

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE  
INSTITUTO DE OCEANOGRAFIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GERENCIAMENTO COSTEIRO

CARLOS VINICIUS DA CRUZ WEISS

**ANÁLISE LOCACIONAL E ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE SUPORTE PARA  
A EXPANSÃO SUSTENTÁVEL DA ENERGIA EÓLICA NA ZONA COSTEIRA DO  
EXTREMO SUL DO BRASIL**

RIO GRANDE  
2014

CARLOS VINICIUS DA CRUZ WEISS

**ANÁLISE LOCACIONAL E ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE SUPORTE PARA  
A EXPANSÃO SUSTENTÁVEL DA ENERGIA EÓLICA NA ZONA COSTEIRA DO  
EXTREMO SUL DO BRASIL**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Gerenciamento Costeiro da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Gerenciamento Costeiro.  
Linha de pesquisa: Planejamento e Gestão Ambiental dos Sistemas Marinhos e Costeiros.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Armanini Tagliani  
Coorientador: Prof. MSc. Jean Marcel de Almeida Espinoza

RIO GRANDE  
2014

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

W429 Weiss, Carlos Vinicius da Cruz

Análise locacional e estimativa da capacidade de suporte para a expansão sustentável da energia eólica na zona costeira do extremo sul do Brasil / Carlos Vinicius da Cruz Weiss. - 2014.

103 p.

Orientador: Paulo Roberto Armanini Tagliani.

Co-orientador: Jean Marcel de Almeida Espinoza

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande, Programa de Pós-Graduação em Gerenciamento Costeiro, Rio Grande, BR – RS, 2014.

1. Zoneamento territorial. 2. Análise multicritério. 3. Energia eólica. 4. Potencial eólico. 5. Litoral sul do Rio Grande do Sul. I. Tagliani, Paulo Roberto Armanini, orient. II. Espinoza, Jean de Almeida, coorient. III. Título

CDU 620.91(816.5)

Catálogo da publicação. Clarice Souza CRB10/923

CARLOS VINICIUS DA CRUZ WEISS

**ANÁLISE LOCACIONAL E ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE SUPORTE PARA  
A EXPANSÃO SUSTENTÁVEL DA ENERGIA EÓLICA NA ZONA COSTEIRA DO  
EXTREMO SUL DO BRASIL**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Gerenciamento Costeiro da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Gerenciamento Costeiro.

COMISSÃO JULGADORA

Prof. Dr. Paulo Roberto Armanini Tagliani  
Universidade Federal do Rio Grande

Prof. Dr. Gilberto Fonseca Barroso  
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Carlos Roney Armanini Tagliani  
Universidade Federal do Rio Grande

Prof. Dr. Marcelo Dutra da Silva  
Universidade Federal do Rio Grande

Aprovada em: 20 de Fevereiro de 2014.

*Dedico este trabalho:  
à toda minha família,  
em especial aos meus pais  
pelo apoio incondicional...*

## AGRADECIMENTOS

Ao sábio professor Jean Espinoza pela paciência, amizade e orientação nesse caminho percorrido; Ao amigo e professor Paulo Roberto Tagliani pela parceria e orientações no decorrer do trabalho; A minha companheira Natália Peppes pelo apoio e ajuda, foram imprescindíveis para a realização da pesquisa; Aos meus amigos e colegas de pós-graduação mais próximos nessa etapa, Abraão, Felipe, Bruna, Lucas.

Aos companheiros e guerreiros moradores e frequentadores das casas divididas no Cassinão, Karine, Jefferson, Vanessa, Darwin e Júlio (Maluco, PWP); Aos professores, grandes inspiradores e amigos do IFRS Tiago Gandra, Miguel Albuquerque, Gobel, João, Maurício e Jefferson; aos colegas e grandes amigos dessa mesma instituição Eduardo, Juan, Raquel, Tamires, Bruna, João Anello e Deivid.

Aos amigos da graduação que mesmo longe contribuíram e mostraram que a distância não influencia na amizade Rafael Cardoso, Renata e Daniel; Ao programa de pós-graduação em Gerenciamento Costeiro (PPGC) e seus respectivos professores e técnicos, grandes amigos que facilitaram e guiaram um processo de amadurecimento acadêmico, instruindo e ajudando em conversas, aulas e apresentações, destacando os que mais convivi Lúcia Anello, Dione, Milton Asmus, Carlos Tagliani, Marcelo Dutra, Charles, Christian e Wagner. E por último e não com menor importância meus pais, aos meus amigos de sempre e à minha família.

*" No soy un número, ni parte de una cifra,  
aunque se paga por igual la misma tarifa.  
Sin prisa, para mirar donde se pisa.  
No vale el tiempo pero valen las memorias,  
no se cuentan los segundos, se cuentan historias.  
La paciencia es lo que se cosecha,  
mi calendario no tiene fecha.  
No estoy solo, ando con mis cinco sentidos,  
acá el silencio se convierte en sonido."*

*Eduardo Cabra / René Pérez*

# **Análise locacional e estimativa da capacidade de suporte para a expansão sustentável da energia eólica na zona costeira do extremo sul do Brasil<sup>1</sup>**

## **RESUMO**

O aproveitamento da energia eólica é considerado como alternativa para melhorar a qualidade ambiental na geração de energia. Porém, a instalação de complexos eólicos podem causar impactos ambientais, tais como: supressão de ambientes, mudança na paisagem e no uso do território, ruídos, interferência eletromagnética e danos à fauna. Alguns destes impactos na implementação e operação de parques eólicos podem ser minimizados e até eliminados, através de um planejamento adequado e utilização de novas tecnologias. O litoral do Rio Grande do Sul está em um cenário atual de expansão eólica, sendo alvo de empreendimentos do setor energético, porém faltam subsídios para gerar um zoneamento ambiental adequado para essa atividade. O objetivo deste trabalho é implementar um modelo de decisão hierárquica sobre uma base de dados georreferenciada para realizar a análise multicriterial de alternativas locacionais para parques eólicos, a fim de estimar a capacidade de suporte e o potencial eólico que pode vir a ser instalado na região. A área de estudo contempla a totalidade dos municípios de Rio Grande, Santa Vitória do Palmar e Chuí. A metodologia baseou-se em critérios restritivos e atrativos de natureza social, ambiental, econômica e legal. Foi empregado na análise locacional o método AHP linear (Analytic Hierarchy Process) que adota a variação linear dos critérios, estipulando seus pesos por meio da comparação pareada entre os critérios em uma tabela de cruzamento. Para estipular a variação dos critérios, de acordo com a variação espacial, foi utilizado o AHP geométrico, no qual é aplicada a curva do decaimento, que propicia uma análise menos subjetiva no modelo. Os resultados da análise geraram mapas de aptidão da área de estudo para a instalação de parques eólicos, considerando as zonas de restrição ambiental, legal e cultural, rotas de aves e algumas restrições condicionais. Esses mapas apontaram as probabilidades de viabilidade da instalação de parques eólicos em cada área, sendo que estes dados servirão como suporte à instalação e avaliação de empreendimentos eólicos, bem como fonte de estimativa do potencial energético eólico e a capacidade de suporte da área. A metodologia proposta tende a acrescentar argumentos e subsídios para posteriores pesquisas e consultorias referentes a esse tema e os modelos visam auxiliar tomadores de decisões na autorização e concessão de licenciamentos.

**Palavras-chave:** Zoneamento territorial. Análise multicriterial. Energia eólica. Potencial eólico. Litoral sul do Rio Grande do Sul.

---

<sup>1</sup> Dissertação de Mestrado em Gerenciamento Costeiro, Instituto de Oceanografia, Curso de Pós-Graduação em Gerenciamento Costeiro da Universidade Federal do Rio Grande. Rio Grande / RS, (103 p.), Fevereiro, 2014.

## **Locational analysis and estimated support capacity for sustainable growth of wind energy in the coastal zone of southernmost Brazil<sup>2</sup>**

### **ABSTRACT**

The use of wind energy is considered as an alternative to improve the environmental quality in power generation. However, the installation of wind complexes may cause environmental impacts, such as: suppression of environments, changing the landscape and uses the territory, noise, electromagnetic interference and damage the fauna. Some of these impacts in the implementation and operation of wind farms can be minimized or even eliminated, through proper planning and use of new technologies. The coast of Rio Grande do Sul is in a current scenario of wind expansion, being the target of ventures in the energy sector, but lacks subsidies to generate adequate environmental zoning for this activity. The objective of this work is to implement a computational model of hierarchical decision about a data basis georeferenced to perform multicriteria analysis of locational alternatives for wind farms in order to estimate the carrying capacity and the wind potential that may be installed in the region. The study area includes the municipalities of Rio Grande, Santa Vitória do Palmar and Chuí. The methodology used was based on stringent criteria and attractive social, environmental, economic and legal nature. Locational analysis was employed in the linear AHP (Analytic Hierarchy Process) which adopts a linear variation of the criteria, stipulating their weights by pairwise comparison between criteria in a cross table. For stipulating the variation of the criteria according to the spatial variation was applied the geometric AHP, which provides a less subjective analysis model. The analysis results generated suitability maps of the study area for the installation of wind farms, considering the zones of environmental and legal restrictions, routes of birds and some conditional constraints. These maps showed the probability of feasibility of the installing wind farms in each area, and these data will serve as support to installation and evaluation of wind farms, as well as a source for estimating the wind energy potential and carrying capacity of the area. The proposed method tends to add arguments and allowances for future researches and consultancy relating to this subject and the models are intended to assist decision makers in the authorization and granting of licenses.

**Keywords:** Territorial zoning. Multicriteria analysis. Wind energy. Wind potential. Southern coast of the state of Rio Grande do Sul.

---

<sup>2</sup> MASTER of Science Thesis, Institute of Oceanography, Graduate Course in Coastal Management, Federal University of Rio Grande. Rio Grande / RS, (103 p.), February, 2014.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVOS.....	17
2.1 Objetivo Geral.....	17
2.2 Objetivos Específicos .....	17
3. JUSTIFICATIVA.....	18
4. REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
4.1 Panorama e perspectivas sobre a energia eólica .....	19
4.2 Oportunidades e desafios para a expansão da energia eólica .....	22
4.3 Impactos ambientais da energia eólica.....	23
4.3.1 Emissão de poluentes .....	23
4.3.2 Uso do solo .....	24
4.3.3 Impacto sobre habitats .....	25
4.3.4 Interferência eletromagnética e ruídos .....	27
4.3.5 Impacto visual .....	28
4.4 Aspectos ambientais da planície costeira do Rio Grande do Sul .....	28
4.5 Análise multicritério.....	31
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	34
5.1 Área de estudo .....	34
5.2 Descrição das etapas metodológicas .....	36
5.2.1 Definição dos critérios .....	36
5.2.2 Tabela de cruzamento dos fatores .....	39
5.2.3 Geração de critérios de restrição .....	39
5.2.3.1 Áreas de restrição ambiental e legal.....	39
5.2.3.2 Áreas propostas como rotas de aves.....	42
5.2.3.3 Restrição condicional para o florestamento .....	43
5.2.4 Dados relativos ao vento.....	45
5.2.5 Critérios considerando as distâncias euclidianas.....	46
5.2.6 Modelo digital de elevação do terreno.....	47
5.2.7 Peso dos critérios em função da localização (Curva de decaimento) ..	47
5.2.8 Modelos de análise hierárquica multicritério .....	48
5.2.9 Validação do modelo pelo índice Kappa .....	49

5.2.10	Cenários e mapas temáticos .....	50
5.2.11	Estimativa da capacidade de suporte do ambiente .....	50
5.2.12	Cálculo do potencial eólico instalado e produção estimada .....	51
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	54
6.1	Banco de dados cartográfico / mapa de classes .....	54
6.2	Mapas de aptidão de vento sem restrições ambientais e legais.....	58
6.3	Variação dos critérios nos modelos AHP.....	61
6.4	Comparação entre o mapa de aptidão e os parques com LP, LI e LO.....	71
6.5	Validação do modelo pelo índice Kappa.....	71
6.6	Mapa de aptidão com proposta de restrição para rota de aves .....	73
6.7	Restrição condicional para o florestamento .....	76
6.8	Cenários propostos.....	78
6.9	Capacidade de suporte e potencial eólico instalado.....	82
6.10	Produção energética estimada .....	85
7.	CONCLUSÃO .....	87
8.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	90
8.1	Limitações do estudo.....	90
8.2	Recomendações.....	90
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	92
	APÊNDICE .....	100

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Porcentagem do balanço energético no ano de 2012. ....	20
Figura 2. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001. ....	21
Figura 3. Vias de acesso para instalação de parque eólico no Município de Santa Vitória do Palmar. ....	25
Figura 4. Nível de ruídos de aerogeradores em 1995. ....	27
Figura 5. AHP Árvore hierárquica. ....	32
Figura 6. Mapa temático da área de estudo. ....	35
Figura 7. Organograma metodológico. ....	38
Figura 8. Procedimentos realizados para a classificação por redes neurais auto-organizáveis. ....	40
Figura 9. Fluxo laminar de duas zonas de turbulência. ....	44
Figura 10. Estimativa da altura dos florestamentos em campo. ....	44
Figura 11. Modelo para geração da intensidade do vento e energia cinética eólica, através das componentes U e V. ....	46
Figura 12. Fórmula para determinar a variação dos critérios. ....	48
Figura 13. Curva de decaimento do critério em função do peso. ....	48
Figura 14. Multiplicação dos pesos com o critério (AHP). ....	49
Figura 15. Distância dentre aerogeradores em um parque eólico. ....	51
Figura 16. Mapa temático de classes do uso e ocupação do solo. ....	56
Figura 17. Miniaturas com as classes separadas. ....	57
Figura 18. Modelagem do vento a partir dos pesos atribuídos no AHP (intensidade do vento e energia cinética). ....	60
Figura 19. Mapa considerando todos os critérios com pesos iguais. ....	63
Figura 20. Mapa contemplando todos os critérios. ....	66
Figura 21. Teste de modelo gerado sem considerar a energia cinética eólica. ....	67
Figura 22. Modelo gerado sem considerar a intensidade do vento. ....	68
Figura 23. Modelo gerado desconsiderando os dados provenientes do vento (i. e. intensidade do vento e energia cinética eólica). ....	70
Figura 24. Mapa de aptidão com localização dos parques eólicos com LP, LI e LO na área de estudo. ....	72

Figura 25. Modelo de aptidão mais adequado, com proposta de restrição para rota de aves (500 m). .....	75
Figura 26. Proposta de restrição condicional considerando as zonas de florestamento.....	77
Figura 27. Cenário ecodesenvolvimentista com proposta de rota de aves e distância da rede viária.....	80
Figura 28. Cenário conservacionista com proposta de rota de aves e distância da rede viária.....	80
Figura 29. Cenário ecodesenvolvimentista considerando as distâncias das redes viárias.....	81
Figura 30. Cenário conservacionista considerando as distâncias das redes viárias.	81
Figura 31. Mapa considerando como critérios de restrição a proposta de ampliação da Estação Ecológica do Taim .....	100
Figura 32. Proposta de zoneamento considerando como critérios de restrição a proposta da zona de amortecimento e a área de ampliação da Estação Ecológica do Taim .....	101
Figura 33. Aspecto do Parque eólico em Santa Vitória do Palmar.....	102
Figura 34. Vista aérea dos cordões litorâneos ao sul da cidade de Rio Grande, considerado como zona de exclusão no modelo.....	102

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Emissão de CO2 de diferentes tecnologias de geração de energia.....	24
Tabela 2. Escala de relativa importância de Saaty.....	33
Tabela 3. Representação da tabela SAATY.....	39
Tabela 4. Relação entre o índice Kappa e o desempenho.....	50
Tabela 5. Dados técnicos do projeto Ventos do Sul Energia, parques eólicos de Osório.....	52
Tabela 6. Valores das distâncias declaradas como restrição nos dois cenários propostos.....	79
Tabela 7. Dados relativos a capacidade de suporte ambiental em cenários distintos. ....	83
Tabela 8. Grau do uso do solo para aerogeradores.....	84
Tabela 9. Potencial eólico instalado de acordo com a capacidade de suporte. ....	84
Tabela 10. Estimativa da produção estima diante dos cenários propostos.....	85
Tabela 11. Tabela de cruzamento "Crosstab". ....	103
Tabela 12. Cálculo do decaimento com os resultados ponderados. ....	103

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil encontra-se em um cenário de crescente demanda de energia, visto a necessidade energética nos polos industriais e ao crescimento populacional, e para compor esse novo quadro da matriz energética é necessário investir em fontes alternativas de energia. Levando em consideração que a maior parte da energia é baseada em fontes hidráulicas (hidrelétricas) e em fontes não renováveis que são na sua maior parte de combustíveis fósseis - os quais há indícios de esgotamento e são altamente impactantes ao meio ambiente - o país tem buscado implantar alternativas energéticas, criando programas de incentivo para geração de energia obtida por meio de recursos naturais, tal como vento, biomassa e energia solar.

Diante dos impactos socioambientais associados às grandes hidrelétricas, particularmente aquelas situadas na Amazônia, fica evidente a necessidade da utilização de novas fontes para obtenção de energia. Nesse contexto, a energia eólica surge como uma alternativa promissora para complementar o suprimento energético nas situações críticas, já que não é possível estocar em forma de energia potencial como no caso das hidrelétricas. Esta fonte energética apresenta uma projeção para os próximos dez anos como horizonte para 2022, na capacidade instalada de geração elétrica do Sistema Interligado Nacional (SIN), de um aumento de 9.67 vezes em relação ao ano de 2012 (PDE, 2013), além de possuir uma base tecnológica estabelecida e confiável. A forma comercial de exploração desta fonte energética estabelece-se como parques de geração energética, compostos por aerogeradores, redes de elevação de tensão elétrica (*i.e.*, subestações) e redes de transmissão.

Nos últimos anos o país vem tentando atingir uma melhor qualidade no suprimento energético através da expansão do parque industrial, dando incentivos e subsídios ao setor, estimulando a implementação tecnológica e alavancando recursos para fixar a energia eólica como fonte sustentável e confiável, contribuindo desta forma no fornecimento de energia limpa para a matriz energética brasileira.

Os fatores que impulsionam e justificam a energia eólica como alternativa para obtenção de energia de uma forma menos agressiva ao ambiente são: a não emissão de dióxido de carbono e outros poluentes; a redução da dependência por combustíveis fósseis e complementação energética para usinas hidrelétricas; o fato

das áreas ocupadas pelos aerogeradores serem mínimas quando comparadas com outros tipos de obtenção de energia; a utilização do vento para obtenção de energia, o qual é uma fonte renovável e abundante principalmente no litoral do país; e a possibilidade de as áreas utilizadas pelos complexos eólicos serem aproveitadas para outros fins. Devido aos incentivos governamentais e ao potencial eólico no território nacional, a indústria eólica tende a crescer, e com o desenvolvimento da tecnologia os custos de produção e operação tendem a declinar rapidamente.

Por outro lado, essa fonte de energia apresenta alguns impactos ambientais desfavoráveis, tais como: impacto na paisagem, ruídos, interferência eletromagnética e danos à fauna, mesmo que em pequena escala. O impacto visual na paisagem é subjetivo, pois pode ser interpretada como um símbolo de energia limpa e tecnológica, mas também pode ser visto como uma interferência na paisagem natural. Porém, as reações negativas têm sido minimizadas perante a conscientização das vantagens que a energia eólica pode proporcionar. Também é relevante o impacto dos aerogeradores sobre a fauna local, que na maioria das vezes está associado a eventuais acidentes com aves, o que pode ser evitado descartando-se a instalação de grandes parques em rotas migratórias e da criação de corredores para a avifauna nos projetos de complexos eólicos.

Ainda, durante a fase de implantação o intenso fluxo de veículos pesados sobre áreas rurais causam danos à habitats naturais como campos e banhados. Quando esse trânsito ocorre em áreas urbanas periféricas pode trazer grandes transtornos tais como pó, ruído, trepidação e riscos à segurança das comunidades locais.

As características negativas podem ser minimizadas e até eliminadas por meio de um planejamento adequado e utilização de novas tecnologias. Nesse âmbito, entra a aplicação de ferramentas de geoprocessamento e sensoriamento remoto, as quais são imprescindíveis quando se trata de dados geográficos. O sensoriamento remoto em conjunto com o geoprocessamento permite uma cobertura da área em questão, modelar dados, analisar dados espaciais, manipular informações armazenadas em bancos de dados geográficos, base de dados de informações alfanuméricas, imagens, fotografias aéreas, vetores, textos, tabelas, arquivos digitais e dentre outros que podem ser diretamente associados às entidades espaciais.

No estado do Rio Grande do Sul está sendo preparado um zoneamento ambiental para reger a implantação de empreendimentos eólicos, mas até o momento esse estudo por parte do governo do Estado ainda não se encontra concluído. O mapeamento do potencial eólico do estado realizado no ano de 2002 por Amarante (2002), não levou em consideração a capacidade de suporte do meio ambiente; além disso, por se tratar de uma escala regional, o nível de detalhamento não permite tomada de decisões em nível local. Ainda, os critérios levados em consideração no licenciamento ambiental de parques eólicos não são padronizados no que se refere à localização espacial.

Dentro desse contexto, o escopo do presente trabalho consiste em aportar uma contribuição para o planejamento da expansão dos parques eólicos no sul do Rio Grande do Sul, apontando com um alto nível de resolução (30 metros) as áreas mais aptas para a implantação dos mesmos, considerando critérios ambientais e paisagísticos.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O objetivo deste trabalho é propor, por meio de um modelo hierárquico multicriterial de análise locacional, um zoneamento territorial sustentável para complexos eólicos, baseado em critérios restritivos e atrativos, a fim de gerar um mapa de aptidão para instalação de empreendimentos voltados para a atividade eólica. Estimando a capacidade de suporte ambiental da área de estudo perante os empreendimentos de energia eólica, e por conseguinte calcular o potencial eólico anual das zonas consideradas como aptas no modelo.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Definir os critérios mais relevantes para a instalação de complexos eólicos;
- Criar e ajustar camadas de informação representativas de cada critério;
- Testar e analisar o resultado da alteração do peso dos critérios no resultado do modelo;
- Gerar um modelo multicriterial hierárquico de viabilidade locacional para parques eólicos;
- Validar o modelo com base em índices de acurácia (Índice Kappa) e nas áreas já licenciadas para parques eólicos na região;
- Criar cenários distintos para exploração eólica na área de estudo;
- Estimar a capacidade de suporte ambiental baseadas nesses cenários;
- Calcular o potencial eólico anual para a região, levando em consideração as áreas aptas geradas nos cenários.

### **3. JUSTIFICATIVA**

O litoral sul do Rio Grande do Sul possui um potencial eólico considerado alto para investimentos do ramo de geração de energia por meio da captação do vento. Esta região tem sido objeto de interesse alvo de empresas multinacionais para instalação de grandes complexos eólicos. Porém a região carece de um zoneamento territorial adequado visando às instalações de parques eólicos, tal como consta na pesquisa sobre licenciamento de parques eólicos (MMA, 2010). A falta de estudos que abordem o impacto ocasionado nas aves pelos aerogeradores e que tratem de alternativas para minimizar eventuais acidentes podem interferir no processo de licenciamento, ocasionando efeitos negativos tanto para o empreendimento quanto para o meio ambiente.

O quadro atual é de acelerado crescimento de investimentos de grande porte nos municípios da área de estudo atrelado a ausência de uma clara definição de áreas próprias para implementação de parques eólicos, capaz de considerar tanto os aspectos econômicos e energéticos, como sociais, ambientais e paisagísticos. Esta pesquisa pretende aportar uma contribuição nesse sentido, apresentado em escala adequada uma proposta de zoneamento ecológico econômico para o setor eólico na região sul do estado do Rio Grande do Sul, estabelecendo com base nesses mesmos critérios a capacidade de suporte da região para a expansão dos parques eólicos, considerando as estimativas mais precisas da intensidade do vento e energia cinética eólica da mesma.

## **4. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **4.1 Panorama e perspectivas sobre a energia eólica**

Os recursos eólicos mundiais se concentram principalmente nas regiões costeiras, as quais são privilegiadas pela ação do vento. Estima-se que o potencial bruto mundial gerado pela fonte eólica possa atingir aproximadamente 500.000 TW/h por ano. No entanto, devido as restrições socioambientais, apenas 10% desse valor são aproveitáveis. Esse potencial líquido, corresponde cerca de quatro vezes o consumo atual de eletricidade no mundo (CNI, 2009).

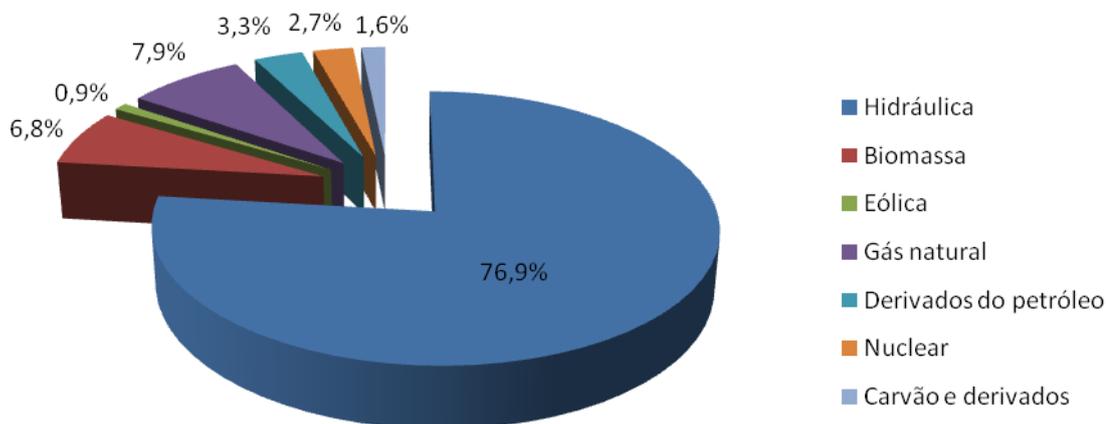
A América do Sul é uma região rica em recursos naturais e com políticas públicas voltadas para seu aproveitamento. Possui um grande potencial hidroelétrico ainda não utilizado e possibilidades excelentes para a utilização da energia eólica, geotérmica, solar e de biomassa (OLADE, 2010). Segundo estudos realizados pela Organização da América Latina de Energia, a tendência é que até o ano de 2032 as fontes de hidroenergia e de biomassa se tornem as principais fontes de energias renováveis em utilização. Ainda assim, se espera um grande impulso no setor de energia eólica (FIESP; OLADE, 2009).

São inúmeras as localidades com alto potencial eólico, e quando elegidos livremente pelos investidores em processos de licenciamento, como é o caso do Brasil e do Uruguai, o desenvolvimento desse tipo de energia pode expandir com facilidade (GARRÓN, 2013). Os baixos custos registrados ultimamente nos projetos de energia eólica apontam para uma mudança notável nos países com grande potencial de aproveitamento desse recurso, entre esses figuram o Brasil, a Argentina e o Uruguai (FIESP; OLADE, 2009).

A matriz energética brasileira é uma das mais limpas do mundo (Matriz Energética, 2012), contando com 84,6% de fontes renováveis, onde 76,9% são hidráulicas e apenas 7,7% de biomassa e eólica (Figura 1). O Ministério das Minas e Energia (MME) tem trabalhado intensamente para a criação de incentivos para a difusão da energia eólica. Através da criação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), criado pela Lei nº 10.438, de 26 abril de 2002 e regulamentado pelo Decreto nº 5.025, de 30 março de 2004, e posteriormente pelo surgimento dos sucessivos leilões da compra e venda de energia eólica, este setor vem crescendo no contexto energético brasileiro,

passando de 20 MW (Mega Watts) para 1.180 MW de participação na matriz elétrica do país (PDE, 2012; PNE 2007; AMARANTE *et al.*, 2001).

Figura 1. Porcentagem do balanço energético no ano de 2012.



Fonte: Adaptado de EPE, 2013.

