

RIO GRANDE DO SUL

ATLAS EÓLICO



ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL
Secretaria de Energia, Minas e Comunicações

RIO GRANDE DO SUL ATLAS EÓLICO



ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL
Secretaria de Energia, Minas e Comunicações

A881

Atlas eólico: Rio Grande do Sul / elaborado por Odilon A. Camargo ... [et al.] e editado pela Secretaria de Energia Minas e Comunicações. Porto Alegre: SEMC, 2002.

70 p.: il., mapas.

1. Energia Fontes alternativas. 2. Energia elétrica. I. Camargo, Odilon, A. II. Silva, Fabiano J. Lima da. III. Custódio, Ronaldo dos Santos. IV. Gravino, Nelson. V. Rio Grande do Sul. Secretaria de Energia Minas e Comunicações.

CDU: 62-67(816.5)

CIP
Ivete Lopes Figueiró
CRB10-509

Estado do Rio Grande do Sul
Governador: Olívio Dutra

Secretaria de Energia, Minas e Comunicações - SEMC
Secretária: Dilma Vana Rousseff

Grupo de Energia Eólica da SEMC:
Ronaldo dos Santos Custódio - Coordenador
Nelson Gravino
Anderson Braga Dorneles
Alan Nardon Dorneles
Marcelo Santos Fiorin
Alexandre Cordeiro Silveira

Dados anemométricos usados com autorização das Empresas:
CEEE Companhia Estadual de Energia Elétrica
CERTEL Cooperativa Regional de Eletrificação Teotônia
ERB Energia Regenerativa Brasil Ltda.
Gamesa Energia
Wobben Windpower Indústria e Comércio Ltda.

Elaboração do Atlas - CAMARGO SCHUBERT Engenharia Eólica
Odilon Antônio Camargo do Amarante
Fabiano de Jesus Lima da Silva

APRESENTAÇÃO

O uso da energia cinética dos ventos para a realização de trabalho e a produção de energia elétrica é hoje uma alternativa das mais importantes dado o seu baixíssimo impacto sócio-ambiental e sua característica renovável. O Governo do Estado, por intermédio da Secretaria de Energia, Minas e Comunicações (SEMC), ao apresentar o ATLAS EÓLICO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL, pretende contribuir para o desenvolvimento do uso dessa energia no território sul-rio-grandense. O Atlas insere-se no objetivo estratégico de introduzir energias renováveis e de baixo impacto sócio-ambiental na matriz energética do Estado, com vistas ao seu desenvolvimento sustentável. É o fundamento para se estabelecer uma adequada política de uso e desenvolvimento da energia dos ventos.

O Atlas contém informações detalhadas sobre os regimes dos ventos no Rio Grande do Sul, calculadas a partir da mais rigorosa metodologia, utilizando técnicas modernas e tendo como base medições de alta qualidade, realizadas entre 2000 e 2002. Tais informações permitem identificar os potenciais de aproveitamento da energia eólica, tornando possível, assim, a elaboração de estudos preliminares de viabilidade técnica e econômica e a identificação de locais adequados para as medições com vistas a implantação de fazendas eólicas. Apresenta uma estimativa do potencial eólico do Estado do Rio Grande do Sul, a 50 metros de altura e com ventos acima de 7 metros por segundo, no montante de 15.840 MW, o que dá uma dimensão das excelentes perspectivas que se vislumbram para o emprego dessa energia no território gaúcho, pois a demanda máxima observada no Rio Grande do Sul, até o momento, foi de 3.957 MW. Isto não significa que o nosso Estado possa vir a ser totalmente atendido por energia elétrica produzida a partir dos ventos. A energia eólica, no presente estado-da-arte, é intrinsecamente complementar, já que não apresenta as condições de constância indispensáveis para garantir o abastecimento.

Cabe ressaltar que indicadores relevantes foram agregados ao Atlas, tais como as estimativas de ventos máximos em todo o Estado. Disponibilizam-se, assim, dados importantes para os estudos e aplicações relacionados à engenharia de construção civil e de estruturas. A presença de informações relativas à tecnologia de aerogeradores qualifica ainda mais o trabalho. Por sua vez, a metodologia adotada está devidamente apresentada e detalhada em capítulo específico.

Paralelamente aos ganhos ambientais decorrentes do uso da energia eólica, saliente-se que esta atividade é perfeitamente compatível com os principais usos do solo, em especial a agropecuária, atividade econômica predominante em muitas das regiões que apresentam os melhores potenciais.

O lançamento do Atlas ocorre num momento de expectativa mais favorável para a energia eólica e as demais fontes alternativas pois a Lei 10.438, de 26 de abril de 2002, criou o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas - PROINFA. A partir de agora, portanto, um desafio apresenta-se no cenário energético do País. Trata-se de, nos próximos anos, ampliar o uso das fontes alternativas e, para tanto, o Atlas é oportuno e adequado, devendo contribuir para que o Rio Grande do Sul participe expressivamente do emergente mercado de energia eólica.

Colaboraram na realização deste trabalho, disponibilizando informações sobre as medições de vento, realizadas em parceria com o Estado e a Companhia Estadual de Energia Elétrica-CEEE, as empresas Wobben Windpower Indústria e Comércio Ltda, Gamesa Energia, Energias Renováveis do Brasil Ltda.-ERB, e a Cooperativa Regional de Eletrificação Teutônia - CERTEL. A todas essas empresas agradecemos pela qualidade da cooperação técnica até agora efetivada e, sobretudo, pela consciência do que representa este trabalho para o desenvolvimento do Estado e o bem-estar da sociedade gaúcha.

Cumpramos registrar, por oportuno, o abnegado e incansável trabalho desenvolvido pela equipe da área de energia eólica da SEMC. Liderados pelo Engenheiro RONALDO DOS SANTOS CUSTÓDIO, esses técnicos, a despeito da notória escassez de recursos, souberam aliar criatividade com rigor científico, produzindo, a partir das várias parcerias institucionais já referidas, os dados que tornaram possível a elaboração deste Atlas.

O ATLAS EÓLICO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL, além de pioneiro, integra o esforço do governo para estimular a geração distribuída de energia elétrica e a diversificação das fontes, através do uso de energias alternativas, limpas e renováveis. No dizer de Bob Dylan, poeta dos inquietos anos 60, "...a resposta, meu amigo, está soprando nos ventos".

Porto Alegre, agosto de 2002.

Dilma Vana Rousseff
Secretária de Energia, Minas e Comunicações do
Estado do Rio Grande do Sul

1.	INTRODUÇÃO	01
2.	O ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL	
2.1	GEOGRAFIA E DEMOGRAFIA	03
2.2	TRANSPORTES E ENERGIA	03
	2.2.1 Transportes	03
	2.2.2 Energia Elétrica: Consumo	03
	2.2.3 Sistema Elétrico	06
2.3	CLIMATOLOGIA	07
2.4	REGIMES DE VENTO	12
3.	ENERGIA EÓLICA E TECNOLOGIA	
3.1	O VENTO	15
3.2	A ENERGIA DO VENTO	15
3.3	TECNOLOGIA	16
4.	METODOLOGIA	
4.1	METODOLOGIA	19
4.2	MODELOS	19
	4.2.1 Relevo	19
	4.2.2 Rugosidade	22
	4.2.3 Escoamento Atmosférico	24
4.3	CÁLCULO	27
	4.3.1 Regimes de Vento, Parâmetros Estatísticos	27
	4.3.2 O Modelo WindMap	27
4.4	VALIDAÇÃO	28
4.5	VENTOS MÁXIMOS, RAJADAS	29
	4.5.1 Estimativa de Ventos Extremos	29
	4.5.1.1 Distribuição para Ventos Extremos	
	4.5.1.2 Intervalo de Recorrência	
	4.5.1.3 Determinação dos Parâmetros da Distribuição	
	4.5.2 Arrasto Geostrófico e Vento Básico	29
	4.5.3 Cálculo e Incorporação do Fator S_z	30
5.	MAPAS EÓLICOS DO RIO GRANDE DO SUL	
5.1	FREQÜÊNCIAS X DIREÇÕES ANUAIS	34
5.2	VELOCIDADES X DIREÇÕES ANUAIS	35
5.3	POTENCIAL EÓLICO SAZONAL E ANUAL A 50 METROS DE ALTURA	36 E 37
5.4	POTENCIAL EÓLICO SAZONAL E ANUAL A 75 METROS DE ALTURA	38 E 39
5.5	POTENCIAL EÓLICO SAZONAL E ANUAL A 100 METROS DE ALTURA	40 E 41
5.6	POTENCIAL EÓLICO SOBRE LAGOAS E MAR (<i>OFFSHORE</i>)	42 E 43
5.7	FATOR DE FORMA DE WEIBULL, ANUAL	44
5.8	INCERTEZA NAS VELOCIDADES MÉDIAS	45
5.9	VENTOS EXTREMOS A 30M E 50M DE ALTURA	46 E 47
6.	ANÁLISES E DIAGNÓSTICOS	
6.1	ÁREAS MAIS FAVORÁVEIS	51
6.2	POTENCIAL EÓLICO ESTIMADO	52
6.3	ASPECTOS ESTRATÉGICOS	53
	BIBLIOGRAFIA	55
	APÊNDICES	
I.	TORRES ANEMOMÉTRICAS	59
II.	DISTRIBUIÇÕES DE VENTOS EXTREMOS	65
III.	FÓRMULAS E MAPAS ÚTEIS	66
IV.	SUBESTAÇÕES: COORDENADAS E TENSÕES	69

1. INTRODUÇÃO

O Atlas Eólico do Rio Grande do Sul é fruto das iniciativas da Secretaria de Energia, Minas e Comunicações - SEMC, e foi elaborado a partir dos dados de ventos obtidos por intermédio de parcerias institucionais. Para viabilizá-lo, a SEMC definiu os padrões e as especificações técnicas, realizou, em campo, todas as medições entre 2000 e 2002 e contratou, através de processo licitatório, a empresa Camargo Schubert Engenharia Eólica, com notória experiência na elaboração de atlas eólico.

Este trabalho integra o programa de incentivo à energia eólica no Rio Grande do Sul, iniciado em 1999 quando ocorreram as primeiras ações, destacando-se a realização do I Seminário sobre Energia Eólica no Estado do Rio Grande do Sul, promovido e organizado pela SEMC, e a assinatura do primeiro protocolo de intenções para a realização de medições de vento no RS, entre a SEMC, a CEEE e a Wobben. Nos anos seguintes, foram firmados mais 4 protocolos, entre SEMC e a CEEE, com as seguintes empresas: a Gamesa (do grupo Iberdrola), a Energia Regenerativa Brasil Ltda- ERB, a Enerfin (do grupo Elecnor) e a Raiko Engenharia e Consultoria Ltda. Outros 2 protocolos foram assinados entre a SEMC e a Wobben e as seguintes entidades: o Departamento Municipal de Energia de Ijuí-DEMEI e a Cooperativa Regional de Eletrificação Teutônia-CERTEL.

A SEMC, na segunda metade de 2001, já possuía informações e tempo de medição suficientes para que a elaboração do primeiro Atlas Eólico do Rio Grande do Sul fosse iniciada. Dados anemométricos de 21 torres foram utilizados para o Atlas, abrangendo um período igual ou superior a 12 meses, validados por comparações climatológicas e filtragem de efeitos locais de topografia e rugosidade.

Atualmente, existem 26 torres no Estado e, até o final deste ano, serão 36 locais com medições de vento de alta qualidade, conforme se verifica na tabela 1.1.

Todas as medições estão sendo realizadas com o uso de anemômetros do tipo concha, calibrados e certificados, instalados em torres estaiadas, com alturas de 40 a 50m, situadas em locais especialmente selecionados. Os técnicos da Secretaria e da CEEE participam da seleção dos locais de medição, da instalação das torres e equipamentos e realizam a coleta e tratamento dos dados de vento coletados. Estas atividades obedecem os rigorosos procedimentos técnicos e as recomendações do Instituto Alemão de Energia Eólica - DEWI e da Agência Internacional de Energia - IEA. Além da elaboração deste Atlas, este trabalho possibilitou os primeiros projetos de usinas eólicas, alguns dos quais já se encontram registrados na ANEEL e em processo de licenciamento ambiental. Sua implantação, pendente da regulamentação federal, representará a concreta introdução do uso da energia eólica na matriz energética do Rio Grande do Sul.

Os regimes de vento foram interpolados para o restante do território gaúcho através de modelamento de mesoescala - *MesoMap* - uma complexa simulação computacional dos principais processos físicos atuantes na movimentação da atmosfera, balizada por banco de dados meteorológicos validados e consolidados, representativos para 15 anos. Deste processo resultou um modelo atmosférico bastante exato e representativo, por incluir fenômenos tais como as brisas marinhas e terrestres, ventos de montanha, jatos noturnos e outros. O mapeamento final, na resolução de 1km x 1km, foi concluído pelo modelamento tridimensional da camada-limite atmosférica - *WindMap*.

Desta forma, foram utilizados os dados mais completos disponíveis atualmente sobre os regimes de ventos no Estado do Rio Grande do Sul, cujo resultado final é apresentado em mapas temáticos no Capítulo 5.

Ao longo dos 630 km de extensão do litoral do Estado do Rio Grande do Sul, existem 986 km² de areia e dunas, sopradas por ventos intensos e constantes. Também no interior do Estado, na baixa rugosidade e aceleração orográfica das coxilhas da campanha, muitos ventos se unem ao Minuano para compor um dos potenciais eólicos mais promissores do Brasil. A este cenário, soma-se um sistema elétrico que nos últimos anos tem recebido investimentos e reforços importantes na geração e transmissão, exigidos pelas altas taxas de crescimento da demanda energética resultante da industrialização e do desenvolvimento econômico estadual.

Neste contexto, a energia eólica representa uma alternativa capaz de contribuir no fortalecimento do sistema elétrico estadual, ou até mesmo do sistema interligado brasileiro, dada a grande complementaridade sazonal entre os regimes naturais eólico e hidráulico no País. No âmbito sócio-econômico, destacam-se as externalidades potenciais reconhecidamente associadas à geração eólico-elétrica em escala: auto-sustentabilidade pelo uso dos recursos naturais existentes no Estado, atração de investimentos produtivos, tais como em usinas de geração elétrica e fábricas de componentes de aerogeradores, geração de empregos, fixação de tecnologias, desenvolvimento econômico descentralizado, além da importante preservação do patrimônio ambiental.

Entre os principais objetivos deste Atlas, sobressaem:

- Revelar e consolidar o conhecimento mais atual sobre o potencial energético dos ventos sobre o Estado, com o máximo detalhamento possível;
- Gerar ferramentas de auxílio para o Governo do Estado, em suas políticas de planejamento energético e de promoção do desenvolvimento social e econômico;
- Constituir instrumento adicional de atração de investimentos para o Estado do Rio Grande do Sul, ao disponibilizar dados efetivos no auxílio a decisões estratégicas de potenciais investidores.

Além disso, espera-se com este Atlas, disponibilizar informações úteis à comunidade técnica e científica, considerando que o vento tem o interesse multidisciplinar das ciências ambientais, agrárias, da arquitetura, engenharia de edificações, aeronáutica e muitas outras áreas e atividades humanas.

Protocolo Assinatura	Torres de Medições		
	Nº	Município	Início das Medições
SEMC / CEEE / Wobben 9/12/1999	1	Imbé	7/7/2000
	2	Cidreira	8/2/2000
	3	Arroio do Sal	5/4/2001
	4	Santa Vitória do Palmar	1/29/2001
	5	Cassino	7/20/2001
SEMC / Wobben / CERTEL 17/9/2000	1	Progresso	1/3/2001
SEMC / CEEE / Gamesa 3/4/2000	1	São Francisco de Paula	1/16/2001
	2	Imbé	1/17/2001
	3	Palmares do Sul	1/19/2001
	4	Tapes	1/22/2001
	5	São Lourenço do Sul	1/23/2001
	6	São José do Norte	1/25/2001
	7	Rio Grande	1/26/2001
	8	Santa Vitória do Palmar	1/28/2001
	9	Jaguarão	2/6/2001
	10	Piratini	2/7/2001
	11	Livramento	2/12/2001
	12	Faxinalzinho	2/13/2001
SEMC / CEEE / ERB 15/5/2001	1	Arambaré	10/27/2001
	2	Santa Vitória do Palmar	11/11/2001
	3	São Francisco de Paula	12/8/2001
	4	Mostardas	1/11/2002
SEMC / CEEE	1	Balneário Pinhal	3/4/2002
	2	Mostardas	3/7/2002
	3	Osório	7/31/2002
	4	Mostardas	a instalar
	5	Jaquirana	a instalar
	6	Vacaria	a instalar
	7	Canguçu	a instalar
	8	Rio Grande	a instalar
	9	São José do Norte	a instalar
	10	Santa Vitória do Palmar	a instalar
	11	Giruá	a instalar
	12	Santiago	a instalar
SEMC / CEEE / ENERFIN 26/11/2001	1	Osório	4/19/2002
SEMC / WOBWEN / DEMEI 26/2/2002	1	Ijuí	a instalar
SEMC / CEEE / RAIKO 24/6/2002		a definir	a definir

Tabela 1.1
Medições de vento no Estado do Rio Grande do Sul

2. O ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL



Figura 2.1

2.1 GEOGRAFIA E DEMOGRAFIA

Com uma área territorial de 282 062 km² (3.30% do território brasileiro) e ocupando o extremo meridional do Brasil (Fig.2.1), o Estado do Rio Grande do Sul delimita-se com o Estado de Santa Catarina a N-NE, República Argentina a W-NW, República do Uruguai a S-SW e seu extremo oriental é banhado pelo Oceano Atlântico. Seus limites geográficos se estendem entre as longitudes 57°36'14"W - 49°42'00"W e as latitudes 33°45'37"S - 27°05'20"S.

A população estadual, de 10 187 798 habitantes conforme o Censo Demográfico 2000 - IBGE, teve um crescimento de 11.4% na década 1991-2000 (1.02% ao ano, nos últimos anos). Neste período, o percentual de população urbana aumentou de 76.6% para 81.6%, sendo que a população rural diminuiu também em números absolutos: dos 2.14 milhões de habitantes rurais recenseados em 1991, restavam 1.87 milhão em 2000. Este fato traduz não apenas a migração das populações rurais para os centros urbanos, fenômeno recorrente em todo o Brasil nas últimas décadas, mas também a migração de empresários e trabalhadores rurais para as novas e importantes fronteiras agrícolas dos cerrados do Centro-Oeste e Norte do Brasil, onde é notável a presença de pioneiros gaúchos.

Cerca de 28% da população do Rio Grande do Sul está nos municípios que formam a Região Metropolitana de Porto Alegre - principal centro consumidor de energia no Estado. Também se destacam os grandes centros industriais de Caxias do Sul e Pelotas, cidades com população superior a 300 mil habitantes.

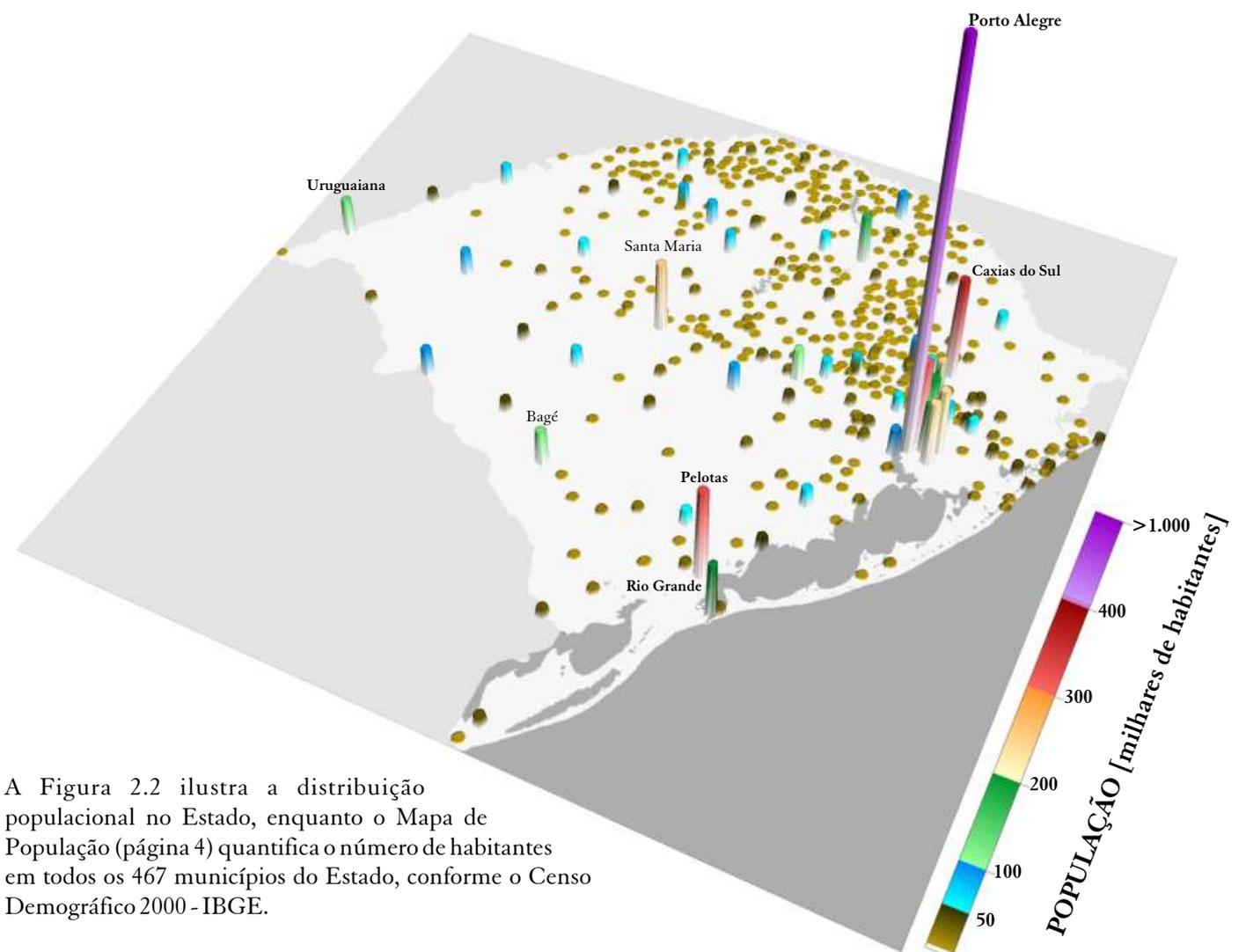


Figura 2.2: Distribuição da população no território rio-grandense.

2.2 TRANSPORTES E ENERGIA

2.2.1 Transportes

A malha rodoviária que interliga o território rio-grandense possui aproximadamente 24 580 km de extensão total; entre estas, as rodovias estaduais ou federais pavimentadas totalizam 10 543km e as não pavimentadas 5 437 km. Para o transporte marítimo, o Estado conta com 2 importantes portos: Rio Grande e Porto Alegre, os quais também são interligados ao interior e extremo oeste do Estado por uma extensa malha ferroviária. O Mapa de População (página 4) inclui também a malha rodoviária e os principais portos em operação.

2.2.2 Energia Elétrica: Consumo

A Figura 2.3 apresenta a participação setorial e a evolução do consumo de energia elétrica no período 1984-1999 ^[20]. No período apresentado, a expansão média do consumo foi de 5.5% ao ano. Neste início de século 21, o consumo de energia elétrica estadual excede 20 TWh/ano, com um consumo anual per capita superior a 2 000 kWh.

