos

CPTEC – Centro de Previsão e Estudos Climáticos

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

UTC - Coordinated Universal Time

Inmet – Instituto Nacional de Meteorologia

MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

NASA - National Aeronautics and Space Administration

EOS AM-1 – Nome técnico atribuído ao satélite Terra

RGB - Red / Green / Blue

## 1) INTRODUÇÃO

Com uma matriz energética predominantemente hidráulica, o setor energético brasileiro passou a se interessar por fontes de energia alternativa. Essa tendência se deve principalmente às dificuldades de se viabilizar a implantação de projetos de geração hidroelétrica em decorrência do grande número de condicionantes ambientais imputadas pelos órgãos responsáveis pela emissão de licenças de instalação e operação.

Considerada do ponto de vista ambiental uma energia limpa, a matriz eólica está sendo objeto de inúmeros estudos no Brasil, e os resultados tem sido bastante satisfatórios, com o potencial projetado colocando essa matriz como grande saída para crise energética já anunciada pelos especialistas.

Apesar de energia dos ventos ser utilizada há alguns séculos para o acionamento dos moinhos de moagem de grãos e bombeamento de água em atividades agrícolas, o grande desenvolvimento da aplicação da energia eólica para geração de energia elétrica iniciou na Dinamarca, em 1980, quando as primeiras turbinas foram produzidas por pequenas companhias fabricantes de equipamentos agrícolas. Estas turbinas possuíam capacidade de geração bastante reduzida quando comparadas com os grandes empreendimentos de geração atuais. Políticas governamentais de incentivo favoreceram o crescimento do setor, de maneira que, atualmente, a Dinamarca é o país que apresenta a maior contribuição no que tange a energia eólica em sua matriz energética e é o maior fabricante mundial de turbinas eólicas (Herbert *et al.*, 2007). No Brasil, devido ao grande potencial hidráulico, a energia eólica só começou a ser estudada para fins comerciais a partir de 1984 quando a Eletrobrás firmou convênio com a Fundação Padre Leonel França, ligada a PUC-RJ, com o objetivo de elaborar o Atlas do Potencial Eólico Nacional. Esse foi o primeiro esforço para se determinar a viabilidade da utilização da energia eólica no país. Os dados foram apresentados em isolinhas de velocidade média, velocidade máxima, probabilidade de calmaria e densidade de potência de cada uma das regiões e a síntese para todo o Brasil (Eletrobrás, 1988).

O empreendimento que representou um marco para o desenvolvimento da tecnologia eólica brasileira foi a implantação, em 1994, pela Cemig – Companhia Energética de Minas Gerais da Usina Experimental Eólica Morro do Camelinho, com apoio do governo alemão através do Projeto Eldorado e com subsídios da empresa alemã Tacke Windtechnik, responsável pelo fornecimento dos aerogeradores. Localizada às margens da Estrada Real no município de Gouveia, esta foi a primeira central eólica implantada na América Latina (Revista Vértice, 2010).

Em 1995, importante passo foi dado com a criação do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB), com suporte de recursos humanos e laboratoriais do Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL) e financeiros da Eletrobras e suas subsidiárias.

Em 2001 foi lançado o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, um estudo macro do território nacional. Desenvolvido pela empresa paranaense Camargo Schubert e TrueWind Solutions, teve como principal objetivo direcionar o planejamento das ações para o aproveitamento desse potencial. Depois disso, alguns estados, através de suas concessionárias de energia elétrica, elaboraram seus próprios atlas, entre eles o estado de Minas Gerais que publicou o seu no princípio do ano 2010.

Atualmente, a contribuição da geração eólica para a matriz energética brasileira é de 0,67%, totalizando 793,3MW, distribuídos em 45 usinas em operação, sendo o estado do Ceará o maior produtor com 477MW de capacidade instalada em 16 parques eólicos implantados, representando 60% da produção nacional (ANEEL, 2010).

O potencial eólico disponível e utilizável de uma região é dado pela transformação da energia cinética dos ventos em energia mecânica pelo giro das pás do rotor e, consecutivamente, em energia elétrica pelo acionamento do gerador de energia. É determinado pelo estudo do comportamento dos ventos, principalmente pelas variáveis velocidade e frequência.

Existem várias metodologias para realizar a avaliação de um potencial eólico. Elas variam desde a utilização de complexos sistemas integrados de simulação de dados atmosféricos e geográficos como velocidade e direção dos ventos, temperatura, pressão atmosférica, umidade relativa, fluxo de calor, relevo e rugosidade do solo, entre outros. O chamado MesoMap é um exemplo, nele são consideradas essas importantes variáveis para modelagem de fenômenos meteorológicos, não consideradas em modelos mais simplificado, que utilizam apenas a velocidade e frequência dos ventos e rugosidade do solo.

Para o presente estudo, pretende-se utilizar ferramentas simples de geoprocessamento para realizar a pré-avaliação do potencial eólico, através da análise espacial de duas variáveis: velocidade dos ventos e rugosidade do solo.

## 2) OBJETIVOS

### 2.1) Objetivo geral

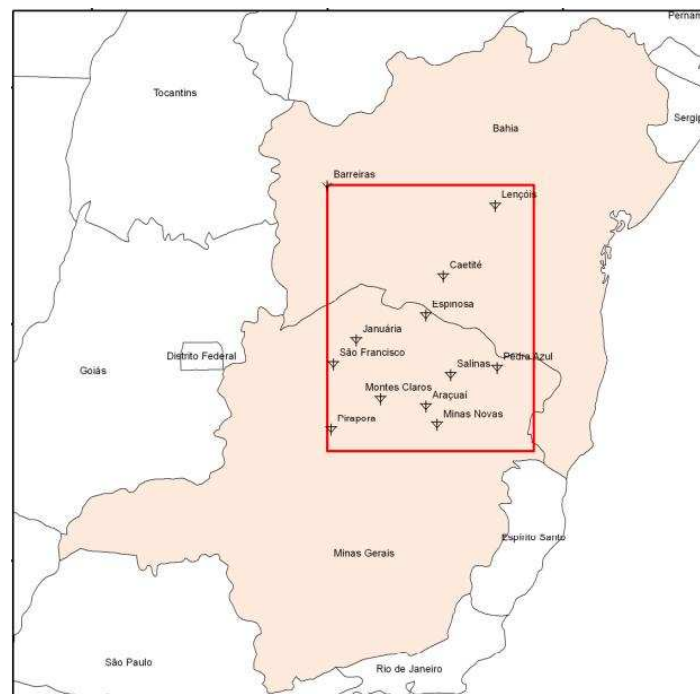
Propor metodologia para avaliação da atratividade para auxiliar na decisão da realização de estudos específicos para determinação efetiva de potencial eólico.

### 2.2) Objetivo específico

Realizar avaliação da atratividade do potencial eólico existente para a implantação de centrais de geração de energia elétrica, de parte da região Norte do estado de Minas Gerais e Sul da Bahia com identificação das áreas de baixo, médio e alto potencial.

## 3) CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS

A área de estudos compreende um polígono que abrange parte do norte do Estado de Minas Gerais e do sul da Bahia, delimitado pelas latitudes (S) 12°20' e 17°48' e longitudes (W) 40°26' e 45°00', perfazendo uma superfície de 302.718km<sup>2</sup> e perímetro de 2.219km.



**Figura 1 - Mapa de Localização da Área de Estudo**

#### 4) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A energia eólica é um tema ainda pouco estudado no Brasil, não existindo literatura consagrada sobre o assunto, somente abordagens superficiais baseadas quase sempre em experiências internacionais.