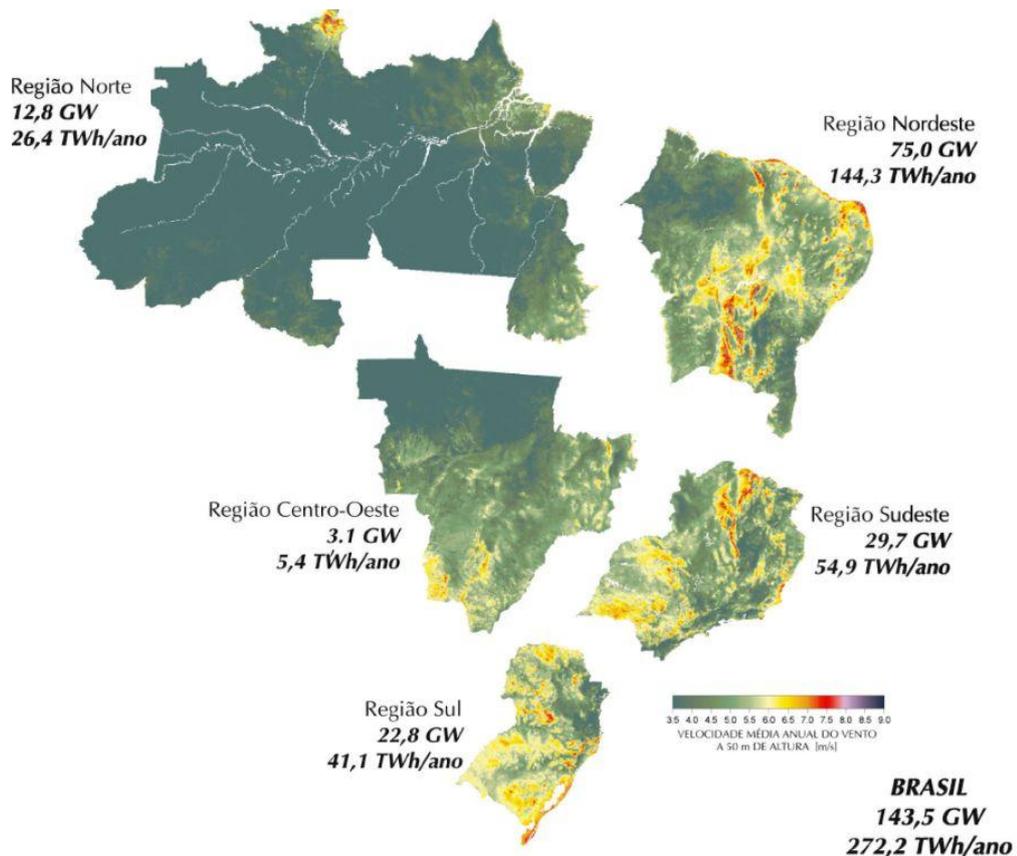
De acordo com a avaliação da organização não governamental “Global Wind Energy Council”, o Brasil é o país mais promissor em termos de produção de energia eólica. A perspectiva é de que a capacidade instalada no país aumente 63,4 GW (Giga Watts) em torno de dez anos. Desse montante 18 GW serão produzidos a partir de fontes alternativas de energia, onde se enquadra a energia eólica (PDE, 2012).

Devido à imensa extensão territorial, o Brasil apresenta várias regiões favoráveis ao aproveitamento eólico. Os ventos do país são caracterizados por serem duas vezes superior à média mundial e pela sua volatilidade de 5% (oscilação da velocidade), o que garante maior previsibilidade ao volume que virá a ser produzido (ANEEL, 2002). Conforme estudo do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica – CRESESB/CEPEL, as estimativas são que o Brasil possua um potencial de geração de energia eólica de 143 GW (BRONZATTI; NETO, 2008).

As regiões com maior potencial medido (Figura 2) são a Nordeste, principalmente no litoral (75 GW); Sudeste (29,7 GW); e Sul (22,8 GW) onde está

localizado o maior complexo gerador de energia da América Latina, os parques eólicos de Osório com potencial gerador de 150 MW (Empreendedor Ventos do Sul Energia, município de Osório) (ANEEL, 2002). A maior parte dos projetos já implantados se encontra na região Nordeste e Sul (PNE, 2007).

Figura 2. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001.



Fonte: Amarante *et al.*, 2001.

No Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (AMARANTE *et al.*, 2001) a distribuição dos regimes dos ventos são divididas em 7 regiões geográficas: Bacia Amazônica Ocidental e Central; Bacia Amazônica Oriental; Zona Litorânea Norte-Nordeste; Zona Litorânea Nordeste-Sudeste; Elevações Nordeste-Sudeste; Planalto Central; e Planaltos do Sul.

A região dos Planaltos do Sul estende-se aproximadamente de São Paulo até o limite sul do Rio Grande do Sul. O escoamento atmosférico geral nessa área é controlado pela Depressão do Nordeste da Argentina. Desse escoamento, resultam velocidades médias anuais de 5,5m/s a 6,5m/s sobre

grandes áreas da região. Os ventos mais intensos estão entre 7m/s e 8m/s e ocorrem nas maiores elevações montanhosas do continente, bem como em planaltos de baixa rugosidade. Outra área com velocidades superiores a 7m/s encontra-se ao longo do litoral sul, onde os ventos predominantes leste-nordeste são acentuados pela persistente ação diurna das brisas marinhas (AMARANTE *et al.*, 2001).

O crescimento da energia eólica como fonte energética é considerado como alternativa para uma melhor qualidade ambiental no suprimento energético. O desenvolvimento dessa tecnologia e a alta do mercado, tem tornado a fonte eólica uma opção para obtenção de energia limpa - sem emissão de poluentes - em grande escala. Uma das características ambientais favoráveis da energia eólica está na não necessidade do uso da água como elemento motriz ou mesmo como fluido de refrigeração, além disso, cerca de 99% de uma área utilizada em um parque eólico pode ser utilizada para outros fins, como a pecuária e atividades agrícolas (MIRANDA, 2004). Além disso, como a velocidade do vento costuma ser maior em períodos de estiagem, é possível operar as usinas eólicas em sistema complementar com as usinas hidrelétricas, de forma a preservar a água dos reservatórios em períodos de poucas chuvas (ANEEL, 2002).

#### **4.2 Oportunidades e desafios para a expansão da energia eólica**

A energia eólica possui uma boa oportunidade no mercado atual brasileiro, tendo argumentos pertinentes a favor da ampliação do setor eólico. Contudo, essa necessita aperfeiçoamentos para sanar seus pontos negativos. Diante disso, pode-se apontar alguns fatores de relevância na oportunidade e outros fatores para aperfeiçoamento. Segundo a confederação Nacional da Indústria (CNI, 2009) e a pesquisa realizada pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2010) os principais argumentos em favor da ampliação da atividade no país são:

- i. os parques eólicos são projetados para operar mais de 20 anos, e ao final de sua vida útil a área pode ser recuperada ou restaurada com baixos custos financeiros e ambientais;
- ii. a população está concentrada na faixa litorânea, onde está localizada a maior parte do potencial eólico, o que permite reduzir os custos de transmissão e as perdas técnicas;

iii. há forte complementaridade entre os períodos de chuva e de vento ao longo do ano, possibilitando os parques eólicos suprirem carências energéticas das usinas hidrelétricas. Sendo a energia eólica uma fonte complementar à hidroeletricidade, substituindo a geração térmica nos meses de seca hidrológica;

iv. os parques eólicos permitem a utilização das terra para outros tipos de atividade;

v. o prazo de instalação das unidades geradoras é relativamente curto, entre 12 e 24 meses;

vi. as unidades de geração eólica não emitem poluente atmosférico;

vii. a gratuidade da fonte energética (vento).

E os principais pontos negativos considerados, sendo a maioria de caráter ambiental e político-institucional, são:

i. a impossibilidade de armazenamento da energia eólica, o que exige aperfeiçoamentos técnicos;

ii. Impactos sonoros e visual;

iii. possível interferência eletromagnética;

iv. a necessidade de aperfeiçoamentos das modalidades contratuais para atender as especificidades do setor;

v. a falta de competitividade da fonte eólica frente às fontes convencionais de geração, criando a necessidade da implantação de políticas de incentivo para sua implantação e/ou de tarifação sobre os custos ambientais decorrentes da geração com fontes convencionais;

vi. a incipiência da indústria de equipamentos eólicos no Brasil, o que dificulta o atendimento dos índices de nacionalização previstos no PROINFA e eleva os custos de instalação e manutenção dos empreendimentos;

vii. danos e ofuscamento à fauna.

### **4.3 Impactos ambientais da energia eólica**

#### **4.3.1 Emissão de poluentes**

Uma das vantagens dos parques eólicos, é que esses não emitem CO<sup>2</sup> e nenhum tipo de poluente durante sua operação. Contribuindo na redução dos gases do efeito estufa e na redução da concentração de CO<sup>2</sup>. Com investimentos no setor

de produção energética renovável sem emissão de poluentes, constata-se uma redução na emissão desses gases ao longo dos anos, porém ainda permanecem em uma faixa consideravelmente alta (JACOBSON *et al.*, 2001).

Como consta na Tabela 1, somente as hidroelétricas de grande porte são competitivas com a fonte de energia eólica no quesito baixa emissão de poluentes, tanto na fase de operação quanto na de instalação. No entanto, hidroelétricas de grande porte causam um impacto negativo nas adjacências de sua área de instalação, devido ao alagamento da mata ciliar e a esse fato ser prejudicial para a biota, e comunidades que utilizem essas áreas para subsistência e/ou moradia (GIUSTI, 2005).

Tabela 1. Emissão de CO<sub>2</sub> de diferentes tecnologias de geração de energia.

Tecnologias	Emissões de CO <sub>2</sub> nos estágios de produção de energia (ton./GWh)			
	Extração	Construção	Operação	Total
Queima de carvão	1	1	962	964
Queima de óleo combustível	-	-	726	726
Planta de queima de gás	-	-	484	484
Energia térmica dos oceanos	ND*	4	300	304
Plantas geotérmicas	<1	1	56	57
Pequenas hidrelétricas	ND*	10	ND*	10
Reatores nucleares	2	1	5	8
<b>Energia eólica</b>	<b>ND*</b>	<b>7</b>	<b>ND*</b>	<b>7</b>
Solar fotovoltaico	ND*	5	ND*	5
Grandes hidrelétricas	ND*	4	ND*	4
Solar térmico	ND*	3	ND*	3

Fonte: World Energy Council, 1993.

#### 4.3.2 *Uso do solo*

Complexos eólicos não ocupam grandes áreas, porém existe uma diferença entre a área efetiva ocupada por um aerogerador e a área total do parque (COELHO, 2007). Além disso, entre os aerogeradores - os quais são o que realmente ocupa o terreno - vias de acesso tem que ser construídas, devido ao fluxo do maquinário para instalação das torres. É necessário colocar toneladas de concreto abaixo do solo para sustentar o aerogerador (TUPI, 2010).

Geralmente, na fase de operação de um parque eólico sua área pode ser utilizada para diversos fins, pois o espaço físico disponível é similar ao anterior ao parque eólico. Os usos mais comuns são de atividades de pecuária e agricultura em

geral. Não há evidências de que fazendas eólicas interfiram em grandes extensões (EWEA, 2000).

#### **4.3.3 Impacto sobre habitats**

Os impactos ambientais nos habitats naturais ocorrem devido a necessidade de construções de vias para deslocamento de estruturas de grande porte em áreas naturais, geralmente habitats de campo (Figura 3). Uma vez estabelecidos, esses acessos tendem a serem mantidos para assegurar a manutenção dos equipamentos. Eventualmente tais acessos podem colmatar pequenos banhados ou interromper os fluxos de drenagem de pequenos arroios. Porém, os maiores impactos sobre a fauna estão relacionados quase que exclusivamente com as aves e também á mortalidade de morcegos.

Figura 3. Vias de acesso para instalação de parque eólico no Município de Santa Vitória do Palmar.



Fonte: Fotografia de Paulo Roberto Armanini Tagliani, 2014.

Considerando o comportamento distinto de cada espécie de ave, a taxa de mortalidade tende a ser específica. As aves migratórias são as mais afetadas quando existe a implementação de um parque em suas rotas. Durante a noite, as aves voam sobre os aerogeradores, entretanto, durante o período diurno elas baixam voo à procura de alimentação e repouso, o que pode ocasionar a colisão com os aerogeradores (KINGSLEY; WHITTAM, 2005).

Uma alternativa viável para minimizar as colisões de aves com as torres de parques eólicos, segundo Coelho (2007), é a utilização de tintas que refletissem os raios ultravioletas, pois as aves tem a capacidade de detecção da luz nesse comprimento de onda. Outro fator a ser levado em consideração é o número de aerogeradores em um parque, uma vez que uma grande quantia de aerogeradores continuamente dificultaria o desvio das aves diante as estruturas, levando essas a exaustão e podendo ocasionar a colisão.

Todavia, existem estudos comprovando que os números de óbitos de aves são muito pequenos quando comparado com outras atividades que levam a morte das mesmas. Segundo a National Academy of Sciences (2007), comparando causas de mortes da avifauna, turbinas eólicas representam cerca de 0,003% da totalidade de mortes de aves.

Estudos com sensores específicos em Tjaereborg na Dinamarca, comprovam que fora da rota de migração, turbinas eólicas não interferem nas aves. Estudos demonstram que no local onde foi instalado um aerogerador de 2 MW e 60 metros de diâmetro, as aves tendem a mudar sua rota de voo entre 100 a 200 m, passando por cima ou ao redor da turbina, em distâncias seguras. Esse comportamento tem sido observado tanto durante a noite quanto durante o dia (ELLIOT, 2000).

De acordo com Amarante *et al.* (2001), com o desenvolvimento da tecnologia dos aerogeradores, a tendência é a construção de turbinas de máximo diâmetro possível. Isso gera um impacto positivo no que diz respeito às aves, pois com o aumento da estrutura, a velocidade de rotação das pás fica bastante reduzida, sua visibilidade torna-se mais eficiente e estes animais podem mudar seus cursos de voos a tempo de evitar a colisão.

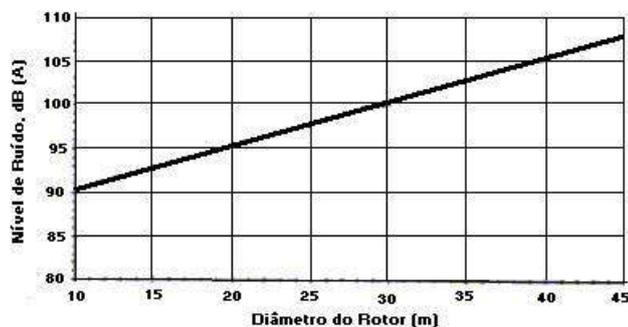
Diante dos impactos nos morcegos, não há um consenso diante da causa de óbitos desses animais. Entretanto as hipóteses mais plausíveis na literatura fazem referência a migração e ecolocalização. Segundo Ahlém (2003), os morcegos quando estão em rotas migratórias, para poupar energia, não usam seu sistema ecolocalizador na mesma intensidade que quando não estão migrando. Sendo assim, haveria maior incidência de colisões de morcegos que estivessem migrando. A outra hipótese, argumenta que os aerogeradores produzem sons em frequências prejudiciais para a quiropterofauna, podendo esses atrair ou desorientar os morcegos em suas rotas migratórias, ocasionando colisões.

#### 4.3.4 Interferência eletromagnética e ruídos

Na década de oitenta e início da década de noventa, o ruído das máquinas aerogeradoras eram um fator que bloquearam a difusão desse tipo de atividade. Com o aumento da tecnologia e a exigência do mercado, ocorreu um avanço significativo na diminuição dos níveis de ruído produzido pelos aerogeradores. Os ruídos das máquinas estão relacionados com os fatores mecânicos de funcionamento e a variação da frequência do ruído, uma vez que este é ajustável com a velocidade do vento incidente nas pás (TERCIOTI, 2002).

Conforme estudo do Instituto Alemão de Energia Eólica (DEWI, 1996), os aerogeradores disponíveis no mercado possuíam um nível de ruído entre 90 e 100 decibéis (Figura 4). A legislação referente ao nível de ruído na Alemanha recomendam uma zona de afastamento de 200 metros dos parques eólicos em relação aos centros urbanos.

Figura 4. Nível de ruídos de aerogeradores em 1995.



Fonte: DEWI, 1996.

Em face da interferência eletromagnética, os complexos eólicos podem interferir em ondas de rádio e televisão, devido à difração de onda através do pylom (sustentação do eixo do rotor) e reflexão através das pás do aerogerador. Portanto ao invés de a onda emitida propagar-se de forma retilínea, ela será desviada por reflexão e difração, ocasionando uma discrepância na sincronia das ondas recebidas pelo aparelho receptor (CARVALHO, 2009).

#### **4.3.5 Impacto visual**

O impacto visual é inevitável nos parques eólicos de grande porte, devido as estruturas ultrapassarem os 120 metros de altura e terem formas geométricas diferenciadas do ambiente onde estão inseridas. Outro fator é que as pás do aerogerador se movimentam em meio a uma paisagem geralmente estática (REY; DE OLIVEIRA, 2005; AUBREY *et al.*, 2006).

O impacto visual é subjetivo, sendo visto pelo lado positivo como um símbolo de energia limpa, podendo ser interpretado como um aspecto negativo na paisagem. Os efeitos negativos tem sido minimizados com a conscientização da população diante dos benefícios da energia advinda dos ventos (TERCIOTI, 2002).

Segundo Morrison (2006), em estudos de impacto visual sobre parques eólicos, não se pode apenas considerar um aerogerador, pois ele não será considerado como elemento intrusivo. Para realização de um estudo de impactos visuais de um parque eólico com quantidade exacerbada de aerogeradores por unidade de área, o elemento aerogerador será considerado como intrusivo, pois os impactos gerados serão cumulativos.

#### **4.4 Aspectos ambientais da planície costeira do Rio Grande do Sul**

A zona costeira do estado do Rio Grande do Sul sofreu um processo de ciclos de transgressão e regressão marinha, sendo retrabalhada e condicionada pelas glaciações-eustáticas no período do Quaternário, era Cenozóica. Devido a esses ciclos e às características físicas da costa, a planície costeira foi formada por sistemas de leques aluviais e de posições do tipo laguna-barreira, sendo uma das quatro províncias geomorfológicas do estado (VILLWOCK *et al.*, 1986; CARRARO, 1974).

A complexidade geomorfológica define o padrão do mosaico ambiental e, conseqüentemente, a distribuição, abundância, diversidade da biota e os padrões de uso e ocupação do solo, além do desenvolvimento socioeconômico. É importante o discernimento dos processos que atuam na evolução geológica da Planície Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS) para o entendimento da organização estrutural e funcional dos ecossistemas costeiros e assim, definir estratégias de desenvolvimento ajustadas às restrições ambientais da área (TAGLIANI, 1995).

Com extensão de mais de 600 Km, desde o município de Torres, ao norte, até a desembocadura do arroio Chuí, ao sul, a planície apresenta uma paisagem dominante com lagoas, áreas úmidas, matas de restinga, praias e dunas. Há uma grande biodiversidade devido a ampla diversificação ecossistêmica, onde a maioria das lagoas se comunicam por meio de canais e banhados, ocorrendo transferência de matéria e nutrientes, além do deslocamento de organismos. Os banhados apresentam ampla diversidade de vegetais macrófitos, a qual varia conforme a morfometria das plantas, o regime hidrológico e as características físicas dos sistemas (SCHWARZBOLD; SCHÄFER, 1984).

As áreas úmidas presentes na PCRS disponibilizam nutrientes para processos vitais, permitem a recarga de aquíferos, retém nutrientes, purificam a água, estabilizam zonas costeiras, barram inundações e regulam o regime hídrico dos corpos de água na região. Além disso, possuem caráter socioeconômico e cultural para a população humana, sendo fundamentais para comunidades urbanas e rurais (MMA, 2014).

Waechter (1985) define a PCRS como sendo um divisor biogeográfico para a flora, por ser o limite austral da Mata Atlântica e o limite setentrional de muitas espécies do sul do continente. A partir de migrações de regiões vizinhas geologicamente mais antigas, se originou a flora nessa planície, não ocorrendo especiação local (SHÄFER, 2009). A vegetação de restinga é bastante complexa, ocorrendo tipos herbáceos, arbustivos e arbóreos; pois esta variabilidade resulta de modificações nas condições climáticas e através do caráter seccional (SHÄFER, 2009).

No litoral norte, na altura de Torres, a Serra, a PCRS apresenta um estreitamento, com a Serra Geral aproximando-se do Oceano Atlântico. Guadagnin e Leidner (1999), observaram que há um aumento na riqueza de passeriformes e uma redução da diversidade de aves aquáticas conforme ocorre esse afunilamento. A dimensão dos banhados, lagoas e lagunas também diminui conforme o estreitamento da planície. Com isso, a planície costeira mais ao sul possui grandes corpos hídricos, sendo que os maiores remanescentes encontram-se entre a Lagoa Mirim, Laguna dos Patos e o Oceano Atlântico (VILLWOCK; TOMAZELLI, 2007).

O sul da planície costeira é caracterizado pela sua imensidão, onde as lagoas e banhados, praias arenosas, dunas frontais e lacustres, campos litorâneos, matas

de restinga e butiazais, predominam na paisagem. Esses ecossistemas, em grande maioria, ocorrem associados com campos litorâneos que compõem um mosaico de banhados e matas de restinga. Os extensos campos de dunas dessa região são de grande importância ambiental e de beleza cênica, servindo de habitat para diversas espécies de mamíferos, aves, insetos e plantas (BURGES; RAMOS, 2007).

As dunas desempenham papel fundamental na manutenção da morfologia da costa, atuando como barreira contra ação de fortes ventos, ondas e tempestades. Constituem uma área de refúgio, alimentação, nidificação de aves, e habitat para uma grande diversidade de espécies vegetais e animais. Essas são utilizadas principalmente pelos insetos, répteis, anfíbios, pequenos mamíferos e aves (GIANUCA, 1998; VOOREN, 1998). As dunas são grandes reservatórios de água, devendo ser analisadas como partes integrais dos sistemas costeiros, permutando massa, energia, biota e informações com meio ambientes transicionais (CORDAZZO, 1985; SARILHO, 2003).

As maiores lagoas e lagunas da região sul são a Lagoa dos Patos, a Lagoa Mirim e a Lagoa Mangueira. Esses ambientes abrigam ampla variedade de espécies, dos quais peixes e crustáceos servem de sustento para muitas famílias ribeirinhas. Na planície costeira sul também perfazem outras lagoas menores como a das Flores, Caiubá, dos Pachecos, dos Silveiras, Formosa e as lagoas Nicola e do Jacaré, as quais integram o sistema do banhado do Taim. Os banhados desta região são extensos com predominância de macrófitas emergentes e flutuantes (BURGES; RAMOS, 2007).

A região possui alta riqueza e diversidade de espécies, principalmente de aves aquáticas. Sendo uma das principais áreas de reprodução, alimentação e desasagem de espécies raras, ameaçadas ou de grande interesse cinegenético (SILVA, 1987). Por esse motivo existem na região Unidades de Conservação, e entre elas a principal é a Estação Ecológica do Taim, a qual possui 60% da área em sistemas de banhado. O sistema de banhados contribui para a conservação de muitas espécies da fauna e flora, ameaçadas ou vulneráveis em nível local, nacional e internacional, como é o caso da lontra (*Lontra longicaudis*) (BURGES; RAMOS, 2007).

O objetivo da ESEC do Taim é a preservação das espécies, sendo que de um total de 220 espécies de aves encontradas no banhado do Taim, 78 são

aquáticas, representantes de 18 famílias. Isso corresponde a 9,4% das espécies e 56% das famílias de aves aquáticas do planeta (MÄHLER *et al.*, 1996; VEIGA *et al.*, 1995). Segundo Belton (1994), aves de nove espécies migram do Hemisfério Norte, permanecendo no Rio Grande do Sul nos meses de verão; cinco espécies vêm do sul do Hemisfério Sul, ocorrendo nos meses mais frios; e outras quatro espécies de rota desconhecida.

Segundo Maurício e Dias (2001), ao norte do banhado do Taim, o complexo Senandes é preferencial para aves, ocorrendo espécies ameaçadas, algumas delas com populações significativas para conservação. Tais como a noivinha-de-rabo-preto (*Heteroxolmis dominicana*) e o caboclinho-de-papo-preto (*Sporophila palustris*). Já o Complexo de banhados do Vinte-e-Cinco e da Mulata, são áreas extensas de turfeira, é o único local de ocorrência da ave veste-amarela (*Xanthopsar flavus*) no litoral do Rio Grande do Sul (MAURÍCIO; DIAS, 2001).

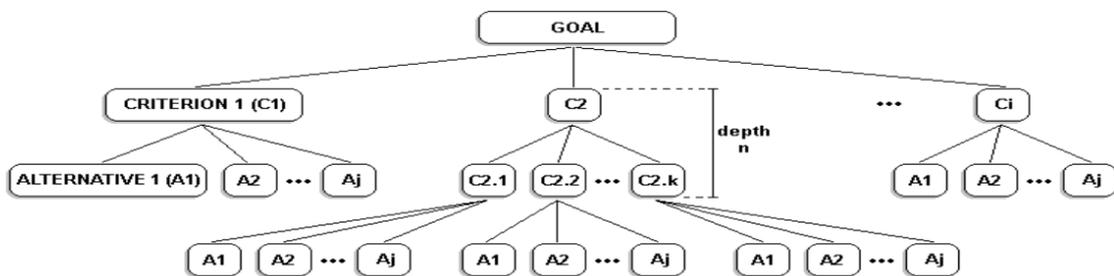
#### **4.5 Análise multicritério**

O AHP (Analytic Hierarchy Process) foi desenvolvido na década de 1970 por Thomas L. Saaty e foi expansivamente estudado a partir dessa época. Segundo Schmoltdt *et al.* (2001), o método AHP é utilizado para diversas aplicações, isso deve-se a sua estrutura flexível e de ser um modelo matemático facilmente aplicável. O AHP é uma abordagem estruturada para solução de problemas de tomada de decisão em ambientes complexos em que diversas variáveis ou critérios são considerados para a priorização e seleção de alternativas (SAATY, 1980). Atualmente é aplicado para a tomada de decisão em diversos temas e cenários, onde atuam diversas pessoas para tomar decisões e onde interpretações, julgamentos e consequências possuem repercussão de longo prazo (BHUSHAN; RAI, 2004).

Este método transforma as comparações, muitas vezes subjetivas, em valores numéricos que são processados e comparados. O peso de cada um dos fatores permite a avaliação de cada um dos elementos dentro da hierarquia definida. Essa capacidade de conversão de dados empíricos em modelos matemáticos é o principal diferencial do AHP com relação a outras técnicas (VARGAS, 2010).

O método AHP de tomada de decisão é decomposto em quatro etapas: (i) O problema é definido e todos os domínios da informação que serão utilizados para a tomada de decisão são determinados. A definição do problema é utilizada para determinar o objetivo de todo o processo e as informações dos domínios são usados como critérios. (ii) Uma árvore de hierarquia é criada, e é possível para cada critério ter sub-critérios tantos quanto necessário. Nos últimos níveis estão as alternativas, como se pode observar na (Figura 5) existem alternativas de “A1 a Aj”, e uma dessas será selecionada como resultado do processo inteiro. (SAATY, 2008).

Figura 5. AHP Árvore hierárquica.



Fonte: Ersan, 2012.

(iii) Um conjunto de matrizes é construído de modo a realizar uma comparação de critérios na árvore de hierarquia. Ao criar essas matrizes de uma abordagem por pares é considerado que cada critério seja comparado um por um com o outro. (iv) Ao fazer comparações de pares, um critério de importância relativo é atribuído ao relacionamento entre estes fatores, segundo uma escala pré-definida (Tabela 2) (SAATY, 2008; INPE, 2002).

A escala de relativa importância entre duas alternativas propostas por Saaty é a mais utilizada. Atribuindo valores que variam de 1 a 9, a escala determina a importância relativa de uma alternativa com relação à outra, conforme apresentado na Tabela 2.

A geração de tabelas de contingência (comparações de importância, “Crosstab”), permite o cruzamento de variáveis em geoprocessamento determinando a correlação múltipla para um conjunto de variáveis (MEIRELLES *et al*, 2007). A correlação cruzada consiste em uma técnica estatística de análise de dados multirrelacionados através de tabelas de duas ou mais entradas ou tabelas de relação cruzada (Crosstab). As tabelas de contingência são utilizadas para estudar a

relação entre duas ou mais variáveis categóricas descrevendo as frequências das categorias de uma das variáveis relativamente às categorias de outra (EHLERS, 2003).

Tabela 2. Escala de relativa importância de Saaty.

<b>Escala</b>	<b>Avaliação</b>	<b>Recíproco</b>	<b>Comentário</b>
Igual importância	1	1	Os dois critérios contribuem igualmente para os objetivos.
Importância moderada	3	1/3	A experiência e o julgamento favorecem um critério levemente sobre outro.
Mais importante	5	1/5	A experiência e o julgamento favorecem um critério fortemente em relação ao outro.
Muito importante	7	1/7	Um critério é fortemente favorecido em relação a outro e pode ser demonstrado na prática.
Importância extrema	9	1/9	Um critério é favorecido em relação a outro com mais alto grau de certeza.
Valores intermediários	2, 4, 6 e 8		Quando se procura condições de compromisso entre duas definições. É necessário acordo.

Fonte: Adaptado de Saaty, 1980.

Na tabela de contingência realiza-se a comparação de pesos dos critérios estabelecidos, onde todos os critérios analisados são pareados dois a dois. Essa comparação pode utilizar dados concretos das alternativas ou julgamentos humanos como forma de informação subjacentes (SAATY, 2008; TRIANTAPHYLLOU, 2002).

Posteriormente as comparações de importância e atribuição de pesos entre os critérios a serem avaliados, a probabilidade numérica de cada uma das alternativas é calculada. Essa probabilidade indica o quanto o critério pode atender a meta estabelecida (VARGAS, 2010).

O fato da atribuição de pesos em função do decaimento, no AHP geométrico, oferece maior flexibilidade para descrição da variabilidade dos critérios e das distribuições de probabilidade (TRIANANTAPHYLLOU, 2002). O modelo é constituído de uma técnica para tomada de decisão em árvores de decisão complexas, onde diversos critérios são considerados para determinação de probabilidades. Pelo fato da atribuição subjetiva nos pesos de cada critério, a análise de decaimento minimiza os erros de distribuição linear para variáveis não lineares (CÂMARA *et al.*, 2000), possibilitando uma análise mais próxima da realizada.