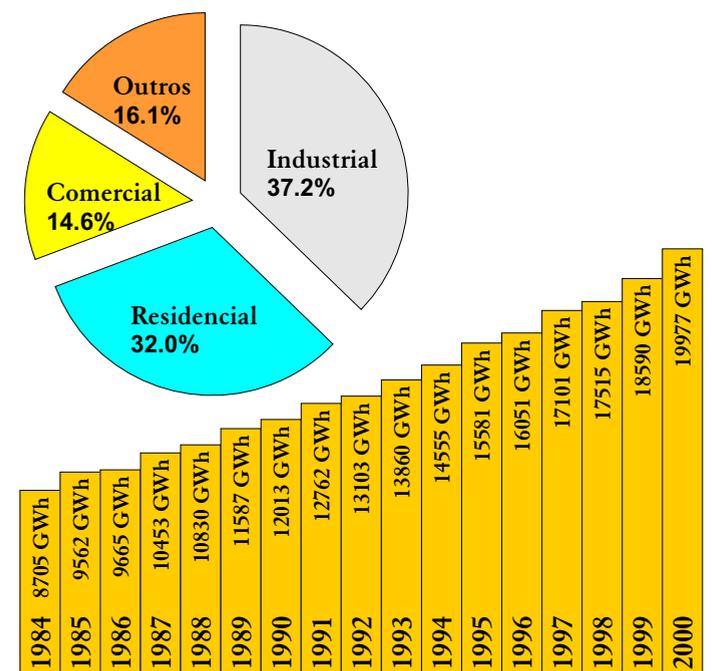
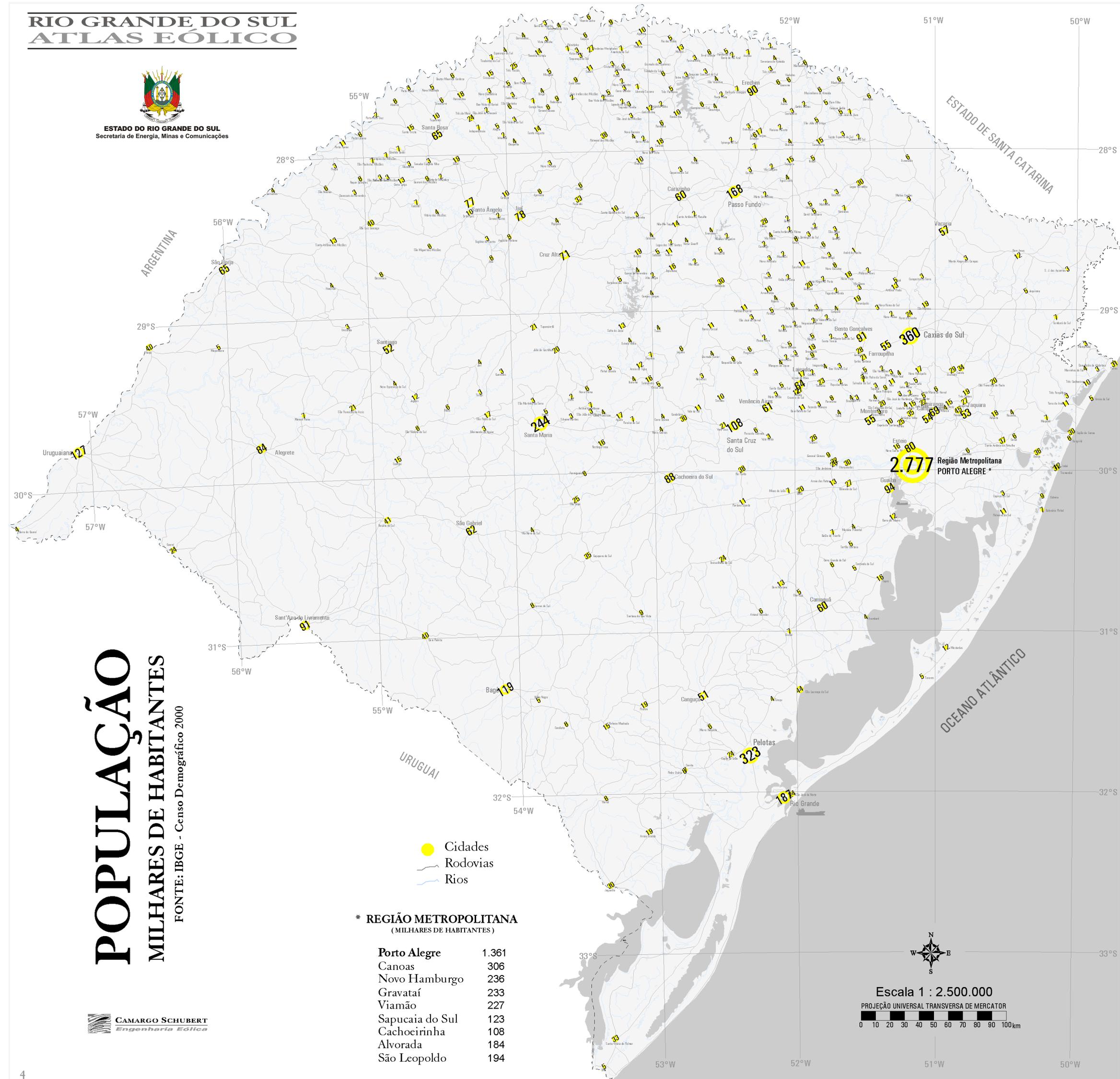


Figura 2.3: Consumo de energia no Rio Grande do Sul ^[26].

RIO GRANDE DO SUL ATLAS EÓLICO



ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL
Secretaria de Energia, Minas e Comunicações



POPULAÇÃO MILHARES DE HABITANTES

FONTE: IBGE - Censo Demográfico 2000

● Cidades
— Rodovias
— Rios

* REGIÃO METROPOLITANA (MILHARES DE HABITANTES)

Porto Alegre	1.361
Canoas	306
Novo Hamburgo	236
Gravataí	233
Viamão	227
Sapucaia do Sul	123
Cachoeirinha	108
Alvorada	184
São Leopoldo	194



Escala 1 : 2.500.000

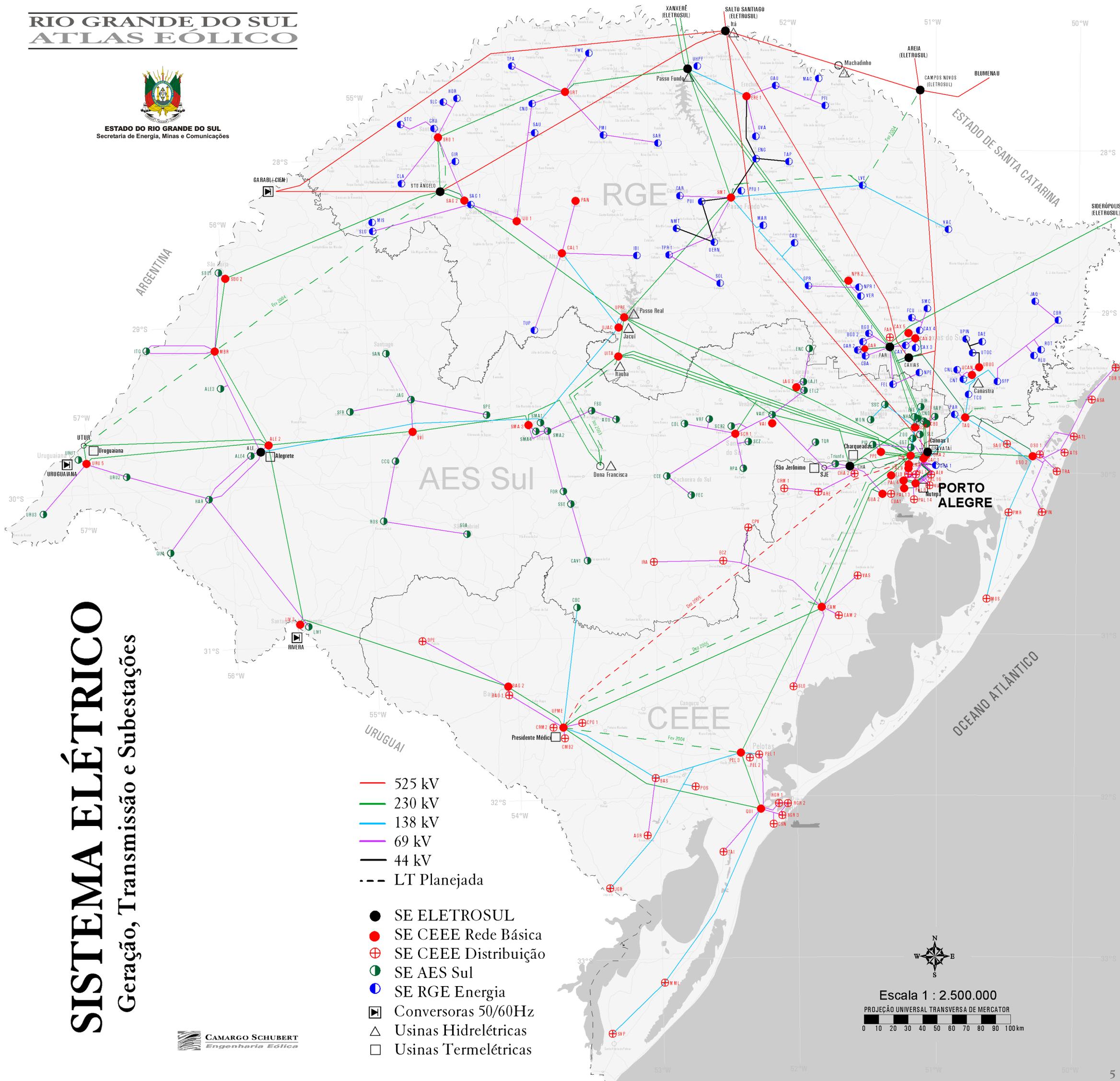
PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR



RIO GRANDE DO SUL ATLAS EÓLICO



ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL
Secretaria de Energia, Minas e Comunicações



SISTEMA ELÉTRICO

Geração, Transmissão e Subestações

- 525 kV
- 230 kV
- 138 kV
- 69 kV
- 44 kV
- - - LT Planejada

- SE ELETROSUL
- SE CEEE Rede Básica
- ⊕ SE CEEE Distribuição
- SE AES Sul
- SE RGE Energia
- ▣ Conversoras 50/60Hz
- △ Usinas Hidrelétricas
- Usinas Termelétricas

CAMARGO SCHUBERT
Engenharia Eólica



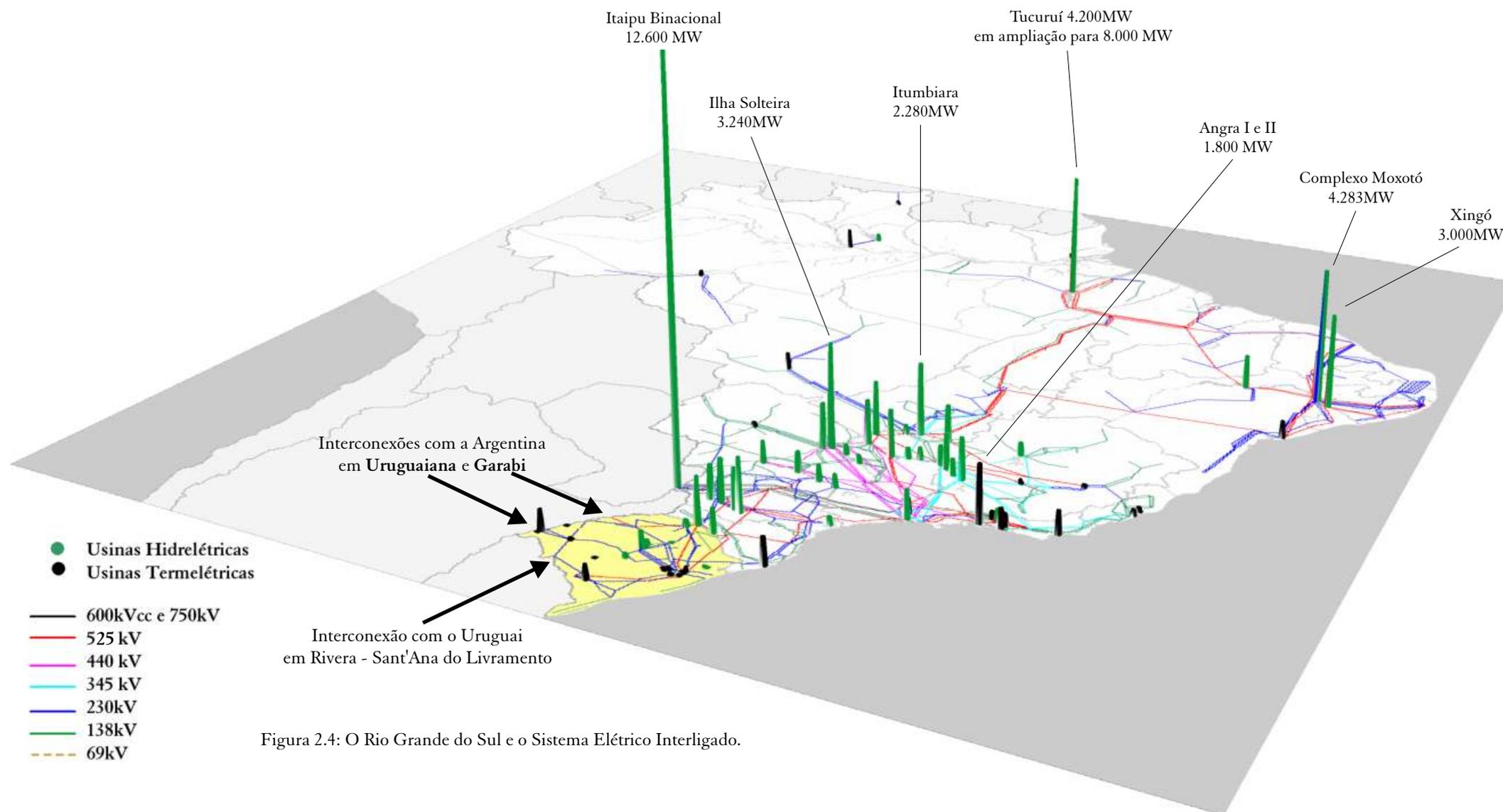


Figura 2.4: O Rio Grande do Sul e o Sistema Elétrico Interligado.

2.2.3 Sistema Elétrico

Conforme apresentado na Figura 2.4, a infra-estrutura de transmissão elétrica no Estado do Rio Grande do Sul está inserida no sistema interligado brasileiro, estando também conectada ao sistema elétrico da Argentina (através das estações conversoras de Garabi e Uruguaiana) e ao sistema elétrico do Uruguai (estação conversora de Rivera, fronteira com Sant'Ana do Livramento). A frequência alternada utilizada na Argentina e Uruguai é de 50Hz ao invés dos 60Hz utilizados no Brasil, daí a necessidade de estações conversoras na integração energética transnacional.

Situado na extremidade do sistema interligado brasileiro, o sistema elétrico rio-grandense tem sido historicamente dependente de reforços na transmissão, bem como da expansão da geração térmica. A Tabela 2.1 apresenta a capacidade de geração instalada no Rio Grande do Sul, situação em 2002^[22].

A máxima demanda no sistema elétrico estadual ocorre no período da tarde, nos meses de verão, causado pela disseminada necessidade de refrigeração de ambientes. Este pico tem atingido valores próximos de 4 000MW (2001-2002). A partir de 1999, os investimentos em transmissão e em subestações, coordenados pela Secretaria de Energia,

USINAS HIDRELÉTRICAS

Usina	MW
Itá	725
Machadinho	570
Itaúba	500
Passo Fundo	226
Jacuí	180
Passo Real	158
Dona Francisca	125
31 Pequenas Centrais Hidrelétricas	46.7
Canastra	44.8
TOTAL	2576 MW

Nota 1: Nas Usinas de Itá e Machadinho foi considerado metade da potência instalada, pois estão localizadas na fronteira com Santa Catarina.
Nota 2: As tabelas não incluem autoprodutores de energia.

USINAS TERMELÉTRICAS

Usina	MW	Combustível
Uruguaiana	600	Gás Natural
Presidente Médici	446	Carvão
Canoas I	160	Gás Natural
Charqueadas	72	Carvão
Oswaldo Aranha (Alegrete)	66	Óleo Combustível
Nutepa	24	Óleo Combustível
São Jerônimo	20	Carvão
Piratini	10	Resíduos de Madeira
Uruguaiana II	8	Casca de Arroz
TOTAL	1406 MW	

Tabela 2.1: Geração instalada no Rio Grande do Sul: 3982 MW.

Minas e Comunicações do Estado, trouxeram as necessárias margens de segurança para o atendimento nos picos de consumo no Rio Grande do Sul. O Estado possui hoje cerca de 6400 km de linhas de transmissão da rede básica em 525 kV e 230kV, 5200km de linhas de sub-transmissão em 138kV, 69kV e 44kV, e em torno de 100.000 km de alimentadores em 23,1kV e 13.8kV^[25].

O setor elétrico gaúcho é composto por 3 empresas específicas de geração, 1 de transmissão, 1 de interconexão

energética, 8 concessionárias e 15 permissionárias (cooperativas), discriminadas na Tabela 2.2. A distribuição de energia elétrica no Rio Grande do Sul é realizada principalmente pelas empresas CEEE - Companhia Estadual de Energia Elétrica S.A, AES-SUL - Distribuidora Gaúcha de Energia S.A., e RGE - Rio Grande Energia S.A.

Empresas de Geração	
	AES Uruguiana LTDA.
CGTEE	Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica
	Tractebel Energia S.A. (Ex GERASUL)
Empresa de Transmissão	
ELETROSUL	Empresa Transmissora de energia Elétrica do Sul do Brasil S.A.
Empresa de Interconexão	
CIEN	Companhia de Interconexão Energética
Concessionárias	
AES Sul	Distribuidora Gaúcha de Energia Elétrica S.A.
CEEE	Companhia Estadual de Energia Elétrica *
RGE	Rio Grande Energia S.A.
DEMEI	Departamento Municipal de Energia de Ijuí
ELETROCAR	Centrais Elétricas de Carazinho S.A.
HIDROPAN	Hidrelétrica Panambi
UHENPAL	Usina Hidroelétrica Nova Palma Ltda
	Muxfeldt Marin & Cia Ltda
Cooperativas de Eletrificação Rural	
CELETRO	Cooperativa de Eletrificação Centro Jacuí Ltda
CERFOX	Cooperativa de Energia e Desenvolvimento Rural Coprel Ltda
CERILUZ	Cooperativa Regional de Energia e Desenvolvimento Ijuí Ltda
CERMISSÕES	Cooperativa Regional de Eletrificação Rural das Missões Ltda
CERTAJA	Cooperativa Regional de Energia e Desenvolvimento Rural Taquari Jacuí Ltda
CERTEL	Cooperativa Regional de Eletrificação Teotônia Ltda
CERTHIL	Cooperativa de Energia e Desenvolvimento Rural Entre Rios Ltda
CERVALE	Cooperativa de Eletrificação Rural do Vale do Jaguarí Ltda
COOPERLUZ	Cooperativa de Eletrificação Rural Fronteira Noroeste Ltda
COOPERNORTE	Cooperativa Regional de Energia e Desenvolvimento do Litoral Norte Ltda
COOPERSUL	Cooperativa Regional de Eletrificação Rural Fronteira Sul Ltda
COPREL	Cooperativa de Energia e Desenvolvimento Rural Coprel Ltda
COSEL	Cooperativa Sudeste de Eletrificação Rural Ltda
CRELUZ	Cooperativa de Energia e Desenvolvimento Rural do Médio Uruguai Ltda
CRERAL	Cooperativa Regional de Eletrificação Rural do Alto Uruguai Ltda

Fonte: SEMC

* A CEEE é uma Empresa de Geração, Transmissão e Distribuição

Tabela 2.2: Empresas do Setor Elétrico Gaúcho

2.3 CLIMATOLOGIA

A Figura 2.5 apresenta a sazonalidade das chuvas no Estado do Rio Grande do Sul^[7]. As séries climatológicas mostram uma das principais características do clima temperado subtropical do sul brasileiro, com chuvas bem distribuídas ao longo do ano. As flutuações inter-regionais dentro do Estado são de pequena magnitude, podendo-se notar uma tendência a índices de precipitação anuais crescentes no sentido Sul-Norte, variando entre 1200mm e 2500mm anuais.

Por outro lado, por situar-se na extremidade meridional do Brasil, o Rio Grande do Sul apresenta as maiores amplitudes térmicas anuais, atingindo temperaturas no entorno ou abaixo de 0°C durante o inverno, e dias quentes (>30°C) e úmidos durante o verão. A região mais fria naturalmente está situada nas maiores altitudes dos campos do alto da serra, enquanto a região mais quente está no extremo oeste do Estado. Nas páginas 8 e 9 são apresentados, respectivamente, os mapas das temperaturas médias sazonais e a temperatura média anual no Rio Grande do Sul, elaborados a partir de dados climatológicos extraídos da Ref. 7, corrigidos para altitude a partir do modelo digital de relevo.

Esta magnitude das flutuações da temperatura ao longo do ano pode implicar em variações superiores a 10% na densidade do ar, com conseqüente influência na geração eólica, conforme apresentado nas fórmulas do Capítulo 3. A densidade do ar [kg/m³] varia com a altitude e a temperatura conforme apresentado no Apêndice III, onde foi considerado ar seco. Flutuações adicionais na densidade - porém menos acentuadas - ocorrem devido às variações no índice de umidade do ar. Os mapas das densidades médias do ar no Estado do Rio Grande do Sul - sazonais e anual - são apresentados nas páginas 10 e 11, respectivamente.