O trabalho mais consistente já realizado foi para elaboração do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, lançado em 2001, pelas empresas *Camargo Schubert e TrueWind* que consistiu na modelagem dos dados de diversas estações meteorológicas espalhadas pelo território nacional, utilizando-se o sistema MesoMap. Os resultados dessas modelagens foram apresentados em mapas temáticos que representam os regimes médios de vento (velocidades, direções predominantes e parâmetros estatísticos de Weibull) e fluxos de potência eólica numa altura de 50 metros, na resolução espacial de 1km x 1km para todo o país.

O engenheiro eletricitista Paulo de Carvalho, professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, sintetizou seu conhecimento sobre essa matriz energética no livro *Geração Eólica* publicado em 2003 pela Editora Imprensa Universitária. Essa obra é uma das poucas publicações encontradas em português sobre o assunto. Seu trabalho apresenta um panorama geral, incluindo a caracterização das velocidades dos ventos, implantação das instalações, legislação do setor, aspectos econômicos e as tendências para o futuro.

Outra grande contribuição para o setor é da meteorologista Dra. Chou Sin Chan, pesquisadora da Divisão de Modelagem e Desenvolvimento do Centro de Previsão e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC / INPE) em Cachoeira Paulista – SP. Ela teve participação importante nas pesquisas de desenvolvimento de um modelo de extrapolação numérica das velocidades dos ventos superficiais para camadas superiores.

O Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB) tem publicada uma Coletânea de Artigos – Energia Solar e Eólica (Volume 1 e 2 - 2003). São artigos de autores diversos, podendo-se destacar os seguintes trabalhos: “Otimização dos Parâmetros da Distribuição de Weibull” de Patrícia de Castro, Vanessa Gonçalves Guedes, Maria Regina Pereira de Araújo e Miguel Hiroo Hirata; “Energia Eólica no Brasil” de Alexandre Filgueiras e Thelma Maria V. e Silva; “Caracterização do Potencial Eólico do Estado de São Paulo” de Adriana Rocha e Luiz Antonio Rossi.

Foram encontrados inúmeros trabalhos acadêmicos abordando o assunto de forma superficial, mas que foram úteis para ajudar no embasamento teórico desse trabalho.

## 5) FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Para alcançar um resultado consistente e que caracterize a realidade do potencial eólico da área estudada, é preponderante ter um banco de dados amostral representativo, validado por histórico de pelo menos dois anos de observações. Essas observações devem estar bem distribuídas ao longo do dia, com registros realizados, preferencialmente, a cada 10 minutos. Isso garante que a variação das velocidades médias dos ventos ocorridas ao longo do dia seja bem caracterizada, proporcionando um melhor ajuste para a curva da distribuição de frequência e velocidade do vento (gráfico de permanência).

A conversão e aproveitamento da energia não é realizada uniformemente ao longo de toda faixa de velocidade do vento. Ventos de baixa velocidade não transportam energia suficiente para acionar o sistema, a velocidade a partir da qual o sistema inicia sua operação é denominada de velocidade de entrada. Com o crescimento da velocidade, a energia gerada aumenta gradativamente até atingir a potência nominal do sistema. A partir da velocidade nominal, a geração permanece constante até a velocidade de corte, na qual o sistema de geração deve sair de operação para evitar danos estruturais. Por esse motivo, é importante realizar uma análise estatística dos registros das velocidades dos ventos para determinação dos fatores que proporcionam o melhor desempenho possível do sistema. Para o cálculo dessas grandezas estatísticas utiliza-se a distribuição de Weibull, pela qual é possível traçar os gráficos de frequência de velocidades acumuladas e de duração e assim determinar a energia associada.

Os instrumentos destinados à medição das velocidades dos ventos são chamados de anemômetros, normalmente instalados a dez metros da superfície. Nessa altura a velocidade do vento é abrandada pela fricção com a superfície terrestre. Esse efeito ocorre devido a influência da rugosidade da superfície que é inversamente proporcional a altura de medição, assim quanto maior for a altura considerada, maior é a velocidade devido a menor interferência da superfície. Os ventos de interesse para o aproveitamento em geração eólica são os que ocorrem em baixa altura, cerca de 50 a 80 metros acima do nível do solo. A restrição ao aproveitamento de ventos em alturas maiores, se deve ao custo e complexidade das estruturas necessárias para sustentação dos aerogeradores.

Existem algumas equações empíricas que buscam estabelecer a velocidade dos ventos a uma certa altura a partir do conhecimento da velocidade dos mesmos numa altura de referência. O parâmetro principal de entrada para essa extrapolação é o fator de rugosidade do solo.

A aplicação dessas equações para várias alturas permite traçar uma curva chamada Log Wind Profile (*Chou Sin Chan – 2010*).

Segundo a Wind Energy Association (2010), o comprimento da rugosidade varia de acordo com o tipo de cobertura existente no solo, variando de zero na superfície da água até 1,6 metros em metrópoles com altos edifícios e arranha-céus.

A classificação de rugosidade normalmente utilizada está apresentada na tabela abaixo.

**Tabela 1 - Classificação da Rugosidade do Solo – Silva e Wind Energy Association**

Classe de Rugosidade	Coefficiente “n”*	Comprimento de Rugosidade (m) – “zo”**	Tipo de Cobertura
Baixa	0,143	0,0001 a 0,03	Superfície da água, áreas agrícolas, pastagens, solos expostos
Média	0,091	0,031 a 0,8	Matas e pequenas cidades
Alta	0,067	0,81 a 1,6	Cidades com altos edifícios

\*Classificação proposta por *Silva*

\*\*Classificação proposta pela *Wind Energy Association*

Para determinação prática da rugosidade, devem ser utilizados dois anemômetros em um mesmo mastro, situados a diferentes alturas. Com a variação das velocidades obtidas nas respectivas alturas é deduzida a influência da rugosidade do solo na velocidade do vento no local de medição.

Com relação à topografia do terreno, os esquemas para a avaliação de velocidades são poucos precisos. Normalmente, em pequenas elevações a velocidade do vento é maior no topo e a sotavento (lado oposto àquele de onde sopra o vento). Já no caso de superfícies mais elevadas e escarpadas, o comportamento é imprevisível, podendo ocorrer inversão em algumas partes do terreno.

## 6) MATERIAIS E MÉTODOS

### 6.1) Dados de velocidade dos ventos

Para elaboração desse estudo, utilizou-se as séries históricas de dados de medições anemométricas provenientes de estações meteorológicas espalhadas pela região de interesse de estudos. Esses dados foram compilados da publicação *Normais Climatológicas do Brasil (2009)* e são registros de observações realizadas, diariamente, às 12, 18 e 24 UTC<sup>3</sup>, na Rede de observações de Superfície do Immet – Instituto Nacional de Meteorologia, no período e 1961 a 1990. Os valores publicados não representam as leituras diárias registradas, mas a média mensal e anual durante o período estabelecido. Nestas estações, os anemômetros estão instalados a uma altura padrão de 10 metros da superfície.

As estações estão identificadas por um código próprio, nomeadas de acordo com o município onde estão instaladas e com indicação de sua posição geográfica. Essas informações facilitaram a localização das bases existentes na área selecionada para o estudo. Foram identificadas 17 estações, sendo 5 no estado da Bahia e 12 em Minas Gerais.

As estações estão georreferenciadas por coordenadas geográficas e bem distribuídas geometricamente pela área de estudo ou na sua adjacência.