## 5. MATERIAL E MÉTODOS

Para execução do presente trabalho, foram utilizados dados de caracterização do uso e cobertura do solo (vetoriais e *raster*), dados meteorológicos de vento e dados auxiliares do terreno como topografia. Todos aplicados em um conjunto de passos metodológicos em sequência discutidos.

### 5.1 Área de estudo

A área de estudo (Figura 6) está situada exclusivamente na planície costeira do estado do Rio Grande do Sul, sendo seus limites de abrangência as zonas territoriais dos municípios de Rio Grande, Santa Vitória do Palmar e Chuí. Fica compreendida entre os paralelos 31° 56' 33" e 33° 44' 22" de latitude Sul e entre os meridianos 52° 06' 57" e 53° 25' 29" de longitude Oeste.

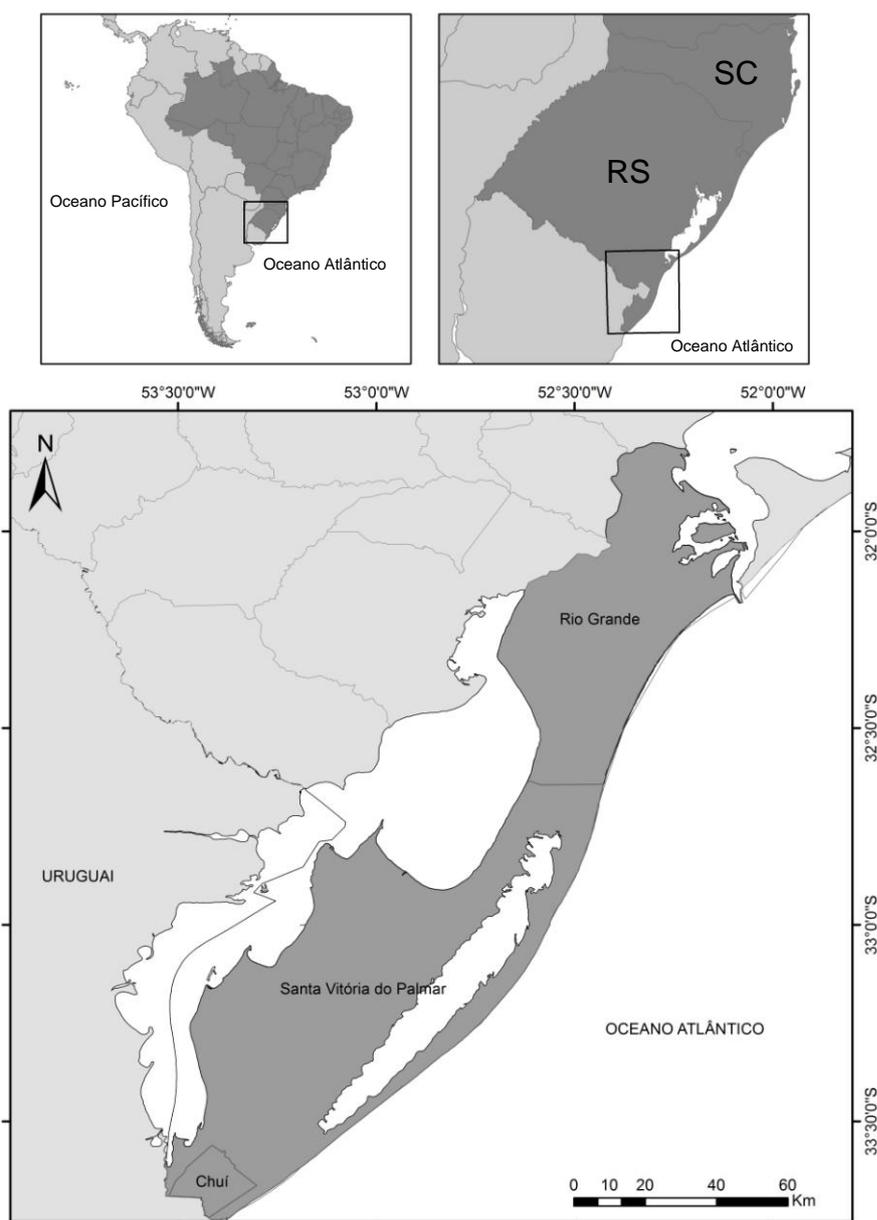
Segundo Amarante *et al.* (2001), o Estado do Rio Grande do Sul figura entre as zonas com maior potencial eólico, o qual se estende por sua zona costeira e diminui gradativamente em direção ao continente, contudo a mudança do potencial não é uniforme. A planície costeira do estado é uma das regiões com maior constância de comportamento eólico no país (AMARANTE *et al.*, 2002; MMA, 1996), favorecendo o investimento de empreendimentos eólicos, os quais tem aumentado consideravelmente, com a instalação de parques eólicos, sobretudo, na zona costeira.

Essa região encontra-se em um momento acelerado de crescimento e de investimentos para geração de energia advinda de fonte eólica. Como consta no banco de dados de licenciamento da FEPAM<sup>1</sup>, órgão estadual responsável pelo licenciamento desse ramo de atividades, são 16 (dezesesseis) empreendimentos em processo de licenciamento no município de Rio Grande, 12 (doze) empreendimentos no município de Santa Vitória do Palmar e 3 (três) empreendimentos em licenciamento no Chuí.

<sup>1</sup> FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIZ ROESSLER (FEPAM, 2014)  
Fonte: <http://www.fepam.rs.gov.br/licenciamento/Area1/default.as>

Os municípios na área de estudo estão em fase de adaptação a essa nova realidade. As consequências que poderão vir a serem enfrentadas devido a um mau planejamento podem ser irreversíveis. A crescente implementação dessa tecnologia na produção de energia, requer estudos ambientais, econômicos, políticos e sociais visando um planejamento adequado para implementação desta atividade na região e no país.

Figura 6. Mapa temático da área de estudo.



Fonte: O autor, 2014.

## **5.2 Descrição das etapas metodológicas**

Os métodos empregados no presente trabalho encontram-se no organograma metodológico (Figura 7), onde constam as principais etapas utilizadas para cumprir a proposta de pesquisa. A metodologia utilizada para realização do estudo consiste nas seguintes etapas:

### **5.2.1 Definição dos critérios**

Através de constantes consultas a literatura relativa à metodologia empregada, à área de estudo e ao tema de pesquisa, pode-se definir as variáveis (critérios) mais importantes para o processo de licenciamento de áreas para instalação de parques eólicos. As variáveis foram definidas de acordo com a importância da mesma diante do objetivo do trabalho, o qual está baseado na parte operacional de um parque eólico, nas constantes físicas do ambiente e no meio ambiente da região de estudo. O intuito de estabelecer os critérios mais plausíveis no que tange às necessidades para implementação de complexos eólicos, é poder validar o modelo de análise hierárquica multicritério. Não obstante, com os resultados pôde-se apontar as áreas com maior aptidão para o desenvolvimento dessa atividade, o potencial eólico e a capacidade de suporte do ambiente em vista ao desenvolvimento eólico na região.

A zona costeira está propensa a ação dos ventos e apresenta características geográficas que impactam no deslocamento das massas de ar sem que haja resistência suficiente na superfície, ou seja, algum tipo de relevo. Entretanto, segundo Custódio (2009), existem algumas características que devem ser levadas em consideração para o sucesso de um empreendimento eólico, tais características serviram como base para o modelo empregado neste trabalho, as quais são:

- i. A região tem que ser promissora, pois investir em uma região inadequada acarretará em perda de recurso e tempo;
- ii. Tamanho do terreno para implementação de aerogeradores, levando em consideração o tamanho das máquinas, a potência do parque eólico a ser instalado no local e os espaçamentos necessários entre os aerogeradores;

**iii.** Topografia/rugosidade do terreno deve ser baixa, de forma a aumentar a velocidade do vento na altura do rotor e de não restringir a área para instalação das torres eólicas;

**iv.** Obstáculos no terreno e ao seu redor, ser livre de obstáculos e sem quebra ventos para uma maior eficiência eólica. No caso de obstáculos ao redor do terreno estes devem ser considerados como rugosidade;

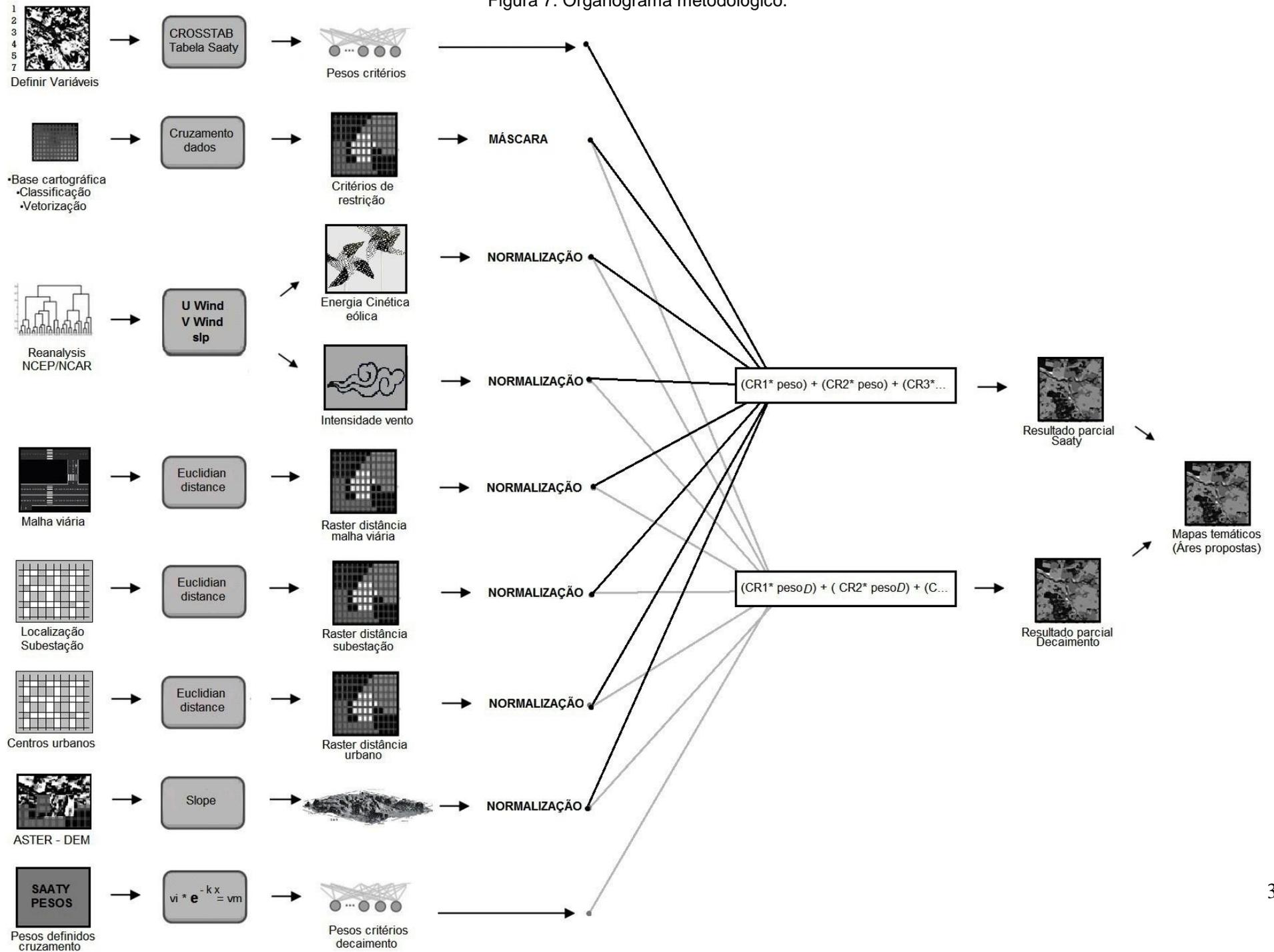
**v.** Acesso ao local, considerando dois aspectos: instalação de torres anemográficas e instalação do parque eólico;

**vi.** Distâncias de redes elétricas e viabilidade de conexão as mesmas, podendo esse ser um importante aspecto ao custo total do empreendimento. Se muito distante podem inviabilizar o projeto;

**vii.** Autorização formalizada do proprietário do terreno para instalação do parque eólico e movimento de maquinário durante a fase de instalação;

**viii.** Restrições ambientais, tais como reservas naturais, APP, parques, rotas de aves e entre outras. E as restrições legais, as quais podem ser, área de interesse público para outros fins, litígio jurídico pelo terreno, plano diretor, aspectos culturais e outros a serem averiguados.

Figura 7. Organograma metodológico.



### 5.2.2 Tabela de cruzamento dos fatores

Para estipular um valor ("peso") para as variáveis definidas, foi realizado uma tabela de cruzamento (*CrossTab* - Saaty) entre todas as variáveis, inclusive entre as mesmas. Todas variáveis ficaram na coluna "x" da tabela, e todas também na coluna "y". Baseando-se na tabela Saaty (Tabela 3) foram atribuídos pesos na comparação entre as variáveis com o auxílio da escala que consta na tabela, os quais variam de "igualmente preferido" até "extremamente preferido". Os pesos atribuídos variam de 0 a 9 na avaliação numérica (critério mais importante) e de 1/2 a 1/9 no seu recíproco. A partir da tabela de cruzamento (*Apêndice*) pode-se estipular um peso para cada variável, esse valor foi ponderado variando de 0 a 1 para posteriormente ser aplicado no modelo de análise hierárquica definindo o quanto mais ou menos relevante é o critério em relação aos outros.

Tabela 3. Representação da tabela SAATY.

Escala	Avaliação Numérica	Recíproco
<b>Extremamente preferido</b>	9	1/9
Muito forte ao extremo	8	1/8
<b>Muito fortemente preferido</b>	7	1/7
Forte a muito forte	6	1/6
<b>Fortemente preferido</b>	5	1/5
Moderado a forte	4	1/4
<b>Moderadamente preferido</b>	3	1/3
Igual a moderado	2	1/2
<b>Igualmente preferido</b>	1	1

Fonte: Adaptado de SAATY, 2005.

### 5.2.3 Geração de critérios de restrição

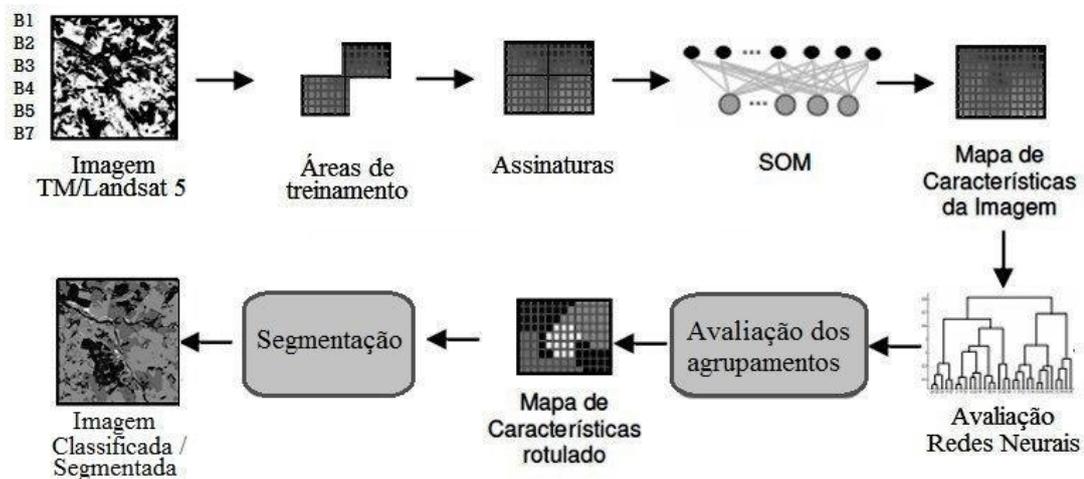
#### 5.2.3.1 Áreas de restrição ambiental e legal

A fim de restringir áreas de preservação permanente (APP) previstas na atualização de código florestal de legislação brasileira (RAMOS; TOSI, 2012), foi realizada uma classificação supervisionada de imagens de satélite. O processamento digital de imagem (PDI) foi realizado no software Idrisi Selva® com imagens orbitais do sensor TM/Landsat 5 das órbitas/pontos 221/82 e 222/83. A

imagem utilizada foi obtida gratuitamente através do banco de dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), com resolução espacial de 30 metros e seis bandas espectrais do espectro refletido, desde o visível até o infravermelho de ondas curtas, datada do ano de 2011.

O procedimento para classificação da imagem, ilustrado na Figura 8, seguiu as seguintes etapas: composição colorida da imagem, áreas de treinamento, extração de assinaturas, obtenção do gráfico de curvas espectrais, análise SOM (redes neurais), mapa rotulado, segmentação e mapa de classificação final.

Figura 8. Procedimentos realizados para a classificação por redes neurais auto-organizáveis.



Fonte: Adaptado de Gonçalves, 2008.

Na obtenção das assinaturas foram identificadas dez classes: antrópico rural, antrópico urbano, água, areia e dunas, dunas vegetadas e com mata de restinga, banhado e áreas úmidas, campos, florestamento, mantos de aspersão eólica e vegetação florestal. Posteriormente carregou-se as assinaturas e as seis bandas da imagem para obtenção das curvas espectrais. Para essa análise foi necessário definir um conjunto de amostras de treinamento para cada classe a ser diferenciada na imagem classificada. De acordo com Crosta (1992), esse método de obtenção das assinaturas espectrais dos pixels de treinamento, parte do pressuposto de que o usuário conheça a imagem a ser classificada de tal modo que possa definir quantas e quais as classes que são mais representativas no que tange o uso e cobertura do solo.

Na classificação da imagem utilizou-se a análise da ferramenta SOM (Kohonen's Self-Organizing Map) do software Idrisi Selva®. Essa ferramenta denominada "Mapa Auto-organizável de Kohonen", consiste em um tipo de rede neural artificial baseada em aprendizado competitivo e não-supervisionado (KOHONEN, 1987). Esse método assemelha-se a neurônios biológicos, que formam uma rede de interconexões e são conectados por nós de uma grade que geralmente é uni ou bidimensional.

Nessa etapa de classificação foram selecionadas as seis bandas, as assinaturas, e a composição criada, resultando na classificação da imagem. Posteriormente, foi realizada a segmentação da imagem bruta e cruzada a mesma com a classificação, gerando um mapa final com as classes pré-definidas.

Após a confecção do mapa temático com as classes descritas anteriormente, buscou-se no banco de dados da FEPAM (FEPAM, 2013), com o intuito de validar as áreas propostas na classificação, os arquivos *shapfile* estabelecendo os limites das classes de áreas úmidas, recursos hídricos, áreas urbanas, rede viária e lagoas. Os arquivos de áreas úmidas e lagoas validaram os dados da classificação, já os dados de recursos hídricos e áreas urbanas foram adicionados a classificação. A classe de rede viária foi empregada para delimitar distâncias de restrições das vias principais e secundárias em distintos cenários.

Para delimitar as áreas de APP vigente no código florestal como áreas de restrição, foram atribuídas zonas de distâncias das mesmas (*buffer*) seguindo as faixas da área de preservação permanente descritas na legislação. A faixa de preservação no entorno dos recursos hídricos está definida pelo novo código florestal, onde considera-se a largura do curso d'água em metros (m) a contar da borda superior regular, sendo que até 10m de largura a área destinada para preservação é de 30m do curso d'água; entre 10 e 50m a área de preservação é de 50m; entre 50 e 200m a área adjacente de preservação é de 100m; e acima de 200m a faixa destinada como área de proteção, como neste caso de mata ciliar, é de 500m.

Na classe de lagoas, denominada área do reservatório natural na legislação, os limites previstos por lei são os seguintes: para corpos de água com até 20 hectares (ha), a faixa adjacente de proteção permanente tem que ser igual a 30m em áreas urbanas e 50m em áreas rurais; e para corpos de água com área superior

à 20ha a faixa destinada para proteção é de 30m em áreas urbanas e de 100m em áreas consideradas rurais. Para a classe de áreas urbanas, foi delimitado uma distância de restrição de 1Km no cenário ecodesenvolvimentista<sup>1</sup> (modelo 1) e de 5 Km no cenário conservacionista<sup>2</sup> (modelo 2), a fim de evitar os efeitos provindos de aerogeradores em centros urbanos, tal como ruídos e interferência na paisagem diária da população residente nos centros urbanos da área de estudo.

Com a classe de redes viárias, foram gerados *buffer* de restrições no entorno das vias, com o propósito de não causar impacto visual nas pessoas que utilizam as mesmas. Foram gerados dois cenários, onde considerou-se no cenário conservacionista uma faixa mais larga de restrição, restringindo 5 Km para cada lado das vias principais e 1 Km para cada lado das vias secundárias. No cenário ecodesenvolvimentista foi gerada uma faixa de restrição menor, sendo 1 Km para cada lado da estrada principal e 250 m para cada lado das vias secundárias.

As classes de areia e dunas; dunas vegetadas e com mata de restinga; banhado e áreas úmidas; vegetação florestal, foram consideradas como área de APP, conforme legislação vigente. Foram estabelecidos então como restrição apenas os limites gerados pela classificação de imagem e pelos arquivos disponíveis no bancos de dados da FEPAM. A área da Estação Ecológica do TAIM vigente por lei (decreto de 1986) foi considerada como zona de restrição para o empreendimento eólico. Por fim, todos os limites de restrição gerados foram unidos em um único *shapfile*, servindo como máscara de restrição para os resultados de aptidão de locais propícios para instalação de parques eólicos.

### 5.2.3.2 Áreas propostas como rotas de aves

Como não consta nenhuma alternativa validada cientificamente na literatura consultada perante o conflito de localização dos complexos eólicos sobre as rotas da avifauna na região de estudo, propõem-se na pesquisa algumas rotas principais das aves, as quais foram consideradas no modelo de análise hierárquica multicritério com máscara de restrição.

<sup>1</sup> Cenário ecodesenvolvimentista: proposto pelo autor a fim de marcar um panorama flexível diante do desenvolvimento no setor eólico e a proteção ecológica, não deixando de levar em consideração as restrições legais e ambientais.

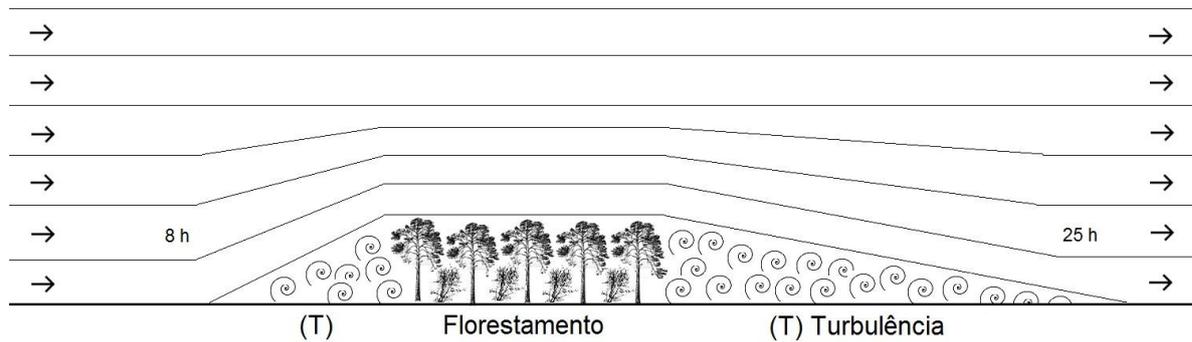
<sup>2</sup> Cenário conservacionista: proposto para refletir um enfoque maior na proteção da paisagem local, reduzindo impactos na paisagem natural. Com forte proteção ecológica focando na manutenção ecossistêmica. Leva em consideração as restrições legais e ambientais.

Para confeccionar as rotas de aves na área de estudo, fez-se o uso da classe de áreas úmidas, onde a partir desta foram gerados centróides em cada polígono da classe. Com o pacote *XTools Pro* do software ArcGIS® foram gerados, a partir dos centróides, conexões entre os polígonos mais próximos. Para propor um corredor de restrição para instalação de complexos eólicos em função das aves, foi considerado uma faixa de abrangência (*buffer*) de 500m de largura, na sua totalidade, nas conexões entre as áreas úmidas para o cenário ecodesenvolvimentista, gerando faixas de restrições de corredores da avifauna. Para o conservacionista foi considerado com área restrita para instalação de parques eólicos uma faixa de 2 Km nas adjacências das rotas de aves propostas. As restrições estão fundamentadas em análises da paisagem, embasada em premissas de ecologia de paisagem, não sendo realizadas observações de campo.

#### 5.2.3.3 *Restrição condicional para o florestamento*

De acordo com Forman (1995), o vento ao longo de um campo é reduzido em velocidade de fluxo ascendente em uma distância de aproximadamente 8 vezes a altura da floresta, causando uma zona de turbulência nas áreas de incidência do vento com essa distância. A zona turbulenta aumenta nas áreas adjacentes posteriores a floresta em cerca de 25 vezes a altura do florestamento (Figura 9). As distâncias podem variar consideravelmente, dependendo da estrutura de arbustos ou pela presença de pequenas árvores na borda. A turbulência afeta os aerogerados, e portanto parque eólicos não podem ser instalados em zonas de turbulência. Nas florestas as zonas turbulentas tendem a ser ao contrário do sentido do vento, porém devido a permeabilidade da madeira, essa é alta na borda a favor do vento, tornando essas locais sujeitos à erosão.

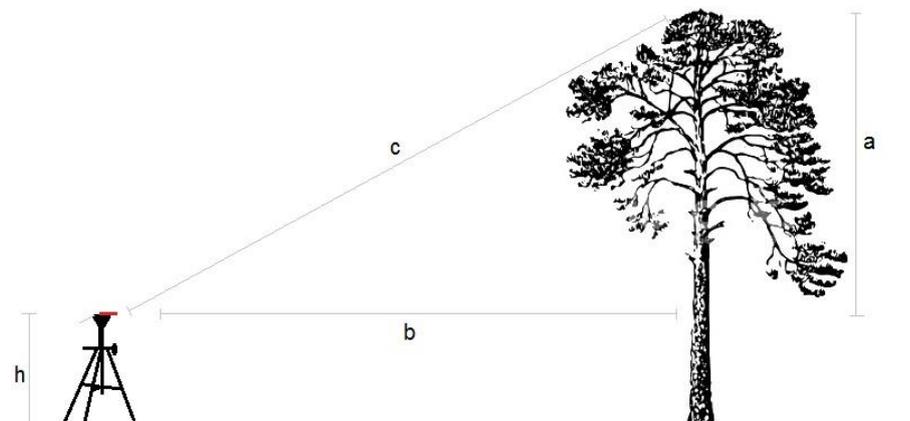
Figura 9. Fluxo laminar de duas zonas de turbulência.



Fonte: Adaptado de Forman, 1995.

Para evitar de gerar zonas aptas em áreas com a presença de florestamento e de suas adjacências consideradas como zonas turbulentas, optou-se nesse estudo seguir o que consta na literatura anteriormente citada. Primeiramente mediu-se a altura dos florestamentos da área de estudo com uma trena a laser (Figura 10), posteriormente foi calculado a média das distâncias do equipamento entre a copa da árvore medida (c) e considerado a distância do equipamento em relação ao tronco da árvore medida (b). A altura (a) foi estimada por meio da aplicação do Teorema de Pitágoras (1), com o valor da altura foi somado a altura do equipamento (h). Estimando assim a altura média dos florestamentos na área de estudo. As medições foram realizadas nos arbustos da borda e nos arbustos centrais para se obter uma maior confiabilidade na estimativa da altura.

Figura 10. Estimativa da altura dos florestamentos em campo.



Fonte: O autor, 2014.

$$a^2 + b^2 = c^2 \tag{1}$$

Após se obter o valor médio da altura dos florestamentos, considerou-se uma zona de restrição condicional nas área adjacente aos florestamentos de 25 vezes a altura média calculada. Foi considerada a distância máxima proposta por Forman (1995) justamente para evitar regiões turbulentas, e pela variabilidade da direção do vento. Também considerou-se como área restritiva condicional as áreas dos florestamentos, tendo portanto com restrição condicional os florestamentos e as áreas adjacentes com distância de 25 vezes a altura média calculada.

#### **5.2.4 Dados relativos ao vento**

Os dados relativos ao vento foram adquiridos no banco de dados do projeto “Reanalysis” do NCEP (National Centers for Environmental Prediction) e NCAR (National Center for Atmospheric Research), o qual visa produzir um registro de análises globais dos campos atmosféricos para apoio às necessidades de comunidades de pesquisa e monitoramento do clima. Esse esforço envolve a recuperação de dados de superfície terrestre, navio, radiossonda, aviões, satélites e outros dados, controle de qualidade e assimilar esses dados com um sistema de assimilação de dados. O NCEP/NCAR usa o estado da arte em sistemas de assimilação global de dados e uma base de dados tão completo quanto possível (KALNAY *et al.*, 1996).