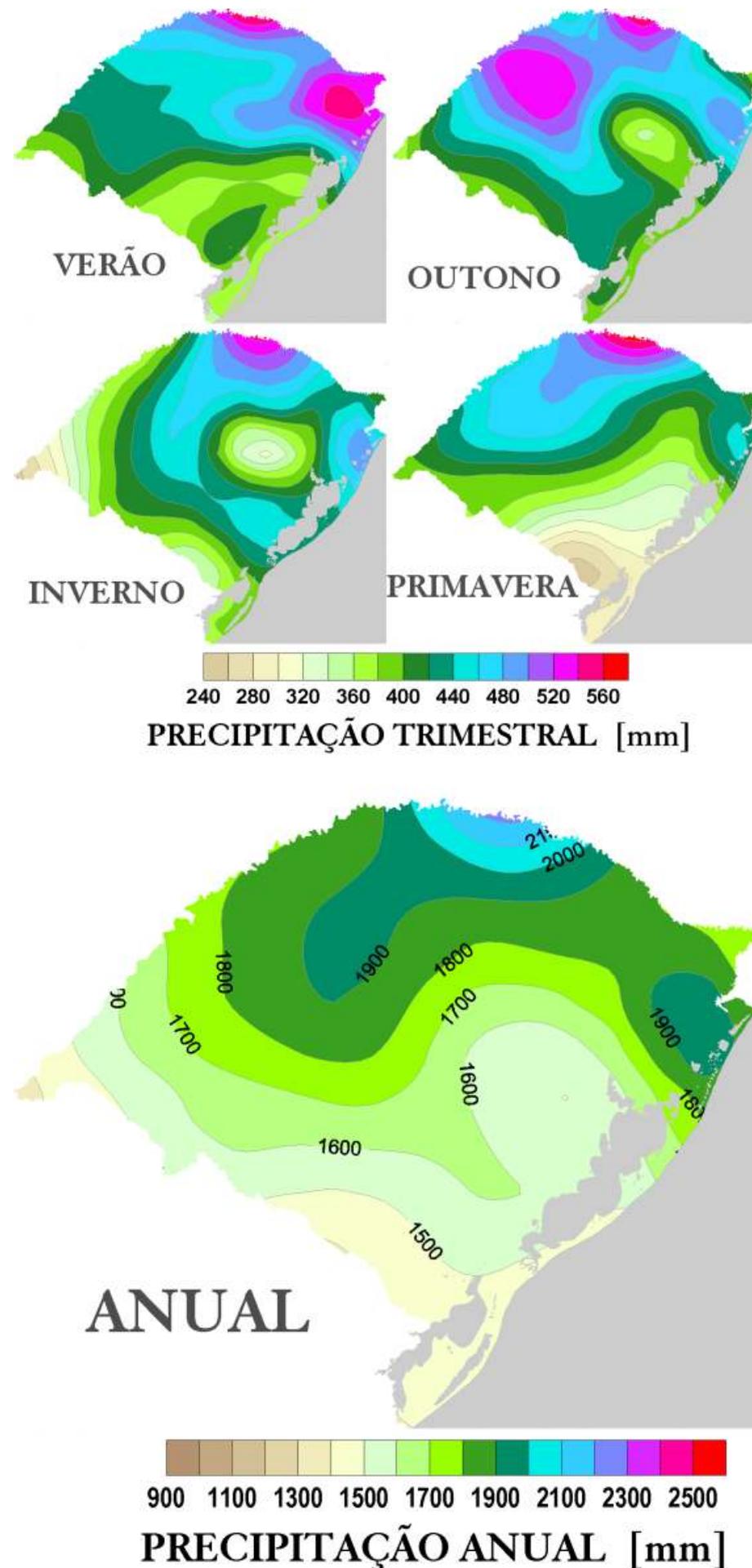
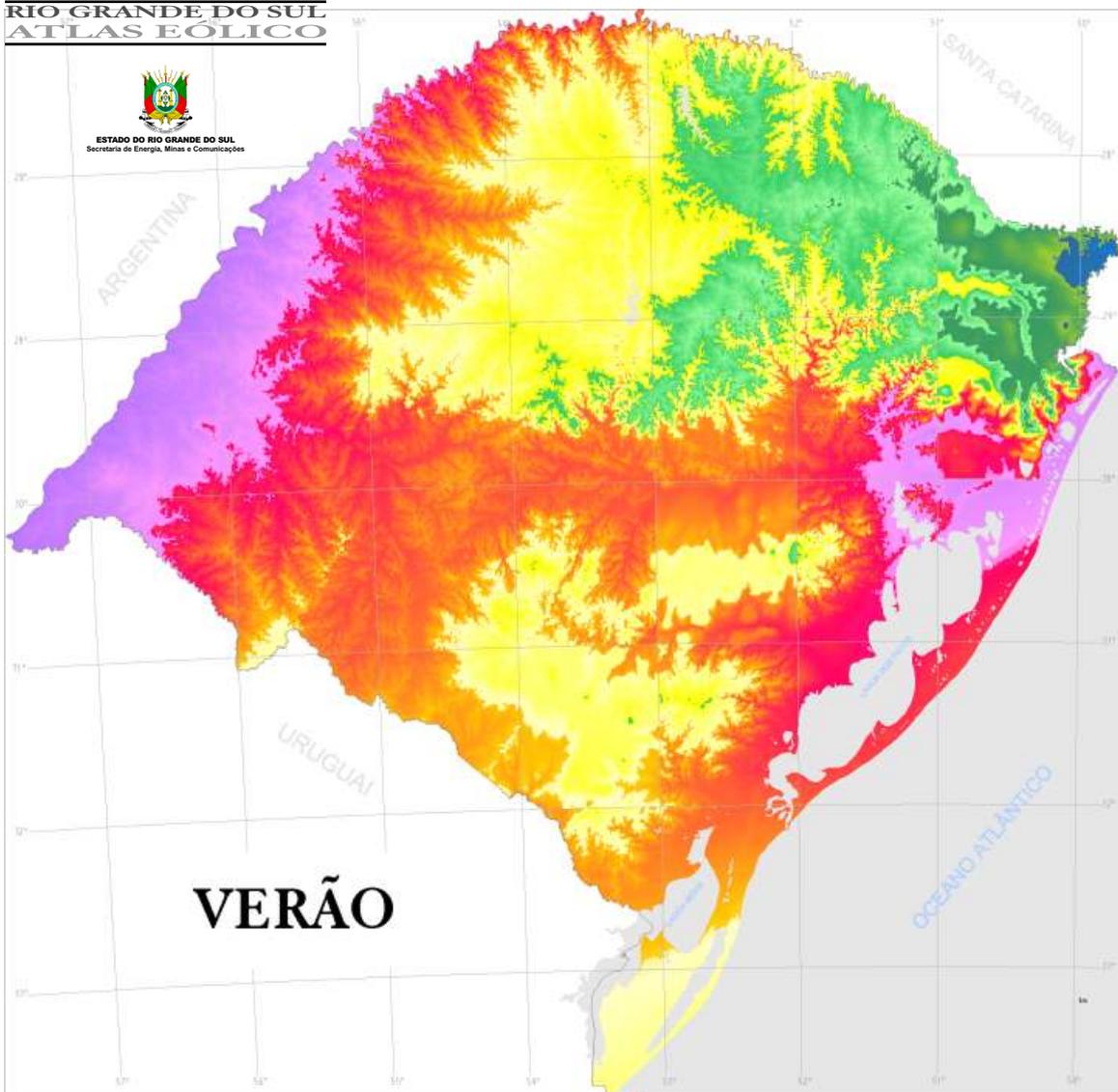
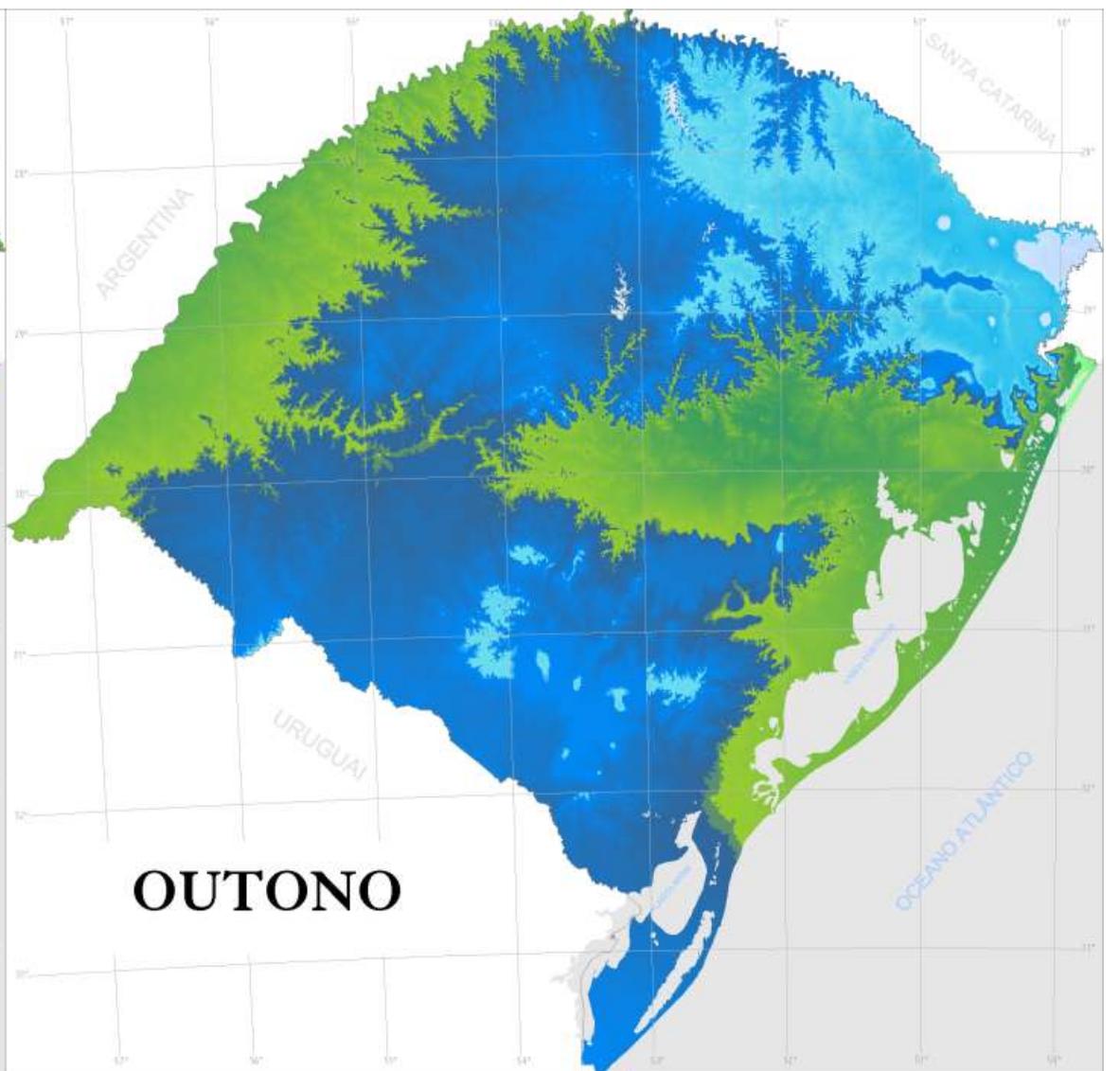


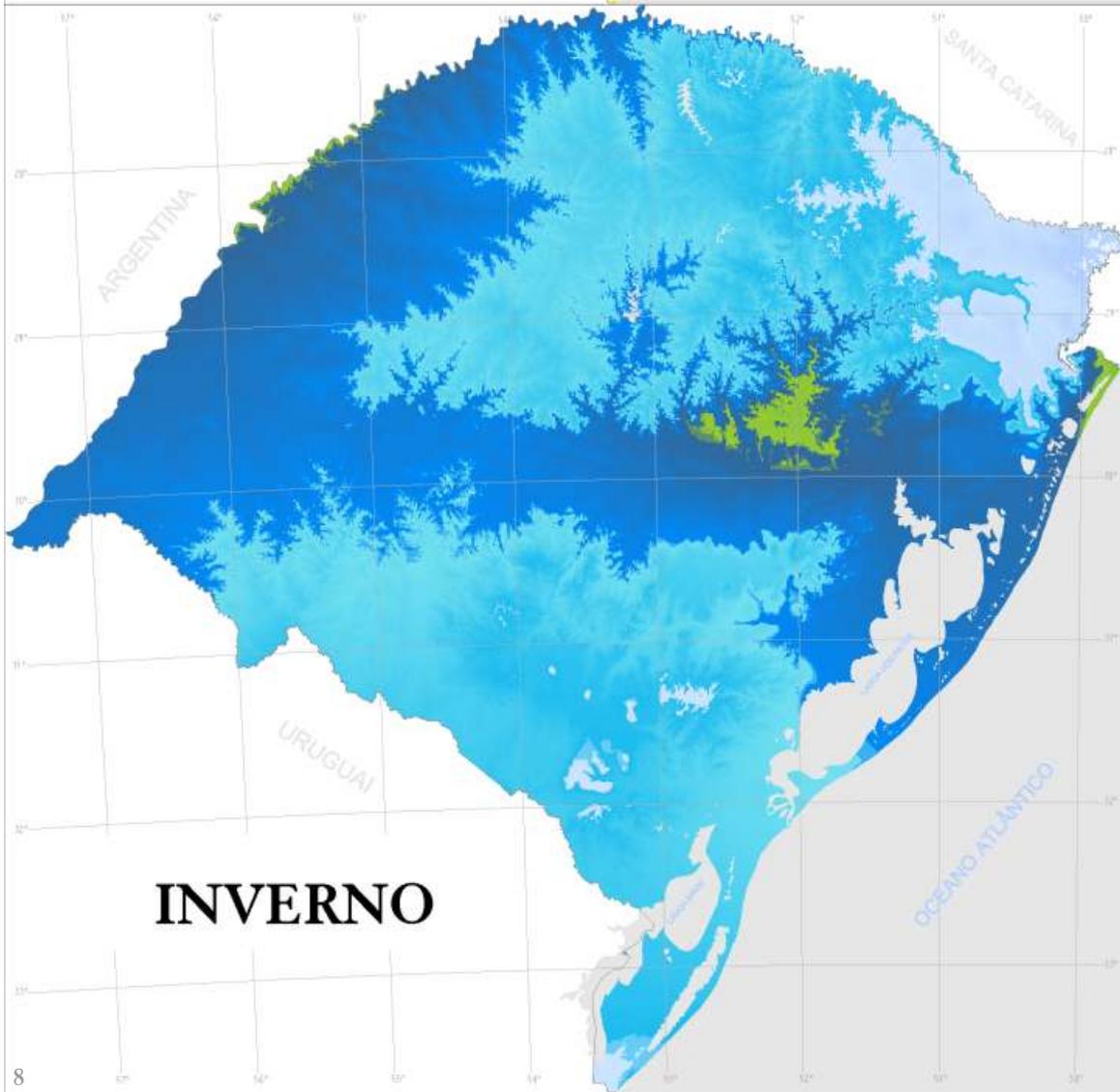
Figura 2.5: Médias climatológicas de Precipitação^[7].



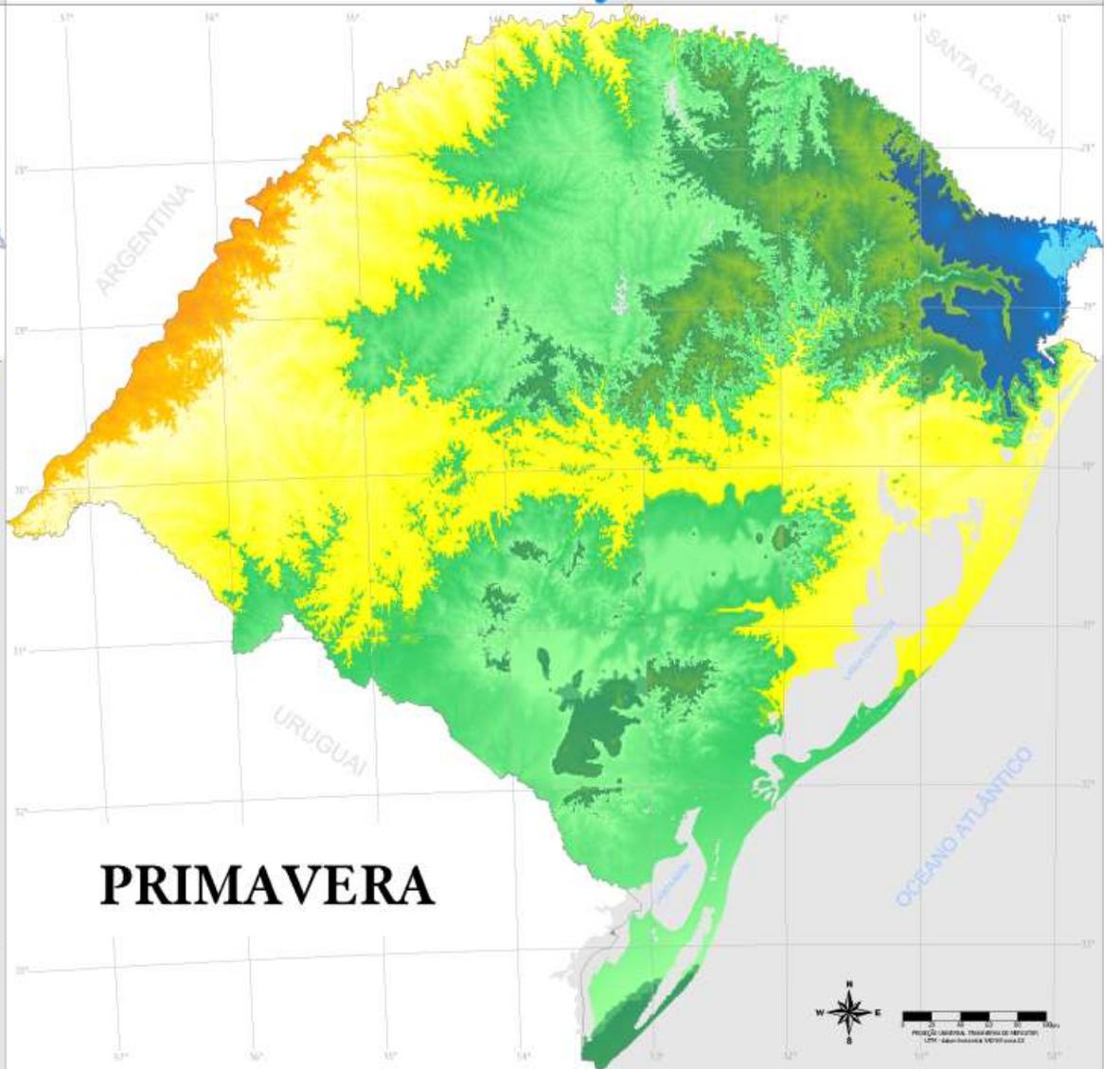
VERÃO



OUTONO



INVERNO



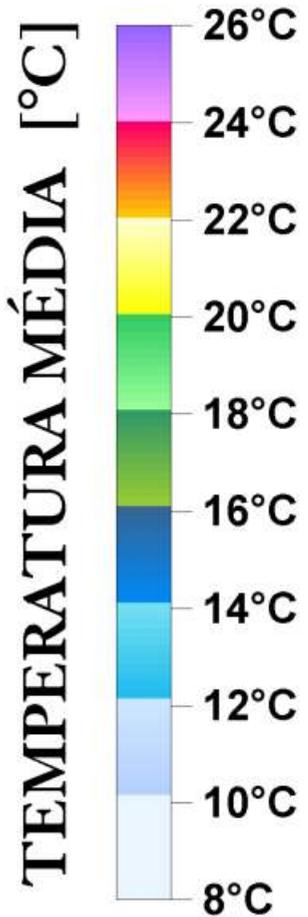
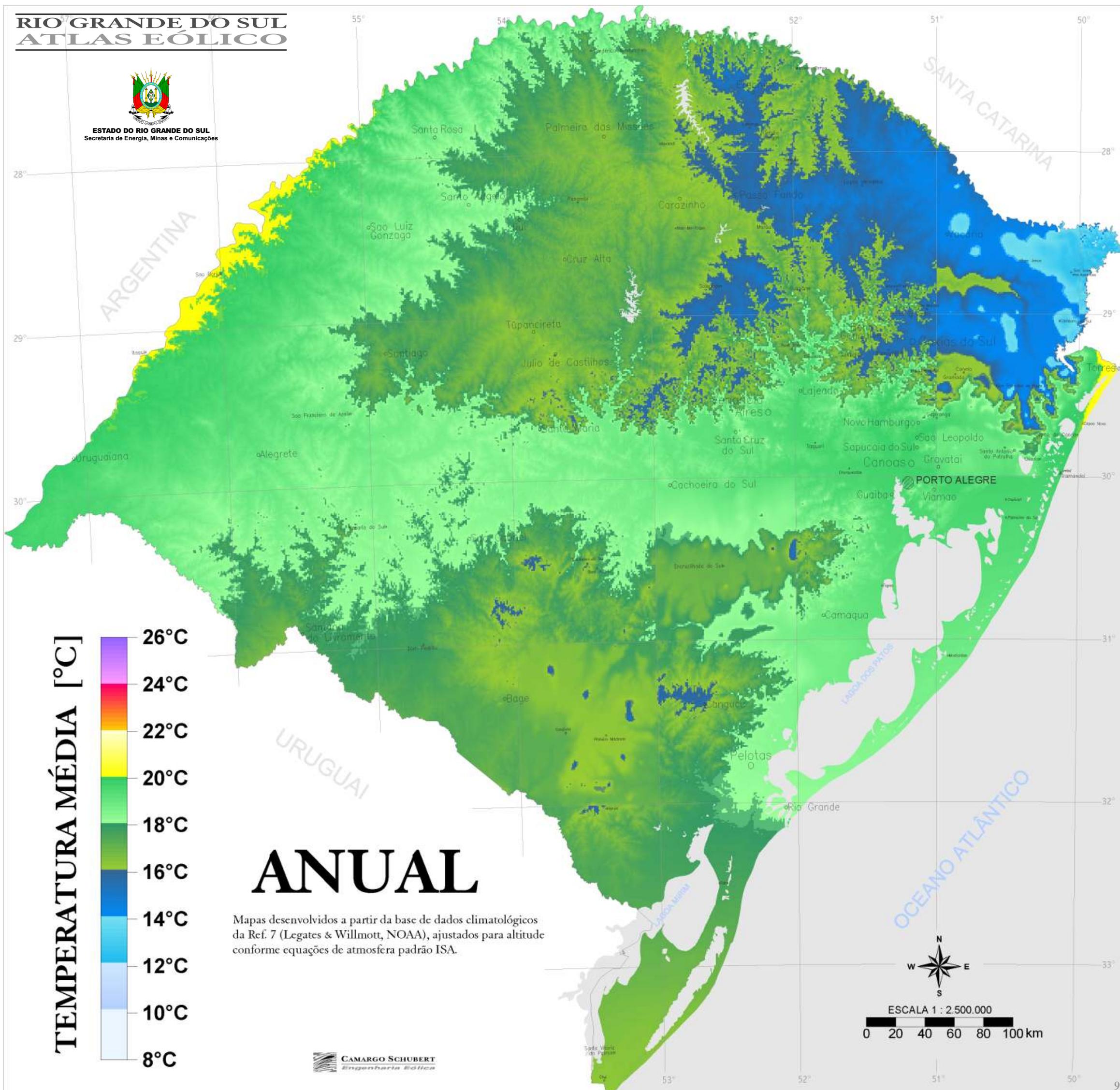
PRIMAVERA