Figura 2 - Localização das Estações



**Tabela 2 - Estações de referência**

Estações Inmet Utilizadas				
Cod	Nome	UF	Latitude (S)	Longitude (W)
83295	Itiruçu	BA	13°21'	40°07'
83339	Caetité	BA	14°04'	42°29'
83236	Barreiras	BA	12°09'	45°00'
83242	Lençóis	BA	12°34'	41°23'
83244	Itaberaba	BA	12°31'	40°17'
83442	Araçuaí	MG	16°50'	42°03'
83338	Espinosa	MG	14°55'	42°51'
83488	Itamarandiba	MG	17°51'	42°51'
83490	Itambacuri	MG	18°01'	41°01'
83386	Januária	MG	15°27'	44°22'
83440	Minas Novas	MG	17°14'	42°35'
83437	Montes Claros	MG	16°41'	43°50'
83393	Pedra Azul	MG	16°00'	41°17'
83483	Pirapora	MG	17°21'	44°55'
83441	Salinas	MG	16°10'	42°18'
83385	São Francisco	MG	15°57'	44°52'
83492	Teófilo Otoni	MG	17°51'	41°30'

## **6.2) Elaboração de mapa de velocidades**

Conhecendo-se a posição geográfica de cada estação e os registros das respectivas velocidades, pôde-se construir o mapa com a modelagem das velocidades.

Para a distribuição das velocidades por área de ocorrência, aplicou-se os conceitos de Delaunay, que realiza por meio de uma malha de triangulação a interpolação dos dados. Na técnica utilizada, cada vértice dos triângulos da malha de triangulação corresponde a uma das dezessete estações de medição. Qualquer ponto inscrito em cada um desses triângulos tem sua velocidade determinada pela interpolação dos valores atribuídos a cada um dos três vértices, onde os pontos localizados mais próximos de um determinado vértice tendem a assumir a velocidade semelhante a ele atribuída e a dos pontos mais afastados a do vértice vizinho. A principal propriedade desse método, é que dentro do perímetro formado pelos três vértices do triângulo não exista nenhum outro ponto que componha o conjunto de referência (estações).

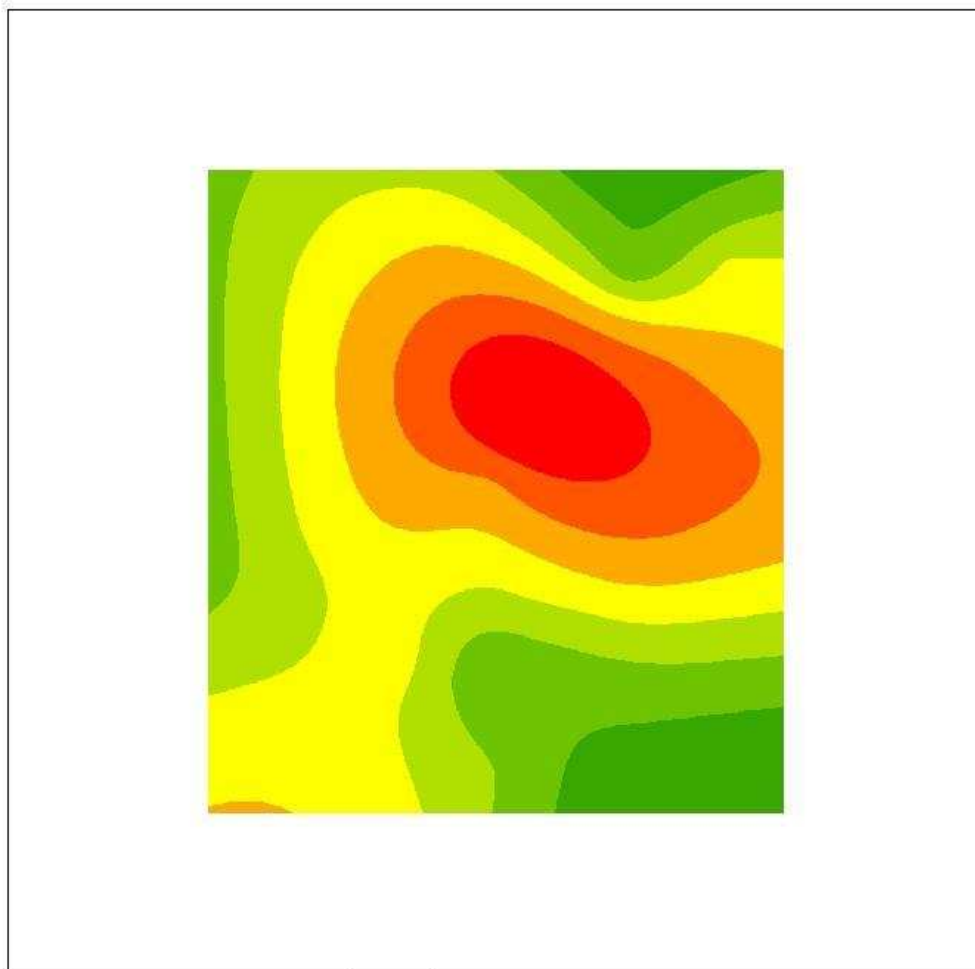
Foram consideradas as velocidades medidas a dez metros de altura, sendo realizadas três interpolações: a primeira com a média anual, a segunda e terceira

considerando os maiores e menores registros (médias mensais). A interpolação foi realizada no software Arqview.

**Tabela 3 - Registros de Velocidades do Vento**

Estação	Registros de velocidades a 10 metros (m/s)		
	Médias Anuais	Maiores Registros Médias Mensais	Menores Registros Médias Mensais
Itiruçu	2,33	2,50	2,14
Caetité	4,09	5,02	3,14
Barreiras	1,73	2,06	1,45
Lençóis	1,10	1,29	0,97
Itaberaba	1,95	2,55	1,63
Araçuaí	1,10	1,23	1,00
Espinosa	2,54	3,58	1,95
Itamarandiba	1,53	1,73	1,42
Itambacuri	0,54	0,89	0,31
Januária	2,11	2,59	1,89
Minas Novas	1,17	1,60	0,91
Montes Claros	2,06	2,73	1,74
Pedra Azul	2,15	2,51	1,89
Pirapora	2,07	2,64	1,76
Salinas	1,77	2,23	1,51
São Francisco	1,69	1,99	1,50
Teófilo Otoni	0,74	0,88	0,62

O resultado foi uma imagem digital onde os valores dos pixels correspondem as velocidades determinadas pela interpolação de Delaunay.



**Legenda**

**Velocidade Média a 10 metros**



Médias Anuais (m/s)

**Figura 3 - Mapa de velocidade**

### 6.3) Elaboração de mapa de Rugosidade do Solo

O mapa de rugosidade da área de estudo foi elaborado através da classificação supervisionada de duas imagens georreferenciadas do sensor MODIS tomadas em 28/09/2010.

O sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) é o principal instrumento a bordo do satélite Terra (EOS AM-1), um dos sistemas de observação da terra da NASA. O MODIS realiza observações de toda a superfície terrestre a cada 1 ou 2 dias, e adquire dados em 36 bandas espectrais que se situam entre 0.62 e 14.38  $\mu\text{m}$  e se distribuem em três diferentes faixas de resolução espacial (Jensen et al - 2009).

Imagens Modis utilizadas:

Imagem 1: MOD09A1.A2010273.h13v10.005.2010284060928

Imagem 2: MOD09A1.A2010273.h14v10.005.2010284031650

As bandas são disponibilizadas no formato .hdf e podem ser baixadas do site [lpdaac@usgs.gov](mailto:lpdaac@usgs.gov). Para esse estudo, foram utilizadas as bandas 3, 4 e 5. O contraste e o mosaico foram realizados no software Envi e depois as imagens foram convertidas para a extensão geotif, um dos formatos compatíveis com software Arcview.