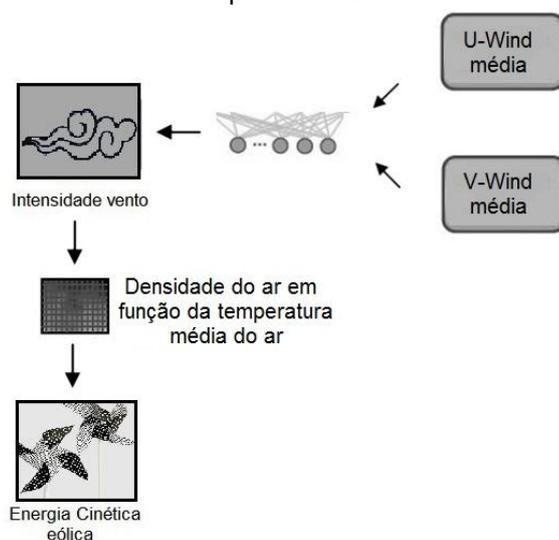
Os dados possuem uma resolução temporal de 6 horas e resolução espacial de  $2,5^\circ$  vs  $2,5^\circ$ , reexibidos nesta pesquisa para  $7 \times 10^{-4}^\circ$  vs  $7 \times 10^{-4}^\circ$ , sendo relativos ao componente zonal *U-wind* e a componente meridional *V-wind* com altura estipulada de aproximadamente 30m, onde pode-se calcular a média da velocidade do vento (BOWDEN, 1983). Estes dados foram coletados para a janela proposta de área de estudo desde o ano de 1948 até o ano de 2012, por meio destes dados pode-se calcular a intensidade do vento e energia cinética eólica.

A aquisição dos dados *U* e *V*, se deram a partir de um modelo de conversão para o sistema de coordenadas do projeto e conversão para o formato de arquivo de saída *raster* (*Tiff*), no software Matlab®. Com os dados de *U* e *V* em formato *raster* pode-se calcular a média mensal de cada componente, posteriormente a anual e por fim a média geral dos 64 anos de dados. Através das componentes *U* e *V* média geral, gerou-se o arquivo *raster* de intensidade do vento, posteriormente foi utilizado uma função de filtro de mediana de *kernel 3x3*. O *raster* de energia cinética eólica foi

confeccionado a partir do *raster* de intensidade, substituindo o valor da densidade do ar em função da temperatura média do ar, como pode-se observar na Figura 11.

Com os dados de  $U$  e  $V$  médios pode-se gerar a intensidade do vento, e com a intensidade foi gerado o modelo *raster* de energia cinética eólica, em função da média geral do vento. Proporcionando um *raster* de potencial eólico pontual variando espacialmente conforme a intensidade. A temperatura média do ar consultada no período da coleta de dados foi de  $19,5^{\circ}\text{C}$ .

Figura 11. Modelo para geração da intensidade do vento e energia cinética eólica, através das componentes  $U$  e  $V$ .



Fonte: O autor, 2014.

### 5.2.5 Critérios considerando as distâncias euclidianas

As variáveis consideradas para gerar os critérios de aptidão foram a distância das principais vias de acesso, a distância da subestação conectada ao Sistema Interligado Nacional (SIN) e a distância do consumidor, a qual considera os centros urbanos disponibilizados no banco de dados da FEPAM.

As vias de acesso foram obtidas no banco de dados *shapfile* da FEPAM, e a partir desta foi gerado um *raster* de distância euclidiana, favorecendo a proximidade das vias e desfavorecendo a distância. A subestação, presente no município de pelotas, foi georreferenciada e posteriormente foi gerado a distância euclidiana a partir da localização da subestação, onde quanto mais perto da subestação mas apto é a área para instalação de complexos eólicos. Nos centro urbanos a lógica foi

a mesma, por meio da distância euclidiana gerada pode-se determinar que quanto mais próximo mais apta era a área para instalação dos parques.

#### **5.2.6 Modelo digital de elevação do terreno**

Os modelos digitais de elevação do terreno (MDE) do sensor ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection) foram obtidos no banco de dados da U. S. Geological Survey (USGS, 2013), datados de setembro de 2012. Foi criado um mosaico do mesmo para contemplar toda a área de estudo, gerando um MDE de toda a área proposta.

Posteriormente foi gerada a declividade no software ArcGIS® por meio da ferramenta *slope*. A fim de eliminar as áreas impróprias para instalação de complexos eólicos, ou seja, declividades maiores do que 30° foi imposto um critério condicional, o qual gerou uma máscara com as áreas de declividade impróprias. Essa máscara foi subtraída do *raster* original de declividade, eliminando as áreas impróprias. Esse produto *raster* foi invertido para demonstrar a condição inversa da declividade, onde quanto menor a declividade mais apto está o terreno para implementação de parques eólicos.

#### **5.2.7 Peso dos critérios em função da localização (Curva de decaimento)**

A curva de decaimento é uma função matemática para declarar o decaimento em função da localização, desvenda o quanto o critério reduz seu peso em comparação com os demais critérios. A equação do decaimento (Figura 12) demonstra o quando o critério varia espacialmente, quanto menor a variação espacial, mais baixo será o peso do critério em relação a aplicação do modelo de análise multicritério (Figura 13), ou seja, menor a importância deste critério em relação aos demais.

Figura 12. Fórmula para determinar a variação dos critérios.

$$100\% \cdot e^{-k x} = \text{Valor médio da variável}$$

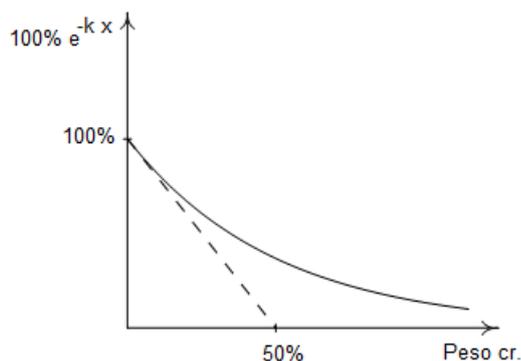
Valor médio da variável = 50%  
k = Constante da variável (decaimento)  
x = Distribuição espacial

Fonte: Adaptado de Triantaphyllou, 2002.

Essa etapa é importante para não definirmos variáveis subjetivamente, para que os valores cheguem mais perto da realidade para a área de estudo. Um exemplo na área de estudo é a declividade, a qual não varia muito devido a topografia do terreno ser plana, logo esta terá um peso baixo em relação aos outros critérios que possuem maior variação espacial, obviamente se a variação do critério for importante para implementação de parques eólicos.

No modelo de decaimento atribui-se que um determinado critério varia de forma não linear temporal e/ou espacialmente. Portanto, para cada critério individual é atribuído uma posição de decaimento, onde o peso deste critério decairá à 50% (CÂMARA, 2000). A rapidez da suavização do critério dependerá da constante de decaimento “k” (Figura 13).

Figura 13. Curva de decaimento do critério em função do peso.



Fonte: O autor, 2014.

### 5.2.8 Modelos de análise hierárquica multicritério

Conforme mostrado no organograma metodológico (Figura 7) todos os critérios foram normalizados e multiplicados uma vez pelo seu peso da tabela de cruzamento (*Crosstab*); e outra pelo peso estabelecido pelo decaimento do critério

(Figura 14). Para gerar os modelos computacionais utilizou-se o software ERDAS IMAGINE 2013®, neste os produtos das multiplicações pelos pesos da tabela de cruzamento e do decaimento foram cruzados, gerando o resultado final da pesquisa.

Figura 14. Multiplicação dos pesos com o critério (AHP).

$$Probabil. = \frac{(critério_A \times peso_A + critério_B \times peso_B + \dots + critério_n \times peso_n)}{(peso_A + peso_B + \dots + peso_n)}$$

Fonte: Adaptado de Saaty, 2008.

### **5.2.9 Validação do modelo pelo índice Kappa**

Com o intuito de validar a acurácia do modelo de análise hierárquica multicriterial, buscou-se um índice para estimar a concordância estatística entre diferentes métodos e aferir a exatidão do estudo analítico. Para a validação utilizando o coeficiente Kappa ( $\kappa$ ), foi necessário a localização geográfica dos parques eólicos instalados na área de estudo e a provável localização dos parques com licença. Foram considerados nesse estudo os parques com licença prévia (LP), licença de instalação (LI) e licença de operação (LO), conforme o banco de dados do órgão responsável por licenciar essa atividade no Rio Grande do Sul (FEPAM, 2014).

Por meio de uma consulta genérica no banco de dados dessa instituição, pode-se avaliar todos os empreendimentos em processo de licenciamento nos municípios da área de estudo. Consultados um à um os arquivos continham informações sobre a etapa de licenciamento. Quando o empreendimento possuía uma LP, LI ou LO constava nesse documento as coordenadas geográficas dos aerogeradores e/ou dos vértices dos polígonos que totalizavam a área ocupada pelo parque.

Todos os parques com LP, LI e LO foram separados e importados suas coordenadas para um sistema de informação geográfica (SIG), onde foram considerados como áreas ideais para a atividade eólica, sendo então o método para comparação e validação das áreas propostas pelo modelo multicriterial. Considera-se que quanto melhor a qualidade do mapa temático produzido, maior será a diferença entre ele e um mapa temático produzido de maneira aleatória (CENTENO, 2004). A diferença pode ser mediada pelo coeficiente Kappa ( $\kappa$ ), proposto por Cohen (1960).

$$k = \frac{N * \sum_{i=1}^M M(i, i) - \sum_{i=1}^M SL(i) * SC(i)}{N^2 - \sum SL(i) * SC(i)} \quad (2)$$

Onde 'N' representa o número de pixels de verificação e 'M' o número de classes. Quanto maior o valor do índice Kappa melhor será o resultado do modelo, tal como consta na Tabela 4 de relação entre o índice e o desempenho proposta por Landis e Koch (1977) e adaptada por Moreira (2001).

Tabela 4. Relação entre o índice Kappa e o desempenho.

<b>Índice Kappa</b>	<b>Desempenho</b>
< 0	Péssimo
0 < κ ≤ 0,2	Ruim
0,2 < κ ≤ 0,4	Razoável
0,4 < κ ≤ 0,6	Bom
0,6 < κ ≤ 0,8	Muito bom
0,8 < κ ≤ 1,0	excelente

Fonte: Adaptado de Moreira, 2001.

### **5.2.10 Cenários e mapas temáticos**

Nesta etapa foram gerados cenários demonstrando o índice de aptidão e de restrição na área de estudo de acordo com as variáveis e as localidades para implementação de parques eólicos. Não obstante, foram criados mapas temáticos em função de melhor representação das áreas mais aptas de acordo com os critérios adotados nos modelos para diferentes cenários.

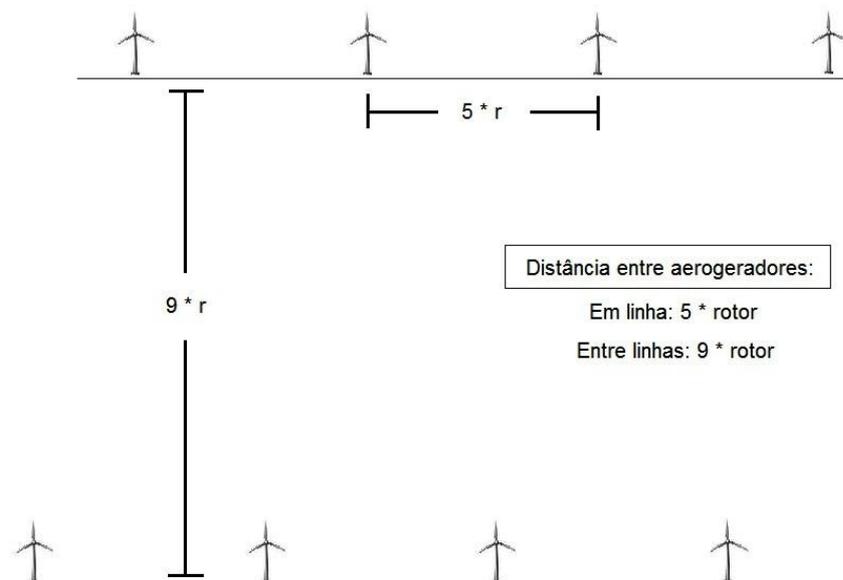
### **5.2.11 Estimativa da capacidade de suporte do ambiente**

Com propósito de aferir a capacidade de suporte do ambiente em relação a implementação de energia eólica, foi estimado uma relação entre aerogerador e área ocupada por esse. Segundo Castro (2007), o acúmulo de aerogeradores pode ocasionar o efeito esteira entre as máquinas, sendo prudente o posicionamento desses de acordo com a potência, tamanho e velocidade das pás das turbinas eólicas. O espaçamento mais frequente, e tido como base nesta pesquisa, é de três a cinco vezes o diâmetro do rotor da máquina instalada na linha do parque e de cinco a nove vezes o tamanho do rotor entre as linhas de instalação do parque (DWIA, 2003).

Para aplicação nesse estudo foi considerado uma distância entre os aerogeradores de cinco vezes o diâmetro do rotor entre as turbinas em linha, e nove vezes o diâmetro do rotor entre as linhas do parque (Figura 15). Nota-se que as distâncias consideradas, foram a maior possível diante do aconselhável pelo autor supracitado.

Os aerogeradores considerados para o calculo da capacidade de suporte tinham as mesmas dimensões e potência que os dos parques eólicos de Osório. Onde cada aerogerador tem uma potência aproximada de 2 MW, altura do rotor de 100 metros e o diâmetro das pás desse é de 70 metros (VENTOS DO SUL ENERGIA, 2014).

Figura 15. Distância dentre aerogeradores em um parque eólico.



Fonte: Adaptado de DWIA, 2003.

### **5.2.12 Cálculo do potencial eólico instalado e produção estimada**

No calculo do potencial eólico instalado e da produção estimada para um ano em toda região considerada como apta, usou-se as dimensões e características dos aerogeradores instalados nos parques eólicos Ventos do Sul no município de Osório, Rio Grande do Sul (Tabela 5). Para o cálculo de potencial instalado na área apta de acordo com a capacidade de suporte, foi aumentado em duas vezes o número de aerogeradores suportados na região, devido a ser considerado cada

aerogerador com 2 MW, tendo assim o potencial total que pode vir a ser instalado na região de acordo com o cenário.

Tabela 5. Dados técnicos do projeto Ventos do Sul Energia, parques eólicos de Osório.

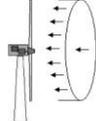
<b>Aerogeradores</b>	<b>Características</b>
Altura do rotor	100 m
Velocidade do rotor	10 - 22 r.p.m.
Diâmetro do rotor	70 m
Peso total do aerogerador	915 ton.
Área de varredura	3960 m <sup>2</sup>
Número de máquinas	75
Potencial total	150 MW
Produção estimada	425 GW/ano

Fonte: Ventos do Sul Energia, 2014.

Para realizar o cálculo da produção total estimada por ano, tem que se levar em consideração que a energia eólica é a energia cinética disponível nas massas de ar em movimento, sendo a energia transformada em eletricidade na conversão dessa em energia mecânica durante as rotações nas pás dos aerogeradores. Sendo que a energia cinética efetiva considera a massa ( $m$ ) de ar e a velocidade ( $v$ ) (3).

$$E_{cin.efet.} = \frac{1}{2} (m * v^2) \quad (3)$$

Portanto, para aferir a produção estimada da energia eólica nas regiões aptas da área de estudo, foram considerados a densidade do ar ( $\rho$ ), a área de varredura do rotor ( $A_{var}$ ) e a velocidade na equação (4), sendo essa em um tempo ( $t$ ) de 1 segundo. A potência disponível a uma velocidade ( $v$ ) constante que atravessa uma seção plana transversal ( $A_{var} m^2$ ) do rotor de uma turbina é calculada pela razão entre o trabalho ( $W$ ) e o intervalo de tempo (BURTON *et al.*, 2001). Como o trabalho é igual a energia cinética disponível, tem-se:

$$E_{cin.efet.} = \frac{1}{2} (\rho_{ar} * A_{var}) v^3 \quad (4)$$


Como o intuito foi gerar a energia produzida em um ano, foi multiplicado o resultado da energia cinética efetiva em um segundo (4) pelo tempo de um ano em segundos ( $31,536 * 10^6$ ). Para eventuais comparações, os resultados foram

transformados de Watts ( $W$ ) para Gigawatts ( $GW$ ) e Terawatts ( $TW$ ), fazendo a razão entre o resultado em  $W$  por  $10^9$  para  $GW$  e  $10^{12}$  para  $TW$ .

A equação (4) determina a potência disponível do vento na área de incidência sem considerar a turbina do aerogerador. Portanto, para considerar a área de varredura do aerogerador e estimar a produção eólica de toda área considerada como apta, foi multiplicada a área de varredura do aerogerador ( $3960 \text{ m}^2$ ) pelo número de aerogeradores considerados na capacidade de suporte, obtendo-se assim a área de varredura total da região estudada.

Posteriormente foi realizada uma equivalência, onde o resultante da equação (4) era a energia cinética efetiva em  $1\text{m}^2$ . Desse modo, foi extrapolado esse valor para a área de varredura total calculada. Por fim o valor da energia potencial a ser produzida foi transformada para  $TWh/a$  e  $GWh/a$ , a fim de realizar uma comparação energética com o atlas de energia elétrica do Brasil (ANEEL, 2002), multiplicando esse valor pela eficiência apontada pelo mesmo atlas.

## **6. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **6.1 Banco de dados cartográfico / mapa de classes**

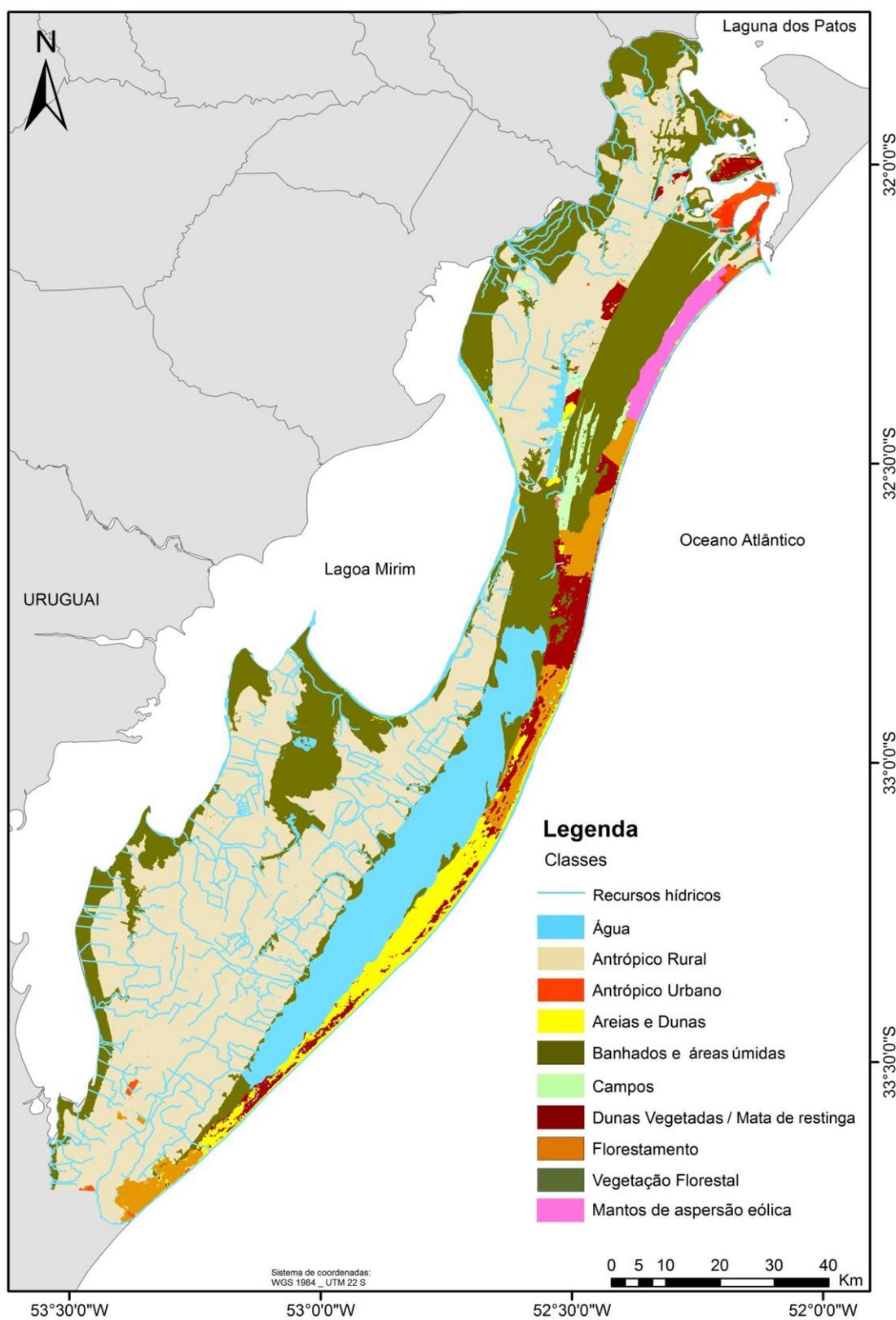
A geração de um banco de dados cartográfico a partir da classificação supervisionada de imagens do sensor TM / Landsat 5 (Figura 16), serviu de base para aplicação dos critérios de restrição legal e ambiental vigentes por legislação. Além disso, poderá servir como embasamento de eventuais pesquisas realizadas na área de estudo voltados para o uso e ocupação do solo, bem como para abordagens relativas aos municípios de Rio Grande, Santa Vitória do Palmar e Chuí.

Como citado na descrição dos métodos, a classificação distinguiu nove classes (Figura 17), sendo algumas destas validadas de acordo com o banco de dados da FEPAM. Com a classificação foi possível diferenciar as classes relevantes para o estudo de análise locacional, podendo gerar através dessas, as zonas de restrições legais e ambientais para parques eólicos. A classe de florestamento pode ser considerada como um critério impeditivo, tendo custo de oportunidade alto, devido a formação de uma barreira para a incidência do vento, porém não é restritivo legalmente e ambientalmente restritivo. As classes de dunas e areias e de dunas vegetadas com mata de restinga foram consideradas nesta pesquisa como áreas de preservação permanente (APP), entretanto pode ocorrer nessas zonas algum equívoco na diferenciação da areia com dunas, pois áreas de areia considerada como planície de deflação não são protegidas por lei. Apenas areia consideradas como dunas na sua forma são consideradas APP. A divergência dos dados entre as diferentes classes deve-se pela interpretação espacial, e pelo fato de não validar em campo a assinatura da classe, devido ao local ser inacessível por terra. No entanto, não comprometendo o resultado do banco de dados para as análises desta pesquisa.

As áreas consideradas como úmidas e de banhados englobam a unidade de conservação de proteção integral da natureza, a Estação Ecológica do Taim (delimitação do decreto de 1986) e entre outros banhados de relevante importância na região, tal como o banhado do maçarico. Essa classe, validade de acordo com os dados obtidos junto ao banco de dados da FEPAM, são as mais importantes na região, devido a importância na conservação da biodiversidade da biota, principalmente a avifauna.

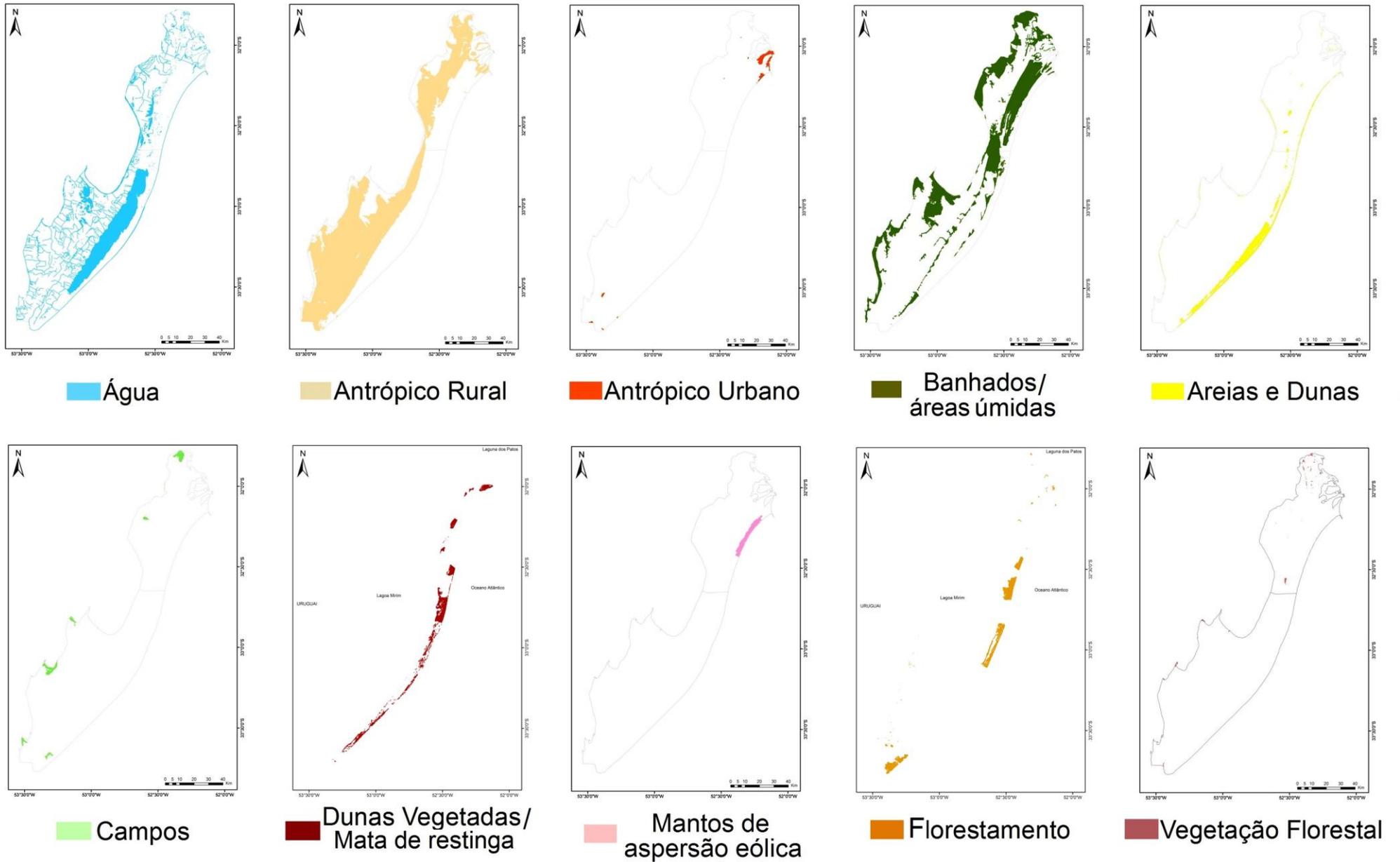
A partir das classes de água, recursos hídricos, áreas urbanas pode-se gerar as zonas de distâncias previstas por lei, e com os limites das classes de áreas úmidas e banhados, areais e dunas, dunas vegetadas com mata de restinga e vegetação florestal foi restrito o uso dessa área para a atividade de obtenção de energia eólica. As áreas de campo, reflorestamento, antrópico rural foram consideradas como aptas a receber complexos eólicos.

Figura 16. Mapa temático de classes do uso e ocupação do solo.



Fonte: O autor, 2014.

Figura 17. Miniaturas com as classes separadas.



Fonte: O autor, 2014.

## 6.2 Mapas de aptidão de vento sem restrições ambientais e legais

Evidentemente, o parâmetro de maior relevância para a instalação e funcionamento desse tipo de empreendimento é o vento, elemento motriz para os parques eólicos. Porém, existe uma deficiência quanto à aquisição desses dados em regiões com difícil acesso e/ou sem a cobertura de estações meteorológicas de campo. O estudo de dados de vento com amplitude nacional mais confiável está presente no mapa eólico do Brasil de Amarante *et al.* (2001), esses são baseados em estações climatológicas e meteorológicas, as quais estão distribuídas heterogeneamente no país.

Com o crescente interesse no aproveitamento da energia eólica na região e no país, tem-se verificado atualmente um esforço para caracterização do vento no território brasileiro. Vários órgãos governamentais, empresas privadas e instituições de pesquisa têm monitorado a caracterização desta forma de energia, apresentando estudos de caso do potencial eólico em locais apropriados para o aproveitamento do vento. Estes estudos vem contribuindo para a caracterização do escoamento atmosférico em locais específicos e o melhor entendimento do potencial eólico de um certo local. No entanto, os resultados obtidos apresentam um caráter pontual, restringidos a confiabilidade de dimensões reduzidas. Apesar desses poderem ser extrapolados para toda a superfície terrestre, a exatidão e a confiabilidade dos mesmos tendem a ser muito gerais e/ou pontuais, não permitindo o mapeamento desse recurso energético para uma região de macroescala (*e. g.* totalidade da área de estudo).

Portanto, a aquisição sistemática dos dados dessa natureza podem não ser precisos, devido a extrapolação e constante mudança da variável vento em pequenas distâncias, o que acaba por comprometer a análise locacional para aerogeradores. Devido aos fatos mencionados, os dados de vento obtidos no presente trabalho consideram uma média de 64 anos de dados analisados do projeto Reanalysis, tal como mencionado na descrição dos métodos desse trabalho. A aplicação de dados com essa temporalidade permite uma maior confiabilidade nos resultados, porém também pode influenciar o mesmo devido a períodos extremos como El Niño e La Niña.