RIO GRANDE DO SUL ATLAS EÓLICO

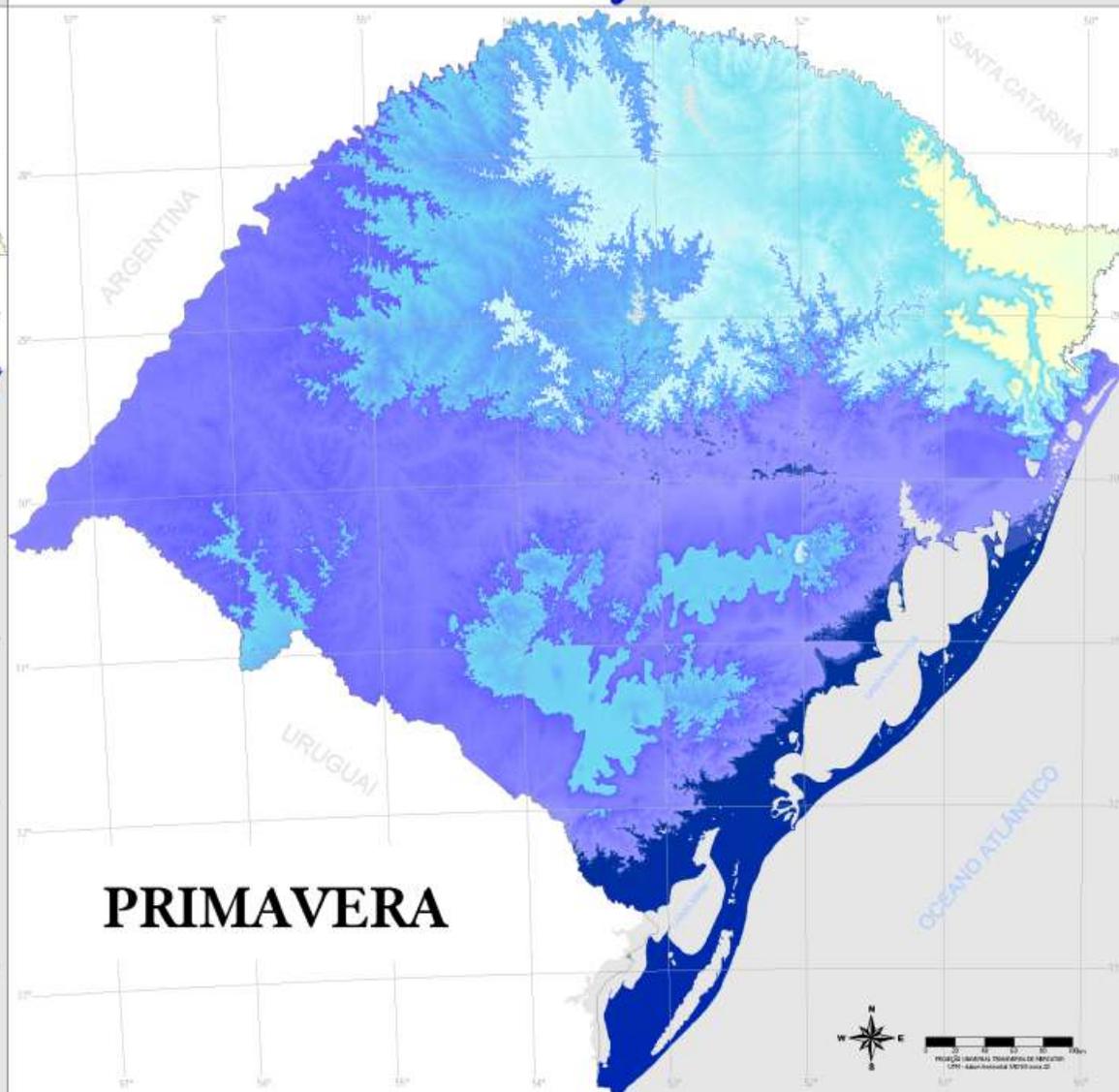
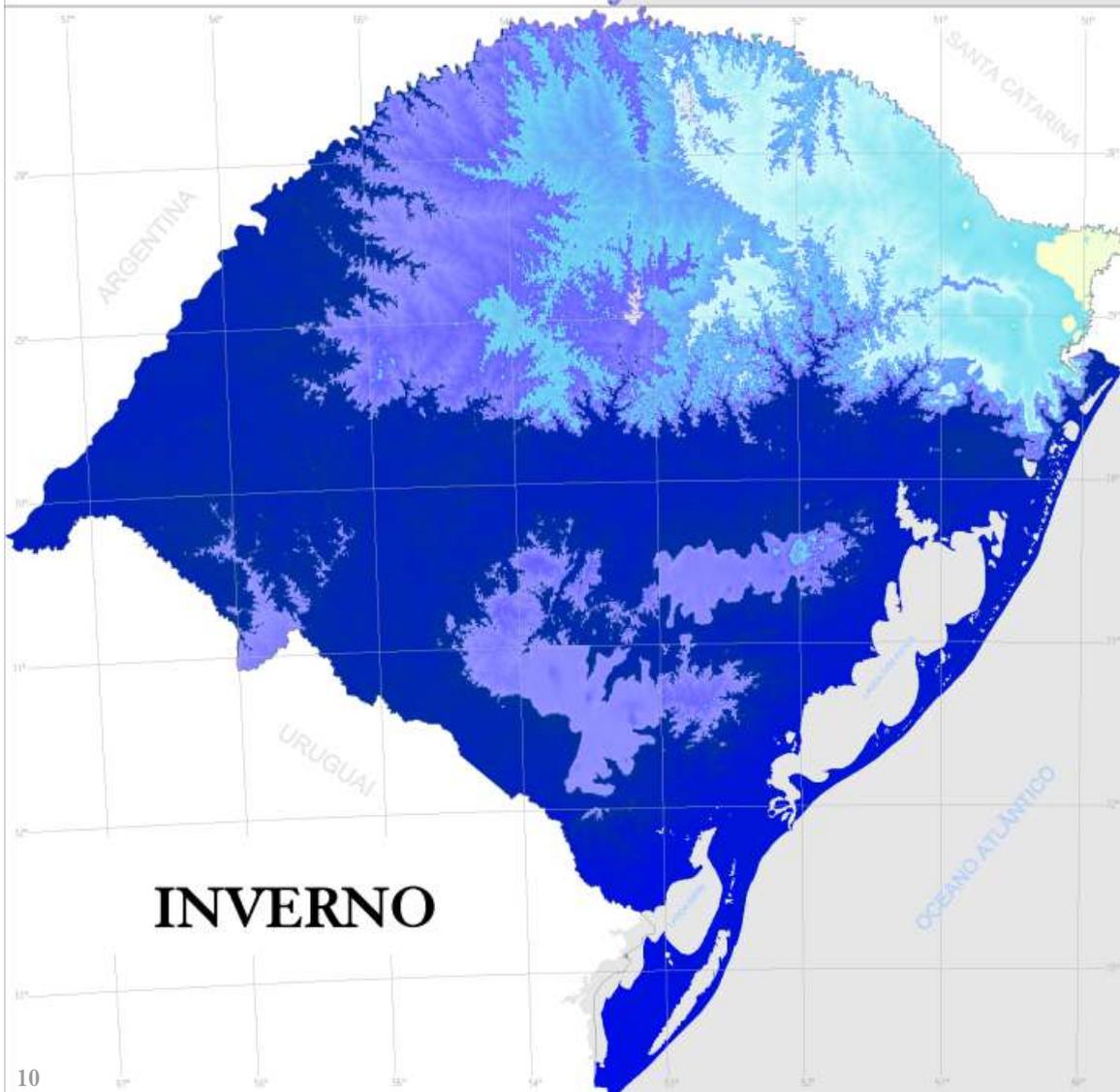
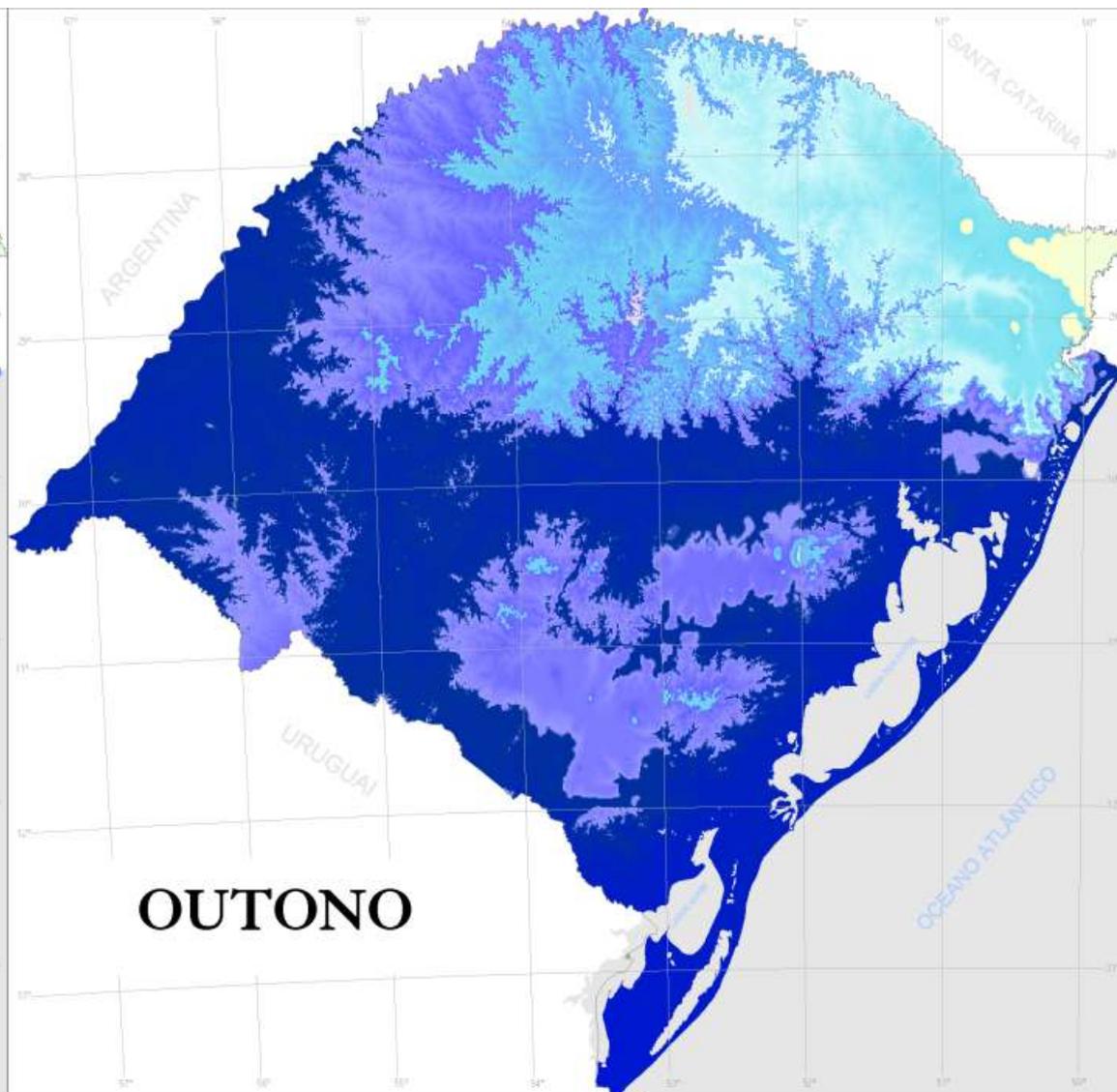
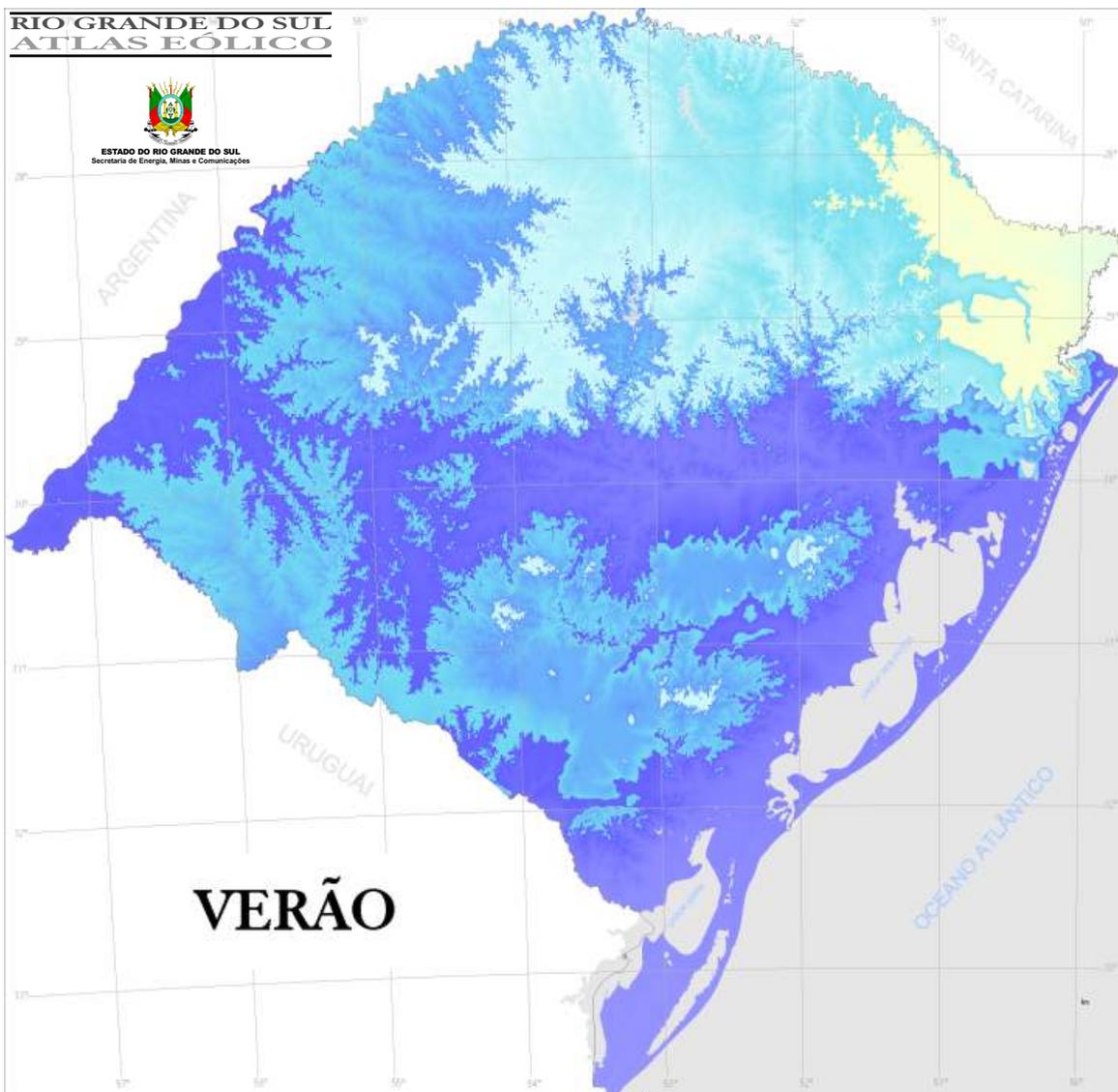


ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL
Secretaria de Energia, Minas e Comunicações



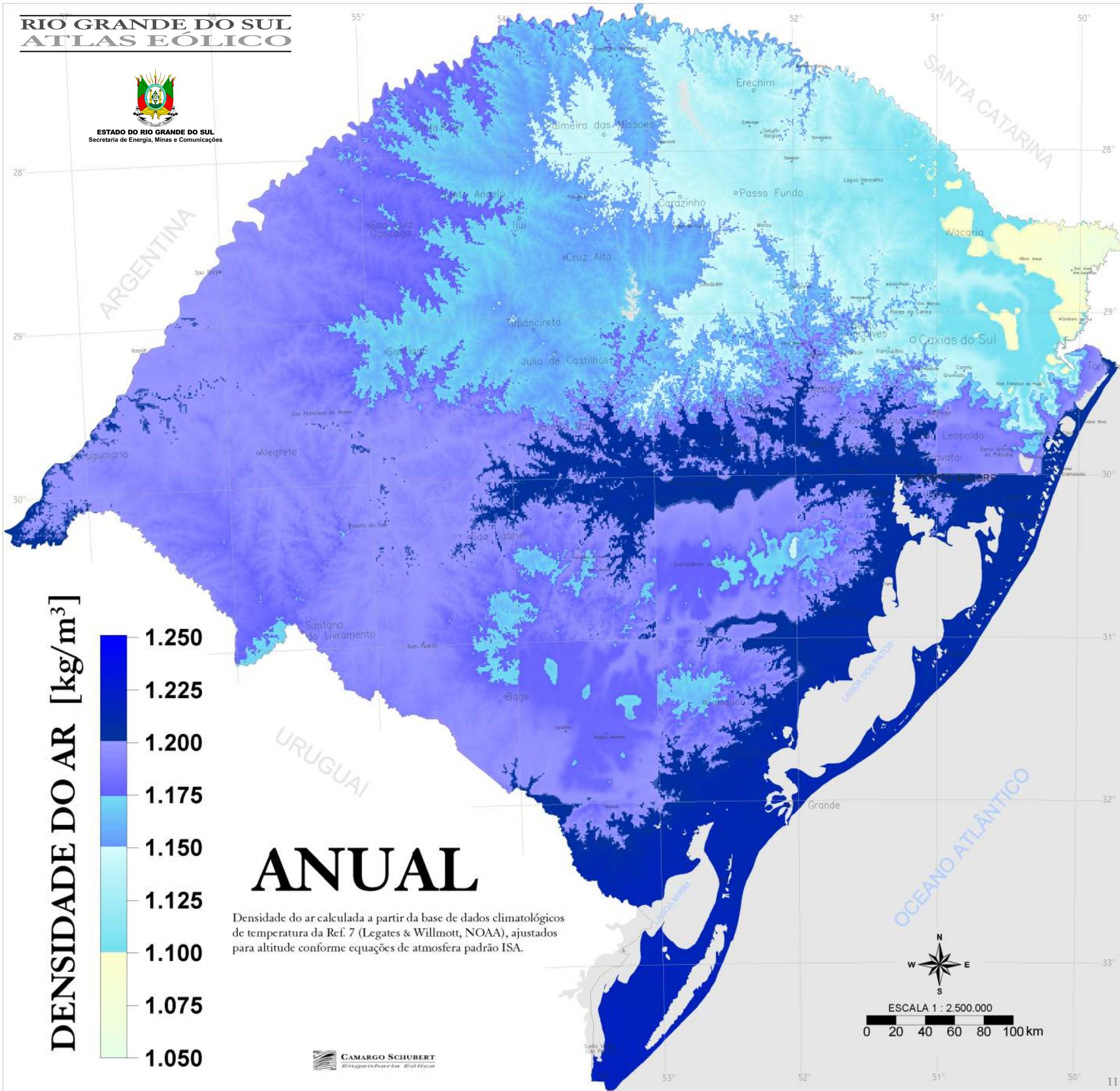
ANUAL

Mapas desenvolvidos a partir da base de dados climatológicos da Ref. 7 (Legates & Willmott, NOAA), ajustados para altitude conforme equações de atmosfera padrão ISA.





ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL
Secretaria de Energia, Minas e Comunicações



2.4 REGIMES DE VENTO

Apesar da aparente imprevisibilidade, o vento traduz uma contínua movimentação da atmosfera, resultante da circulação de massas de ar provocada pela energia radiante do Sol e pela rotação da Terra (Figura 2.8). Entre os principais mecanismos atuantes, destaca-se o aquecimento desigual da superfície terrestre, que ocorre tanto em escala global (latitudes e ciclo dia-noite) quanto local (mar-terra, montanha-vale). Assim, é natural que as velocidades e direções de vento apresentem tendências diurnas e sazonais dentro de seu caráter estocástico.

A Figura 2.9 sintetiza os regimes diurnos e sazonais para distintas regiões do Rio Grande do Sul, com base nos registros de médias de 10 minutos obtidos das torres anemométricas. Os gráficos apresentam as velocidades médias horárias do vento normalizadas - i.e. divididas pelo valor da velocidade média anual - e a sua variação ao longo das 24 horas do dia e dos 12 meses do ano. Em termos de sazonalidade, sobressaem os ventos mais intensos na segunda metade do ano, ocorrendo em todas as regiões - com pequenas defasagens na ocorrência dos picos entre os extremos leste e oeste do Estado. Esta sazonalidade também é apresentada nos mapas de potencial eólico apresentados no Capítulo 5.

No escoamento atmosférico sobre o Rio Grande do Sul prevalecem os efeitos ditados pela dinâmica entre o anticiclone subtropical Atlântico, os intermitentes deslocamentos de massas polares e a depressão barométrica do nordeste da Argentina.

O anticiclone subtropical Atlântico é um centro de altas pressões cuja posição média anual é próxima a 30°S, 25°W. A circulação atmosférica dele resultante, no sentido anti-horário, resulta no predomínio de ventos de leste-nordeste sobre toda a área do Brasil situada abaixo da latitude 10°S.

A depressão barométrica do nordeste da Argentina é uma área quase permanente de baixas pressões, geralmente estacionária a leste dos Andes, cuja posição anual média é de aproximadamente 29°S, 66°W. Esta depressão é causada pelo bloqueio da circulação geral atmosférica imposto pela

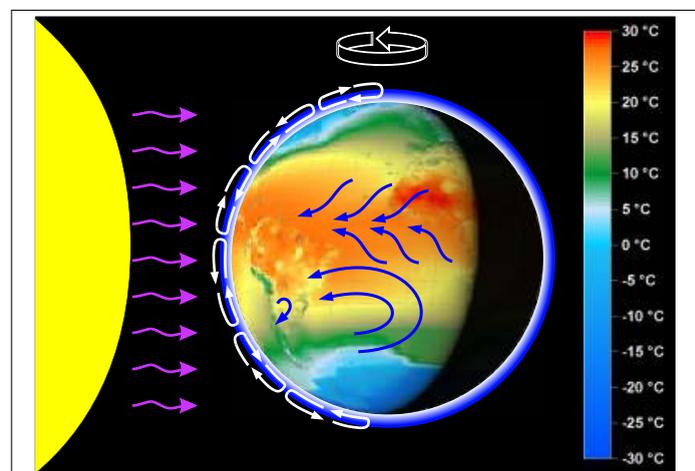


Figura 2.8: Circulação atmosférica: energia solar, temperaturas médias anuais, campos de pressão, rotação da terra.

parede montanhosa dos Andes e acentuada pelo intenso aquecimento das planícies de baixa altitude da região.

O gradiente de pressão atmosférica entre a depressão do nordeste da Argentina e o anticiclone subtropical Atlântico induz um escoamento persistente de leste-nordeste ao longo de toda a região Sul do Brasil. Desse escoamento resultam velocidades médias anuais de 5.5m/s a 6.5m/s sobre grandes áreas da região. Entretanto, esse perfil geral de circulação atmosférica encontra variações significativas na mesoescala e na microescala, por diferenças em propriedades de superfícies, tais como geometria e altitude de terreno, vegetação e distribuição de superfícies de terra e água. Desses fatores podem resultar condições de vento locais que se afastam significativamente do perfil geral da larga escala da circulação atmosférica, conforme poderá ser visto nos mapas do Capítulo 5. Assim, ventos superiores a 7m/s poderão ser encontrados nas elevações mais favoráveis do continente, sempre associados à baixa rugosidade da campanha. Outra grande área com velocidades superiores a 7m/s está ao longo do extenso litoral que se estende a partir de Imbé até o extremo sul do Estado, onde os ventos predominantes de leste-nordeste são acentuados pela ação diurna das brisas marinhas, ao longo dos meses de primavera, verão e início de outono.

Até aqui foram ressaltados os regimes predominantes do vento, mas é muito importante que se ressalte o caráter dinâmico das circulações sobre o Rio Grande do Sul, em especial as intermitentes passagens de frentes frias - que se intensificam no inverno e primavera, trazendo o célebre Minuano - vento forte, frio e cortante que sopra de SW sobre a campanha, com duração aproximada de três dias a cada passagem de massa polar.

Uma amostra dessa dinâmica é apresentada na Figura 2.10: acima são exemplificados os vetores de velocidade durante o deslocamento de uma massa de ar polar, representado pela cor azul. O ar frio possui maior densidade e é alta a pressão barométrica na área ocupada por estas parcelas de atmosfera resfriada - que têm dimensão horizontal da ordem de 1 000 km e são geradas no Polo Sul, dentro do processo de circulação atmosférica. Por ser mais densa, a massa fria avança levantando as massas de ar mais quentes à sua frente, o que causa as chuvas na sua parte frontal.

A chegada da frente é precedida por ventos de norte-noroeste, que trazem os ventos mais intensos mas de pequena duração. A passagem da frente é seguida pelo Minuano, sopro de ar polar, da direção sudoeste, com velocidades que podem exceder 10 m/s por alguns dias.

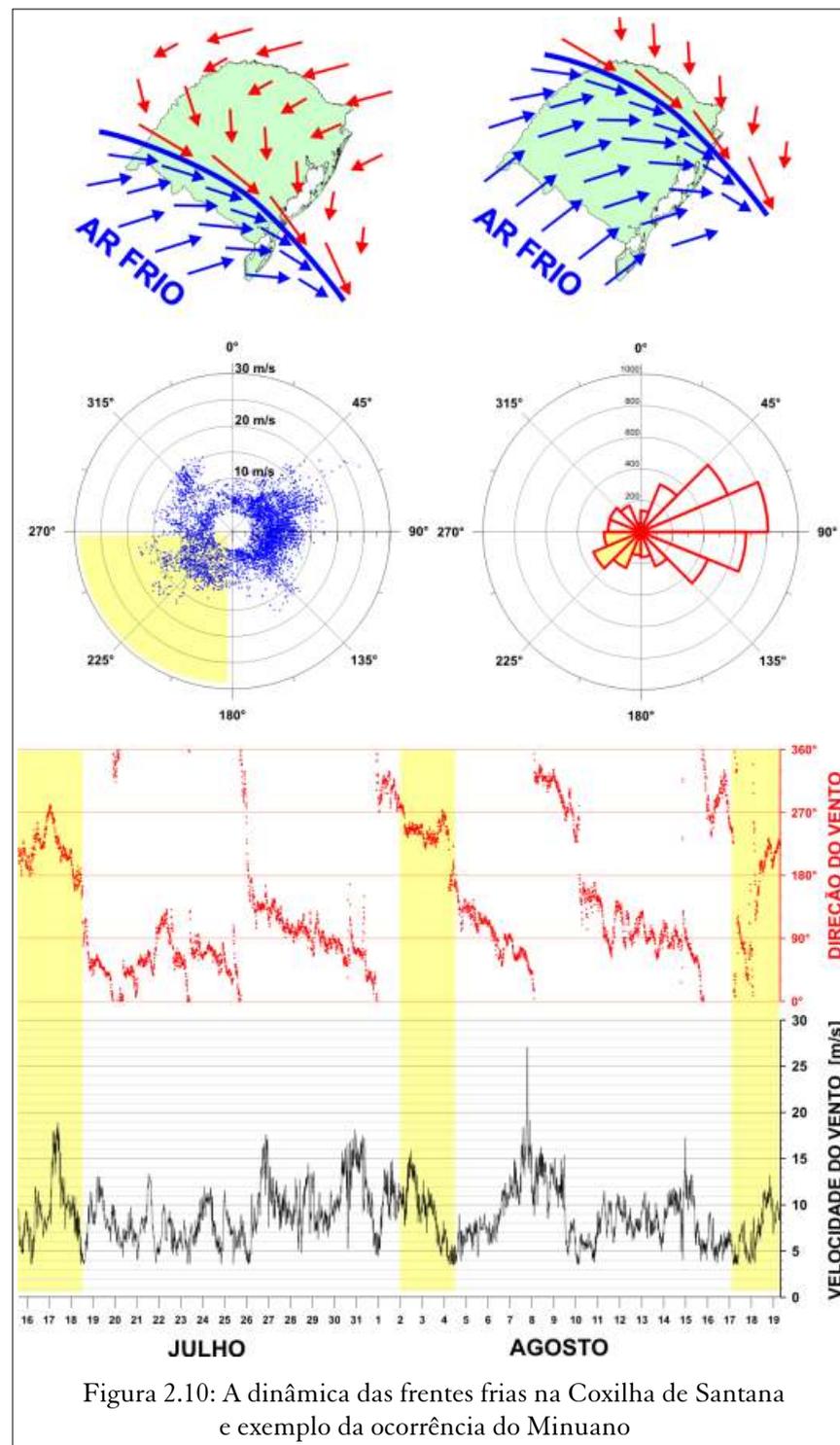


Figura 2.10: A dinâmica das frentes frias na Coxilha de Santana e exemplo da ocorrência do Minuano

Depois, gradualmente, a situação geral dos ventos de leste-nordeste tende a se reestabelecer, até a passagem de nova frente. No período apresentado na Fig.2.10 - amostragem de Julho-Agosto na Coxilha de Santana - pode-se observar a passagem de pelo menos 5 frentes frias, marcadas por variações de 360° na direção dos ventos; em um evento, o vento médio de 10 minutos (a 40m de altura) atingiu 27m/s (97.2 km/h) durante a chegada de uma frontal. Por três vezes no período amostrado, o Minuano teve persistência de dias, conforme indicado em amarelo. Certamente o Minuano é um vento extremamente marcante para o gaúcho que cavalga pela campanha, pelo sopro forte de ar polar, denso e persistente ao longo de dias. Apesar de não ser predominante, o Minuano agrega uma contribuição importante ao potencial eólico do Rio Grande do Sul.