Optou-se por uma composição RGB 543, prevalecendo a resolução original de 500 metros.



**Figura 4 - Composição 543 - Sensor MODIS**

Para facilitar o reconhecimento de padrões e objetos homogêneos, preliminarmente, utilizou-se imagens do Google Earth, onde foram identificados os principais elementos de cobertura do solo (cultura / pastagens, água, mancha urbana, solo exposto e mata). Em seguida, o mesmo ponto foi localizado na imagem MODIS, onde as amostras representativas dos temas já com o comprimento de rugosidade atribuído, conforme tabela 4, foram coletadas e processadas. A classificação foi realizada no software Arqview, pelo método supervisionado e o algoritmo máxima verossimilhança, conhecido como Maxver.

**Tabela 4 - Temas e valores de rugosidade atribuídos**

<b>Tema Classificado</b>	<b>Comprimento de Rugosidade Atribuído (m)</b>
Solo exposto	0,02
Mata	0,5
Mancha urbana	0,8
Cultura / pastagens	0,03
Água	0,0001

O resultado da classificação foi uma imagem digital, onde cada pixel representa o comprimento da rugosidade para. Para que a classificação por máxima verossimilhança fosse precisa, foram utilizadas 72 amostras, isso proporcionou temas com padrões bem definidos e homogêneos.

Após a classificação supervisionada, a imagem foi reclassificada de acordo com o comprimento da rugosidade proposta pela Wind Energy Association (Tabela 1). Não foram identificadas áreas classificadas com rugosidade alta (0,81 a 1,6 metros), conforme pode ser visualizado no mapa de rugosidade produzido.



**Figura 5 - Imagem Modis Classificada**

#### **6.4) Parâmetros de extrapolação de velocidade**

Considerando que as medições foram realizadas na altura de 10 metros e que para o aproveitamento eólico a captação deve ser acima de 50 metros de altura, foi necessária a definição de uma metodologia de cálculo de extrapolação da velocidade para 60 metros.

Para essa extrapolação foram testadas duas equações distintas com o intuito de comparar os resultados obtidos e escolher a que represente com maior precisão a velocidade na altura a ser considerada.

$$\text{Equação 1} \quad V_z = V_r \left( \frac{z}{z_r} \right)^n \quad (\text{Silva} - 1992)$$

Onde:

$V_z$  = velocidade para a altura  $Z$

$Z$  = altura a ser extrapolada

$V_r$  = velocidade medida

$Z_r$  = altura onde a velocidade foi medida

$n$  = coeficiente de rugosidade do solo

$$\text{Equação 2} \quad V_z = V_r \frac{\left( \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \right)}{\left( \ln \left( \frac{z_r}{z_0} \right) \right)} \quad (\text{Wind Energy Association} - 2010)$$

Onde:

$V_z$  = velocidade para a altura  $Z$

$Z$  = altura a ser extrapolada

$Z_0$  = comprimento da rugosidade do solo

$V_r$  = velocidade medida

$Z_r$  = altura onde a velocidade foi medida

Aplicou-se essas equações de extrapolação para as 17 estações, sendo necessário para desenvolvimento dos cálculos a definição do parâmetro de rugosidade do solo. A identificação do tipo de cobertura existente no entorno de cada estação foi realizada através da avaliação visual de imagens Google Earth e a relação entre o tipo, a classe e comprimento da rugosidade, conforme a tabela 1.

Nessa avaliação, não foi adotado nenhum raio de influência da possível interferência da cobertura de solo existente na velocidade do vento a partir da estação considerada, isto por que a finalidade dessa determinação é apenas auxiliar na escolha da equação que melhor se aplica ao objetivo proposto neste trabalho e não será utilizada como parâmetro de entrada nas definições do grau de atratividade para o estudo do potencial eólico da área.