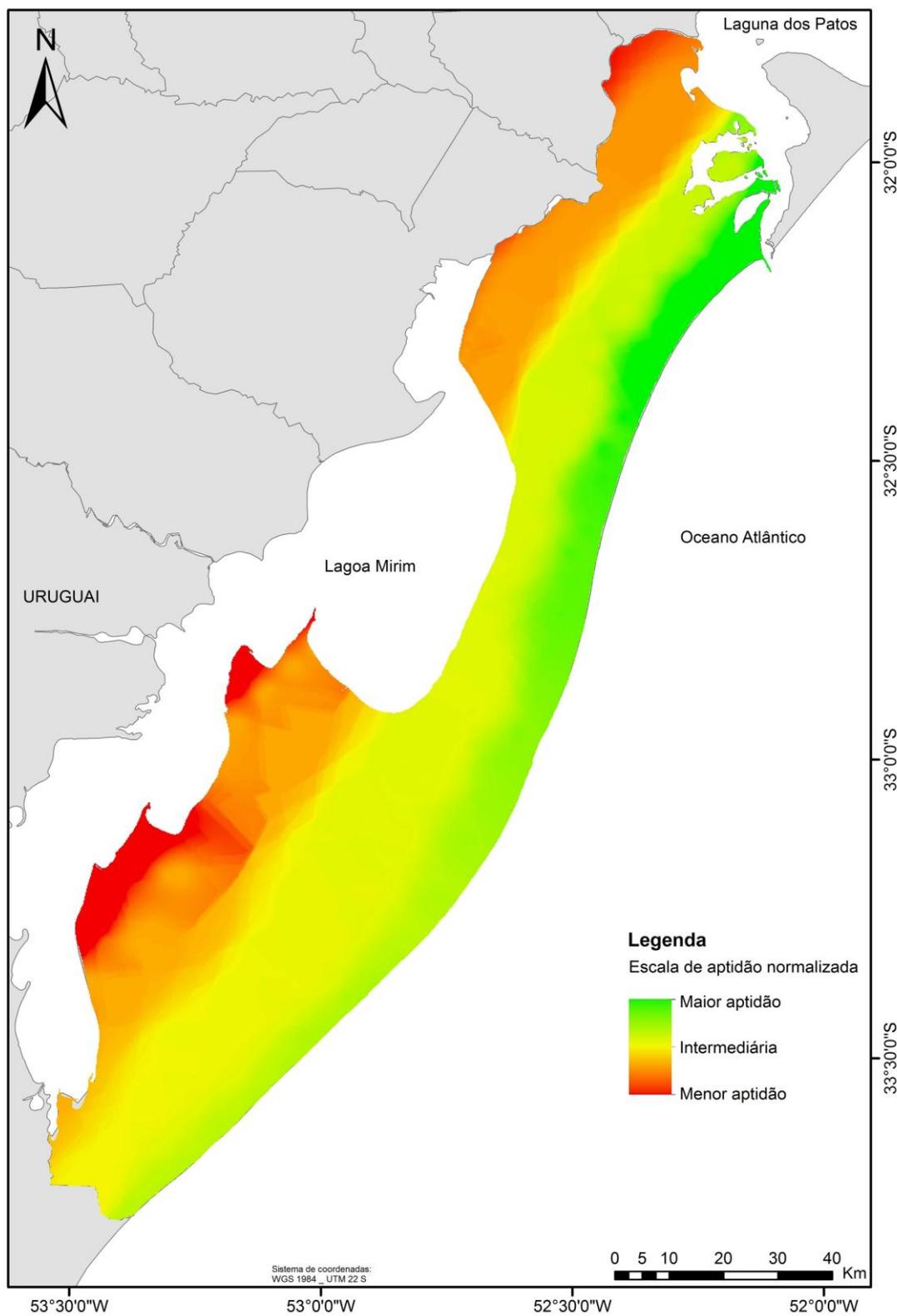
O resultado representado em forma de mapa de vento da região sul da planície costeira do Rio Grande do Sul (Figura 18) expressa o modelo de análise hierárquica multicritério gerado por meio dos dados de intensidade do vento e energia cinética eólica. Neste modelo foram atribuídos os pesos para os critérios na tabela de cruzamento e na curva de decaimento, tal como para as outras análises. Entretanto, não foram considerados nenhum outro critério, nem mesmo o de restrição de áreas de proteção permanente ou outras restrições legais e ambientais.

O mapa de vento (Figura 18) demonstra a variação das componentes zonal e meridional, através das quais foram geradas as médias dos 64 anos de dados da intensidade do vento e energia cinética eólica. A escala no mapa esta normalizada de 0 a 100% e não pode ser comparada com outras áreas, se utilizada a escala normalizada. A análise destas distribuições de probabilidade nos exhibe as áreas mais propensas instalação de aerogeradores. Estas áreas de maior probabilidade localizam-se acompanhando a faixa de praia, beneficiando toda as áreas mais próximas do oceano atlântico. A mudança na escala de coloração (e. g. mudança brusca de cor do verde para o amarelo) não significa uma quebra de classe, e sim uma mudança suave nos valores de probabilidade.

A área leste (faixa de praia) e a zona norte da área de estudo cumprem de forma mais efetiva as zonas aptas para instalação de parques eólicos. Estes valores se justificam pelo fato das áreas de maior probabilidade compreender as regiões de maior intensidade, velocidade e incidência do vento. Nota-se que o gradiente de porcentagem segue o afastamento do oceano atlântico, quanto mais afastado menos apta é a área, no entanto é imprescindível ressaltar que as áreas de coloração mais quentes não são áreas ruins para a atividade eólica, e sim áreas com menor aptidão de acordo com os critérios quando comparadas com toda a área de estudo.

A diferença na temperatura entre massas de ar implica diferenças de densidade, sendo o ar tropical menos denso que o ar polar. Devido a ação da força da gravidade o ar tropical tenderá a deslocar-se para os polos e para cima, enquanto que o ar polar tenderá a deslocar-se para o Equador e para baixo. Desta forma pode-se explicar o modelo de subida do ar quente e descida de ar frio (Cook, 1985). Além destes efeitos macro-meteorológicos, diferenças de temperatura entre frentes meteorológicas geram gradientes de pressão e originam ventos de menor escala.

Figura 18. Modelagem do vento a partir dos pesos atribuídos no AHP (intensidade do vento e energia cinética).



Fonte: O autor, 2014.

### **6.3 Variação dos critérios nos modelos AHP**

A fim de evitar a simplificação da interpretação dos dados na adaptação das situações complexas aos modelos quantitativos, foram empregados modelos que incluíram e mediram os fatores importantes ao processo de tomada de decisão. Seja esses critérios mensuráveis, tangíveis ou intangíveis, considerando as diferenças reais de cada um. Deve ser considerada a variação da importância do mesmo perante pesos de comparação entre critérios e de pesos pela variação espacial do mesmo, chegando mais perto de uma análise real.

Segundo Saaty (1991), os valores (pesos) atribuídos para diferentes critérios em uma sociedade complexa exigem métodos que permitam avaliar equivalências entre economia, qualidade ambiental, saúde e entidades similares. O modelo proposto por Saaty (1991), permite a tomada de decisão baseada em critérios qualitativos e quantitativos, ao mesmo tempo que admite pontos de vista diferenciados e contraditórios.

A estruturação do problema complexo numa hierarquia não torna rígida a interação, nem tão pouco significa que os níveis superiores são realmente mais importantes que os inferiores. Tal dinamismo circular (um nível alimentando o outro e sendo alimentado por outros) permite uma flexibilidade necessária para se trabalhar a complexidade do problema em questão. Em suma, os procedimentos do modelo permitem incorporar os valores perceptivos dos tomadores de decisão e resolver pontos de vista conflituosos entre eles. A sua flexibilidade e adaptação tornaram-se características essenciais para apoiar decisões.

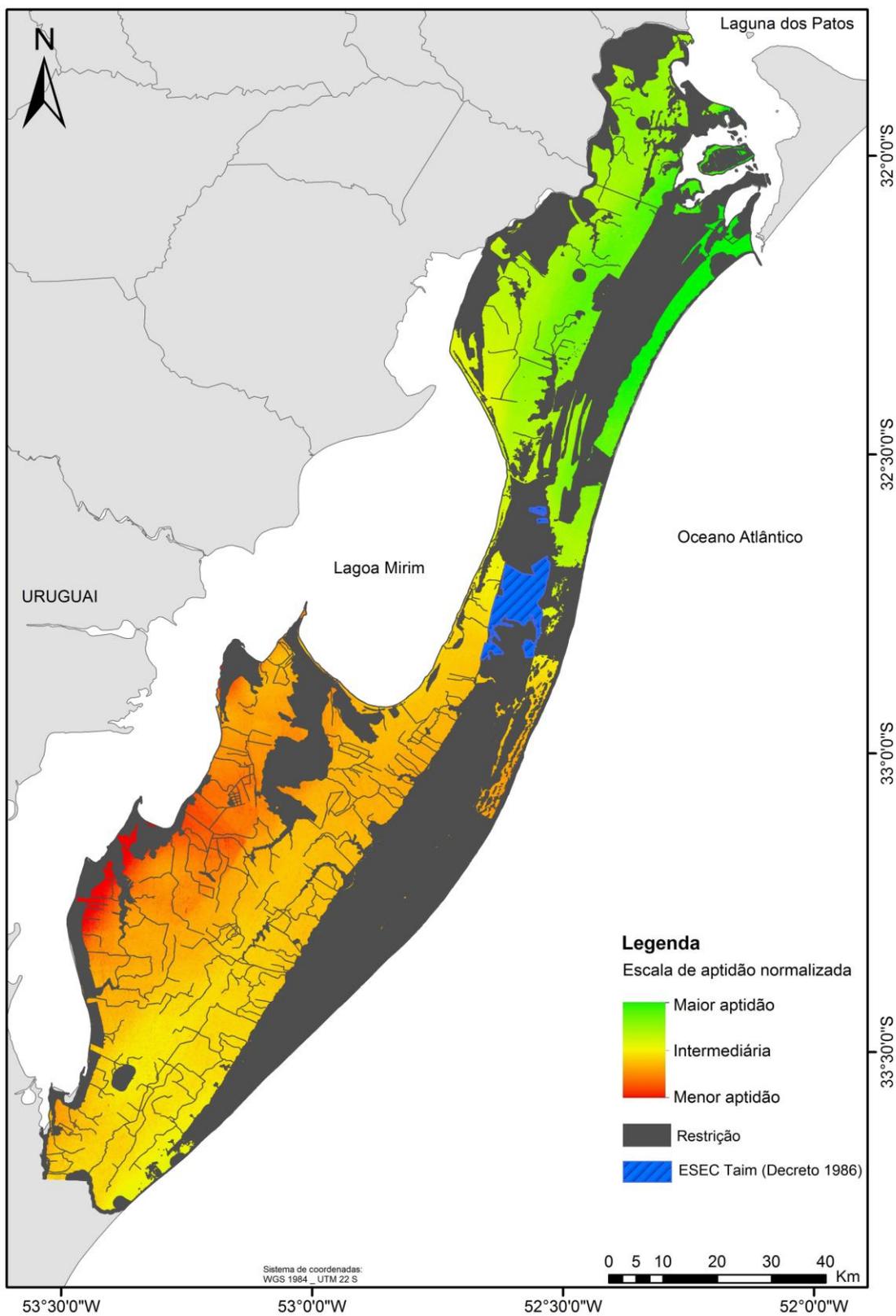
Pretende-se no trabalho sugerir um método que admita limitações e a complexidade do problema, operando de forma mais dinâmica. Para tal fim, os critérios empregados no modelo de análise locacional foram: a distância de vias de acesso consolidadas, onde considera-se que quanto mais próximo a estas mais apto é a área para implementação de aerogeradores; a distância da subestação conectada ao sistema de energia SIN (Sistema Interligado Nacional), que leva em consideração a proximidade da mesma como benefício em vista da dissipação da energia de acordo com a distância percorrida pelos cabos de alta tensão; a distância dos centros urbanos da área de estudo, onde considera-se mais apto as regiões mais próximas as zonas urbanas devido a perda de energia em função da distância;

a declividade que quanto mais plana melhor para instalação de torres eólicas; a intensidade do vento que mede a variação do fluxo de energia no tempo, basicamente quanto maior a intensidade maior o fluxo de energia pelo espaço; a energia cinética eólica, a qual representa a energia máxima disponível em determinado ponto, determinando o potencial eólico de certa localidade, portanto quanto maior energia cinética, melhor o local em função da geração de energia; e por fim os critérios de restrição, os quais unidos geraram uma máscara de restrição para esse tipo de atividade.

Com o intuito de comparar as mudanças nos pesos atribuídos para cada critério e testar modelos com diferentes critérios, foi gerado um "mapa neutro" que considerou todos os critérios como tendo pesos iguais (Figura 19). Os mapas de modelos de análise locacional que seguem são predispostos escala de cores variando do verde ao vermelho intenso, facilitando a visualização da escala de aptidão e a compreensão, demonstrando não os valores em porcentagem, mas sim o grau de aptidão no local. É importante salientar que a escala utilizada na área de estudo é apenas local, estando normalizada de 0 a 100 por cento, portanto não considera áreas adjacentes à região de estudo.

No mapa, as cores quentes representam menor aptidão e as cores frias maior aptidão, a coloração cinza escura representa as áreas de restrição legal e ambiental, destaca-se também a delimitação da Estação Ecológica do Taim (decreto de 1986, vigente por lei) como área de restrição, em todos os mapas que seguem (traçados azuis). A escala de cores foi definida dessa forma baseado no que essas cores representam para um leitor leigo e avançado no dia a dia, demonstrando melhor aptidão nas cores verdes e menor aptidão nas cores vermelhas. Observa-se que as zonas com maior aptidão concentram-se no norte da área de estudo. Isso já era esperado devido aos dados de intensidade de vento e energia cinética eólica demonstrarem, através das médias de componentes zonal e meridional, ser mais altas no município de Rio Grande e em direção a linha de costa. Não obstante, a região norte fica mais próxima das subestações e possui mais vias de acesso consolidadas, favorecendo o modelo.

Figura 19. Mapa considerando todos os critérios com pesos iguais.



Fonte: O autor, 2014.

O mapa que segue (Figura 20) contempla todos os critérios citados anteriormente, onde os pesos atribuídos pela tabela de cruzamento "*Crosstab*" foram ponderados e aplicados em cada variável. O mesmo foi realizado com os pesos relacionados a curva de decaimento (variação espacial do critério em função do peso). Os produtos foram cruzados para geração de um resultado onde levaria em consideração os pesos da tabela "*Crosstab*" e do decaimento. Portanto, os mapas de modelos que seguem foram todos submetidos a esse procedimento.

Considerando o modelo que correlaciona todos os critérios propostos nesta pesquisa, percebe-se que ao comparar com o modelo sem atribuição de pesos com o referido mapa locacional (Figura 20), as áreas com maior aptidão concentram-se ainda no norte da área de estudo, porém essas estão mais evidentes ao leste (oceano atlântico). Também com a aplicação dos pesos nos critérios é evidente a preferência por áreas mais próximas ao oceano atlântico, posto que os critérios com maior peso no modelo são a intensidade do vento e a energia cinética eólica, as quais são mais elevadas na faixa de praia.

Constata-se pela escala de cores que nas áreas aptas para instalação de complexos eólicos, comparando com o modelo com pesos iguais, a maior aptidão está nas áreas próximas a costa, tal como pode-se notar no litoral do município de Santa Vitória do Palmar até o Chuí pela presença de coloração considerada mais fria (tons de verde). Portanto, apesar de os critérios beneficiarem a zona norte - devido a presença da subestação, zonas urbanas e maior presença de vias de acesso como anteriormente comentado - o modelo tendeu a estabelecer como áreas de maior aptidão as zonas mais próximas do oceano atlântico.

Na análise locacional via modelo de decisão hierárquica multicritério podem-se distinguir três fases, a estruturação, o julgamento e a síntese dos resultados, onde a estruturação consiste na obtenção do modelo de decisão hierárquica, no julgamento os critérios são comparados entre si, adentrando na fase de resultados. Partindo dos planos de informação (critérios) foram geradas pesos de probabilidade individual de cada plano de informação.

O mapa de probabilidade de afinidade locacional (Figura 21) foi baseado na correlação de todos os critérios, sendo desconsiderado a energia cinética eólica. O referido resultado leva em consideração os critérios de aptidão e restrição, e perante os dados de vento considera-se somente a intensidade. Observa-se no produto uma gama de variações de probabilidade de aptidão locacional. Os tons mais quentes

representam menor aptidão, enquanto que os tons mais frios maior aptidão para implementação de parques eólicos. Estes valores estão relacionados com o valor do pixel na imagem, o qual é a menor representatividade, tendo neste caso um tamanho equivalente a 30 metros.

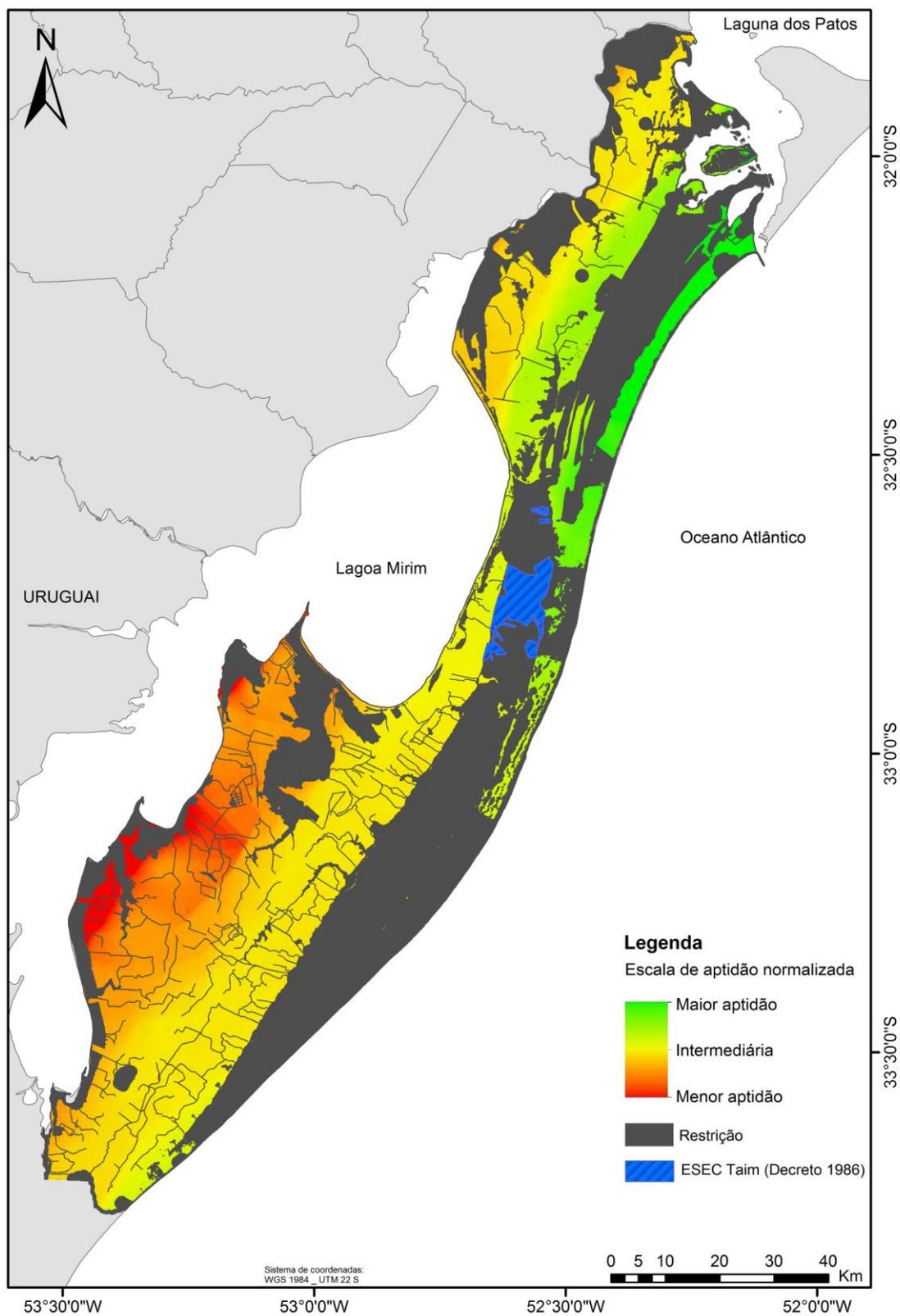
Na Figura 21, atenta-se na questão da maior quantidade de áreas com maior aptidão, comparados com os outros modelos de teste. As zonas com maior aptidão encontram-se, tal como na maioria dos modelos, ao norte da área de estudo e ao leste da mesma, aproximando-se do oceano atlântico. Isso deve-se pelo peso da intensidade do vento ser maior perante aos outros critérios, este critério é muito representativo ao leste da área de estudo e a média geral também expressa uma maior intensidade perto do município de Rio Grande.

A energia eólica varia com a intensidade do vento, que tem em conta os efeitos da velocidade do vento no ambiente circundante. Entretanto, como pode-se notar na Figura 22, o método leva em consideração todos os critérios e desconsidera a intensidade do vento. Todavia, o modelo leva em consideração a energia cinética eólica, representando o quanto de potencial eólico pode ser gerado em um determinado ponto, ou seja, o pico máximo de energia em um ponto em função da intensidade do vento. Portanto, apesar de o modelo não considerar o critério de intensidade do vento diretamente, este é considerado indiretamente através da energia cinética eólica, tal como mostrado no modelo de transformação do vento (Figura 11).

O modelo representado no mapa de aptidão (Figura 22), representa o mais adequado perante análises e comparações dos modelos, pelo motivo de considerar a intensidade do vento indiretamente, como supracitado, fazendo com que a comparação na tabela de cruzamento não atribua um peso alto para os dois critérios (*i.e.* intensidade do vento e energia cinética). Dessa forma se os critérios fossem considerados no modelo, esses dominariam os pesos de relevância, e utilizando apenas a energia cinética o peso seria melhor distribuído entre os critérios, estabelecendo pesos mais justos na análise comparativa.

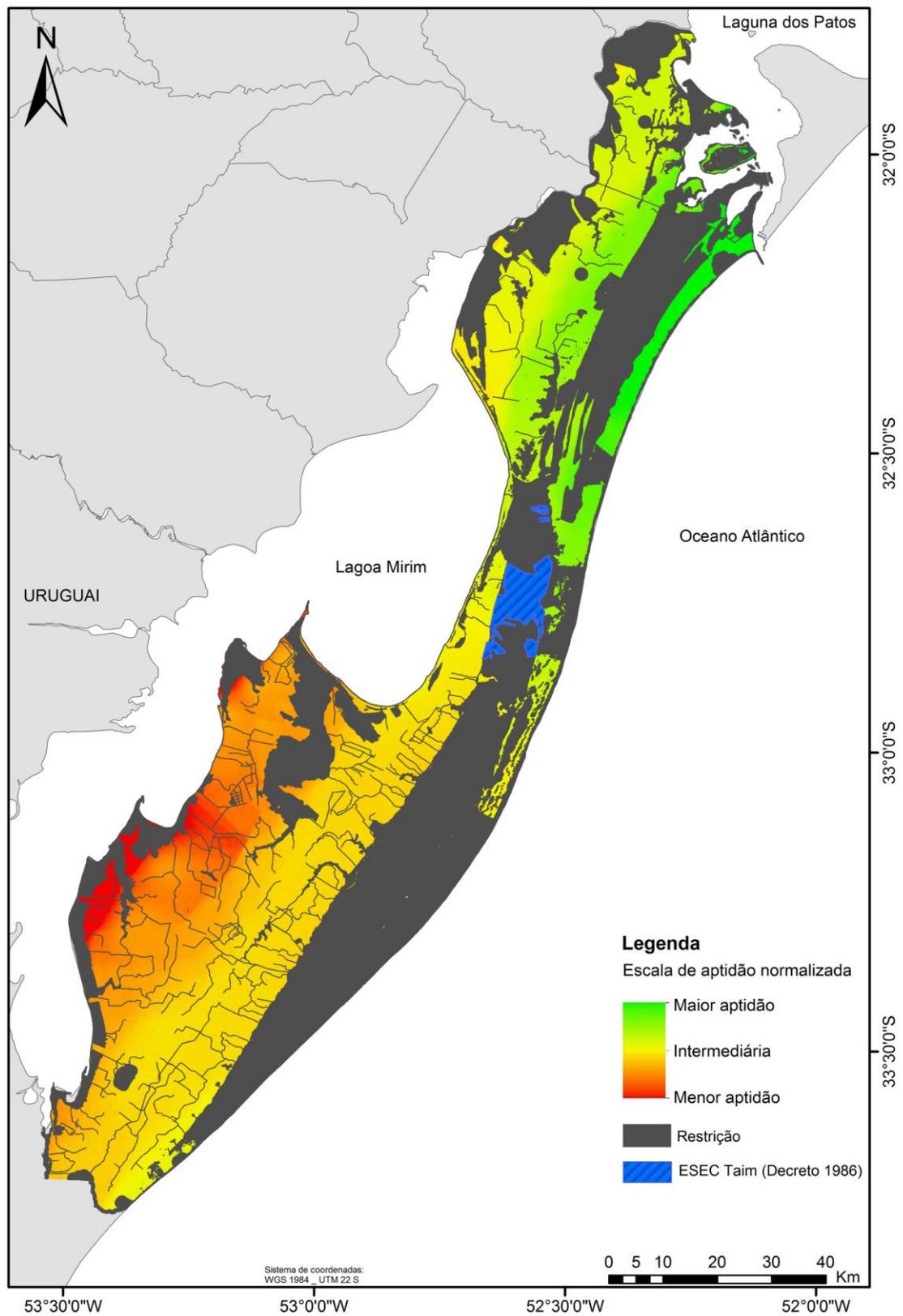
Assim sendo, este resultado representa o mais perto da realidade da região de estudo, considerando as zonas mais aptas para implementação de complexos eólicos. Porém, não significa que o produto esteja validado com realidade, já que o intuito do trabalho é propor uma metodologia e gerar cenários de aptidão para as atividades de energia eólica.

Figura 20. Mapa contemplando todos os critérios.



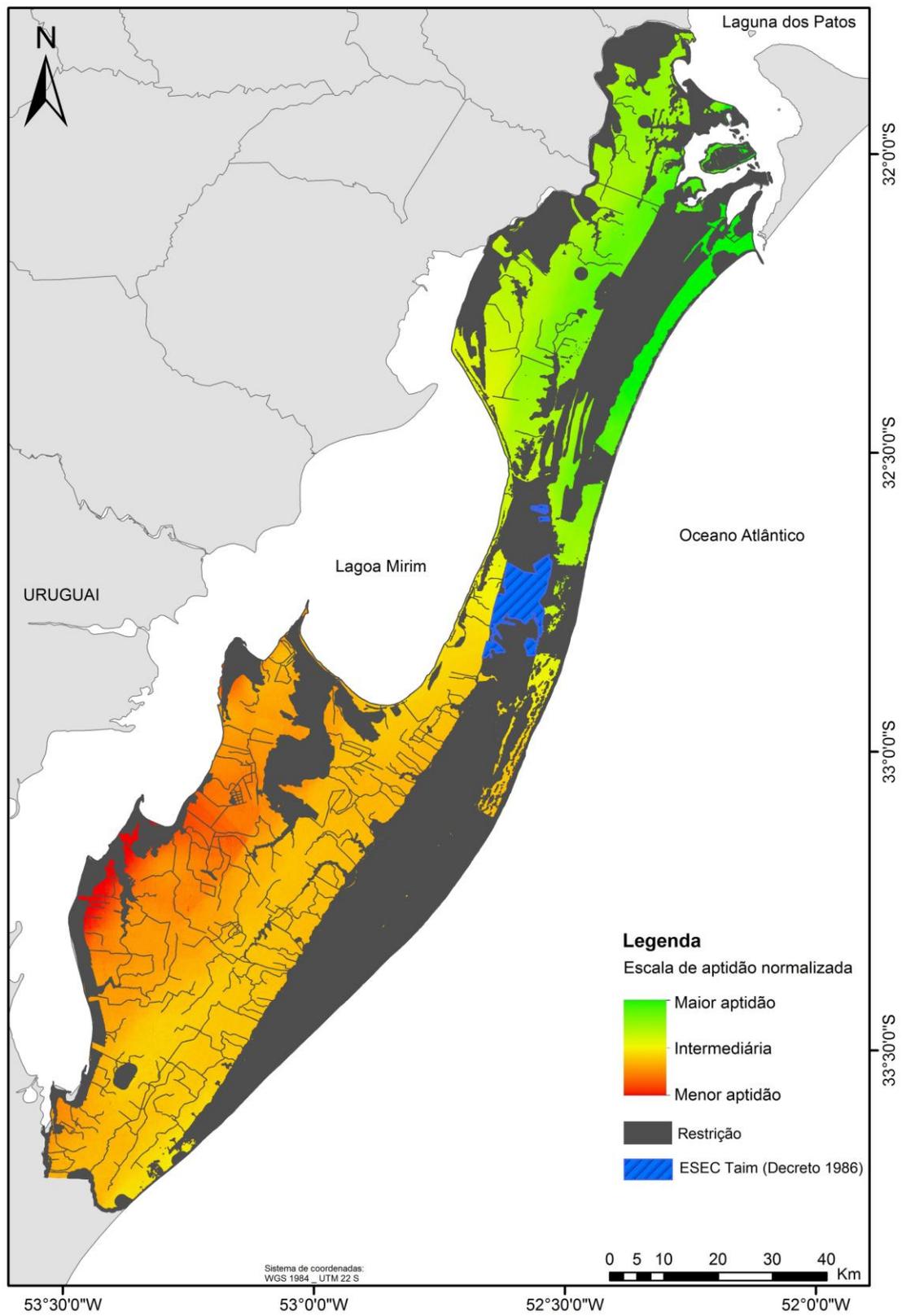
Fonte: O autor, 2014.