Na campanha e serras do centro e oeste do território rio-grandense, as velocidades de vento se intensificam durante o período noturno, com picos ocorrendo a partir de 22:00h até 6:00h da manhã. Essas velocidades se amainam durante as horas do dia, especialmente nos meses de verão e outono.

No alto das maiores elevações das serras ao nordeste do Estado, os ventos tendem a ser mais fracos nos meses de verão e no início das noites, entre 20:00h e 24:00h.

Ao longo do litoral, a ação das brisas marinhas aumenta as velocidades de vento a partir das 11:00h até as 18:00h ao longo da primavera e se estendendo pelos meses de verão, possuindo bom sincronismo com a demanda no sistema elétrico estadual. Como a região apresenta grande amplitude térmica anual, esta situação chega a se reverter nos meses mais frios do inverno, onde as menores velocidades foram registradas no período das 14:00h - 23:00h no litoral sul do estado.

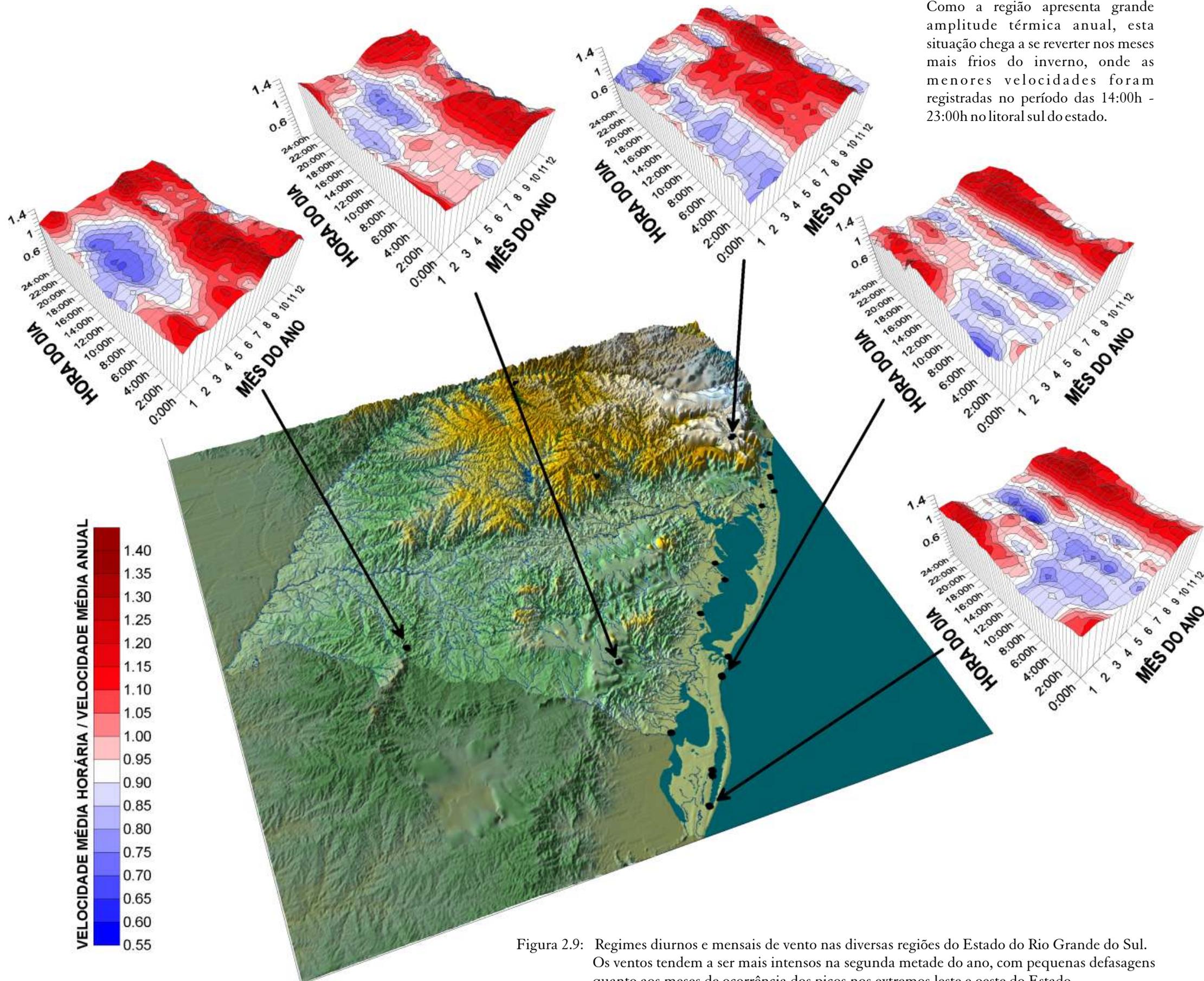


Figura 2.9: Regimes diurnos e mensais de vento nas diversas regiões do Estado do Rio Grande do Sul. Os ventos tendem a ser mais intensos na segunda metade do ano, com pequenas defasagens quanto aos meses de ocorrência dos picos nos extremos leste e oeste do Estado.

3. ENERGIA EÓLICA E TECNOLOGIA

3.1 O VENTO

O vento - atmosfera em movimento - origina-se da associação da radiação solar e da rotação planetária. Todos os planetas envoltos por gases em nosso sistema solar apresentam distintas formas de circulação atmosférica e ventos em sua superfície. Trata-se de um mecanismo solar-planetário permanente, cuja duração é mensurável na escala de bilhões de anos. O vento é renovável.

3.2 A ENERGIA DO VENTO

O ar é composto de moléculas (Nitrogênio, Oxigênio e outros gases) e portanto possui massa; a densidade do ar ρ - como já visto na Figura 2.7 - é da ordem de $1,2 \text{ kg/m}^3$. Massa em movimento é energia cinética. O vento é energia.

Uma turbina eólica capta uma parte da energia cinética do vento, que passa através da área varrida pelo rotor, e a transforma em energia elétrica. A potência elétrica é função do cubo da velocidade de vento v

$$P = \frac{1}{2} A_r v^3 C_p \quad (\text{Watts})$$

A_r - área varrida pelo rotor ($= \pi D^2/4$, D é o diâmetro do rotor); C_p - coeficiente aerodinâmico de potência do rotor (valor máximo teórico = 0.593, na prática atinge 0.45 e é variável com vento, rotação, e parâmetros de controle da turbina); η - eficiência do conjunto gerador/transmissões mecânicas e elétricas ($\sim 0.93-0.98$).

Ao absorver a energia cinética, o rotor reduz a velocidade do vento imediatamente a jusante do disco; gradualmente essa velocidade se recupera, ao se misturar com as massas de ar do escoamento livre. Das forças de sustentação

aerodinâmica nas pás do rotor resulta uma esteira helicoidal de vórtices, a qual também gradualmente se dissipa. Após alguma distância a jusante, o escoamento praticamente recupera a velocidade original e turbinas adicionais podem ser instaladas. Na prática, essa distância varia com a velocidade do vento, condição de operação da turbina, rugosidade de terreno e condição de estabilidade térmica vertical da atmosfera. O equacionamento usual no cálculo desta interferência é desenvolvido a partir da consideração de conservação de *momentum* ao longo da esteira aerodinâmica do rotor [19], onde obtém-se a seguinte relação entre as velocidades do escoamento livre (u_o) e na esteira, a uma distância axial x do rotor (u)

$$u = u_o \left(1 - \sqrt{1 - C_t} \right) \frac{D}{2\beta x}$$

$$\beta = \frac{1}{2 \ln(h/z_o)} \quad C_t = \frac{2F_T}{A_r u_o^2}$$

onde β é a constante de decaimento da esteira; h a altura do centro do rotor; z_o a rugosidade do terreno; C_t é o coeficiente aerodinâmico de tração na turbina e F_T é a força axial (tração) sobre rotor. A Figura 3.1 exemplifica o modelo descrito, comparando a recuperação da velocidade do vento ao passar pelo rotor de uma turbina eólica, em diferentes tipos de terrenos.

A determinação da disposição das máquinas (*micrositing*) em uma usina eólio-elétrica, idealmente requer medições anemométricas específicas, levantamentos detalhados da rugosidade e topografia do terreno e o cálculo do campo de velocidades e interferência aerodinâmica entre todos os rotores. O processo de otimização usualmente envolve o compromisso de Engenharia: maximizar a eficiência e produção energética e também o aproveitamento do terreno/infra-estrutura.

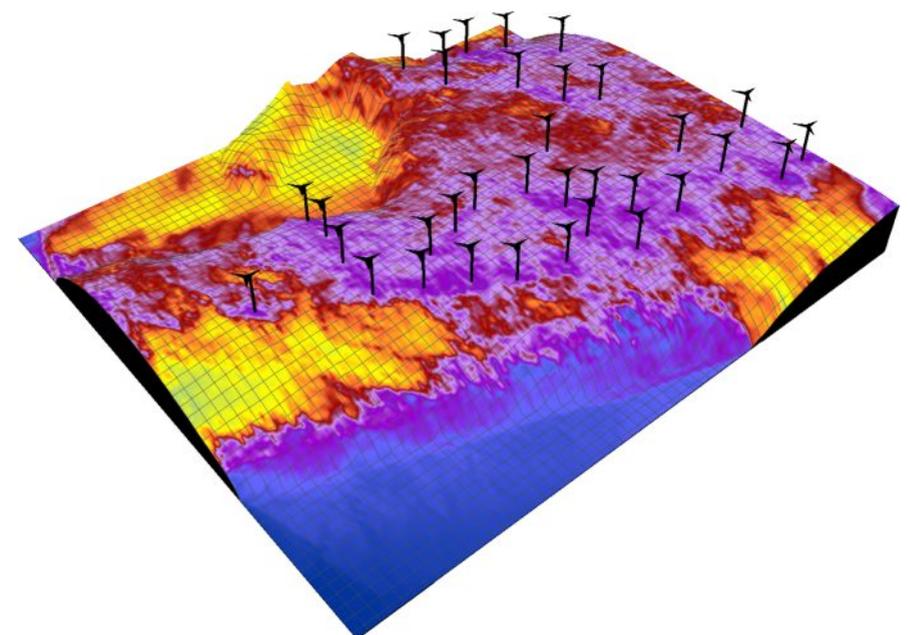
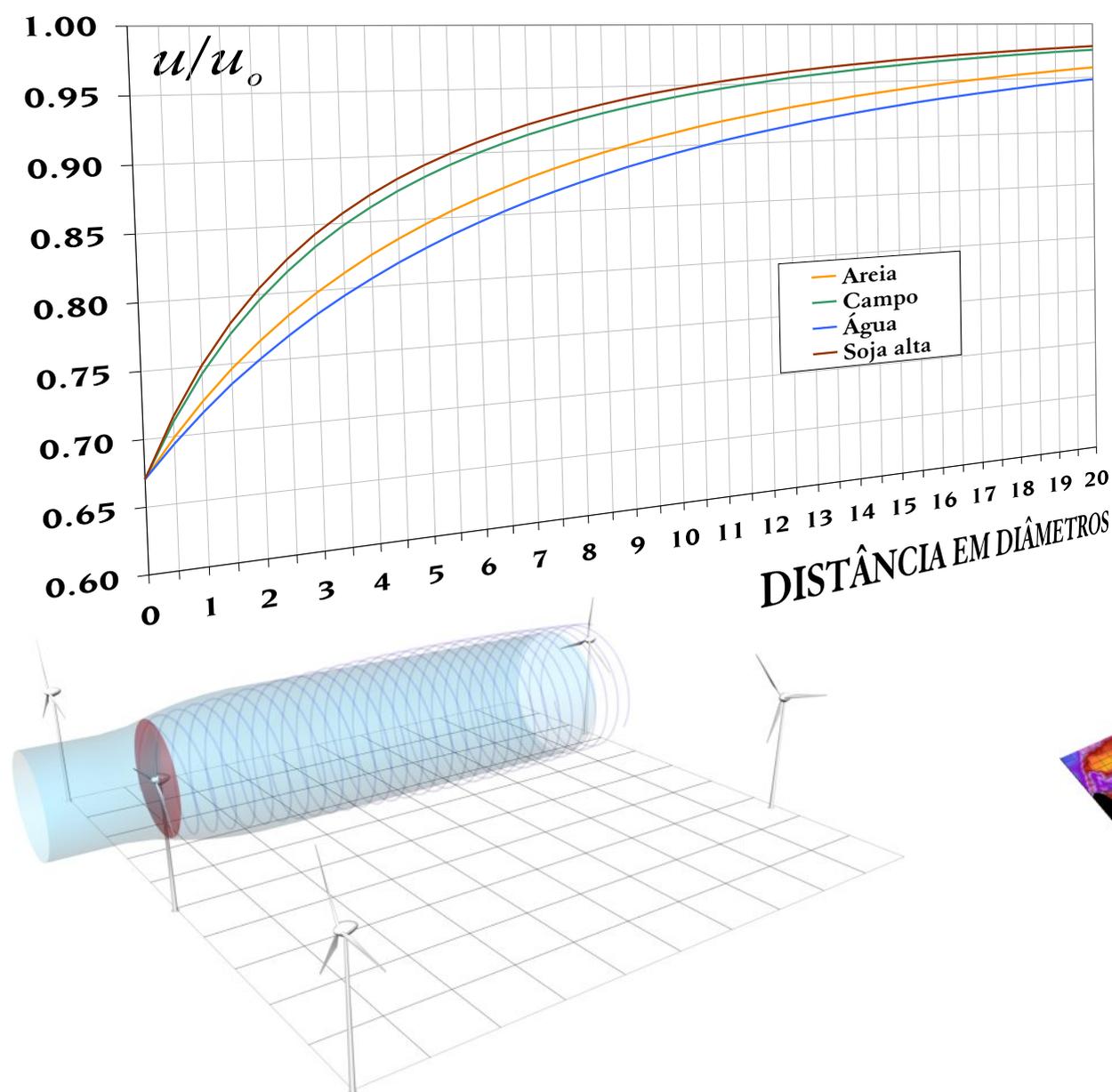


Figura 3.1: Recuperação da velocidade do vento na esteira aerodinâmica do rotor e detalhe de projeto aerodinâmico de usina eólica.

3.3 TECNOLOGIA

A energia do vento tem sido utilizada em larga escala pela humanidade, através dos séculos. Inicialmente em trabalhos mecânicos como moagem de grãos, bombeamento d'água e outros: Pérsia (Século VII), Europa (Séculos XIII - XIX), Estados Unidos (1864-).

O uso da energia do vento para geração elétrica adquiriu escala na década de 1980, e vem se expandindo no mundo a taxas sempre crescentes, conforme apresentado na Figura 3.2. Durante o ano de 2001 foram acrescentados 6765 MW de capacidade eólica no mundo, tendo-se totalizado 24471 MW instalados. Esta rapidez na expansão na escala de Gigawatts se deve em grande parte ao ciclo de sua efetivação, que envolve escala industrial em todas as principais etapas, conforme apresentado na Figura 3.3. Também é fundamental ressaltar que esta rapidez na expansão eólica tem apoio decisivo em sua característica de energia limpa, o que usualmente simplifica e acelera o licenciamento ambiental.

Sendo uma das fontes emergentes com maior taxa de expansão na área energética, as máquinas eólicas se encontram em franco desenvolvimento tecnológico neste início de século XXI, sobressaindo como tendência principal o aumento das dimensões e capacidade unitária das turbinas. A Figura 3.4 ilustra as dimensões de turbinas disponíveis no mercado mundial no ano de 2002: é todavia importante mencionar que as turbinas eólicas com capacidade de até 2000kW já podem ser consideradas como tecnologicamente consolidadas, pela quantidade de máquinas já operacionais no mundo. As turbinas maiores ilustradas, apesar de já disponíveis no mercado e com diversas unidades instaladas, ainda podem ser consideradas como na etapa de consolidação tecnológica. A Figura 3.4 também inclui uma comparação das dimensões das turbinas atuais, com aquelas do Boeing 747 - Jumbo. Os rotores das turbinas eólicas são fabricados em materiais compostos, e pelos requisitos de peso, rigidez e aerodinâmica, também são estruturas com tecnologia tipicamente aeronáutica.

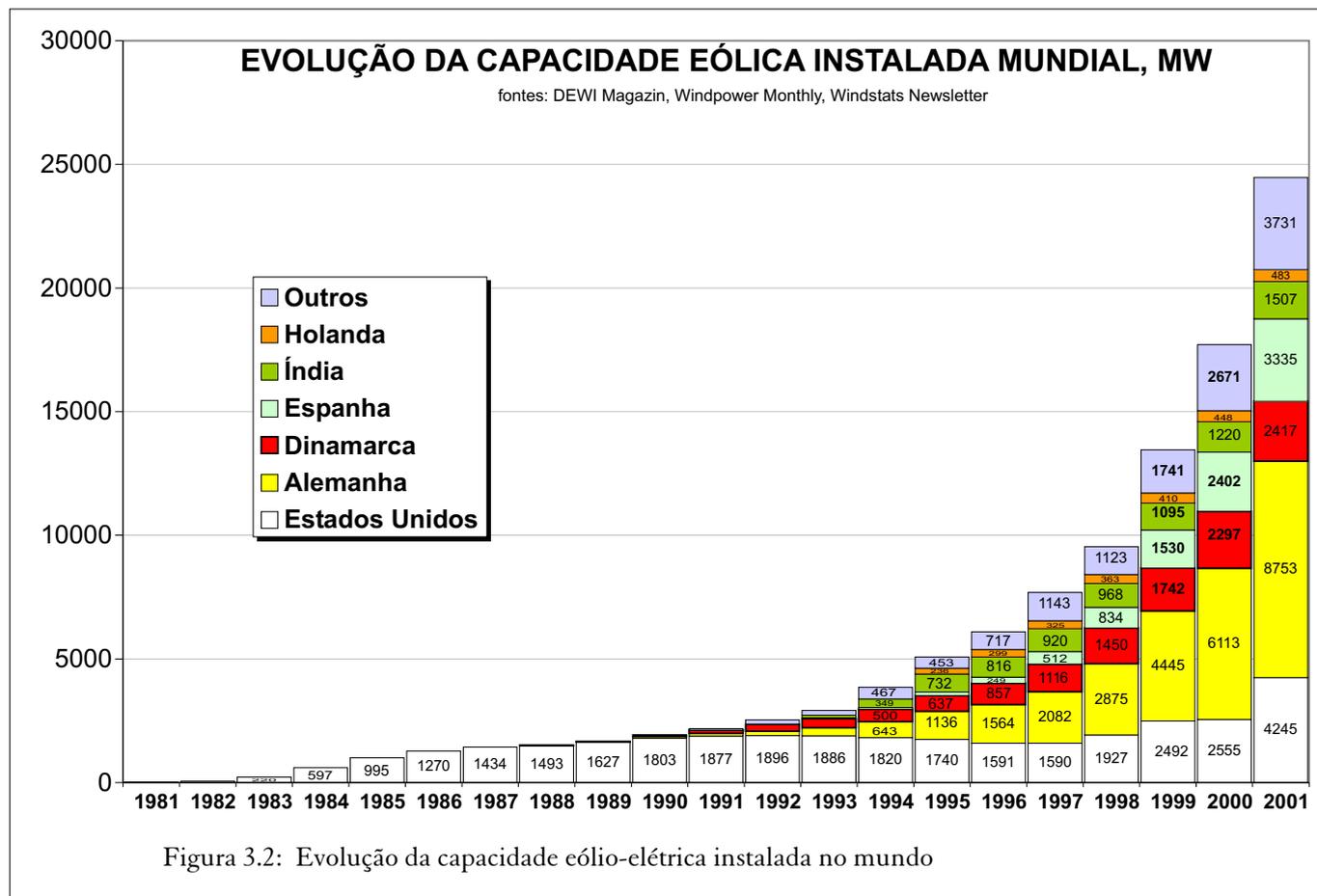


Figura 3.2: Evolução da capacidade eólio-elétrica instalada no mundo

A velocidade angular do rotor é inversamente proporcional ao diâmetro **D**. Usualmente, a rotação é definida por critérios de minimização do ruído aerodinâmico emitido pelas pás. Uma fórmula prática para avaliação da rotação nominal de operação de uma turbina eólica é dada por^[23]

$$rpm = \frac{895}{D} + 6.9 \quad D \text{ em metros}$$

À medida em que a tecnologia propicia diâmetros **D** maiores para os rotores, a rotação se reduz. Os diâmetros no mercado atual variam entre 40m e 100m (Fig.3.4),

resultando em rotações da ordem de 30rpm a 16rpm, respectivamente. As baixas rotações das turbinas maiores tornam as pás visíveis e evitáveis por pássaros em vôo. Quanto aos níveis de ruído, turbinas eólicas no estado-da-arte satisfazem os requisitos ambientais, mesmo quando instaladas a distâncias da ordem de 300m de áreas residenciais. Estes aspectos contribuem para que a tecnologia eólio-elétrica apresente o mínimo impacto ambiental, entre as fontes de geração aptas à escala de Gigawatts. Um bom exemplo disso é a densamente povoada e ambientalmente rigorosa Alemanha, onde já estão instaladas mais de 11400 turbinas eólicas,

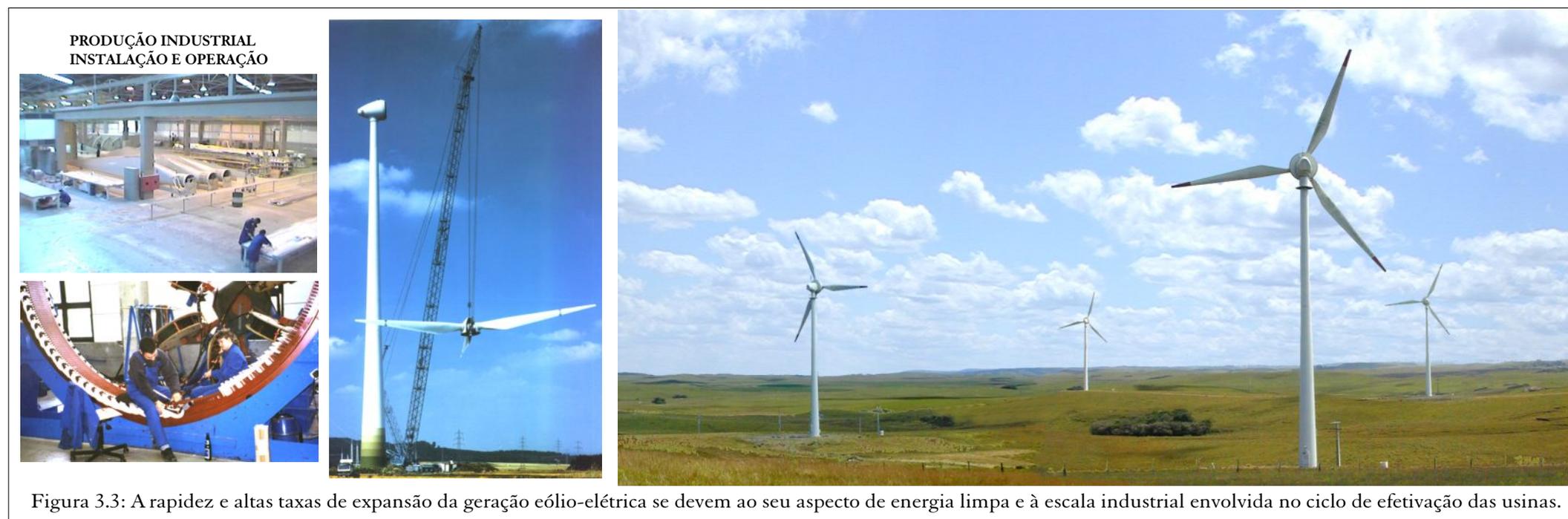


Figura 3.3: A rapidez e altas taxas de expansão da geração eólio-elétrica se devem ao seu aspecto de energia limpa e à escala industrial envolvida no ciclo de efetivação das usinas.

totalizando 8753W instalados ao final de 2001, com taxas de expansão anuais de 1.6GW, 1.7GW e 2.7 GW, nos anos de 1999, 2000 e 2001 respectivamente ^[21]. Em termos aproximados, o território alemão abriga uma população equivalente à metade da brasileira, em uma área equivalente à abrangida pelos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.