Figura 6 - Estação Caetité

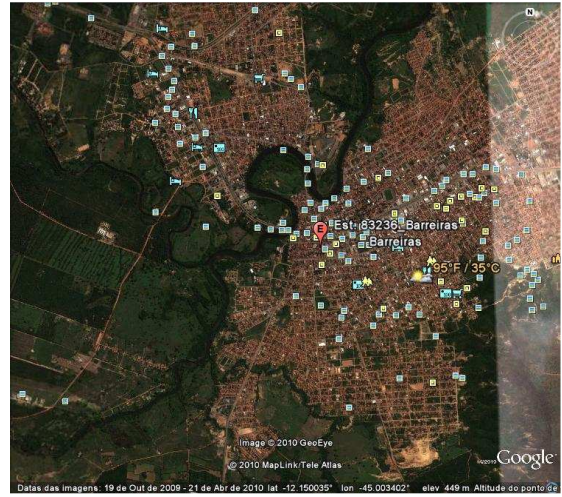


Figura 9 - Estação Barreiras

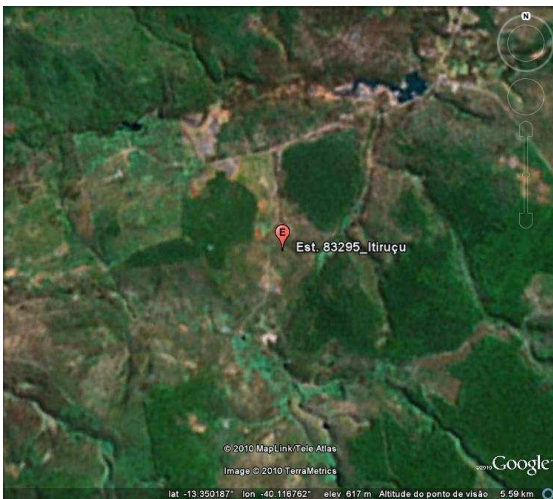


Figura 7 - Estação Itiruçu



Figura 10 - Estação Araçuaí

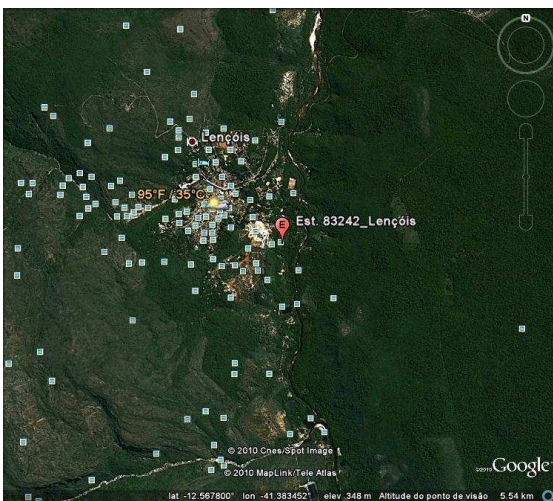


Figura 8 - Estação Lençóis

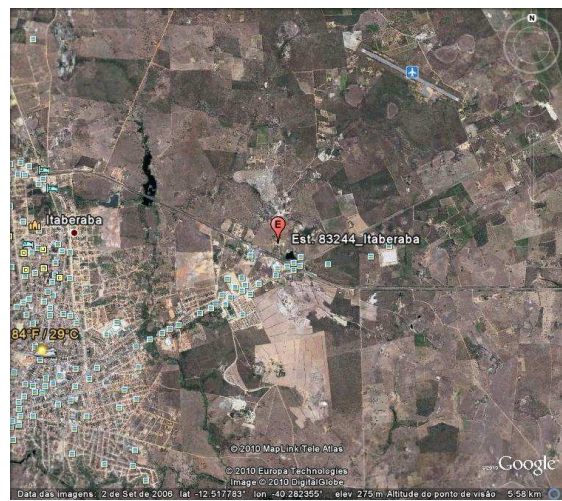


Figura 11 - Estação Itaberaba





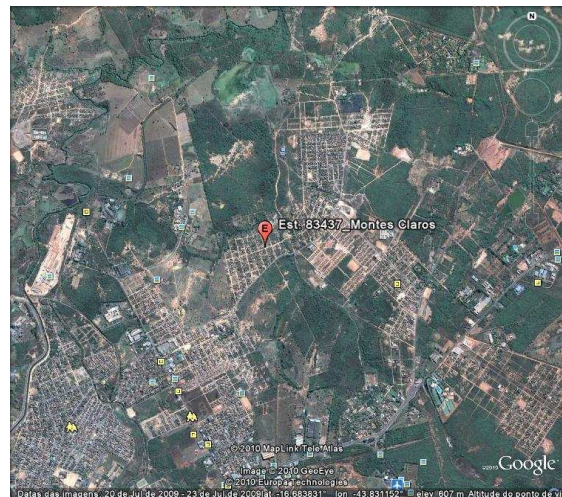
**Figura 12 - Estação Itamarandiba**



**Figura 15 - Estação Itambacuri**



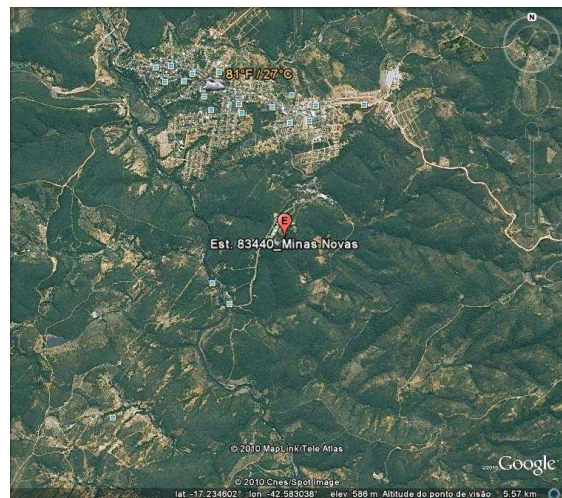
**Figura 13 - Estação Espinosa**



**Figura 16 - Estação Montes Claros**



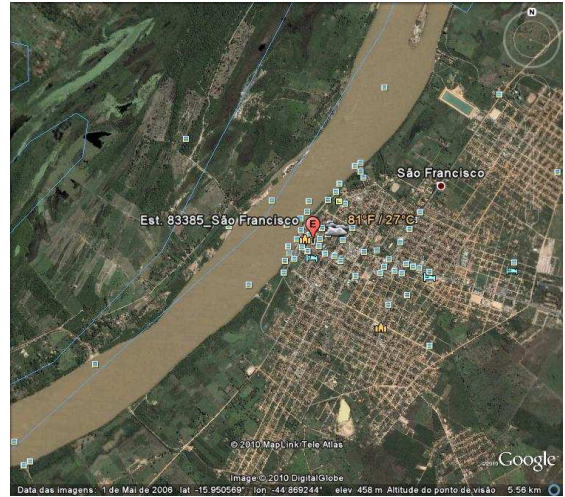
**Figura 14 - Estação Janaúba**



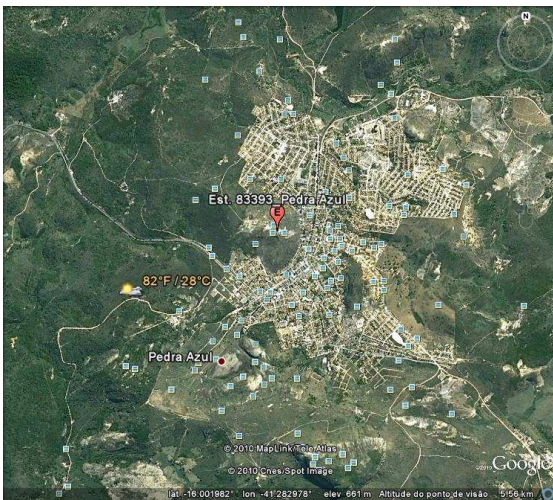
**Figura 17 - Estação Minas Novas**



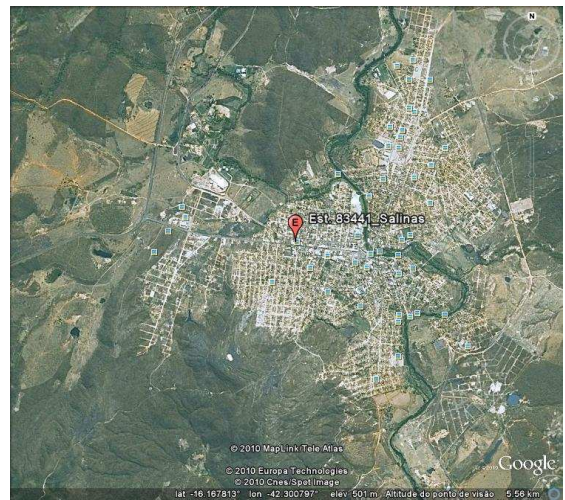
**Figura 18 - Estação Pirapora**



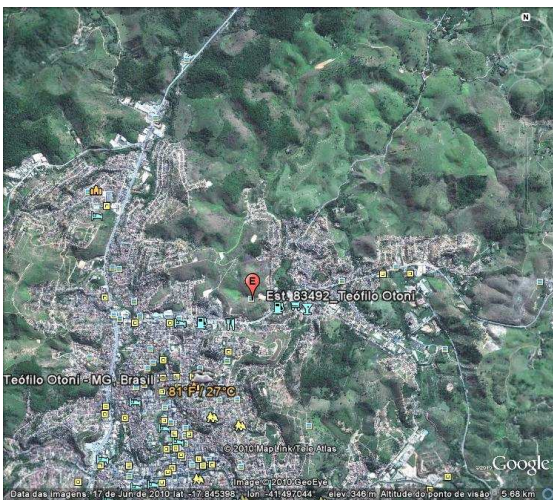
**Figura 21 - Estação São Francisco**



**Figura 19 - Estação Pedra Azul**



**Figura 22 - Estação Salinas**

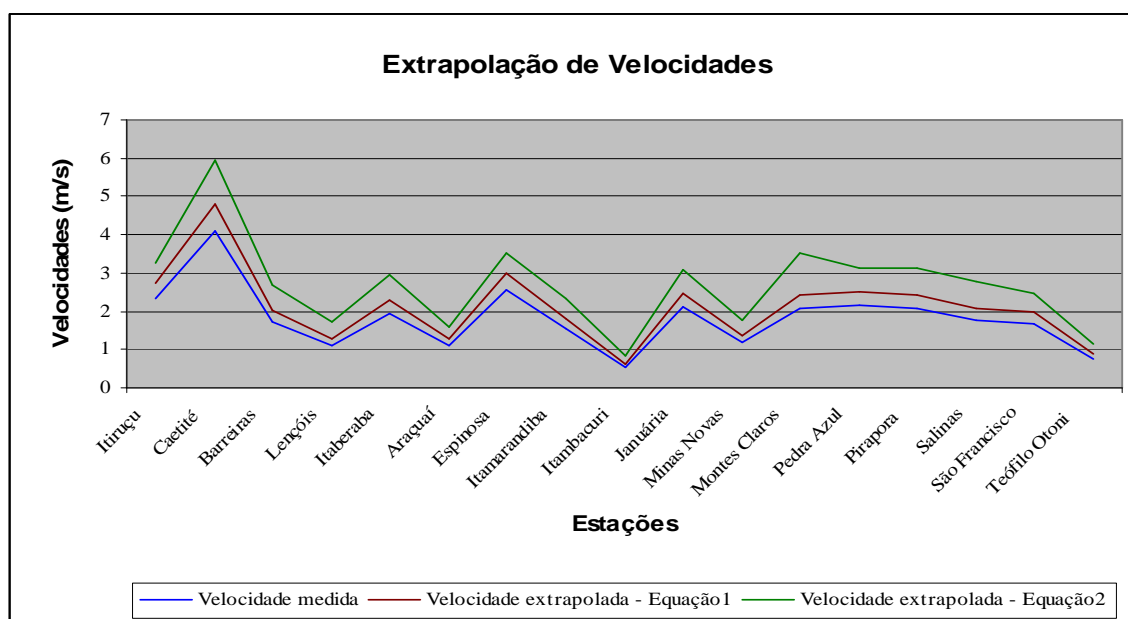


**Figura 20 - Estação Teófilo Otoni**

Pelas características dos elementos de cobertura existentes no entorno das estações identificadas nas imagens, em que predomina a mancha urbana, adotou-se o índice de rugosidade médio ( $n=0,091$ ) a ser aplicado na equação 1 e o comprimento de rugosidade variando de 0,1 a 0,8 metros a ser aplicado na equação 2.

Conforme pode ser observado no gráfico comparativo apresentado a seguir (figura), os valores encontrados para a extrapolação das velocidades para 60 metros pelas duas equações, considerando-se a média anual, apresentaram uma forte correlação. Os valores obtidos na equação da *Wind Energy Association*, foram ligeiramente superiores aos obtidos no cálculo pela equação proposta por *Silva*. Essa variação pode ser explicada pela amplitude das faixas de classificação da rugosidade consideradas, enquanto *Silva* utiliza apenas três classes para o coeficiente ( $n$ ), a *Wind Energy Association* propõe uma classificação mais criteriosa e com maior amplitude para o comprimento da rugosidade ( $z_0$ ).

Pelos motivos expostos, foi adotado nesse estudo a extrapolação obtida pela equação 2 (*Wind Energy Association*) e os resultados estão expressos na tabela abaixo.



**Tabela 5 - Extrapolação de velocidades para 60 metros**

Estação	Coeficiente de Rugosidade (n)	Comprimento de Rugosidade (zo)	Velocidades (m/s)						