Figura 21. Teste de modelo gerado sem considerar a energia cinética eólica.



Fonte: O autor, 2014.

Figura 22. Modelo gerado sem considerar a intensidade do vento.



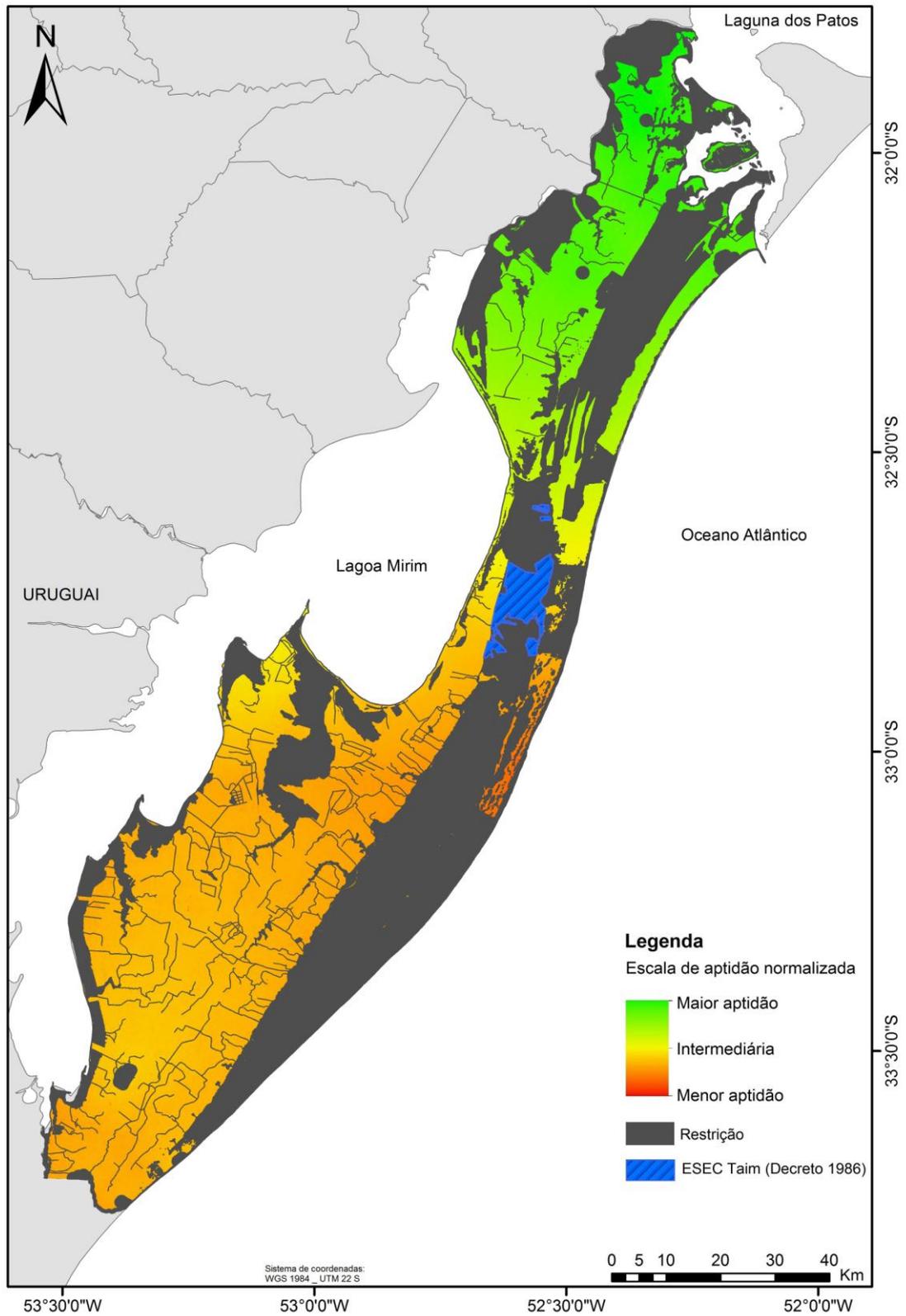
Fonte: O autor, 2014.

Com o intuito de representar espacialmente os critérios de aptidão e restrição sem influência do vento, foi gerado um modelo AHP desconsiderando as variáveis do vento (*i. e.* energia cinética eólica e intensidade do vento) (Figura 23). O propósito de gerar uma análise sem a presença destes dados é comparar este com os demais produtos e analisar até quando o vento predomina perante seu peso alto no modelo.

Tal como nos mapas anteriores, os tons mais frios (tons de verde) representam as áreas mais aptas e estão associados à maiores valores do número digital da imagem, indicando zonas com maior afinidade locacional para implementação da atividade de energia eólica, por meio do cruzamento de critérios associados a normalização de 100 por cento. Os tons mais quentes indicam as áreas menos aptas, já os tons entre o amarelo e verde claro representam valores intermediários dentro da escala, definidos como valores médios para os critérios modelados.

Considerando apenas os critérios de distâncias euclidianas e de restrição, obteve-se a probabilidade total de zonas de aptidão para parques eólicos, dadas pela média de probabilidade (curva de decaimento) dos critérios e pela tabela de cruzamento "*Crosstab*". Resultando em uma espacialização de probabilidade de aptidão na área de estudo. Como demonstrado na Figura 23, a tendência de localização das áreas mais aptas é claramente ao norte da área de estudo, contemplando o município de Rio Grande. Essa tendência deve-se ao passo que: a distância do consumidor é menor, devido a presença de centro urbanos mais consolidados e maiores; a região norte é mais próxima da subestação conectado ao SIN, localizado no município de Pelotas; e no norte há mais vias de acesso consolidadas, beneficiando o modelo que considera que quanto mais próximo a estas melhor aptidão para parques eólicos.

Figura 23. Modelo gerado desconsiderando os dados provenientes do vento (i. e. intensidade do vento e energia cinética eólica).



Fonte: O autor, 2014.

#### **6.4 Comparação entre o mapa de aptidão e os parques com LP, LI e LO**

Para fins de comparação do modelo gerado com a realidade encontrada na região, fez-se o uso do modelo de aptidão gerado sem considerar a intensidade do vento (Figura 22), tido como o de melhor desempenho, tal como discutido anteriormente no subitem 6.2. Uma vez realizada uma consulta genérica no banco de dados da FEPAM, foram predispostos os pontos dos aerogeradores ou dos vértices dos polígonos dos parques com licença prévia (LP), licença de instalação (LI) e licença de operação (LO) dentro de um sistema de informação geográfica (SIG). A consulta no banco de dados desconsiderou o vencimento da licença, uma vez que a intenção da pesquisa é comparar áreas aptas, e as licenças mesmo quando vencidas e não indeferidas consideraram a área sendo apta para instalação.

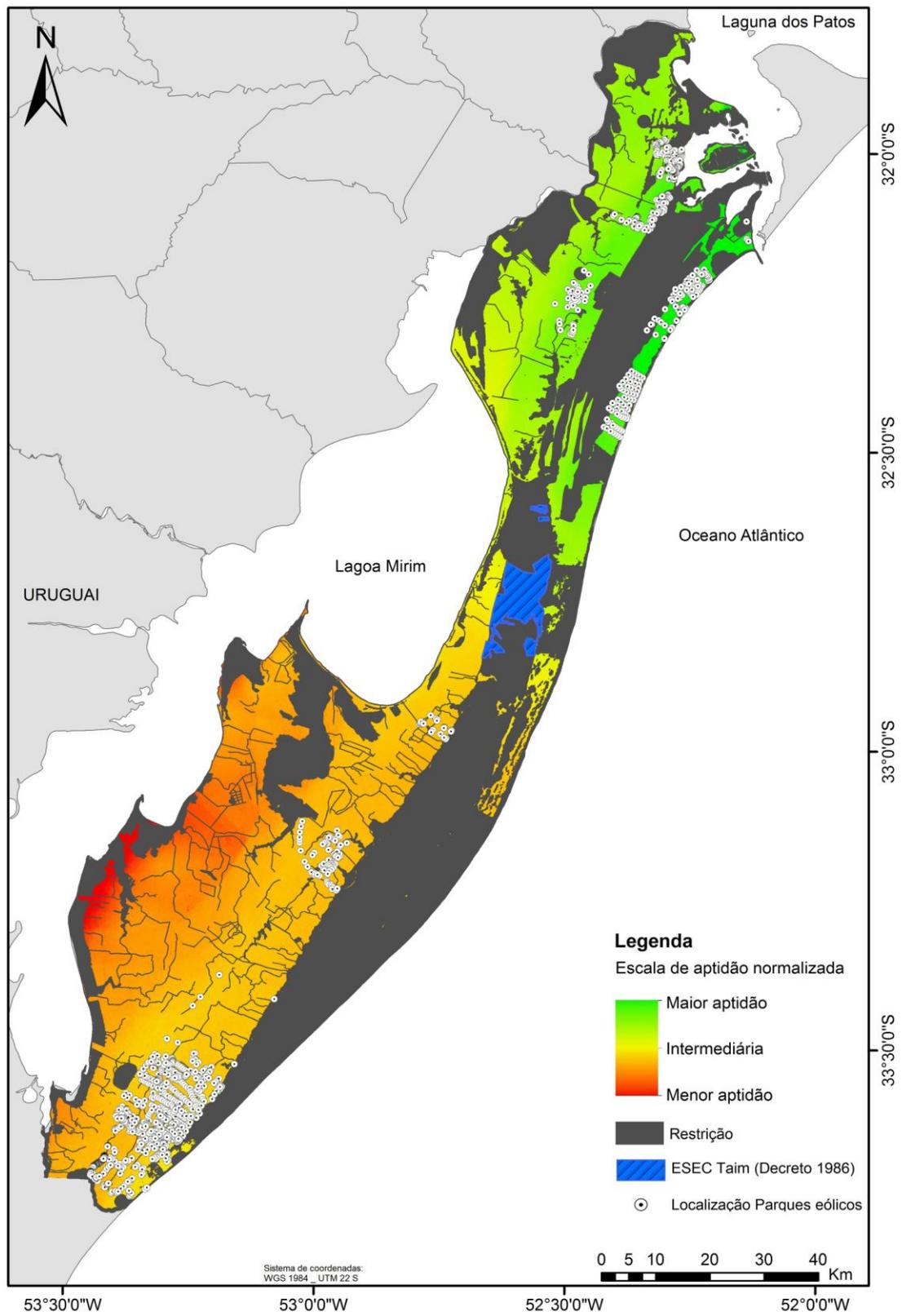
Em comparação com o modelo mencionado, percebe-se que os pontos obtidos no banco de dados encontra-se na sua maioria em zonas consideradas com aptas no modelo. Deve-se considerar que a escala da imagem e predisposição dos pontos podem interferir na análise interpretativa deste mapa estático (Figura 24). Além de a maioria dos pontos estarem em zonas aptas, esses também se localizam nas zonas com maior energia cinética eólica, sendo locais com alto potencial eólico. Também pode-se afirmar pela análise dos dados de vento que essas são zonas de vento mais constante, beneficiando a geração de energia a partir de fonte eólica.

Para os pontos que se localizam em área restritas, não significa que esses estejam inaptos para operação, pois o cenário proposto pode estar desconsiderando algumas aptidão devido a escala de análise.

#### **6.5 Validação do modelo pelo índice Kappa**

Com o propósito de validar o modelo perante índice estatístico, foi aplicado no produto do modelo o coeficiente Kappa, sendo calculado por meio da comparação do mapa de verdade de campo (pontos dos parques com LP, LI e LO na Figura 24) e do mapa de aptidão gerado na trabalho. Foi realizado uma tabulação cruzada e indicando a proporção de casos presentes e/ou ausentes nos mapas. Conforme descrito na metodologia, quanto maior o resultado do índice melhor o resultado do modelo (Tabela 4). O resultado do índice de acurácia foi de 0,80125 (80,125 %), considerado na tabela de relação entre o valor do índice e o desempenho do mesmo como excelente.

Figura 24. Mapa de aptidão com localização dos parques eólicos com LP, LI e LO na área de estudo.



Fonte: O autor, 2014.

## 6.6 Mapa de aptidão com proposta de restrição para rota de aves

Segundo pesquisas (DREWITT *et al.*, 2006; HOTKER *et al.*, 2005) as aves constituem um dos grupos potencialmente mais afetados por parques eólicos. Esta maior sensibilidade reside, fundamentalmente, nos conflitos que se podem gerar durante a fase de exploração, resultantes de uma eventual colisão de aves nos aerogeradores. Os parques eólicos tendem a ser instalados em espaços abertos, o que pode afetar potencialmente os habitats de reprodução e as rotas de aves migratórias (DREWITT *et al.*, 2006).

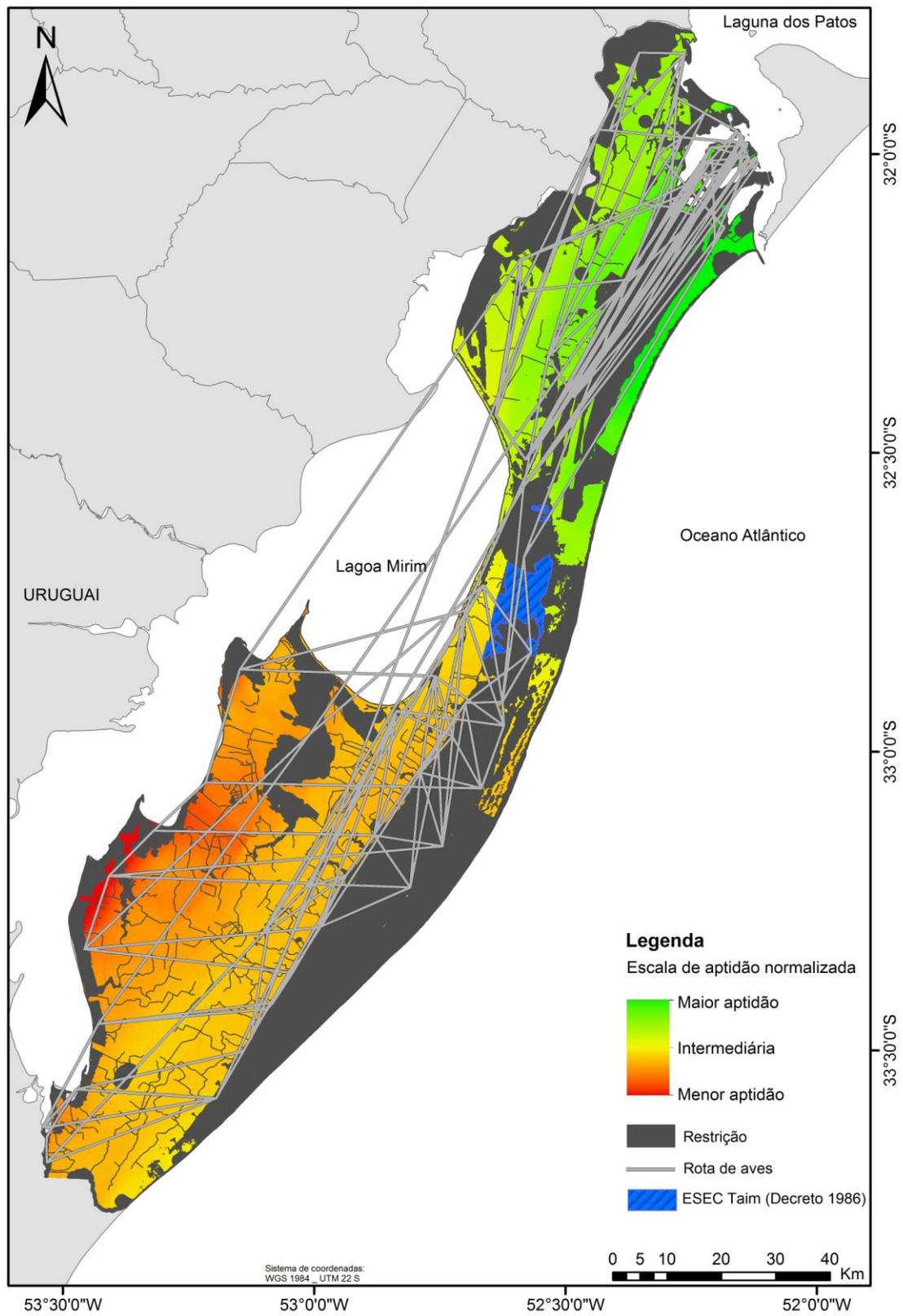
Hotker *et al.* (2005) afirma que os parques eólicos tem efeitos negativos sobre a avifauna. No entanto, ressalta que esse impacto sobre as populações, bem como as perturbações na reprodução, podem ser controlados. Para além destes efeitos, as aves também podem ser afetadas por efeitos secundários como mudanças de gestão da terra ou o abandono do uso agrícola próximo da instalação dos aerogeradores (HOTKER *et al.*, 2005).

Várias pesquisas e trabalhos relacionados aos impactos dos aerogeradores em aves já foram realizados, tal como consta na revisão bibliográfica deste trabalho. O método proposto no presente trabalho é original, à vista disto pretende ser primordial na promoção de novas pesquisas diante à problemática, já que é um modelo experimental com caráter de teste.

Visando preservar os habitats de reprodução e as rotas das aves, é proposto um mapa de rotas de aves junto com as restrições que englobam as áreas onde a maioria das aves nidificam (Figura 25). Foram gerados corredores de 500 metros de largura para a migração das aves, considerando este como restrição para a atividade eólica. Na Figura 25 consta o mapa de aptidão mais adequado (*i. e.* sem a intensidade do vento) junto com os critérios de restrição, contando com as rotas das aves, as quais estão representadas por linhas retilíneas com bordas cinza e interior branco, tal como consta na legenda. É evidente a maior quantidade de corredores perto de áreas de banhados e áreas úmidas devido a estas serem geradas a partir do centroide das mesmas. Na presença de vários corredores de migração para as aves, é aconselhado restringir toda a área, devido ao grande número de rotas e áreas propícias para a migração da avifauna.

A metodologia empregada para gerar corredores de aves não é embasada por lei ou por qualquer pesquisa científica, portanto esse é apenas uma proposta de método para gerar corredores. Ressalta-se ainda que o intuito da pesquisa não é encontrar as áreas ideais para as rotas de aves, mas sim testar os métodos para comprovar a efetividade da metodologia proposta. Apesar de o método propor rotas de aves como restrição, é conveniente todo empreendimento eólico considerar um estudo específico diante das aves e propor corredores dentro do mesmo, já que ocorre além da migração sazonal na região à migração local para alimentação e repouso.

Figura 25. Modelo de aptidão mais adequado, com proposta de restrição para rota de aves (500 m).



Fonte: O autor, 2014.

## 6.7 Restrição condicional para o florestamento

As altas pressões tropicais e polares interferem no regime de ventos e massas de ar no sul do Brasil. O Anticiclone Polar Móvel e o Anticiclone do Atlântico se alteram, pois este por ser de alta pressão proporciona o movimento zonal entre os dois. Definem assim, a circulação de ventos e massas de ar, além do deslocamento de sistemas frontais e linhas de instabilidade (NIMER, 1996; SARILHO, 2003). O Anticiclone do Atlântico domina a influência de vento NE, já o Anticiclone Polar os ventos SW em frentes frias comuns no inverno (MALAVAL, 1923; TOMAZELLI, 1993).

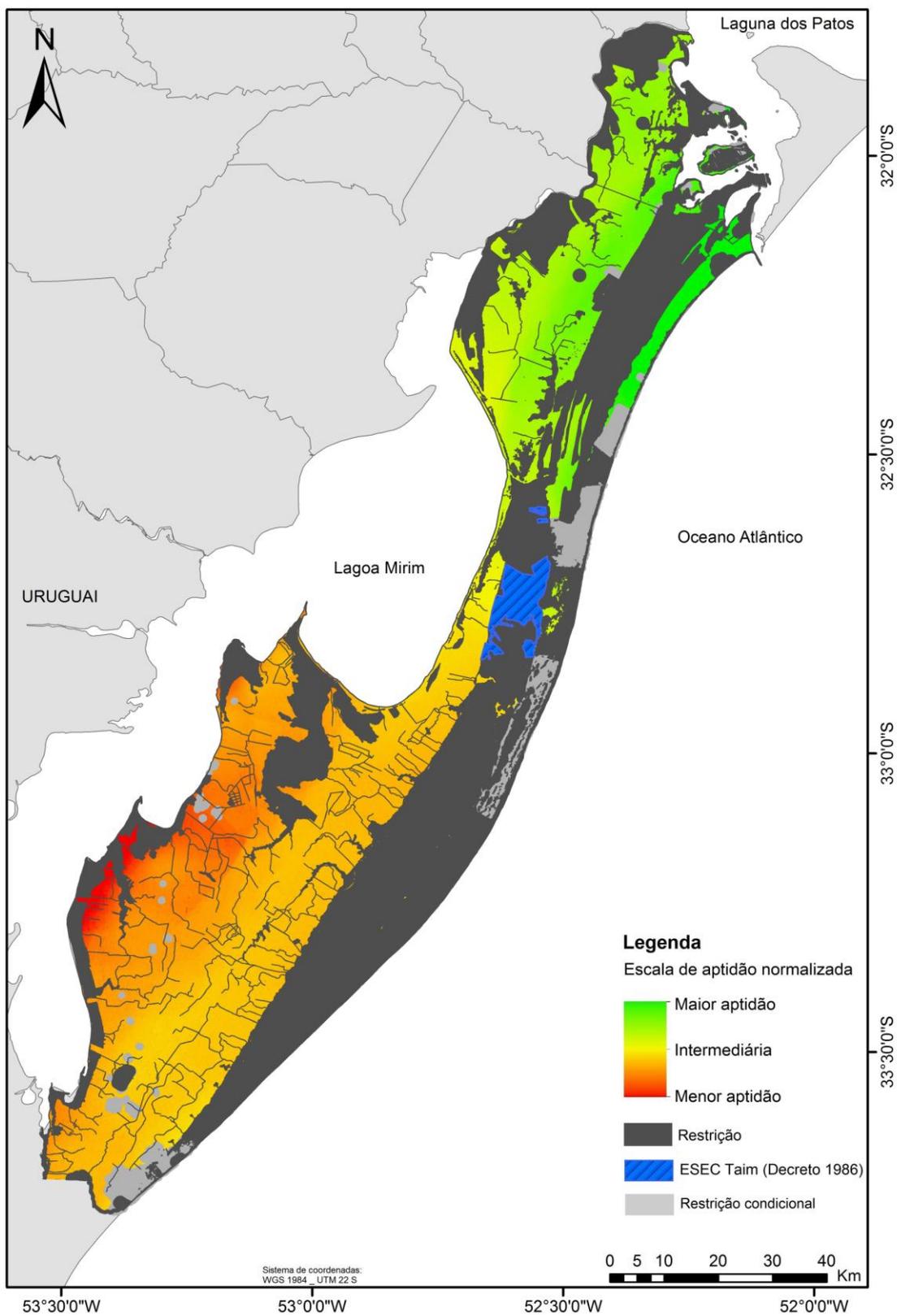
Apesar de o vento ter predominância de direção para nordeste e sudoeste, o mesmo é uma variável, e se analisado em uma escala menor de tempo, varia sua direção para outros sentidos. O florestamento possui altura média de 25 metros, tal como validado pelo autor e descrito nos métodos, sendo esse uma barreira para o vento ocasionando o fenômeno de turbulência. Esse fenômeno prejudica o desempenho dos aerogeradores de um parque eólico, impossibilitando a atividade de um parque eólico.

A turbulência é o resultado do atrito com a superfície terrestre, devido a topografia do terreno, barreiras como árvores, montanhas, vales, prédios e entre outros. As zonas turbulentas tendem a atenuar sua intensidade até se anular por efeitos térmicos que podem causar movimentos verticais de massas de ar resultantes das diferenças de temperatura, originando vórtices de turbulência em larga escala.

Para evitar as zonas de sombreamento (*i. e.* zonas turbulentas), é proposto no trabalho uma restrição condicional para instalação de aerogeradores, onde adaptou-se o método proposto por Forman (1995). Levando em consideração a variação da direção do vento, optou-se por restringir a maior distância proposta pelo autor, ou seja, foi calculada uma zona "tampão" de 25 vezes a altura do florestamento ao entorno das zonas de florestamento (Figura 26). As zonas apontadas como restritas devido a turbulência ocasionada pela barreira do florestamento, encontra-se na cor cinza claro no mapa exposto, tendo uma distância de 625 metros ao entorno do florestamento propriamente dito.

As zonas sugeridas como restrição condicional consideraram as adjacências da barreira, como supracitado e também as próprias zonas de florestamentos. O que indica uma restrição condicional para implementação da atividade eólica de alto custo-oportunidade. Podendo assim haver licenciamento nas áreas apontadas, porém com a condição de eliminar o florestamento exótico.

Figura 26. Proposta de restrição condicional considerando as zonas de florestamento.



Fonte: O autor, 2014.

## 6.8 Cenários propostos

Com o intuito de retratar diferentes perspectivas no que se refere as restrições ambientais e legais na área de estudo, foram gerados dois cenários distintos buscando evidenciar uma visão preservacionista e outra focada no desenvolvimento do setor energético embasado em restrições apenas vigentes por lei e pequenas restrições culturais. Os cenários propostos são denominados de cenário ecodesenvolvimentista (modelo 1) e conservacionista (modelo 2), sendo que os dois consideram as restrições ambientais vigentes por lei.

O cenário ecodesenvolvimentista visou retratar uma preocupação na sustentabilidade da matriz energética nacional, flexibilizando os aspectos de conservação ambiental, patrimonial e cultural com os de desenvolvimento energético de uma Matriz limpa, sem deixar de considerar, no entanto, as restrições ambientais e legais.

No cenário conservacionista foi considerado um enfoque maior na proteção da paisagem, reduzindo impactos na paisagem natural. Considera uma forte proteção ecológica na manutenção do ecossistema, minimizando os efeitos negativos advindos da exploração industrial na área de estudo. O cenário destaca uma perspectiva local da preservação ambiental, possuindo maiores dimensões paisagísticas, ecológicas, cultural e regional.

O ecodesenvolvimento pode ser visto como um processo de desenvolvimento prudente, considerando o meio ambiente, onde se expõem as potencialidades do meio. Evitando o desperdício de recurso natural, e tentando que esses sejam empregados para a satisfação da maioria da sociedade, dada a diversidade ambiental e dos contextos culturais e legais. Já o cenário conservacionista expressa uma ideia de exploração da natureza sem interferir nos processos da mesma, demonstrando que a intervenção antrópica tecnológica pode acontecer, porém com menor intensidade, preservando mais o ambiente.

As diferenças entre os dois cenários propostos esta basicamente relacionadas com restrição nas distâncias relativas dos centros urbanos, das redes viárias e no tamanho total das rotas propostas para aves migratórias. As diferenças entre os modelos constam na Tabela 6, sendo determinadas a fim de distinguir esses cenários.

Tabela 6. Valores das distâncias declaradas como restrição nos dois cenários propostos.