O progressivo aumento nos diâmetros das turbinas traz aumentos generalizados no peso das máquinas. O peso de todo o conjunto que fica no topo da torre (rotor e nacelle - mancais, gerador, sistemas) pode ser estimado de forma aproximada pela fórmula ^[23]:

$$\text{Peso em toneladas do conjunto no topo da torre (rotor e nacelle)} \cong \frac{D^2}{57.8}$$

Por essa aproximação, o peso do conjunto no topo da torre é da ordem de 30 toneladas para máquinas de 40m de diâmetro, e será da ordem de 170 toneladas para turbinas de 100m de diâmetro. Dessas ordens de grandeza, e da análise da expansão do mercado (Fig. 3.2) pode-se concluir que a geração eólio-elétrica constitui uma indústria importante no consumo de aço e resinas para materiais compostos, em países como Dinamarca, Alemanha e Espanha, principais fabricantes mundiais. O

Brasil já participa deste mercado industrial, com as exportações de pás da WOBEN Windpower (Sorocaba-SP e Pecém-CE) e da TECSIS Sistemas Avançados (Sorocaba-SP).

Uma usina eólio-elétrica (UEE) é um conjunto de turbinas eólicas dispostas adequadamente em uma mesma área. Essa proximidade geográfica tem a vantagem econômica da diluição de custos: arrendamento de área, fundações, aluguel de guindastes e custos de montagem, equipes de operação e manutenção, e estoques de reposição. Usinas eólicas com turbinas de projeto consolidado e equipes de manutenção adequadamente capacitadas apresentam fatores de disponibilidade típicos da ordem de 0.98.

A Figura 3.2 mostra a forma típica de curva de potência de uma turbina eólica. Usualmente, a geração elétrica se inicia com velocidades de vento da ordem de 2.5-3.0m/s; abaixo desses valores, o conteúdo energético do vento não justifica aproveitamento. Velocidades superiores a aproximadamente 12.0m/s - 15.0 m/s ativam o sistema automático de limitação de potência da máquina, que pode ser por controle de ângulo de passo das pás ou por estol aerodinâmico, dependendo do modelo de turbina. Em ventos muito fortes ($v > 25\text{m/s}$, no exemplo), atua o

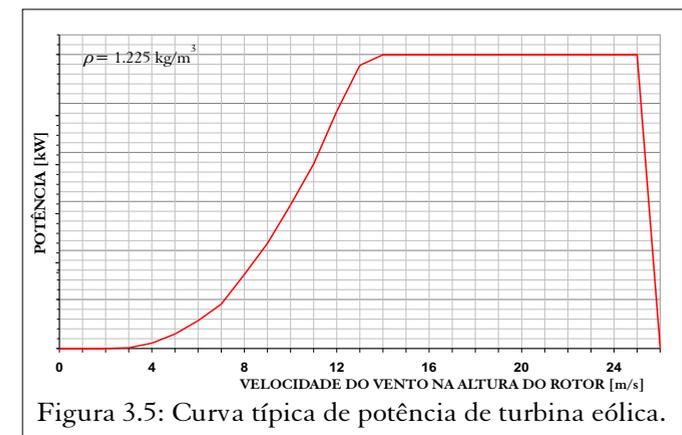
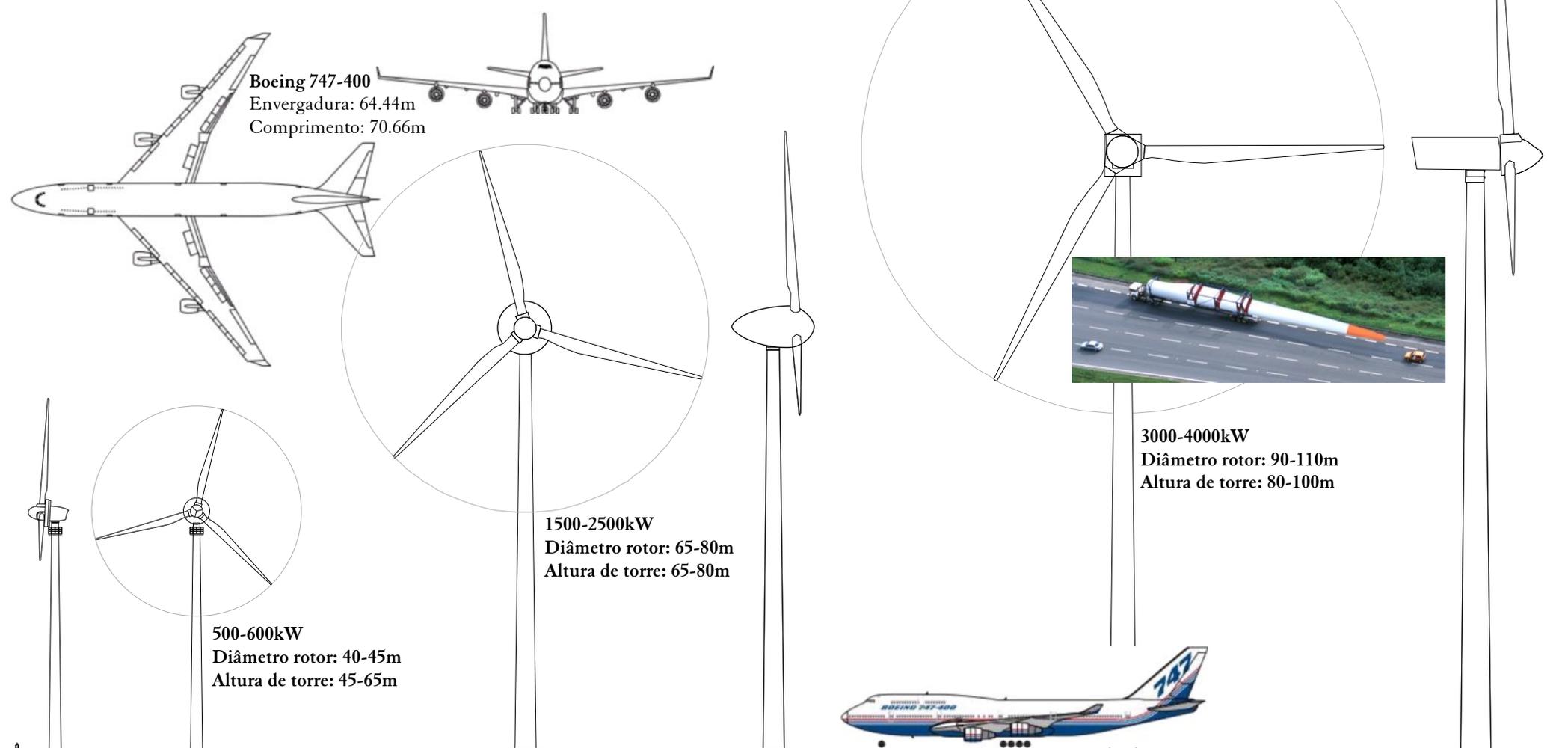


Figura 3.5: Curva típica de potência de turbina eólica.

sistema automático de proteção. Ventos muito fortes têm ocorrência rara e negligenciável em termos de aproveitamento e a turbulência associada é indesejável para a estrutura da máquina; neste caso, a rotação das pás é reduzida (passo ou estol) e o sistema elétrico é desconectado da rede elétrica. Turbinas eólicas de grande porte têm controle inteiramente automático, através de atuadores rápidos, software e microprocessadores alimentados por sensores duplos ("fail safe") em todos os parâmetros relevantes. Usualmente, usa-se telemetria de dados para monitoramento de operação e auxílio a diagnósticos/manutenção.

Figura 3.4: dimensões das turbinas eólicas no mercado atual, comparadas às dimensões da aeronave Boeing 747 Jumbo, cuja envergadura da asa é de 64.44m.



4. METODOLOGIA

4.1 METODOLOGIA

Este mapeamento do potencial eólico do Rio Grande do Sul foi realizado com base em: (a) registros anemométricos medidos em 21 torres altas, (b) interpolação dos regimes de vento por modelamento de mesoescala MesoMap (TrueWind Solutions, LLC) e (c) cálculo final na resolução de 1km x 1km utilizando o software WindMap.

As medições anemométricas foram realizadas em 21 torres com alturas de 40m a 50m, instaladas em locais especialmente selecionados e equipadas com instrumentação específica para medições qualificadas para estudos de viabilidade de usinas eólicas - processo que requer exatidão nos dados coletados. Tais dados são resultado das medições de vento realizadas pela SEMC e tiveram sua utilização autorizada pelas empresas CEEE, CERTEL, ERB, GAMESA e WOBEN, parceiras no trabalho. Na escolha dos locais e na especificação e instalação das torres e equipamentos, a SEMC empregou a melhor técnica, seguindo procedimentos e recomendações do Instituto Alemão de Energia Eólica - DEWI, e da Agência Internacional de Energia - IEA. Os dados medidos abrangeram período igual ou superior a 12 meses e foram validados por comparações climatológicas e filtragem de efeitos locais de topografia e rugosidade.

A interpolação dos regimes de vento para o restante do território gaúcho foi realizada através de modelamento de mesoescala (MesoMap), uma complexa simulação atmosférica baseada em banco de dados meteorológicos validados e consolidados, representativos para 15 anos. Deste processo resulta um modelo atmosférico muito mais

exato e representativo, por incluir fenômenos tais como as brisas marinhas e terrestres, ventos de montanha, jatos noturnos e outros.

O mapeamento final, na resolução de 1km x 1km, foi realizado pelo software WindMap, que é um modelo tridimensional de escoamento, constituído principalmente pelas equações da conservação de massa (escoamento não-divergente) e equações de camada-limite, estas últimas considerando a estabilidade térmica vertical da atmosfera.

Desta forma, foram utilizados os dados mais completos disponíveis atualmente sobre os regimes de ventos no Estado do Rio Grande do Sul, cujo resultado final é apresentado em mapas temáticos na resolução horizontal de 1km x 1km. A Figura 4.1 apresenta o esquema e os modelos básicos da metodologia, utilizados para o processo de cálculo pelo WindMap, para a obtenção dos mapas temáticos do potencial eólico.

4.2 MODELOS

A exatidão dos resultados finais é extremamente dependente da representatividade dos modelos empregados. O cálculo das influências locais de terreno sobre a camada-limite utiliza modelos digitais do relevo e da rugosidade - que constituem os parâmetros de grande influência nos regimes de vento de cada local. Diversos níveis de detalhe e atenção foram necessários na elaboração de cada um dos modelos utilizados na metodologia, entre os quais pode-se destacar: (a) georreferenciamento: para assegurar o sincronismo dos três modelos quanto à localização geográfica de suas variáveis; (b) aferições: um

conjunto de comparações por amostragem, especialmente nas áreas identificadas como mais promissoras, foi realizado em relação a cada modelo, sendo aferida a consistência em relação a modelos existentes, como por exemplo o Mapa de Vegetação do Brasil (IBGE) e cartas IBGE e DSG; (c) validação: os modelos de relevo e rugosidade foram validados de forma especial nas áreas das torres anemométricas, modeladas em resolução de 100m x 100m a partir de cartas DSG e imagens Landsat 5, além de amostragem em campo.

A seguir são apresentados os principais detalhes da elaboração de cada um dos modelos e o processo de cálculo e mapeamento do potencial eólico do Rio Grande do Sul.

4.2.1 Relevo

O Modelo Digital de Relevo do Estado do Rio Grande do Sul foi desenvolvido na resolução horizontal de 1km x 1km, a partir das seguintes bases de dados:

- GTOPO30, base de dados globais de relevo da United States Geological Survey (USGS), na forma de malha digital de cotas, com resolução nominal da ordem de 1km x 1km;
- GLOBE DEM, base de dados de relevo da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), em resolução nominal da ordem de 1km x 1km;
- Na análise dos dados para a elaboração do Modelo de Escoamento Atmosférico, foi necessária uma análise dos efeitos do relevo local nos dados medidos em cada estação anemométrica, e para tanto era necessária uma resolução melhor que 1km x 1km - ver Efeito de Subescala, item 4.2.3. Por isso foram elaborados modelos digitais de alta resolução (100m x 100m) para uma extensão de 10km x 10 km no entorno das principais estações anemométricas do projeto, a partir de curvas de nível e pontos cotados de cartas topográficas 1:50 000 (DSG - Diretoria de Serviço Geográfico, Exército Brasileiro);
- Na realização dos modelos descritos acima, o Modelo de Relevo de todo o Rio Grande do Sul foi automaticamente aferido por amostragem, nas áreas das torres anemométricas, onde foram digitalizados/vetorizados os modelos de alta resolução a partir de cartas topográficas 1:50 000 (DSG). Pelo menos 4 aferições adicionais também foram realizadas, por comparações com cartas topográficas (DSG) de áreas identificadas como de especial interesse quanto ao potencial eólico.

A Figura 4.2 apresenta o Modelo de Relevo do Estado do Rio Grande do Sul, elaborado na resolução horizontal de 1km x 1km, principalmente a partir da base de dados GLOBE (NOAA), aferido por amostragens nas áreas explicitadas.

Uma representação em perspectiva deste modelo tridimensional, com a escala vertical exagerada em 25 vezes para evidenciar as suas características, é apresentada na Figura 4.3.

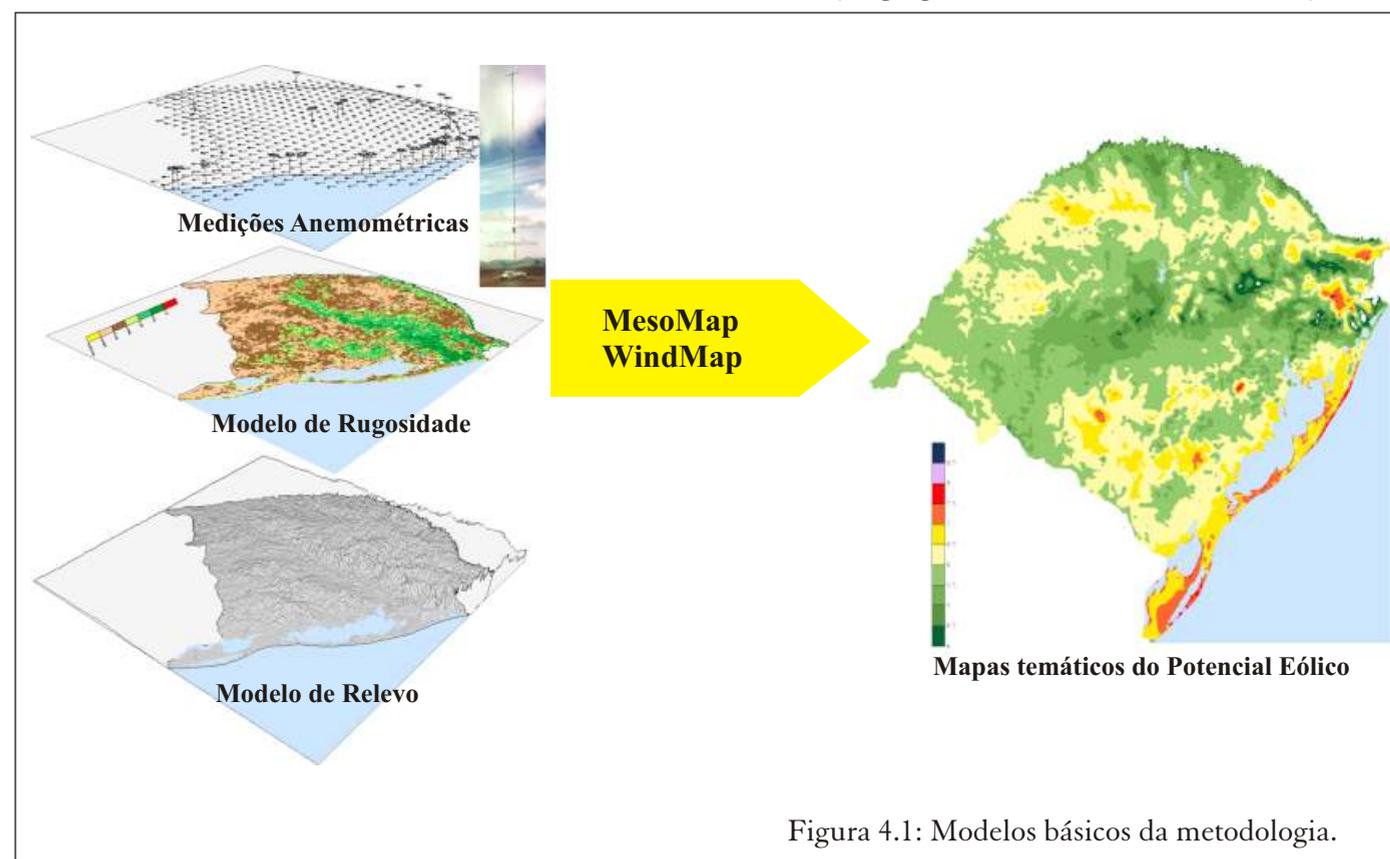
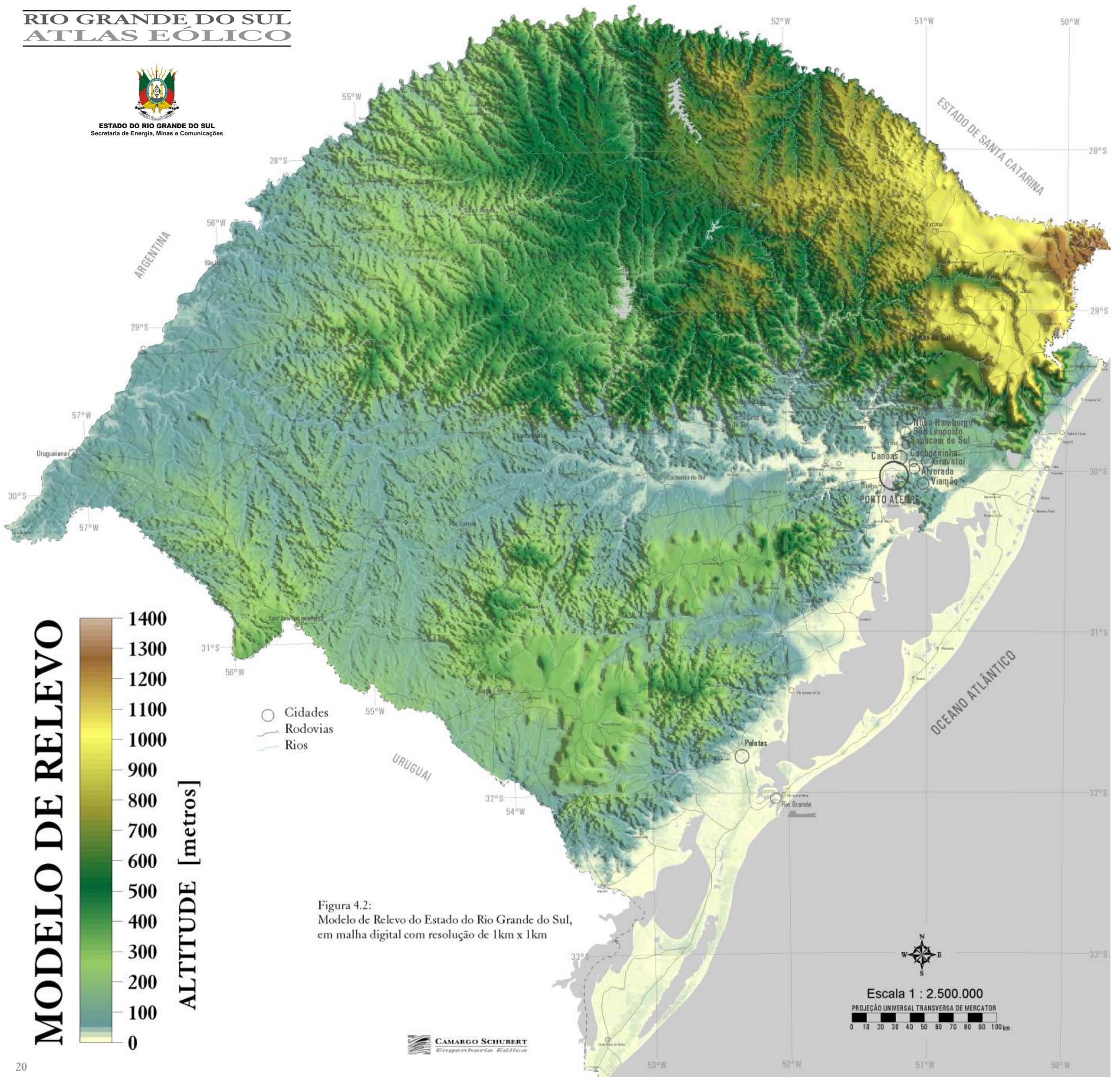


Figura 4.1: Modelos básicos da metodologia.