			Média Anual	Extrapolação da Média Anual (n)	Extrapolação da Média Anual (zo)	Maior Registro	Extrapolação do Maior Registro (zo)	Menor Registro	Extrapolação do Menor Registro (zo)
Itiruçu	0,091	0,1	2,33	2,74	3,24	2,50	3,47	2,14	2,97
Caetité	0,091	0,2	4,09	4,81	5,96	5,02	7,32	3,14	4,58
Barreiras	0,091	0,4	1,73	2,04	2,69	2,06	3,21	1,45	2,26
Lençóis	0,091	0,4	1,10	1,29	1,71	1,29	2,01	0,97	1,51
Itaberaba	0,091	0,3	1,95	2,30	2,95	2,55	3,85	1,63	2,46
Araçuaí	0,091	0,2	1,10	1,29	1,60	1,23	1,79	1,00	1,46
Espinosa	0,091	0,1	2,54	2,99	3,53	3,58	4,97	1,95	2,71
Itamarandiba	0,091	0,3	1,53	1,80	2,31	1,73	2,61	1,42	2,15
Itambacuri	0,091	0,3	0,54	0,64	0,82	0,89	1,34	0,31	0,47
Januária	0,091	0,2	2,11	2,48	3,08	2,59	3,78	1,89	2,76
Minas Novas	0,091	0,3	1,17	1,38	1,77	1,60	2,42	0,91	1,37
Montes Claros	0,091	0,8	2,06	2,42	3,52	2,73	4,67	1,74	2,97
Pedra Azul	0,091	0,2	2,15	2,53	3,13	2,51	3,66	1,89	2,76
Pirapora	0,091	0,3	2,07	2,44	3,13	2,64	3,99	1,76	2,66
Salinas	0,091	0,4	1,77	2,08	2,76	2,23	3,47	1,51	2,35
São Francisco	0,091	0,2	1,69	1,99	2,46	1,99	2,90	1,50	2,19
Teófilo Otoni	0,091	0,4	0,74	0,87	1,15	0,88	1,37	0,62	0,97

### 6.5) Elaboração de mapa de atratividade

Foram construídos três mapas, um representando a atratividade para a média anual das velocidades, o segundo para a média dos maiores registros mensais e o terceiro para a média dos menores registros mensais. Com essa configuração, seria possível estabelecer o cenário para a melhor e a pior situação, o que favorece a tomada de decisão para partir ou não para uma etapa seguinte de estudos.

A construção desses mapas se deu pela aplicação de operações aritméticas nas imagens resultantes da interpolação das velocidades (imagem 1) e da rugosidade (imagem 2). Esse Processo, chamado de álgebra de mapas (ou imagens), combina duas ou mais imagens de acordo com uma equação matemática definida pelo usuário.

A equação utilizada foi previamente definida no item anterior, assim o valor de velocidade atribuído a cada pixel da imagem 1 foi multiplicado pelo comprimento de rugosidade atribuído ao pixel correspondente da imagem 2 conforme demonstrado abaixo:

$$\text{Imagem Resultante} = \text{imagem1} \cdot \frac{\ln\left(\frac{60}{\text{imagem2}}\right)}{\ln\left(\frac{10}{\text{imagem2}}\right)}$$

Após a realização das operações matemáticas, as velocidades resultantes foram reclassificadas em três faixas, de acordo com o grau de atratividade atribuída para cada uma delas, conforme expresso na tabela abaixo.