<b>Distâncias relativas</b>	<b>Ecodesenvolvimentista</b>	<b>Conservacionista</b>
<b>Centros urbanos</b>	1 Km	5 Km
<b>Rota de aves (largura total)</b>	500 m	2 Km
<b>Rede viária principal</b> (para cada lado da via)	1 Km	5 Km
<b>Rede viária secundária</b> (para cada lado da via)	250 m	1 Km

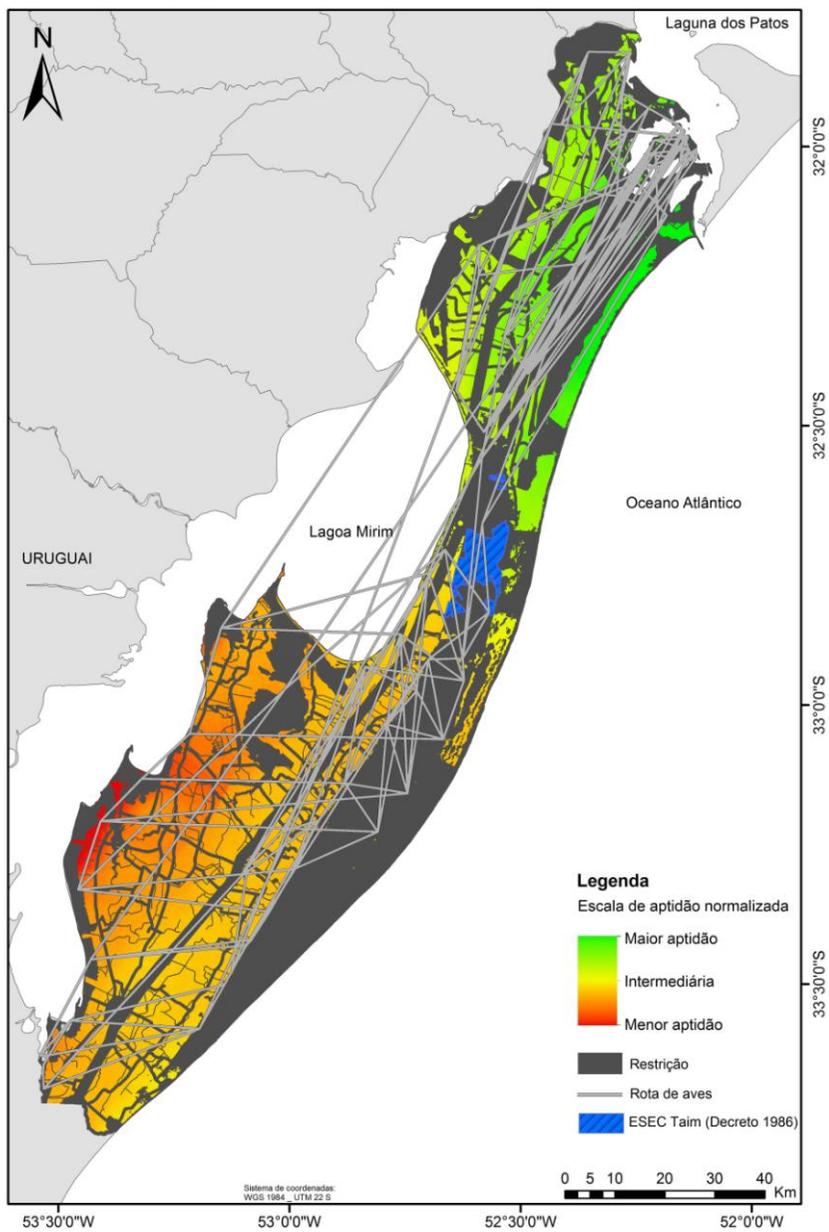
Fonte: O autor, 2014.

Os cenários propostos foram baseados na análise de paisagem, onde a Figura 27 e a Figura 28, representam respectivamente o cenário ecodesenvolvimentista e o conservacionista. Nesses mapas estão contidos como restrição as distâncias das vias principais e secundárias, as distâncias das áreas urbanas e as rotas migratórias de aves, estando essas em conformidade com a Tabela 6.

Nota-se uma diferença considerável entre os dois cenários, dado que o cenário conservacionista quase restringiu todas as áreas aptas para a implementação de parques eólicos. Isto deve-se ao fato de considerar uma restrição ampla nas rotas de aves e na rede viária, as quais são abundantes no modelo proposto. A diferença entre zonas urbanas não se demonstrou significativa nos dois cenários. Em comparação, o cenário ecodesenvolvimentista se mostrou mais plausível diante da real situação dos municípios na área de estudo, os quais se encontram em processo de adaptação à exploração de empreendimentos eólicos (Figura 24).

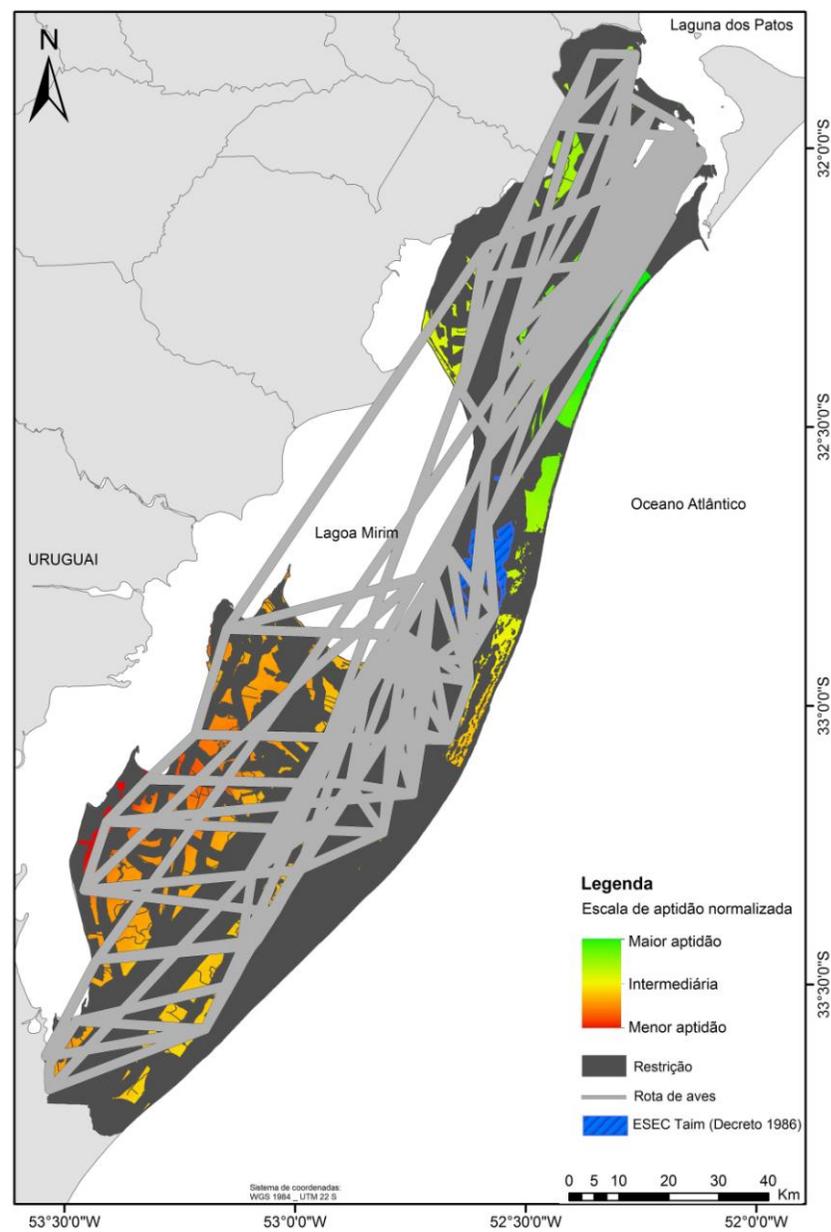
Nas Figuras 29 e 30, pode-se notar melhor a influência das zonas de restrição adjacentes às estradas principais e secundárias. Essas representam os dois cenários, sendo o ecodesenvolvimentista e o conservacionista respectivamente. Não são consideradas as rotas migratórias das aves nesses cenários, com propósito de evidenciar a influência dessas rotas nos cenários. Tal como nas figuras anteriores, onde também foram comparados os dois cenários, o conservacionista exclui mais áreas aptas para a atividade eólica, porém oferece maior área apta em relação com o modelo conservacionista que considera as rotas de aves (Figura 28).

Figura 27. Cenário ecodesenvolvimentista considerando as rotas de aves propostas e as distâncias da rede viária.



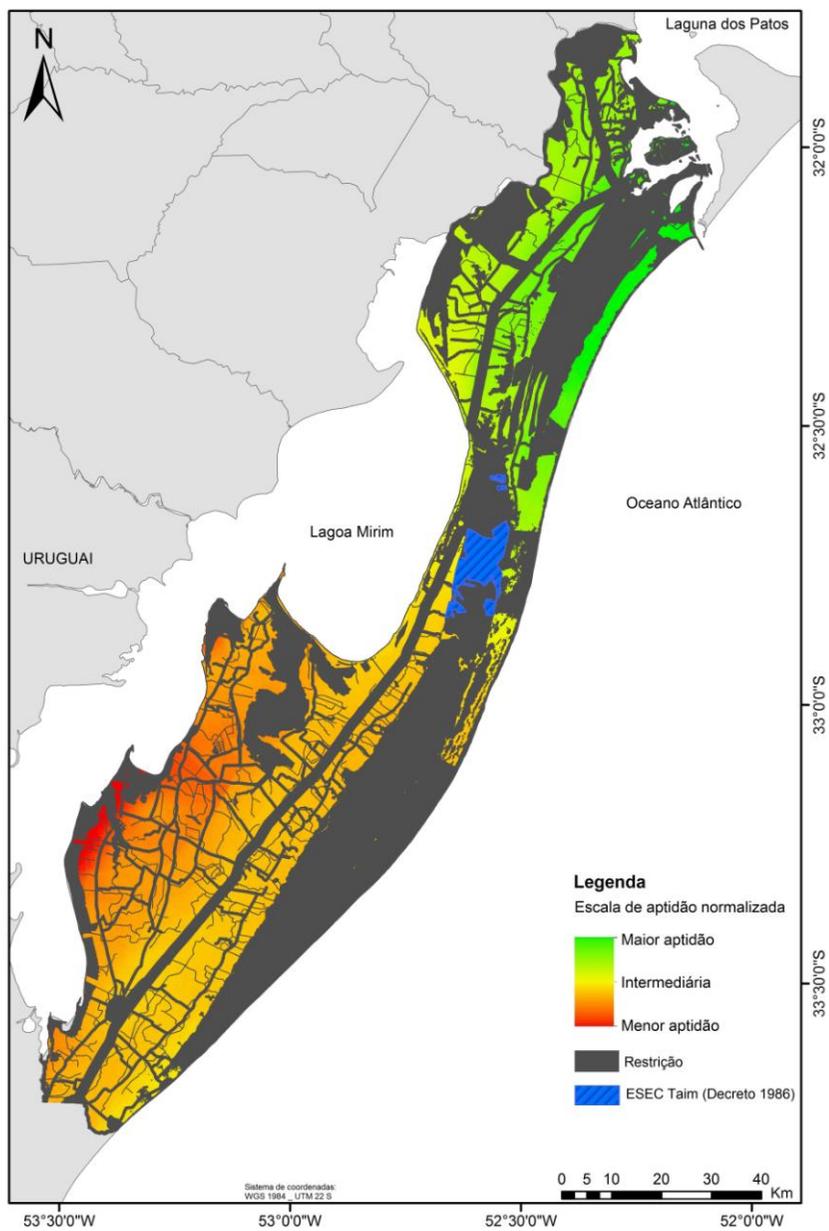
Fonte: O autor, 2014.

Figura 28. Cenário conservacionista considerando as rotas de aves propostas e as distâncias da rede viária.



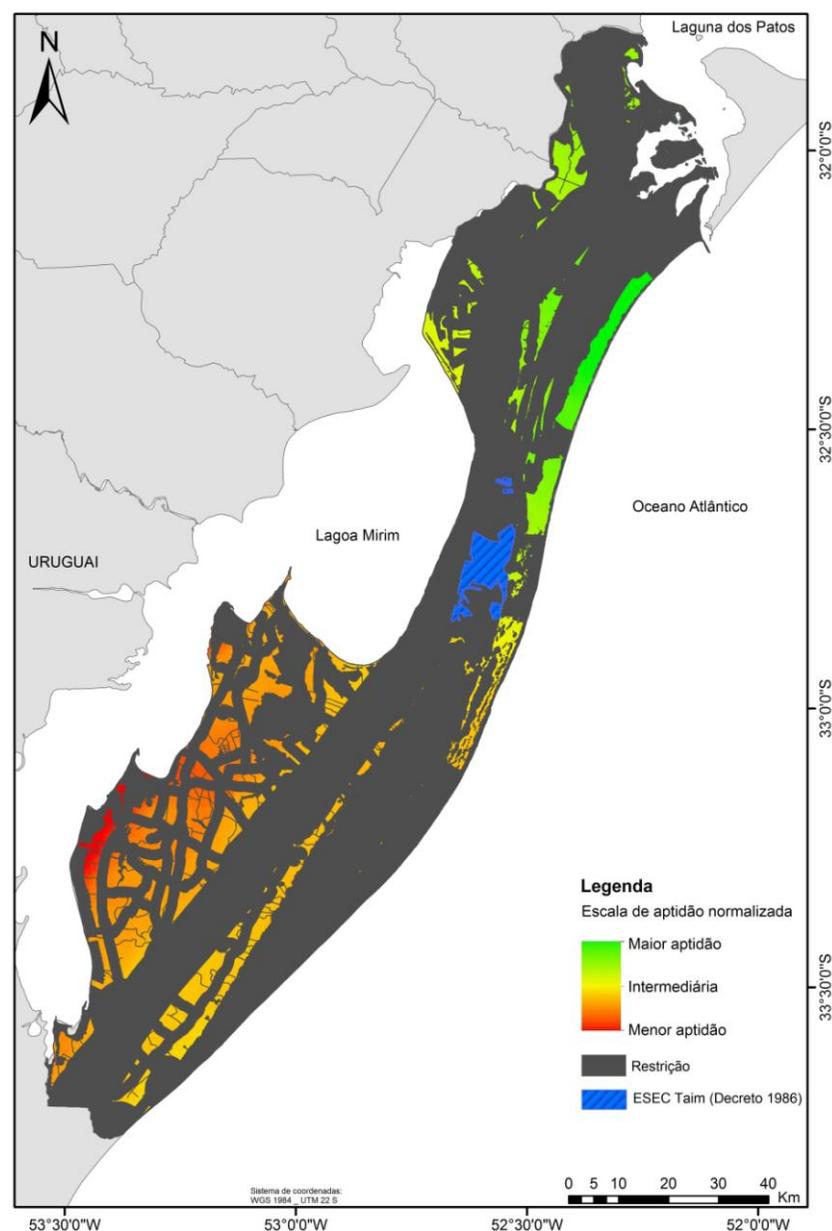
Fonte: O autor, 2014.

Figura 29. Cenário ecodesenvolvimentista considerando as distâncias da rede viária.



Fonte: O autor, 2014.

Figura 30. Cenário conservacionista considerando as distâncias da rede viária.



Fonte: O autor, 2014.

## 6.9 Capacidade de suporte e potencial eólico instalado

A capacidade de suporte eólico estimada para o ambiente, segundo esta abordagem, esta relacionada com a carga máxima suportada pelo ambiente analisado, considerando as áreas aptas compreendidas pela área de estudo. Este calculo buscou estimar quantos aerogeradores poderiam ser instalados na área apta. Esta avaliação considerou dois cenários descritos anteriormente, estando estes diferenciados em três perspectivas no cenário ecodesenvolvimentista e duas perspectivas no cenário conservacionista, tal como consta na Tabela 7.

Observa-se nos dados que a capacidade de suporte é diretamente influenciada pela área apta para instalação de parques eólicos, pressupondo que toda a área teria instalada sua capacidade máxima de geração eólica de acordo com os critérios considerados. É importante ressaltar que para a estimativa do número de aerogeradores foi considerado uma relação de aerogeradores por área, sendo 1 aerogerador ocupante de uma área de 22 hectares, conforme descrito na metodologia. Esse valor de 22 hectares para cada torre, partiu do princípio que o diâmetro das pás sejam de 70 metros, e que as distâncias entre os aerogeradores em linha seja de 5 vezes o diâmetro do rotor e 9 vezes o diâmetro do rotor entre as linhas, como melhor descrito no item 5.2.11.

Analisando a capacidade de suporte, pode-se afirmar que de acordo com a Tabela 7, o cenário com maior capacidade de suporte para a atividade eólica na região é, tal como esperado, o ecodesenvolvimentista. Dentro desse, o modelo desconsiderando as restrições de aves e estradas (Figura 22) se mostrou mais apto a receber maior número de aerogeradores (20810 aerogeradores considerando 1 aerogerador por hectare) devido à desconsiderar algumas restrições propostas.

A relação entre as colunas da tabela de dados esta baseada na proporção direta de relação entre a zona restrita e a área apta, ou seja, quanto menor a zona de restrição, maior será a área apta, logo mais aerogeradores podem ser instalados nessas. No cenário conservacionista o número de aerogeradores a ser instalados variou entre 3610 e 6420, enquanto que no outro cenário variou entre 13447 e 20810 aerogeradores, demonstrando grande distinção na capacidade diante dos cenários propostos.

Tabela 7. Dados relativos a capacidade de suporte ambiental em cenários distintos.

<b>ECODESENVOLVIMENTISTA</b>				
	<b>Área apta (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área restrita (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Total da área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Nº de aerogeradores na área (aprox.)</b>
<b>Restrição de aves e estradas (Figura 27)</b>	2958408000	5211231710	8169639710	13447
<b>Sem restrição de aves (Figura 29)</b>	3614940000	4554699710	8169639710	16431
<b>Sem restrição de aves e estradas (Figura 22)</b>	4578354000	3591285710	8169639710	20810
<b>CONSERVACIONISTA</b>				
	<b>Área apta (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área restrita (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Total da área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Nº de aerogeradores na área (aprox.)</b>
<b>Restrição de aves e estradas (Figura 28)</b>	794200500	7375439210	8169639710	3610
<b>Sem restrição de aves (Figura 30)</b>	1372932000	6796707710	8169639710	6240

Fonte: O autor, 2014.

Na Tabela 8 são propostas denominações para a relação do número de aerogeradores pela área ocupada. Nota-se que na classe denominada intensiva a relação entre aerogerador por área é menor, sendo considerada como uma ocupação intensiva do solo para fins de empreendimento eólico. O grau de ocupação semi-intensivo retrata uma ocupação mais equilibrada com menor número de aerogeradores por área. Destacando que no caso do presente trabalho, foram considerados 22 hectares para cada aerogerador, estando classificada, de acordo com a Tabela 8, como ocupação semi-intensiva.

A classe extensiva de ocupação do solo por aerogeradores expressa uma maior preservação do ambiente natural, sendo ideal para locais com alto fator de preservação, classificado como sendo uma ocupação acima de 22 hectares para cada aerogerador. A tabela proposta visa salientar a capacidade de suporte em relação a área ocupada, para um melhor discernimento entre as distâncias entre aerogeradores tem-se que levar em consideração as distâncias entre as torres em linhas e a distância das torres entre linhas.

As delimitações propostas na Tabela 8, estão embasadas nas características de um aerogerador com potência de 2 MW (Megawatts), 100 metros de altura do rotor e 70 metros de diâmetro nas pás, como consta na Tabela 5, item da descrição da metodologia. A mesma relação pode ser feita considerando outro tipo de gerador

eólico, bastando considerar o diâmetro das pás do aerogerador e as distâncias desses em linha e entre essas.

Tabela 8. Grau do uso do solo para aerogeradores.

<b>Grau de ocupação do solo</b>	<b>Aerogeradores por hectares (ha)</b>
Intensivo	7 ha < A aerog. ≤ 14 ha
Semi-intensivo	14 ha < A aerog. ≤ 22 ha
Extensivo	> 22 ha

Fonte: O autor, 2014.

O potencial eólico instalado variou de acordo o número de aerogeradores instalados na área. Esse valor reflete o potencial do maquinário instalado na área, sendo considerado na Tabela 9 os aerogeradores com potência de 2 MW, logo o potencial instalado é duas vezes maior que o número de aerogeradores. Em consequência de o potencial eólico ser diretamente proporcional ao número de aerogeradores, os cenários com maior potencial instalado são os com maior número de aerogeradores, sendo o maior de 41620 MW instalado no cenário ecodesenvolvimentista sem restrições de aves e estradas. Tal como demonstrado na tabela que segue:

Tabela 9. Potencial eólico instalado de acordo com a capacidade de suporte.

<b>ECODESENVOLVIMENTISTA</b>	<b>Potencial eólico instalado (MW)</b>
Restrição de aves e estradas (Figura 27)	26894
Sem restrição de aves (Figura 29)	32862
Sem restrição de aves e estradas (Figura 22)	41620
<b>CONSERVASIONISTA</b>	<b>Potencial eólico instalado (MW)</b>
Restrição de aves e estradas (Figura 28)	7220
Sem restrição de aves (Figura 30)	12480

Fonte: O autor, 2014.

## 6.10 Produção energética estimada

A Tabela 10 mostra o potencial que pode vir ser produzido diante da energia cinética eólica, desconsiderando os aerogeradores, com estimativa anual em Gigawatts; a estimativa desse potencial em Gigawatts / hora por ano (GWh/a) e em Terawatts / hora por ano (TWh/a); a área total de varredura considerando os aerogeradores com diâmetro de pás de 70 metros; e a energia potencial a ser produzida em relação a eficiência proposta no atlas do potencial eólico brasileiro (AMARANTE *et al.*, 2001).

Tabela 10. Estimativa da produção estimada diante dos cenários propostos.

<b>ECODESENVOLVIMENTISTA</b>					
	<b>Energia potencial a ser produzido (GW/a)</b>	<b>Estimativa do potencial em GWh/a</b>	<b>Estimativa do potencial em TWh/a</b>	<b>Eficiência ANEEL (20%) (TW/a)</b>	<b>Área de varredura total (diâmetro das pás) (m<sup>2</sup>)</b>
<b>Restrição de aves e estradas (Figura 27)</b>	616439,9898	171,2333	0,1712	123,2880	53251344
<b>Sem restrição de aves (Figura 29)</b>	753240,7892	209,2335	0,2092	150,6482	65068920
<b>Sem restrição de aves e estradas (Figura 22)</b>	953986,2295	264,9961	0,2649	190,7972	82410372
<b>CONSERVACIONISTA</b>					
	<b>Energia potencial a ser produzido (GW/a)</b>	<b>Estimativa do potencial em GWh/a</b>	<b>Estimativa do potencial em TWh/a</b>	<b>Eficiência ANEEL (20%) (TW/a)</b>	<b>Área de varredura total (diâmetro das pás) (m<sup>2</sup>)</b>
<b>Restrição de aves e estradas (Figura 28)</b>	165486,6226	45,9685	0,0459	33,0973	14295609
<b>Sem restrição de aves (Figura 30)</b>	286076,2235	79,4656	0,0794	57,2152	24712776

Fonte: O autor, 2014.

A estimativa da energia potencial a ser produzida na região considerada como apta, varia entre 165486 Gigawatts por ano (GW/a) no cenário com maior número de áreas restritas, e 953986 GW/a para o cenário menos restrito, sendo esse o ecodesenvolvimentista sem restrições das rotas de aves e estradas. Para melhor ilustrar o potencial eólico, foi demonstrado na tabela a mesma estimativa, porém em uma unidade de GWh/a e TWh/a.

Tal como consta no mapa do potencial eólico brasileiro (AMARANTE *et al.*, 2001), as áreas ao longo do litoral sul tem ventos com velocidade média superiores a 7m/s. Sendo assim, para calcular a estimativa da produção eólica foi levado em consideração uma eficiência de 0,20 (20%) para ventos entre 7 e 7,5m/s, proposta pela ANEEL (2002). Os resultados variaram de 33 até 150 Terawatts por ano (Tabela 10). A área de varredura foi obtida por meio de uma relação entre o número de aerogeradores comportados pela área apta a instalação e área de varredura das pás de um aerogerador (70 m de diâmetro).

## 7. CONCLUSÃO

A energia eólica vem crescendo muito rápido no cenário energético brasileiro, principalmente na zona costeira, devido ao grande potencial eólico registrado nessa região. Diante dessa realidade é necessário desenvolver ferramentas e técnicas de planejamento capazes de assegurar a sustentabilidade ambiental e socioeconômica desse processo. Esta pesquisa aponta alguns aspectos julgados relevantes para consolidar e orientar políticas públicas no âmbito da implementação de parques eólicos.

O planejamento é a principal etapa no processo de implementação de parques eólicos. Nessa fase está contida todas as restrições, exclusões, mitigações e compensações ambientais. Parques eólicos são empreendimentos de muita confiança, devido ao planejamento das ações serem bem estudadas, e implementadas com cautela. O sucesso nessa fase, fará com que não haja interrupção de ganho energético e principalmente mínimos danos a biota, à sociedade e a economia local.

Considerando os modelos gerados pela metodologia proposta no trabalho, estes tendem a acrescentar argumentos e subsídios para posteriores pesquisas que tratem do tema proposto na área de estudo ou em outras. Os modelos poderão servir como base para que tomadores de decisão possam se embasar no processo de licenciamento. Através dos modelos, pode-se propor um zoneamento ambiental para implantação de parques eólicos, definindo cenários passíveis de áreas para licenciamento com ou sem restrições, a partir da identificação das principais fragilidades e potenciais ambientais, estruturais, sociais e das variáveis físicas na área de estudo.

Por meio da modelagem é possível gerar cenários que explorem o potencial eólico da região e sua capacidade de suporte perante o referido empreendimento, tornando possível o planejamento territorial. Pretende-se que o modelo gerado possa ser utilizado em qualquer área do território brasileiro, necessitando ajustar os critérios e variáveis da área em questão. Ainda assim, espera-se que os resultados possam disponibilizar aos potenciais investidores na atividade eólica, uma estimativa prévia das áreas mais aptas para esse tipo de energia na região de interesse. Fomentando o desenvolvimento eólico na região e no país.

Perante a metodologia empregada no trabalho, a análise locacional multicritério, na sua aplicação é na maioria das vezes empregado a avaliação subjetiva, onde apenas são considerados os valores definidos pelo usuário na tabela de cruzamento "Crosstab", sendo a comparação baseada na tabela Saaty. Este método influencia no resultado pelo fato de que o usuário vai predispor a amostra de uma maneira diferente á qualquer outro intérprete. Em vista disso, na análise multicritério foi empregado a variação espacial do critério (curva de decaimento), sendo conduzida por processos estatísticos, permitindo empregar o modelo para outras regiões, abordando novos critérios dentro do mesmo modelo.

Afirma-se que o método de análise hierárquica multicriterial utilizado, reflete um processo de racionalidade sistemática, o qual permite considerar um problema como um todo e analisar as interações entre os componentes que constituem a hierarquia da árvore de decisão. Este método aborda problemas complexos em termos de interações específicas, permitindo através de equações estatísticas, sintetizar suas apreciações para propor uma avaliação geral das prioridades relativas às várias soluções consideradas. Portanto, este modelo é considerado flexível ao visto que permite tomar decisões, tendo em conta, a lógica, as opiniões e os valores individuais.

Os métodos aqui expostos, constituem um conjunto de testes a partir de modelos com variações de pesos e de critérios. O modelo mais apto foi o mapa locacional de aptidão sem considerar a intensidade do vento (Figura 22), pois demonstrou melhores resultados em relação aos demais modelos, e como já discutido a energia cinética engloba a intensidade do vento desprezando então a necessidade de incluir os dois critérios no modelo.

Visando minimizar as características negativas (i. e. impactos ambientais, sociais e infraestrutura) do processo de instalação e operação de um complexo eólico, comentadas anteriormente no trabalho, foi desenvolvido um modelo de análise hierárquica multicriterial com propósito indicar as áreas mais aptas para a referida atividade. Destaca-se no modelo a importância deste em relação a definição dos principais parâmetros no zoneamento territorial para parques eólicos na área de estudo proposta.

Fica evidente, de acordo com os resultados da pesquisa, que os critérios indispensáveis para um zoneamento adequado são: os critérios de caráter

restritivos, tal como áreas de preservação permanente; os dados relativos a intensidade e energia cinética eólica, os quais nesse modelo foram considerados redundantes quando aplicados separadamente; distância das subestações e consumidores, representando o lado do empreendedorismo e da dissipação energética em função da distância; por fim, apesar de a topografia não influenciar na região de estudo, devido a mesma ser uma planície, o modelo digital de elevação de terreno é muito importante em uma análise para implementação de parques eólicos, pois é por meio deste que pode-se estipular a declividade e a orientação do terreno, os quais são fatores exclusivos para instalações de aerogeradores eólicos.

Os fatores supracitados são indispensáveis para avaliação de uma região para fins de zoneamento territorial de parques eólicos. Não obstante, dependendo da área de estudo o fator de importância dos parâmetros serão distintos em função de sua variação espacial e relevância dos mesmos diante à implementação da atividade eólica. É importante salientar que devido a região em questão seja necessário o acréscimo de outros critérios, os quais devem representar a região a fim de favorecer um zoneamento adequado perante a legislação vigente, aos remanescentes naturais, áreas de preservação, a questão social e econômica.

O modelo tende a ser uma boa ferramenta na identificação e avaliação prévia do potencial eólico e produção energética nas regiões de interesse, já que foi validado perante um coeficiente estatístico. Espera-se que os resultados possam disponibilizar aos potenciais investidores na atividade eólica uma estimativa prévia do recurso energético da região, fomentando o desenvolvimento desse tipo de energia. O cálculo da capacidade de suporte na região pretende estimular um crescimento e desenvolvimento desse setor energético na região para a expansão eólica de uma maneira sustentável.

## **8. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

### **8.1 Limitações do estudo**

Embora os métodos apresentados nesse estudo apresentem limitações, o mesmo foi satisfatório para avaliar o potencial eólico na região e as áreas mais aptas para esse tipo de empreendimento. Uma das limitações mais evidentes diz respeito a resolução espacial dos dados de sensoriamento remoto utilizados, sendo todos padronizados em uma resolução espacial de 30 metros o pixel. No entanto esta precisão é bastante adequada para a escala de trabalho.