RIO GRANDE DO SUL ATLAS EÓLICO



ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL
Secretaria de Energia, Minas e Comunicações



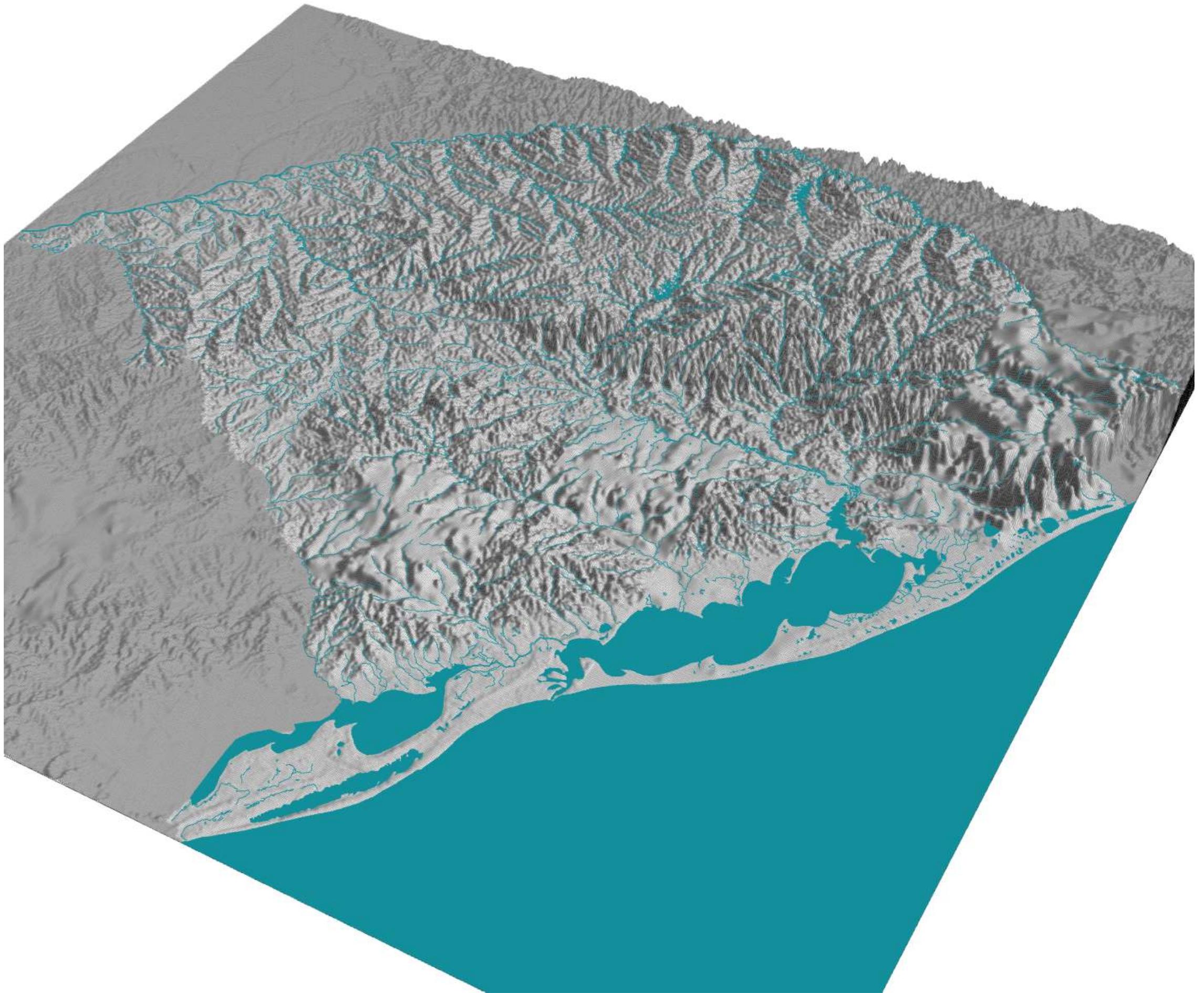


Figura 4.3: Modelo de Relevo representado em perspectiva, com escala vertical ampliada em 25 vezes para evidenciar as principais características topográficas do Estado do Rio Grande do Sul.

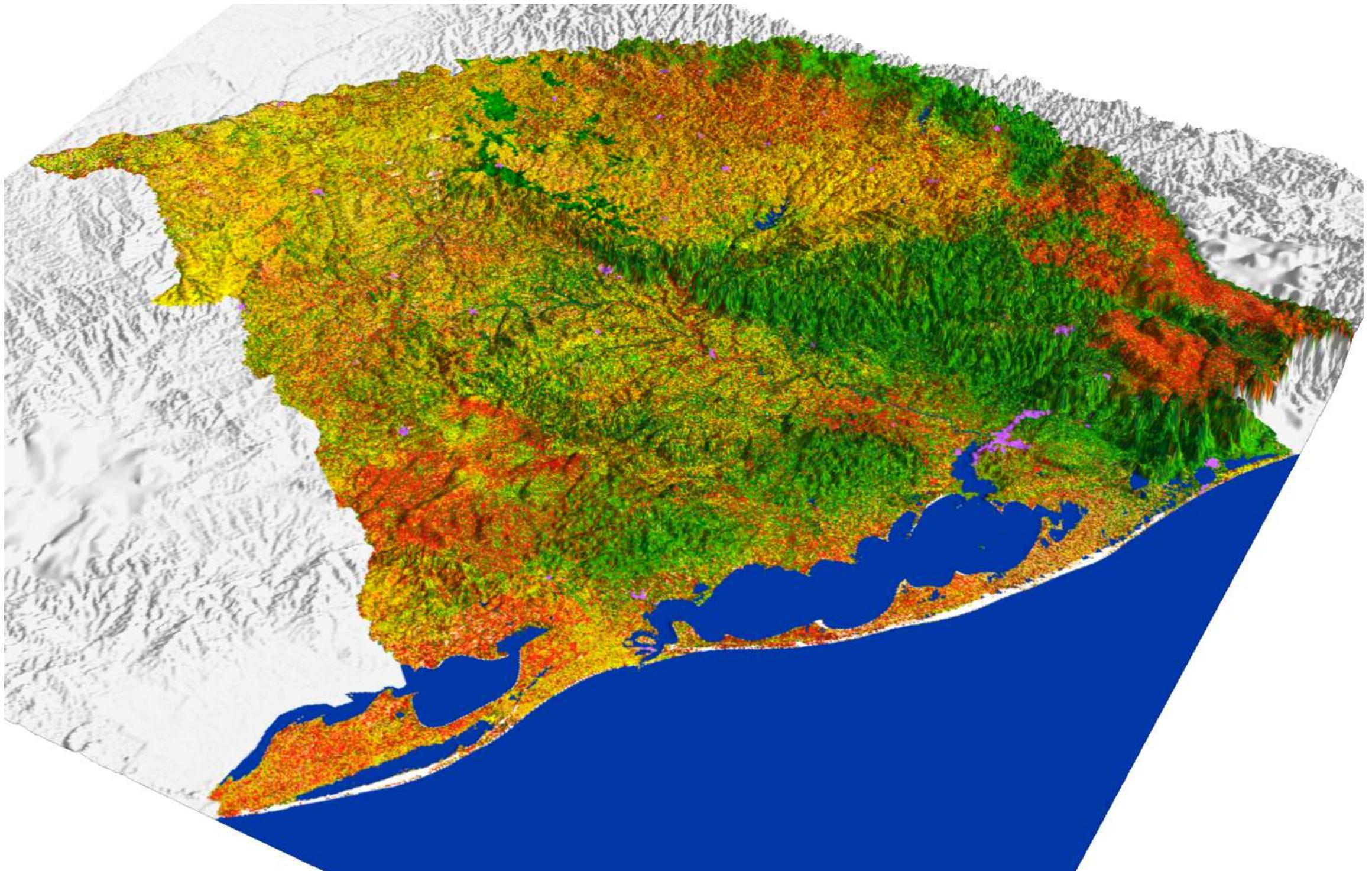


Figura 4.4: Mosaico LANDSAT 5 renderizado sobre modelo de relevo.

4.2.2 Rugosidade

O Modelo Digital de Rugosidade do Estado do Rio Grande do Sul foi elaborado na resolução horizontal de 1km x 1km, a partir de:

- Interpretação do mosaico de imagens do satélite LANDSAT 5, datas de 1997 e 1998, com 0% de cobertura de nuvens, nível de correção 7 - georreferenciada - bandas 3, 4 e 5, na resolução horizontal de 90m x 90m;
- Aferição por comparações com o Mapa de Vegetação do Brasil (IBGE, USGS) e com o Modelo de Uso do Solo desenvolvido pela USGS, Universidade de Nebraska e o Joint Research Centre da Comissão Européia;
- Aferição, nas áreas de maior interesse para

aproveitamento energético, através de amostragens em campo, realizadas em 6 locais nas regiões mais representativas;

- Aferição da rugosidade a partir das medições de gradiente vertical de vento, nos locais com torres altas e medições em duas alturas;
- Na análise dos efeitos de subescala, no entorno das principais estações anemométricas do projeto, foram elaborados modelos digitais de alta resolução (100m x 100m) para uma área de 10 km x 10km em torno de cada estação anemométrica, a partir das imagens Landsat 5 e amostragens em campo.

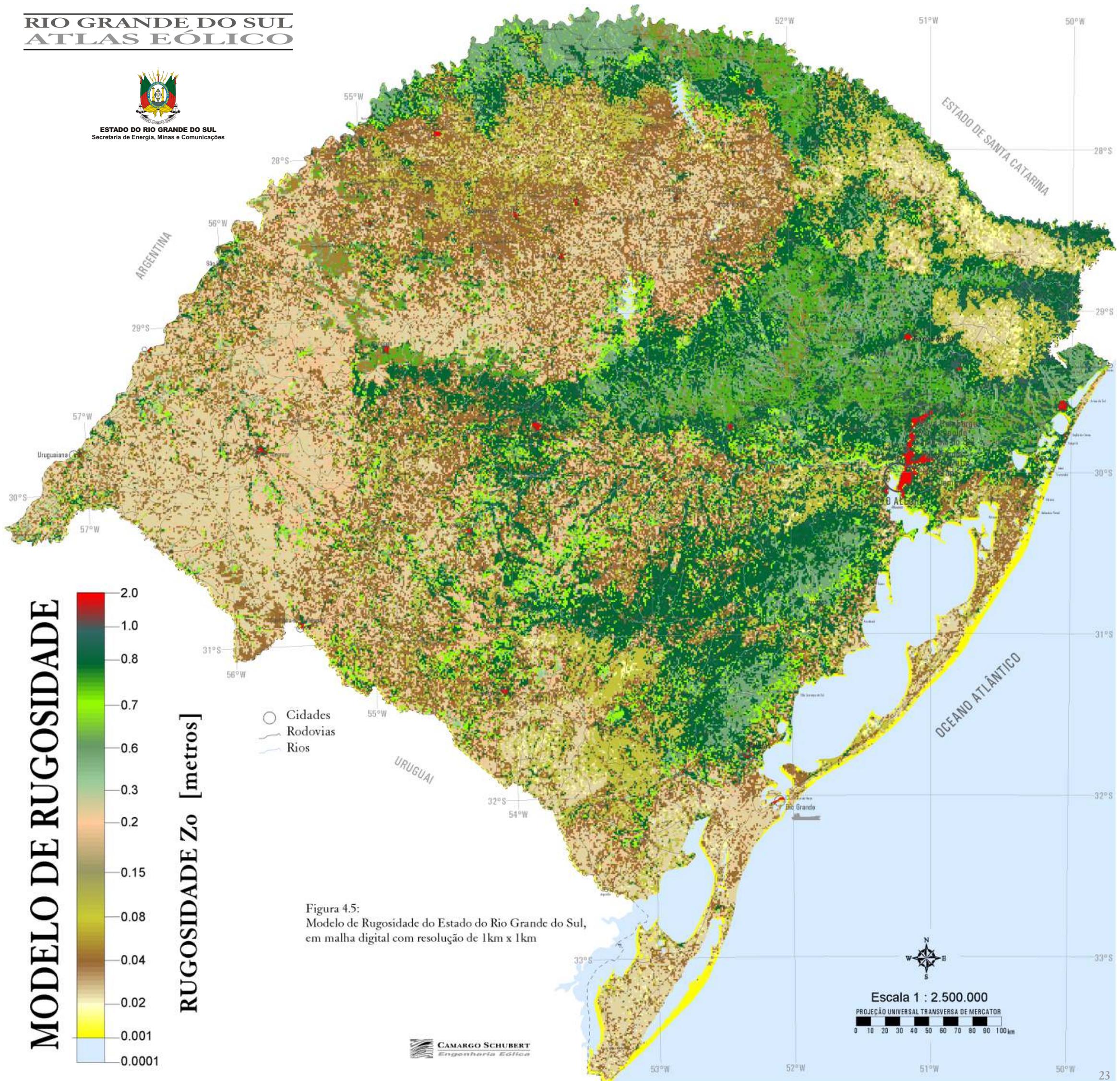
A Figura 4.4 apresenta o mosaico Landsat 5 do Estado do Rio Grande do Sul, na resolução 90m x 90m, renderizado sobre o modelo de relevo com escala vertical ampliada em 25 vezes, para efeito de visualização de terreno e encostas a jusante de ventos predominantes.

A Figura 4.5 apresenta o modelo digital de rugosidade, elaborado conforme descrição acima. Ao mapa está sobreposto o relevo sombreado, para efeito de visualização de terreno e encostas a jusante de ventos predominantes, e inclui a indicação das áreas amostradas para a validação do modelo.

RIO GRANDE DO SUL ATLAS EÓLICO



ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL
Secretaria de Energia, Minas e Comunicações



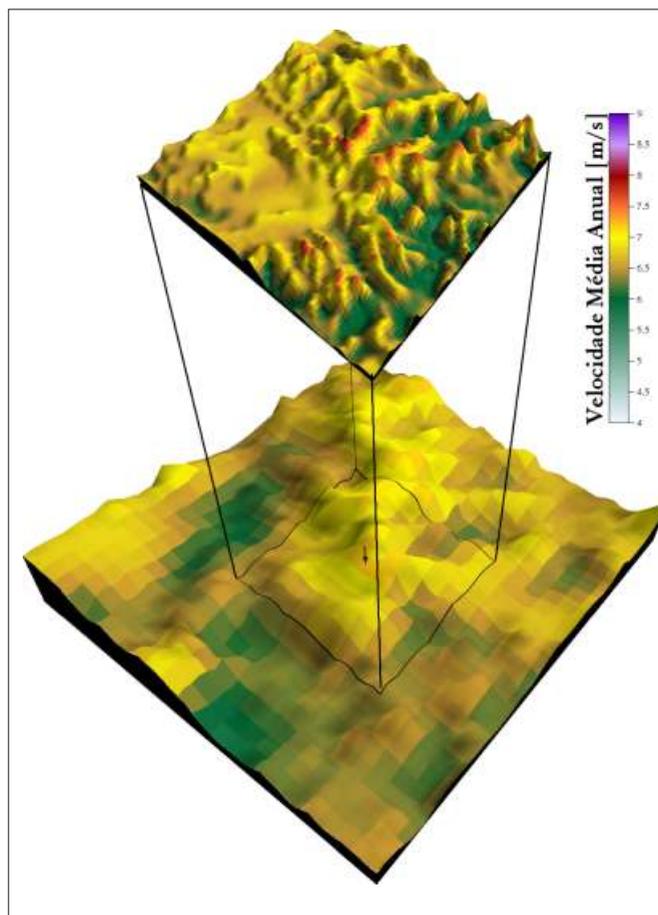
4.2.3 Escoamento Atmosférico

Fontes dos dados: O Modelo de Escoamento Atmosférico foi desenvolvido a partir dos dados de medições anemométricas (SEMC/Wobben/Gamesa/ERB) disponíveis para o projeto e, a sua interpolação para todo o Estado do Rio Grande do Sul, pelas simulações numéricas de mesoescala MesoMap (TrueWind Solutions). Uma análise suplementar das variações interanuais do regime de ventos foi realizada e ajustes climatológicos foram incluídos para o caso de estações com dados simultâneos e de longo prazo disponíveis - de medições realizadas em vizinhança representativa.

Validação dos dados: As séries de dados de medições anemométricas foram auditadas utilizando rotinas e algoritmos de validação e verificação dos dados medidos, de modo a excluir-se possíveis falhas (e.g. atrito em anemômetros, usualmente detectável por análise de histograma) ou incoerências nos registros. As rotinas de validação realizam *Verificações Gerais do Sistema* e *Verificações dos Parâmetros Medidos*. Os parâmetros medidos foram testados, por exemplo, quanto ao intervalo que compreende os valores mínimos e máximos esperados (*Testes de Intervalo de Variação*), quanto à inter-relação entre diferentes variáveis (*Testes Relacionais*) e quanto à tendência de variação ao longo do tempo (*Testes de Tendência*). Após os testes de validação, os registros considerados *suspeitos* ou *ausentes* foram analisados caso a caso; no caso de redundância de sensores (em diferentes alturas), os valores rejeitados foram substituídos ou extrapolados a partir de registros correspondentes do outro sensor. Também foi realizada uma avaliação das interferências locais de obstáculos, tais como a própria estrutura da torre, sendo realizadas análises direcionais de turbulência e gradiente vertical de camada-limite, no caso de torres com registros a cada 10 min.

Filtragem de efeitos de subescala: Os mapas finais de potencial eólico para todo o Estado do Rio Grande do Sul, apresentados neste Atlas, têm resolução digital de 1km x 1km. Isto significa que a informação associada a cada elemento de área ("pixel") nos mapas temáticos é representativa das *condições médias* no respectivo retângulo de 1 km². Ao se utilizar dados de medição na composição do Modelo Atmosférico, é sempre importante lembrar que um anemômetro mede as *condições locais* de vento, e estas são afetadas pelas condições de relevo, rugosidade e obstáculos, que podem ter grandes variações na escala de metros, e assim introduzir erros pelo efeito de subescala. Para avaliar e filtrar essas influências de relevo e rugosidade na subescala, o presente Atlas utilizou metodologia desenvolvida pela Camargo-Schubert a partir do software *WindMap*TM (Brower & Company). Destacam-se como pontos centrais desta metodologia:

a) filtragem dos efeitos de subescala através da integração de modelos na resolução 100m x 100m, numa área de 10km x 10km entorno de cada estação, gerando parâmetros médios no Modelo Atmosférico que sejam compatíveis com o modelo final, na resolução de 1km x 1km. O



modelo de alta resolução é resolvido pelo *WindMap* e integrado através de recursos de geoprocessamento, para a obtenção dos valores médios locais, já incluídos os efeitos locais de subescala;

b) Na solução *WindMap* sobre o modelo de alta resolução, também são avaliados - de forma iterativa, para cada estação - os parâmetros de estabilidade térmica vertical da atmosfera e altura de camada-limite, que complementam o Modelo de Escoamento Atmosférico.

Nesta etapa foram desenvolvidos os Modelos Digitais de Relevo e Rugosidade na resolução 100m x 100m, em uma área de 10km x 10km entorno de todas as estações anemométricas do projeto, os quais são apresentados no Apêndice I.

As estações anemométricas foram georreferenciadas e sobrepostas aos modelos de relevo e rugosidade, na mesma projeção cartográfica. Destas análises, resultam sumários estatísticos de vento para cada direção - nas respectivas alturas de medição nas torres anemométricas - e parâmetros atmosféricos de estabilidade térmica vertical e altura de camada-limite, que compõem o Modelo de Escoamento Atmosférico.

A Figura 4.6 exemplifica este processo pela comparação dos resultados do cálculo de velocidades médias anuais a 50m de altura para os modelos com 100m x 100m e 1km x 1km de resolução, este já levando em consideração as correções de subescala, para a torre anemométrica de Sant'Ana do Livramento.

Apesar do objetivo de "limpar" e filtrar efeitos locais, este

processo tem diferenças importantes em relação à metodologia WAsP: na metodologia WindMap, essa análise local visa filtrar os efeitos de subescala nos dados anemométricos e, para isso, um domínio de 5-10km no entorno das estações é suficiente, por abranger todas as variações locais relevantes de camada-limite por detalhes do relevo e rugosidade na subescala. É diferente da metodologia WAsP⁽⁴⁾, onde um domínio de pelo menos 15 km é necessário no entorno de cada estação, para a determinação do vento geostrófico local - o qual já é intrinsecamente contemplado no método WindMap-MesoMap. Ressalta-se também que no WAsP o modelo de relevo tem resolução aumentada de forma exponencial em direção à posição central da estação, perdendo muito em detalhamento à medida em que dela se afasta. No WindMap, a análise dos efeitos locais de subescala em modelo de alta resolução e o mapeamento final (1km x 1km) de todo o Estado são realizados sobre malhas regulares de pontos, que compõem os modelos mais usuais utilizados por programas usuais de geoprocessamento.

Outra diferença fundamental desta metodologia em relação ao WAsP é que os parâmetros de estabilidade térmica vertical da atmosfera, e a altura de camada-limite, são determinadas a partir do modelamento MesoMap, baseado em dados meteorológicos validados e que incluem radiossondagens; além disso, o WindMap estima a estabilidade térmica vertical de forma iterativa sobre o modelo de alta resolução e a partir das medições em alturas distintas, enquanto que no WAsP estes parâmetros estão embutidos ou ocultos nos algoritmos ou arquivos de parâmetros, e na situação *default* são representativos para as condições da Dinamarca - situada em latitudes bastante distintas do caso brasileiro ou rio-grandense.

Regimes de Vento Regionais: É razoável supor que os regimes de ventos e parâmetros atmosféricos sejam bastante distintos nas diferentes regiões do Estado do Rio Grande do Sul, que alterna extensas áreas litorâneas e planícies do pampa, às serras e planaltos interiores. Um recurso importante utilizado na metodologia WindMap é o Mapa

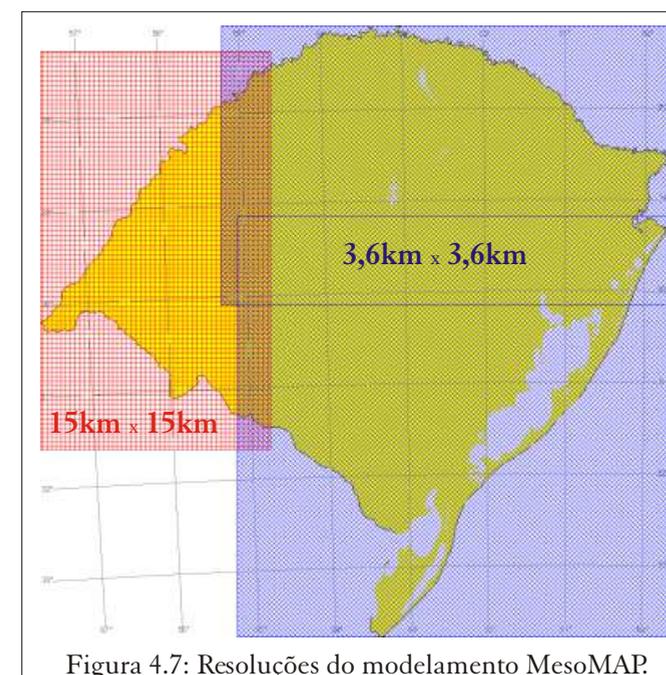


Figura 4.7: Resoluções do modelamento MesoMAP.

de Correlação, que separa - no cálculo - essas áreas com regimes distintos de vento. Porém, no presente Atlas este recurso foi substituído por um procedimento muito mais completo e preciso: a utilização do modelo atmosférico do MesoMap em alta resolução, que já inclui de forma intrínseca todas estas diferenças microrregionais. No caso do presente Atlas, o modelamento atmosférico MesoMap foi realizado na resolução de 3.6km x 3.6km para 85% do território gaúcho (Figura 4.6); esta resolução é suficiente e adequada para modelar os principais mecanismos de mesoescala, como as brisas marinhas no litoral entrecortado por lagoas e o relevo complexo das serras do Rio Grande do Sul. Apenas o extremo oeste do Estado foi modelado em mesoescala na resolução de 15km x 15km, resolução adequada às condições relativamente homogêneas de relevo e rugosidade daquela região. Os regimes de vento calculados pelo MesoMap nestas resoluções de 3.6km e 15km, para distintos níveis de altura (10m, 50m, 75m, 100m, 200m e 500m), foram então utilizados como condições de entrada para o WindMap, utilizado para interpolar as condições de camada-limite para a resolução de 1km x 1km. A diferença de regimes de vento entre as distintas regiões do Estado pode ser observada nos mapas do Capítulo 5.

Representatividade Climatológica: O modelamento MesoMap utilizado para este Atlas considerou dados meteorológicos de reanálise representativos para 15 anos - abrangência que pode ser considerada razoável em relação à sua representatividade climatológica para estudos de usinas eólicas. Por outro lado, os dados anemométricos considerados - medidos em torres altas de estudos de viabilidade - são bastante recentes (a partir de Julho/2000) e cobriram períodos pouco superiores a um ciclo climatológico mínimo de 12 meses. Assim, tornou-se necessária uma avaliação da representatividade do período medido e a eventual necessidade de ajustes climatológicos. Tal avaliação requer dados consistentes, representativos do longo prazo e com a maior abrangência possível - idealmente da ordem de décadas. Para ajustes climatológicos, tais dados também devem possuir um período de simultaneidade com os dados de curto prazo sendo utilizados, para permitir correlações.