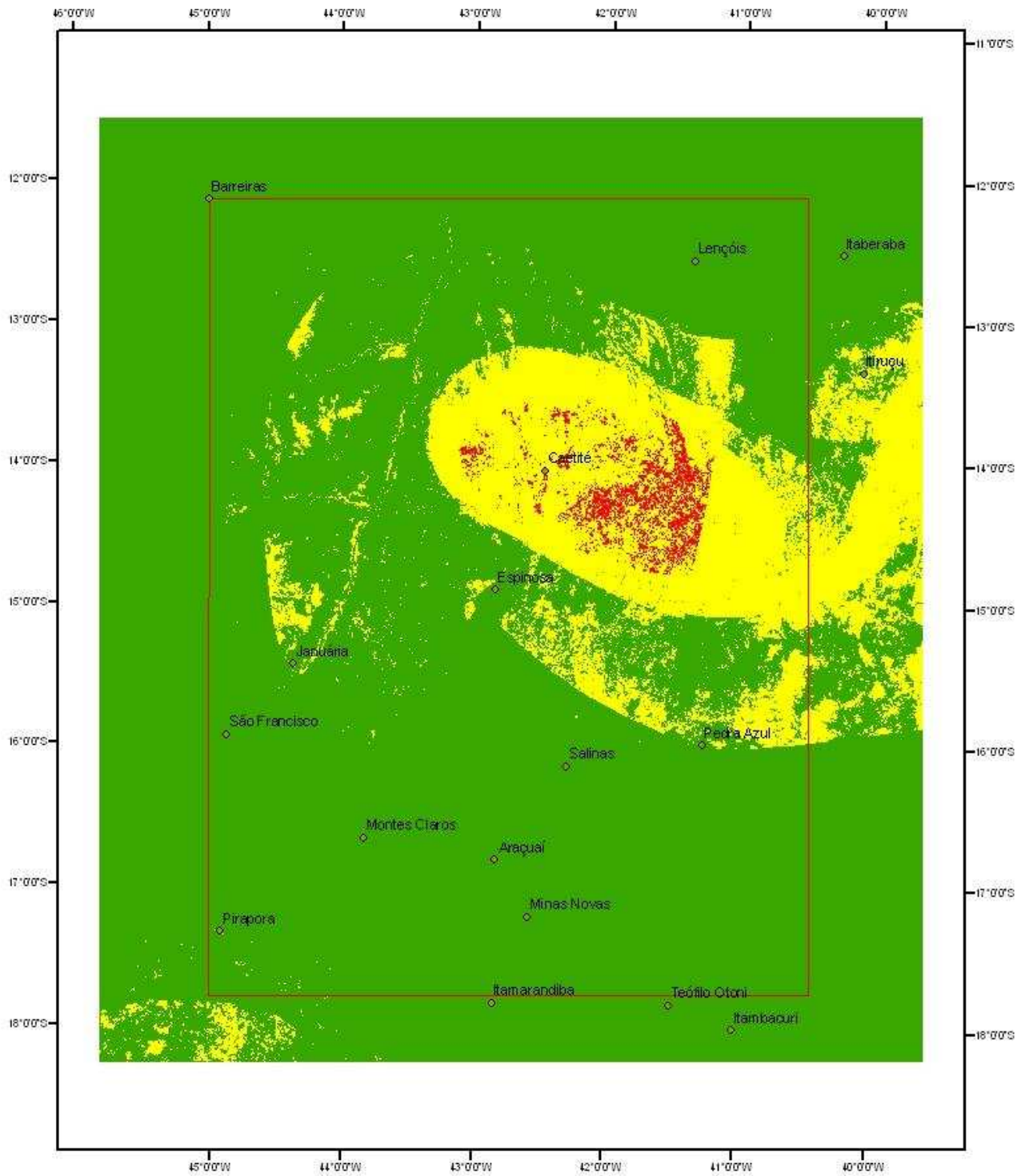
**Tabela 6 - Graus de atratividade**

Faixa de Velocidade (m/s)	Grau de Atratividade
< 3	Baixo
3 a 4,5	Médio
>4,5	Alto

As faixas de atratividade indicadas na tabela 4 são pouco conservadoras, isto por que segundo os especialistas, considera-se como alto potencial para geração eólica, regiões com registros de velocidades superiores a 6m/s. Considerando que com os dados disponibilizados para esse estudo não foi possível construir o gráfico de permanência das velocidades e que a intenção é avaliar a atratividade do potencial para direcionar estudos específicos como a da viabilidade da montagem de torres para realização de novas medições, optou-se pela flexibilização desses valores a fim de diminuir possíveis inconsistências nos dados utilizados devido a pequena frequência de leituras diárias consideradas.

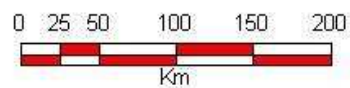
## **7) RESULTADOS OBTIDOS**

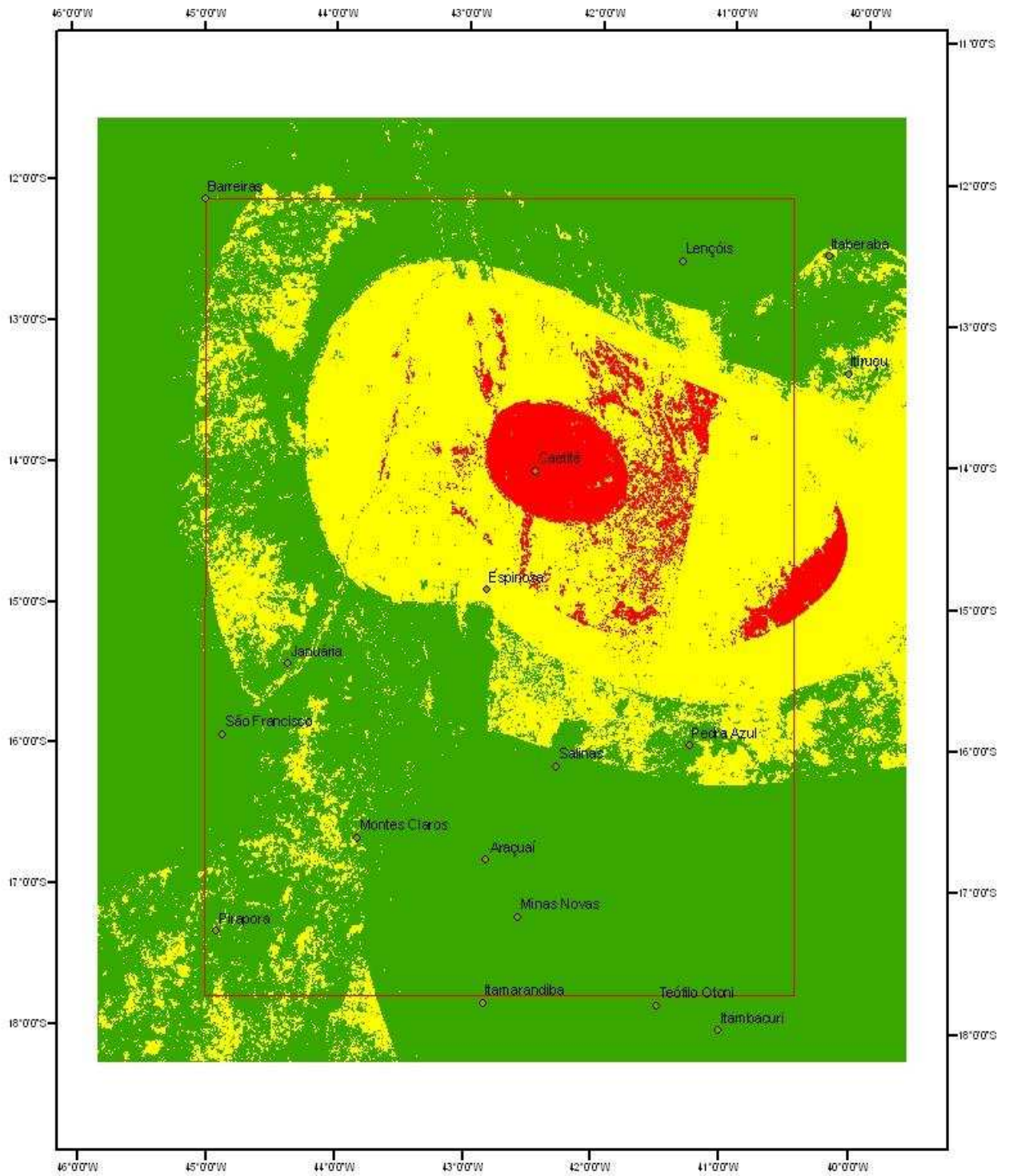
Os três mapas apresentados a seguir, representam o índice de atratividade para realização de estudos específicos para determinação efetiva do potencial eólico da área de estudo, modelados a partir das médias anuais de velocidades e dos registros das maiores e menores velocidades (médias mensais).