Também é necessário reconhecer que na inexistência de critérios objetivos quanto à alguns parâmetros, foram adotados critérios subjetivos, no entanto as entradas de subjetividade estão claramente explícitas. Os resultados dos cenários podem ser mudados alterando tais critérios. Exemplifica-se com o mapeamento dos corredores de deslocamento local de avifauna, onde a direção e largura não foram comprovados empiricamente. A direção dos corredores foi estabelecida a partir da análise das manchas da paisagem (classe de áreas úmidas e banhados) e não através de observações *in loco*. Da mesma forma, para a definição da largura dos corredores, arbitrou-se valores sem qualquer fundamentação em dados de campo. Os resultados no entanto são válidos enquanto modelo. Portanto, é importante destacar que os cálculos e estimativas da capacidade de suporte, potencial eólico instalado e estimativa da produção energética eólica foram aferidos de acordo com os mapas de aptidão e restrição, os quais incluem os critérios subjetivos referentes aos corredores ecológicos e às distâncias arbitradas dos aerogerados em relação às vias consolidadas.

### **8.2 Recomendações**

Os planos regionais de ordenamento do território devem assumir uma postura que possam incluir disposições sobre as energias renováveis, dispendo de um zoneamento ambiental. Numa fase posterior, essas metas devem ser assimiladas nos planos diretores municipais, as quais refinariam as áreas mais adequadas a estas atividades, tornando o licenciamento de projetos eólicos mais simples e transparentes.

As metodologias de avaliação devem integrar-se numa política de planeamento estratégico e desenvolvimento sustentável, aplicáveis a escala regional e local, de modo a caracterizar adequadamente áreas consideradas sensíveis ao nível ecológico.

Em relação aos modelos propostos no trabalho, recomenda-se para posteriores pesquisas acrescentar algumas análises, as quais servem também como sugestões para a análise locacional de parques eólicos na área de estudo, são elas: a validação das áreas propostas como aptas; aperfeiçoar a metodologia proposta para criação de corredores para aves migratórias; adicionar as subestações de pequeno porte no modelo, para gerar uma visão do empreendedor sobre a área de estudo, tal como analisar a distribuição de energia para os centros urbanos da região; gerar mapas de análise mensais e sazonais do vento para comparar os mesmos em diferentes estações, principalmente estações chuvosas e de seca, em função da energia das hidroelétricas que em épocas de estiagem produzem menos energia; e desconsiderar eventos extremos, tal como El Niño e La Niña, para a contabilidade da média das componentes do vento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHLÉN, I. **Wind Turbines and Bats**: a pilot study, Swidish National Energy Administration, 2003.

AMARANTE, O.; ZACK, M.; SÁ, A. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro** / Ministério de Minas e Energia (MME). Brasília, 2001.

AMARANTE O. A.; DA SILVA S. J. L. **Atlas eólico**: Rio Grande do Sul. Secretaria de Energia Minas e Comunicações. Porto Alegre: SEMC, 70 p.: il., 2002.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Atlas de energia elétrica do Brasil** / Agência Nacional de Energia Elétrica. – Brasília. 153 p.: il, 2002.

AUBREY, C.; PULLEN. A.; ZERVOS. A.; TESKE. S. Global Wind Energy Outlook 2006, **Global Wind Energy Council/Greenpeace International**, 57p., 2006.

BELTON, W. **Aves do Rio Grande do Sul - Distribuição e biologia**. São Leopoldo, Editora Unisinos. 584 p., 1994.

BOWDEN, K.F. **Physical Oceanography and Coastal Waters**. Ellis Horwood Ltd. 1983.

BURGER, M. I.; RAMOS, R. A.. Áreas importantes para conservação na Planície Costeira do Rio Grande do Sul. **Biodiversidade**: Regiões da Lagoa do Casamento e dos Butiazais de Tapes, Planície Costeira do Rio Grande do Sul. 2. ed. Brasília/MMA. Cap. 4, p. 46-56, 2007.

BRONZATTI, F. L.; IAROZINSKI N. A. Matrizes Energéticas No Brasil: Cenário 2010-2030. Anais. **XXVIII Encontro Nacional De Engenharia De Produção**, Rio de Janeiro, p.1-15, 2008.

BHUSHAN, N.; RAI, K. **Strategic Decision Making**: Applying the Analytic Hierarchy Process. New York: Springer, 2004.

BURTON, T.; SHARPE, D.; JENKINS, N.; BOSSANYI, E. **Wind Energy**: Handbook, 67 p., 2001.

- CÂMARA, G.; MOREIRA, F. R.; BARBOSA, R. A.; BÖNISH, F. Técnicas de inferência geográfica. **Introdução à ciência da geoinformação**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2000.
- CARRARO, C. C. **Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul**. Instituto de Geociências, UFRGS, Porto Alegre, 1974.
- CARVALHO, A. **Acústica Ambiental e de Edifícios**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- CASTRO, R. M. G. **Energias Renováveis e Produção Descentralizada**. Instituto Superior de Tecnologia, 2007.
- CENTENO, J. A. S. **Sensoriamento Remoto e Processamento de Imagens Digitais**. Curitiba: Editora do Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, 2004.
- CNI - Confederação Nacional da Indústria Energia Eólica: **Panorama mundial e perspectivas no Brasil**, Brasília, 34 p. : il. 2009.
- COELHO, C. I. A. Avaliação dos Impactes Ambientais dos Parques Eólicos em Áreas Protegidas: O Caso de Estudo do Parque Natural das Serras de Aire e Candeeiros. Dissertação de Mestrado – Universidade de Lisboa, 2007.
- COHEN, J. A coefficient of agreement of nominal scales. **Educational and psychological measurement**, 20: 37-46 p. 1960.
- COOK, N. J. **The designer's guide to wind loading of building structures (Part 1)**. p., 1985.
- CORDAZZO, C. V. Taxonomia e ecologia da vegetação das dunas costeiras ao sul do Cassino (RS). Tese de mestrado em oceanografia biológica. Rio Grande: Fundação Universidade Federal do Rio Grande, 103 p. 1985.
- CROSTA, A. P. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto**. SP: IG/UNICAMP, 1992.
- CUSTÓDIO, R. S. **Energia Eólica para a Produção de Energia Elétrica**. Centrais Elétricas Brasileiras S.A., Eletrobrás. Rio de Janeiro, Brasil. 2009.

DEWI - Deutsches Windenergie Institut. **Environmental Aspects and Acceptance of Wind Energy**. Wilhelmshavenm, Eldorado Summer School. 1996.

DREWITT, A.; LANGSTON, R. Assessing the impacts of wind farms on birds. **British Ornithologists Union**, p. 148, 2006.

DWIA - Danish Wind Industry Association. **Guided Tour on Wind Energy**. 2003.

EHLERS, R. S. **Análise de séries temporais**. Curitiba. Editora UFPR, 2003.

ELLIOT, D. Renewable Energy and Sustainable Futures. **Futures**. Vol. 32, 261-274 p. Great Britain, 2000.

EPE - Empresa de pesquisa energética. **Balanco Energético Nacional 2012**. 2013.

ERSAN, D.; HAYDAR, A. The use of Analytic Hierarchy Process for Prediction. **Academic Research International - Savap**, Lodhran City - Pakistan, p.138-141, 2012.

EWEA - European Wind Energy Association. **Wind Energy - The Facts Environment**, Vol. 4, 2000.

FEPAM (Org.). **Licenciamento Ambiental - Consultas Genéricas**. Disponível em: <<http://www.fepam.rs.gov.br/licenciamento/Area1/default.asp>>. Acesso em: 22 jan. 2014.

FEPAM (Org.). **Biblioteca digital / Arquivos digitais para uso em SIG - base cartográfica digital do RS 1:250.000**. Disponível em: <[http://www.fepam.rs.gov.br/biblioteca/geo/bases\\_geo.asp](http://www.fepam.rs.gov.br/biblioteca/geo/bases_geo.asp)>. Acesso em: 17 out. 2013.

FIESP / OLADE - Federação de indústrias do Estado de São Paulo / Organização Latinoamericana de Energia. **Mercados Energéticos en América y El Caribe**. 2009.

FORMAN, R. T. T. **Land Mosaics: The ecology of landscapes and regions**. New York, Ny: Cambridge University Press, 1995.

GARRÓN, M. **Informe energético sectorial Energía: Una visión sobre los retos y oportunidades en América Latina y el Caribe**. Editora CAF Banco de desarrollo de América Latina, 2013.

GIANUCA, N. M. A fauna das dunas costeiras. **Os ecossistemas costeiros e marinho do extremo sul do Brasil**. Rio Grande. Editora Ecoscientia. 114-116 p., 1998.

GIUSTI, M. C. H. Conflictos Ambientales en la Gestión del Santuario Historico de Machupicchu: El Caso de la Instalación y Manejo de la Central Hidroeléctrica Machupicchu. 2005. 189 p. Tese (Master en Ciencias Sociales con Mencion en Gestion Ambiental y Desarrollo)- Escuela Andina de Post-Grado Maestria en Gestion Ambiental y Desarrollo. Cusco, 2005.

GONÇALVES, M. L.; NETTO, M. L. de A.; ZULLO Jr., J.; COSTA, J. A. F. Classificação não-supervisionada de imagens de sensores remotos utilizando redes neurais auto-organizáveis e Métodos de agrupamentos hierárquicos. **Revista Brasileira de Cartografia**, Campinas, p. 1-13, 2008.

GUADAGNIN, D. L.; LAIDNER, C. **Avaliação e ações prioritárias para conservação da Zona Costeira da Região Sul**: Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 82 p., 1999.

HOTKER, H.; THOMESSEN, K.; JEROMIN, H. Impacts on biodiversity of exploitation of renewable energy sources: the example of birds and bats. NABU. **Conservação da Natureza & Biodiversidade**, p.143-171, 2005.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Sistema de Processamento de Informações Georeferencias – SPRING 3.6 – **Tutoriais**. São José dos Campos, SP. 2002.

JACOBSON, M. Z., MASTERS, G. M. **Exploiting Wind Versus Coal Science**. 293 p. August, 2001.

KALNAY et al. **The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project**. Bull. Amer. Meteor. Soc., p. 437-470, 1996.

KINGSLEY, A.; WHITTAM, B. **Wind Turbines and Birds: A Background Review**, Quebec, Environment Canada / Canadian Wildlife Service, 81 p., 2005.

KOHONEN, T. **Self-Organizing maps**. 2nd Edition, Berlin: Springer Verlag, 1987.

LANDIS, J. R.; KOACH, G. G. The measurement of observer agreement for category data, **Biometrics**, Vol. 33(1): 159-174 p. 1977.

MALAVAL, E. I. B. *Travaux du Port et de la Barre de Rio Grande do Sul (Brésil)*. Paris, Librairie de l'enseignement Technique. Leon Eyrolles, éditur, 1923.

MATRIZ ENERGÉTICA. Empresa de Pesquisa Energética. *Balanço Energético Nacional 2012 – Ano base 2011: Resultados Preliminares*. Rio de Janeiro: EPE, p. 1 - 51: 18 il. 2012.

MAURÍCIO, G. N.; DIAS, R. A. **Áreas prioritárias para a conservação de espécies de aves ameaçadas de extinção no litoral sul do Rio Grande do Sul**. In: Simpósio de Áreas Protegidas, Pesquisa e Desenvolvimento Sócio-Econômico, Pelotas. **Anais**. Pelotas, Educat. p.191-195. 2001.

MÄHLER Jr. J. K. F.; KINDEL, A.; KINDEL, E. A. I. **Lista comentada das espécies de aves da Estação Ecológica do Taim, Rio Grande do Sul, Brasil**. *Acta Biol. Leopold.*, 18:69-103. 1996.

MEIRELLES, M. S. T.; ALMEIDA, C. M.; CAMARA, G. **Geomática: Modelos e aplicações ambientais**. Brasília, DF. Editora Embrapa, 2007.

MIRANDA, P. E. V. **Fontes Alternativas de Energia no Brasil**. Rio de Janeiro: Ed. Ciência Moderna, 2004.

MMA – Ministério do Meio Ambiente (Org.). **Macro-diagnóstico da Zona Costeira do Brasil**. Programa Nacional do Meio ambiente. Ministério do Meio Ambiente /UFRJ/FUJB/LAGET, Brasília, 280 p., 1996.

MMA – Ministério do Meio Ambiente (Org.). **Pesquisa sobre licenciamento ambiental de parques eólicos**. 2010. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/estruturas/164/\\_publicacao/164\\_publicacao26022010101115.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/164/_publicacao/164_publicacao26022010101115.pdf)>. Acesso em: 09 jun. 2013.

MMA - Ministério do Meio Ambiente (Org.); ICMBio - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Resumo executivo da proposta de ampliação da Estação Ecológica do Taim**. 2013. Disponível em: <[http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/oquefazemos/consultas\\_publicas/RESUMO\\_EXECUTIVO\\_Ampliacao\\_da\\_ESEC\\_do\\_Taim.pdf](http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/oquefazemos/consultas_publicas/RESUMO_EXECUTIVO_Ampliacao_da_ESEC_do_Taim.pdf)>. Acesso 22 fev. 2014.

MMA - Ministério do Meio Ambiente (Org.). **Conservação Ramsar**. 2014. Disponível em:

<<http://www.mma.gov.br/biodiversidade/biodiversidadeaquatica/comfsfglossary/zona-s-umidas-convencao-de-ramsar>>. Acesso em: 02 fev. 2014.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos, 1º ed. 67 p. 2001.

MORRISON, M. **Bird Movements and Behaviours in the Gulf Coast Region: Relation to Potential Wind Energy Developments**. National Renewable Energy Laboratory, 2006.

National Academy of Sciences. **National Research Council Wind Report**, 2007.

NIMER, E. Climatologia do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia**. Vol. 28 (3) 9-31 p., 1996.

OLADE - Organização Latinoamericana de Energia. **Prospectiva Energética para Suramérica: Escenários Energéticos al 2032**. 2010.

PDE - **Plano Decenal de Expansão de Energia 2021** / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: v. 1: il, 2012.

PDE - **Plano Decenal de Expansão de Energia 2022** / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME /EPE, 2013.

PNE - **Plano Nacional de Energia 2030** / Ministério de Minas e Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética. - Brasília: v. 12: il, 2007.

RAMOS, R. I; TOSI, I. **Código florestal apreciação atualizada**. São Paulo: Abes-sp, 2012.

REY, R. R. R.; DE OLIVEIRA, F. C. **Estudo de Fatores Meio Ambientais: Estudo de Caso na Usina da Taíba**, 2005.

SAATY, T.L. **The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation**. New York: McGraw-Hill, Inc. 1980.

SAATY, T.L. **Método de Análise Hierárquica**. Tradução e revisão técnica Wainer da Silveira e Silva. São Paulo: McGraw-Hill, Makron, 1991.

SAATY, T. L. **Theory and Applications of the Analytic Network Process: Decision Making with Benefits, Opportunities, Costs, and Risks.** Pittsburgh: RWS Publications. 2005.

SAATY, T.L. **Relative Measurement and its Generalization in Decision Making: Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors - The Analytic Hierarchy/Network Process.** RACSAM (Review of the Royal Spanish Academy of Sciences, Series A, Mathematics),102(2), p. 251–318, 2008.

SARILHO, K. A. Diagnóstico socio-ambiental do Balneário Cassino e áreas adjacentes- Rio Grande-RS: Subsídio ao Gerenciamento Costeiro Integrado Local. 2003. 368 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

SCHÄFER, A. E.; LANZER. R.; PEREIRA R. **Atlas socioambiental de Mostardas, Tavares, São José do Norte e Santa Vitória do Palmar.** Caxias do Sul, RS: EducS, 372 p., 2009.

SCHMOLDT, D.; KANGAS, J.; MENDOZA, G.; PESONEN, M. The Analytic Hierarchy Process in Natural Resource and Environmental Decision Making, Managing Forest Ecosystems, Dordrecht, Boston, London: **Kluwer Academic Publishers.**, 3, 2001.

SCHWARZBOLD, A.; SCHÄFER, A. Gênese e morfologia das lagoas costeiras do Rio Grande do Sul. **Amazoniana**, 9(1): 87-104 p., 1984.

SILVA, F. Movimentos de dispersão da marreca-parda (*Anas georgica*): recuperações e recapturas. In: II Encontro Nacional de Anilhadores de Aves. Rio de Janeiro, UFRJ. **Anais.** Rio de Janeiro, SMA. 210-211 p., 1987.

TAGLIANI, P. R. A. Estratégias de Planificação Ambiental para o Sistema Ecológico da Restinga da Lagoa dos Patos-Planície Costeira do Rio Grande do Sul. Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Carlos. 228 p. 1995.

TERCIOTI, R. **A Energia Eólica e o Meio Ambiente.** Agre, Unicamp - Departamento de Energia, 2002.

TOMAZELLI, L. O Regime de ventos e a taxa de migração das dunas eólicas costeiras do Rio Grande do Sul. **Pesquisas**, 20 (1), 19-26 p., 1993

TRIANANTAPHYLLOU, E. P. **Multi-criteria decision**. Making methods: A comparative study. New York, 2002.

TUPI, B. S. **Wind Energy Is Not The Answer**, 2010.

USGS (Org). **Earth Explorer**. 2013 Disponível em: <<http://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 13 set. 2013.

VARGAS, R. V. Using the Analytic Hierarchy Process (AHP) to select and prioritize projects in a portfolio. **Pmi Global Congress 2010**, North America, Washington - Eua, p.1-22, 2010.

VEIGA, L. A.; OLIVEIRA, A. T.; GASTAL, N. A. Aves da Estação Ecológica do Taim. **Arq. Biol. Tecnol.**, 38: 669-678 p., 1995.

VENTOS DO SUL ENERGIA (Org). **Dados técnicos: Projeto**. 2014. Disponível em: <<http://www.ventosdosulenergia.com.br/highres.php>>. Acesso em: 12 jan. 2014.

VILLWOCK, J. A.; TOMAZELLI, L. J.; LOSS, E. L.; DEHNHARDT, E. A.; HORN FILHO, N.O. Geology of the Rio Grande do Sul Coastal Province. **Quaternary of South America and Antarctic Peninsula**, Rotterdam, v. 4, 79-97 p., 1986.

VILLWOCK, J. A.; TOMAZELLI, L. J.. Planície Costeira do Rio Grande do Sul: gênese e paisagem atual. **Biodiversidade: Regiões da Lagoa do Casamento e dos Butiazais de Tapes, Planície Costeira do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Brasília/MMA, Cap. 2. 20-33 p., 2007.

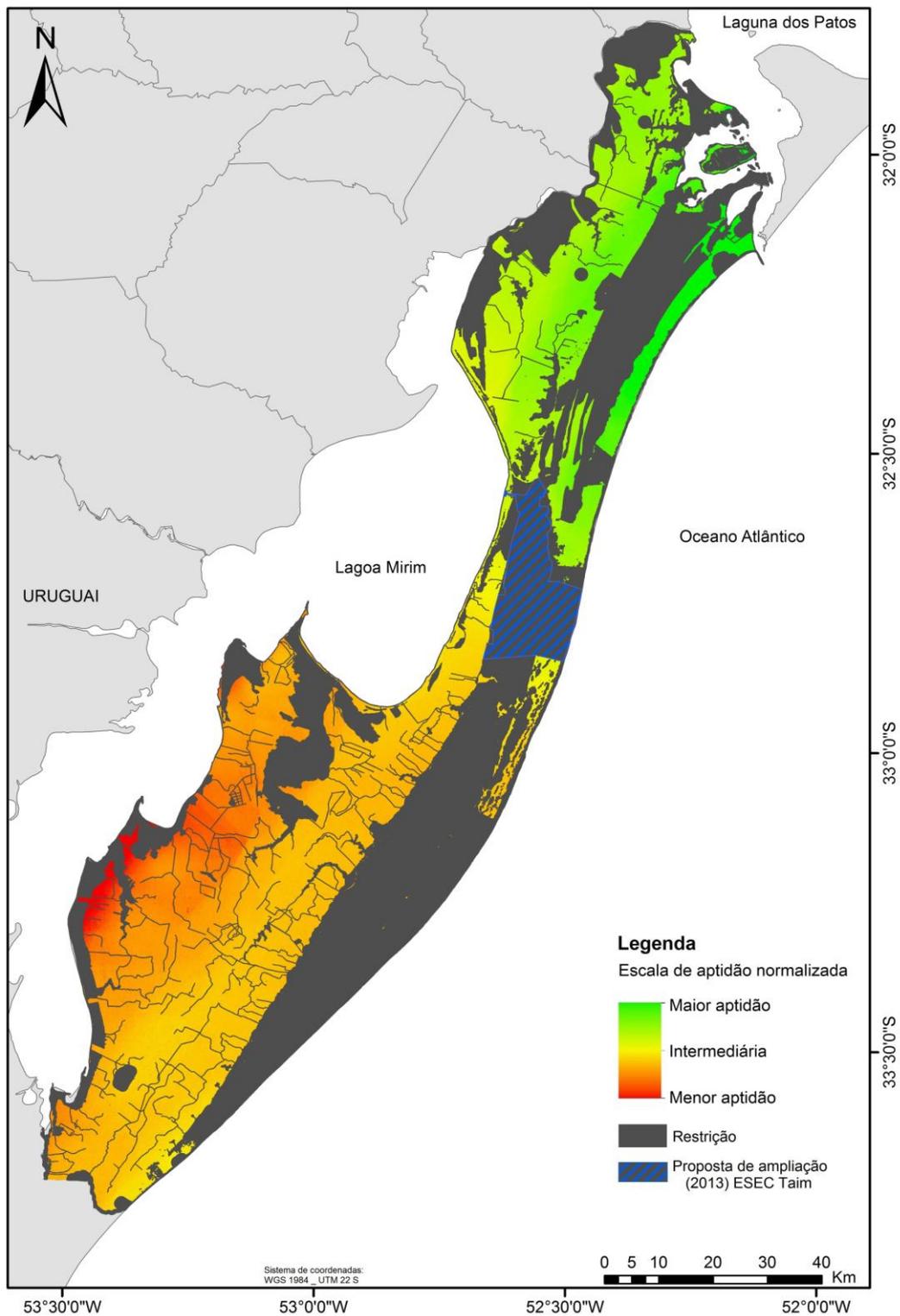
VOOREN, C. M. Aves marinhas e costeiras. **Os ecossistemas costeiros e marinho do extremo sul do Brasil**. Rio Grande. Editora Ecoscientia. 170-176 p. 1998.

WAECHTER, J. L. **Aspectos ecológicos da vegetação de restinga no Rio Grande do Sul**. Comun. Mus. Cienc. PUCRS, Sér. Bot., 33: 49-68 p., 1985.

WORLD ENERGY COUNCIL. **New Renewable Energy Resources: Opportunities and Constraints 1990-2020** p., London, Kogan Page. 1993.

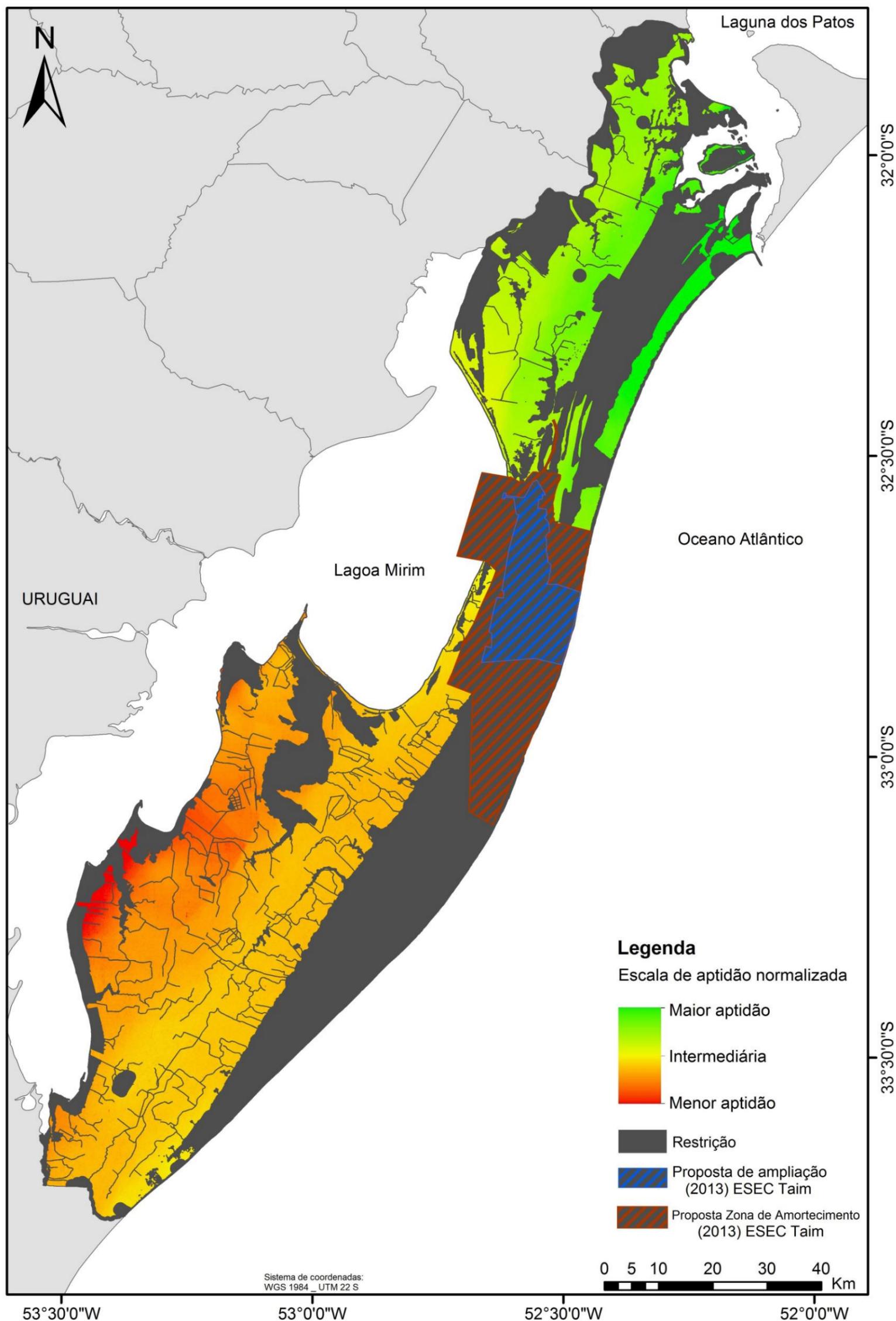
## APÊNDICE

Figura 31. Mapa com modelo mais adequado, considerando como restrição a proposta de 2013 para ampliação da Estação Ecológica do TAIM (MMA; ICMBIO, 2013), onde nota-se um aumento significativo da área de proteção da Unidade de Conservação.



Fonte: O autor, 2014.

Figura 32. Proposta de zoneamento para parques eólicos com o modelo mais adequado apontado na pesquisa; onde desconsiderou-se as pequenas áreas; e é proposto como critério de restrição, além dos demais citados anteriormente, a proposta de ampliação da Estação Ecológica do TAIM (ESEC do TAIM) e a zona de amortecimento proposta em setembro de 2013 pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA; ICMBIO, 2013).



Fonte: O autor, 2014.

Figura 33. Aspecto do Parque eólico em Santa Vitória do Palmar.



Fonte: O autor, 2014.

Figura 34. Vista aérea dos cordões litorâneos ao sul da cidade de Rio Grande, considerado como zona de exclusão.



Fonte: Fotografia de Paulo Roberto Armanini Tagliani, 2010.

Tabela 11. Tabela de cruzamento "Crosstab".

	Vento 10m	dist_consumidor	vias_acesso	declividade	energ_cinetica_eolica	dist_sub	Pesos_Saat	Pesos_percentual	Max_criterio
Vento 10m (intensidade)	0	7	9	4	1	9	30.000	0.296541526	117432.00
dist_consumidor	1/7	0	8	6	1/7	1/5	14.486	0.143187194	121709
vias_acesso	1/9	1/8	0	8	1/8	1/8	8.486	0.083882811	114899
declividade	1/4	1/6	1/8	0	1/4	1/8	0.917	0.009060991	604.307
energ_cinetica_eolica	1	7	8	4	0	6	26.000	0.257002656	907.405
dist_sub	1/9	5	8	8	1/6	0	21.278	0.210324823	271848

Fonte: O autor, 2014.

Tabela 12. Cálculo do decaimento com os resultados ponderados.

Critério Médio	Critério	Decaimento (K)	Pesos Ponderados Decaimento	Pesos Modelo
58716	Vento 10m (intensidade)	1.18051E-05	26.719%	0.7552972
60854.5	dist_consumidor	1.13902E-05	25.780%	0.0000729
57449.5	vias_acesso	1.20653E-05	27.308%	0.0000772
302153.5	declividade	2.29402E-06	5.192%	0.1467732
453702.5	energ_cinetica_eolica	1.52776E-06	3.458%	0.0977469
135924	dist_sub	5.09952E-06	11.542%	0.0000326

Fonte: O autor, 2014.