**Mapa de Atratividade - Vel. Menores Registros**

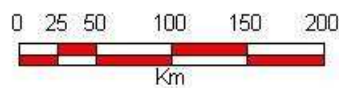
- Atratividade Baixa
- Atratividade Média
- Atratividade Alta

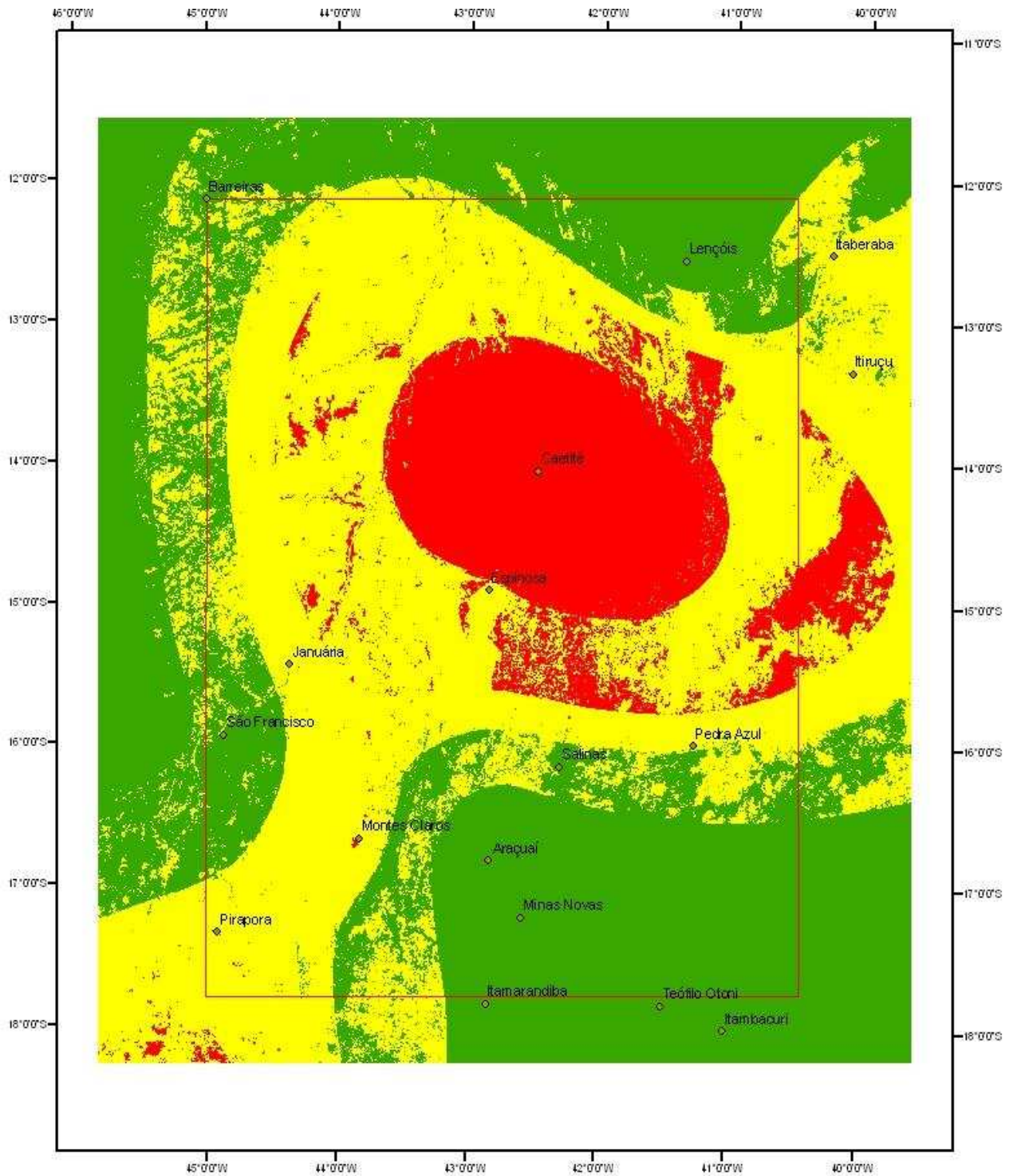




**Mapa de Atratividade - Vel. Média**

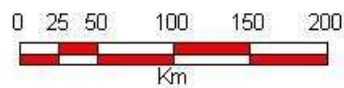
- Atratividade Baixa
- Atratividade Média
- Atratividade Alta





**Mapa de Atratividade - Vel. Maiores Registros**

- Atratividade Baixa
- Atratividade Média
- Atratividade Alta





## 8) CONCLUSÕES

A modelagem dos dados considerando as médias, os maiores e menores registros de velocidade, propiciou uma análise qualitativa da metodologia proposta com a observância da variação das faixas de atratividade resultantes para cada modelo originado.

Concentrando-se a análise no mapa de atratividade de velocidades médias, observa-se um índice de atratividade alto no entorno do município de Caetité (BA), onde se recomendaria a realização de estudos específicos para a determinação efetivo do potencial, com instalações de torres com equipamentos que possibilitem os registros contínuos de velocidade a uma altura de pelo menos 60 metros. Contornando a área de alto potencial, identifica-se a região de média atratividade que vai do município de Itiruçu (BA), na região nordeste da área de estudo e segue na direção sudoeste até a altura de município de Pirapora (MG). Nas regiões noroeste (município de Barreiras – BA) e sudeste (município de Teófilo Otoni – MG), o potencial pode ser considerado de baixa atratividade.

A metodologia utilizada se mostrou eficiente para a determinação da atratividade para orientar a realização de estudos específicos do potencial eólico. Salienta-se no entanto, que outros fatores são importantes para a tomada de decisão sobre a realização desses estudos e não foram abordados nesse trabalho, dentre eles a possibilidades de acesso as áreas identificadas, a existência de áreas tombadas como de interesse ambiental e reservas indígenas, dificuldade de conexão da futura central de geração com o sistema elétrico nacional e a resistência da comunidade local a instalação do empreendimento.

Ressalta-se também a importância da utilização de dados confiáveis e consistentes para o modelo, a fim de evitar uma interpretação equivocada da atratividade da área de estudos. Como já foi abordado nesse trabalho, é importante conhecer o gráfico de permanência, através da análise estatística dos dados de velocidade obtidas a pelo menos a cada dez minutos.

## 9) BIBLIOGRAFIA

Ramos, Andréia M.; Santos, Luiz André R.; Fortes, Lauro T. G. **Normais Climatológicas do Brasil 1961 – 1990**. Brasília: Inmet, 2009

Souza, Hamilton M.; Silva, Patrícia C.; Dutra, Ricardo M. **Coletânea de Artigos – Energia Solar e Eólica – Volume I e II**. Rio de Janeiro: CRESESB / CEPEL, 2006

Carvalho, Paulo; **Geração Eólica**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2003

Revista Vértice; **Bons Ventos Sopram em Gouveia**. Belo Horizonte: CREA-MG Edição nº 4, 2010

Silva, Jorge Xavier da; **Geoprocessamento – Para Análise Ambiental**. Rio de Janeiro: Edição do autor, 2001

Martinelli, Marcelo; **Mapas da Geografia e Cartografia Temática**. São Paulo: Editora Contexto, 2009

**Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Brasília: Camargo Shubert Engenharia Eólica, True Wind Solutions, Cresesb, CEPEL – 2001

Deus, Amaro E. **Estudo da Variabilidade do Regime de Ventos do Litoral Norte do Estado do Rio de Janeiro Para Geração Eólica-Elétrica**. Campos dos Goytacazes: Edição do autor, 2008

Martins, F. R.; Guarnieri, R. A.; Pereira E. B.; **O Aproveitamento da Energia Eólica**. São José dos Campos: Edição dos Autores, 2007

Neves, Eurico G. C.; Damé, Rita C. F.; Teixeira, Cláudia F. A.; **Introdução ao Estudo de Energia Eólica**. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, 2009

**Equação de Extrapolação de Velocidades** - <http://www.wwindea.org> - acesso em 01 de junho de 2010

**Especificações do Sensor MODIS** - [www.engesat.com.br](http://www.engesat.com.br) – acesso em 06 de novembro 2010