Entre os registros históricos de longo prazo pesquisados, sobressaíram os dados medidos nos principais aeroportos da região (fonte: MAER, NOAA) e dados de medições indiretas de ventos de superfície sobre o oceano (fonte: NASA, NOAA, TrueWind Solutions). A Figura 4.8 ilustra a abrangência temporal de todos os registros anemométricos considerados, através de suas médias mensais, e o mapa com a respectiva localização das medições.

Medições indiretas da velocidade do vento de superfície sobre o oceano têm sido possíveis desde 1987, através de sensoriamento remoto a partir de satélites. Neste processo, os ventos são inferidos por medições de altura e deslocamento das ondas, utilizando algoritmos que têm sido calibrados por medições diretas realizadas em bóias meteorológicas. Duas séries distintas de dados,

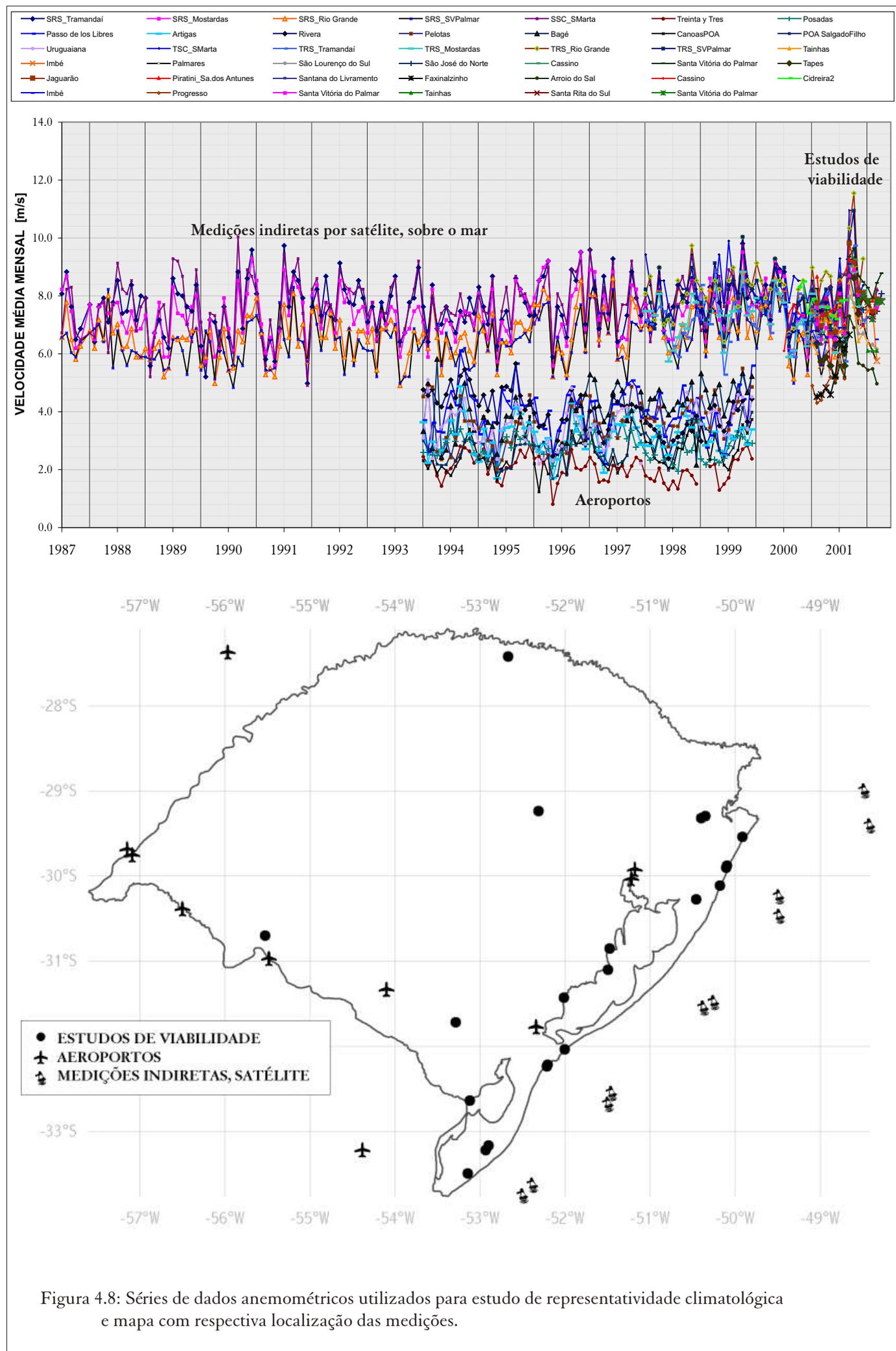


Figura 4.8: Séries de dados anemométricos utilizados para estudo de representatividade climatológica e mapa com respectiva localização das medições.

provenientes de diferentes constelações de satélites e sensores, foram consideradas. Tais dados também existem no período simultâneo às medições de referência do presente Atlas, e foram utilizados para ajustes climatológicos. Foram tomados os dados de 10 pontos ao longo do litoral, visando possibilitar correlação com todas as estações anemométricas litorâneas. De fato, os respectivos coeficientes de correlação com as estações próximas, para as médias mensais no período de simultaneidade, se situaram entre 0.77 e 0.98, o que induz uma aceitável consistência para ajustes climatológicos.

Os fatores de ajuste climatológico calculados para as estações litorâneas são apresentados na Tabela 4.1.

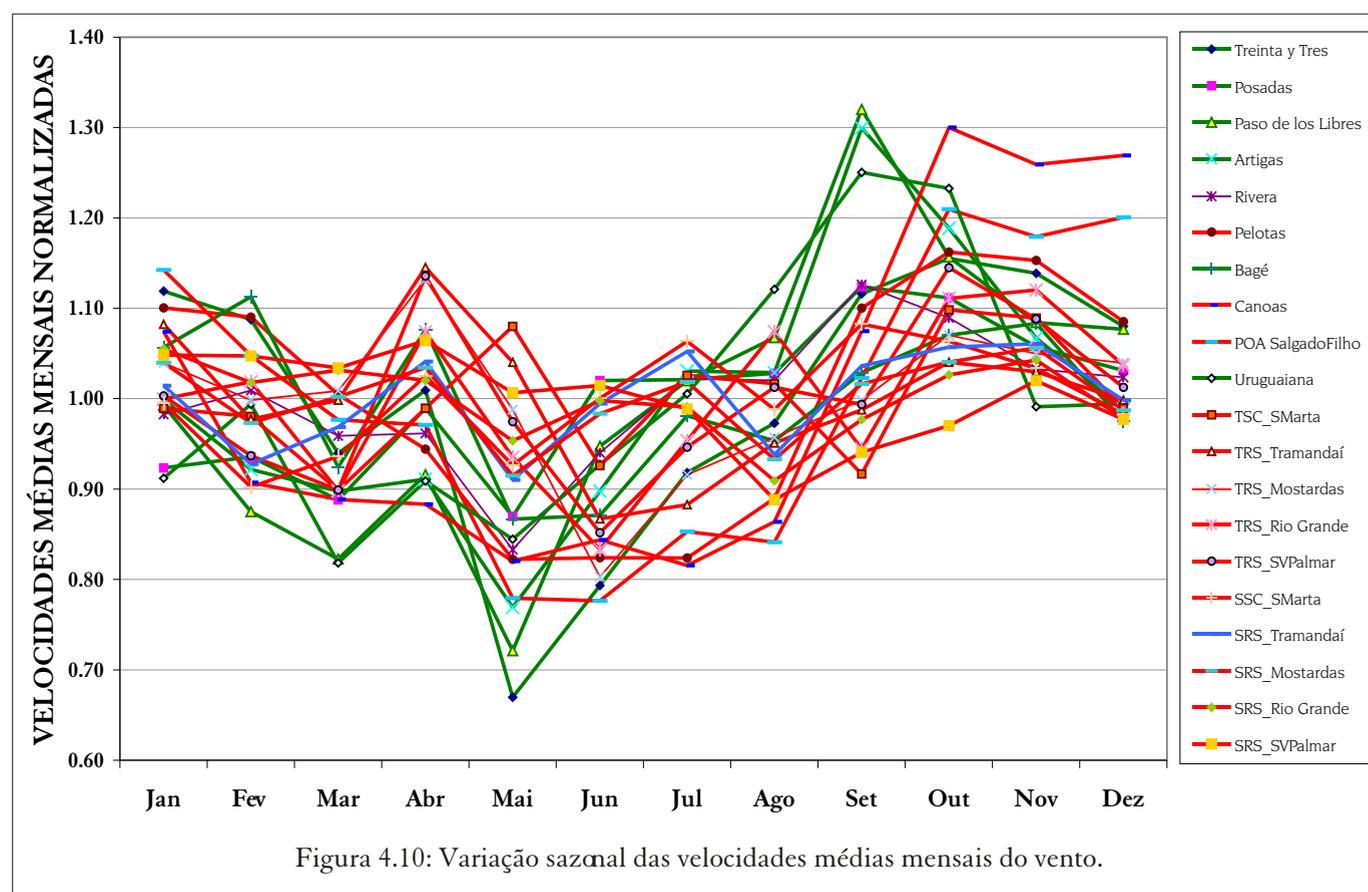
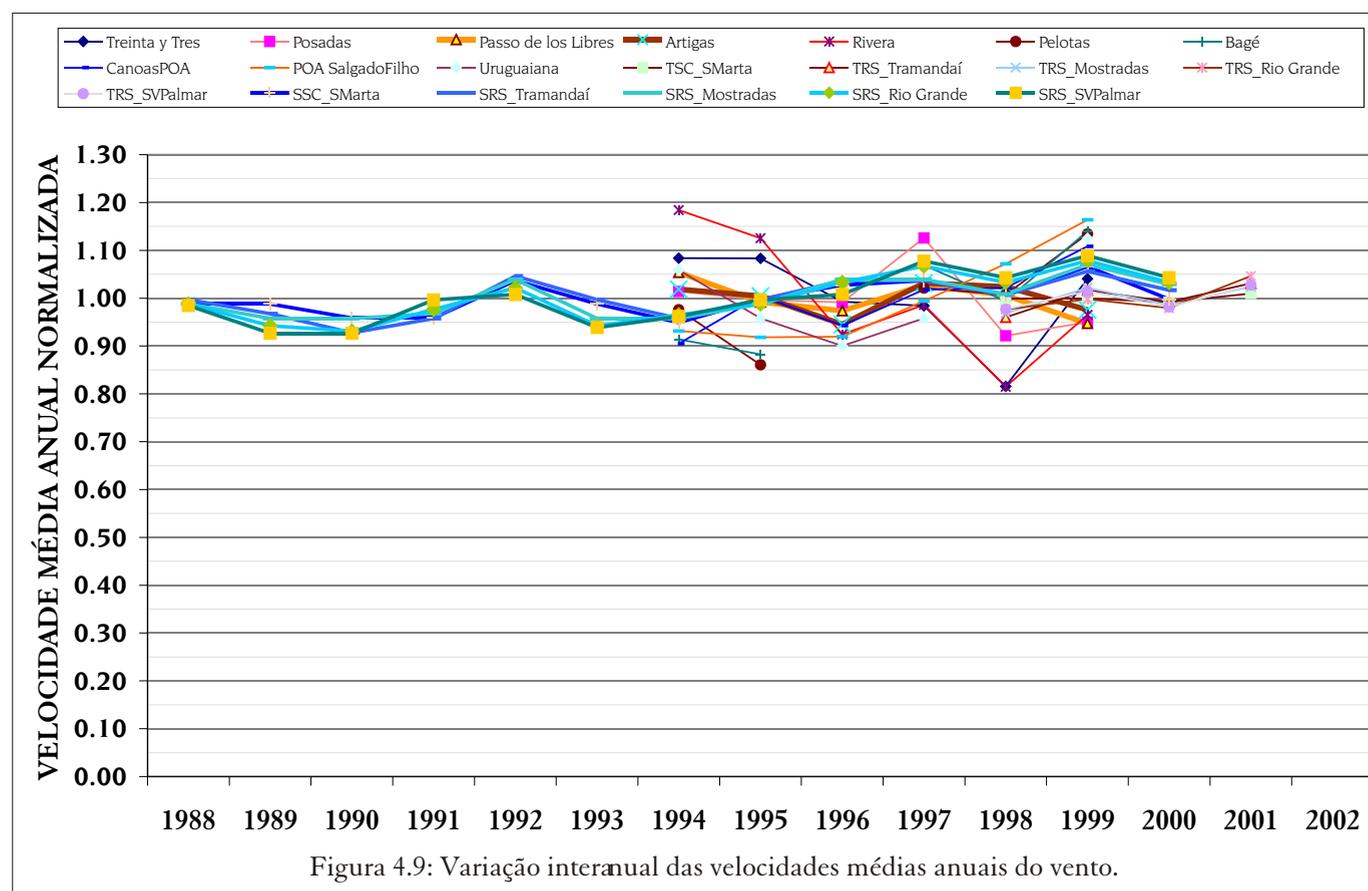
Torre	Estações	Fator de ajuste climatológico
GAMESA	Imbé	0.99
	Palmares	0.99
	São Lourenço do Sul	0.96
	São José do Norte	0.96
	Cassino	0.96
	Santa Vitória do Palmar	0.95
	Tapes	0.95
	Jaguarão	0.97
WOBLEN	Arroio do Sal	0.98
	Cassino	1.01
	Cidreira2	1.01
	Imbé	1.01
ERB	Santa Rita do Sul	0.94
	Santa Vitória do Palmar	0.96

Tabela 4.1: Fatores de ajuste climatológico adotados para as estações litorâneas.

Pode-se notar na Tabela 4.1 que os ajustes máximos foram da ordem de 5%-6%, no sentido de reduzir as velocidades médias efetivamente medidas nas torres, visto que os ventos no período medido se mostraram mais intensos que a média de longo prazo. Distintos fatores de ajuste climatológico se devem ao espaçamento geográfico e diferentes períodos de abrangência das medições.

Os dados de aeroportos abrangem o período 1994-1999, não sendo portanto simultâneos às medições específicas consideradas neste Atlas. Desta forma, pela ausência de referências adequadas de longo prazo, não foram realizados ajustes climatológicos para a região interior do Estado.

A magnitude das variações interanuais da velocidade média anual dos ventos pode ser analisada na Figura 4.9. De modo geral, percebe-se na série mais extensa de dados, de medições indiretas sobre o oceano por um período de 13 anos, que as variações interanuais máximas foram inferiores a $\pm 10\%$ da média de longo prazo. Por outro lado, medições em aeroportos situados na região oeste do Estado mostram variações máximas dentro de $\pm 20\%$.



Também das médias de longo prazo pode-se avaliar a variação sazonal das velocidades de vento, conforme apresentado na Figura 4.10. Em algumas regiões do Estado, tais como o extremo oeste e áreas do litoral, as velocidades podem variar sazonalmente até $\pm 30\%$ em torno da média anual. Os meses de ocorrência de médias mais elevadas de velocidade de vento também podem ser

distintos, para os extremos geográficos do Estado; este fato pode ser comprovado nos mapas de potencial eólico sazonal do Capítulo 5, onde pode-se notar que o pico sazonal de velocidades de vento na parte Oeste do Rio Grande do Sul ocorre durante o inverno, enquanto que no litoral ocorre durante a primavera.

4.3 CÁLCULO

4.3.1 Regimes de Vento, Parâmetros Estatísticos

A distribuição estatística de *Weibull* caracteriza-se por dois parâmetros: um de escala (C , em m/s) e outro de forma (k , adimensional). A frequência de ocorrência de uma velocidade u é representada matematicamente por

$$f(u) = \frac{k}{C} \frac{u}{C}^{k-1} e^{-\frac{u}{C}^k}$$

A função densidade de probabilidade cumulativa, $F(u)$, associada à probabilidade da velocidade do vento ser maior que u , expressa-se por

$$F(u) = \int_u^\infty f(u) du$$

resultando em

$$F(u) = e^{-\frac{u}{C}^k}$$

O valor médio ou valor esperado da variável aleatória (valor médio da velocidade do vento) é dado por

$$\bar{u} = \int_0^\infty u f(u) du$$

resultando em

$$\bar{u} = C \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$$

onde a *Função Gama* (Γ) é definida como

$$\Gamma(z) = \int_0^\infty t^{z-1} e^{-t} dt$$

O *Fluxo ou Densidade de Potência Eólica* é definido como

$$\bar{E} = \frac{1}{2} \rho \bar{u}^3 \quad (\text{W/m}^2)$$

que, expressando-se em termos da distribuição de *Weibull*, resulta em

$$\bar{E} = \frac{1}{2} \rho C^3 \Gamma\left(3 + \frac{1}{k}\right) \quad (\text{W/m}^2)$$

onde ρ é a densidade do ar^[9].

4.3.2 O Modelo WindMap

A partir dos Modelos Digitais de Relevo e Rugosidade e do Modelo Atmosférico (composto pelas medições em torres altas e resultados do modelamento de mesoescala *MesoMap*), as velocidades e direções médias de vento são calculadas para a resolução final pelo software *WindMap*TM (Brower & Co, USA). Desenvolvimento recente dos métodos baseados na equação da continuidade (conservação de massa ou escoamento não-divergente), originários do NOABL (*Numerical Objective Analysis of Boundary Layer*), o programa utiliza o método dos elementos finitos para calcular o campo de velocidade do escoamento em todo o domínio de cálculo, que constitui-se de uma malha tridimensional de pontos sobre o terreno. O *grid* (malha tridimensional de pontos

de cálculo) é gerado utilizando-se um sistema de coordenadas conformes ao terreno e que permite um maior refinamento da malha próximo à superfície do mesmo. Os modelos geográficos de entrada e saída são em formato compatível com Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Sumários estatísticos das estações de referência compõem as condições de contorno e dados de inicialização. A partir de um campo inicial de velocidades de vento, calculado a partir das estações de referência do Modelo de Escoamento Atmosférico, a condição de continuidade é satisfeita, de forma iterativa, pela solução do sistema de equações diferenciais parciais, até que o valor da divergência esteja abaixo de um certo nível de tolerância (usualmente 10^{-5}). O modelamento de ventos pela formulação da equação da continuidade não resolve as equações fundamentais que determinam a influência da estratificação térmica da atmosfera no escoamento; entretanto, o *WindMap*TM contém ferramentas que reproduzem estes efeitos, considerando altura de camada-limite, perfil logarítmico de velocidade vertical de camada-limite e características de estabilidade térmica da atmosfera baseadas na *Teoria da Similaridade de Monin-Obukhov*. No modo de otimização, um algoritmo iterativo converge o valor da razão de estabilidade térmica vertical de atmosfera, correspondente ao mínimo erro médio quadrático, para os valores das estações anemométricas de referência. Além da interface para SIG, o *WindMap*TM permite o uso de um Modelo de Correlação para separar áreas com regimes distintos de vento (e.g. brisas marinhas) e podem ser associados pesos relativos para as margens de incerteza de cada estação anemométrica de referência.

O processo de cálculo é realizado por elementos finitos, em um domínio tridimensional, conforme Figura 4.11. O terreno é representado por uma malha regular de \underline{m} elementos no sentido N-S, \underline{n} elementos no sentido L-O. No sentido vertical são definidos \underline{w} elementos, e o espaçamento vertical entre nós da malha pode ter variação logarítmica ou geométrica (opcional no *WindMap*), de forma a concentrar mais elementos na proximidade da superfície do solo, onde ocorrem as variações mais significativas, devidas à camada-limite.

O resultado do cálculo é um campo de velocidades não-divergente, ou seja, que satisfaz a equação da continuidade, ou conservação de massa, para cada elemento da malha tridimensional, conforme a equação diferencial

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Supondo-se uma condição inicial de campo de escoamento divergente definida localmente em um dado elemento pelas componentes u_0, v_0, w_0 . As componentes ajustadas de velocidade não-divergente podem ser

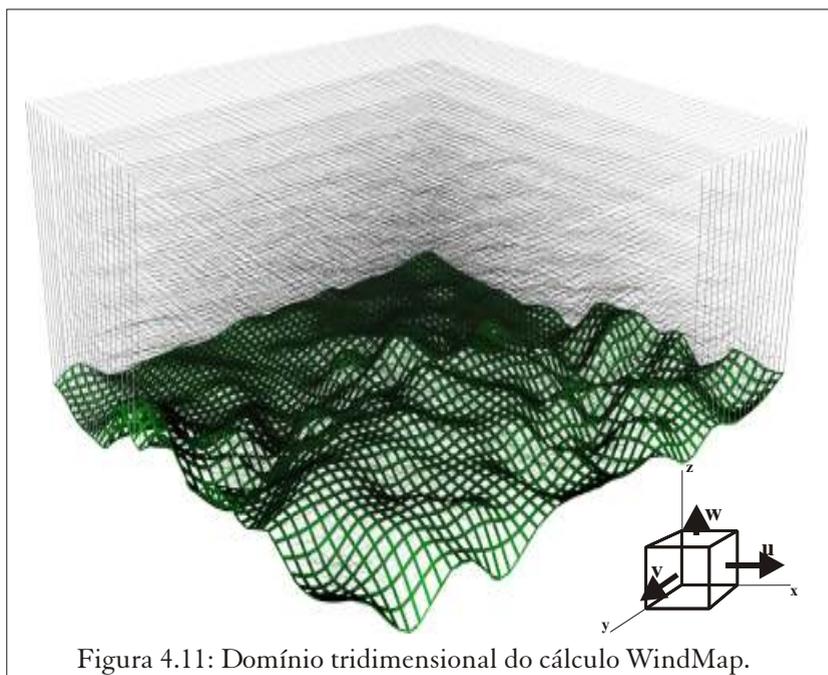


Figura 4.11: Domínio tridimensional do cálculo WindMap.

definidas como

$$u = u_0 + \bar{u} \quad v = v_0 + \bar{v} \quad w = w_0 + \bar{w}$$

onde \bar{u} , \bar{v} , \bar{w} , definem a correção necessária para eliminar a divergência local do escoamento, e são representadas respectivamente por

$$\bar{u} = \frac{\phi}{h} \frac{\partial}{\partial x} \quad \bar{v} = \frac{\phi}{h} \frac{\partial}{\partial y} \quad \bar{w} = \frac{\phi}{v} \frac{\partial}{\partial z}$$

onde o potencial de velocidade de perturbação ϕ é resultante das influências do terreno no campo de escoamento, bem como de erros introduzidos nas condições de inicialização do modelo. Os coeficientes τ_h e τ_v modelam o desvio entre as condições de estabilidade térmica vertical *real* e *neutra* da atmosfera. Para

$$h = v \text{ constante}$$

as velocidades de perturbação adicionam uma correção irrotacional ao campo de escoamento, e assim, a vorticidade inicialmente presente no campo de escoamento é eliminada. A determinação do potencial de velocidade é realizada a partir da equação da continuidade, forçando o escoamento a ser não-divergente. Maiores detalhes sobre os algoritmos e métodos de solução adotados no modelo NOABL são apresentados na Ref. 17.

O perfil de velocidade vertical do vento pode ser aproximado pela *Lei Logarítmica* segundo a relação

$$u(z) = \frac{u_*}{z_0} \ln \frac{z}{z_0}$$

onde $u(z)$ é a velocidade do vento na altura z , z_0 é a rugosidade do terreno, 0.4 é a constante de *von Kármán* e u_* é a *velocidade de fricção*. A expressão anterior leva em consideração apenas a influência da rugosidade no perfil de velocidade, negligenciando o efeito da estratificação térmica da atmosfera e, portanto, desvios significativos podem ocorrer em relação ao perfil de velocidade real da atmosfera.

A Teoria da Similaridade de Monin-Obukhov descreve um perfil mais geral da velocidade vertical, levando em consideração os efeitos da rugosidade e da estabilidade térmica, expressando-se matematicamente por

$$u(z) = \frac{u_*}{L} \ln \frac{z}{z_0}$$

onde u_* é uma função empírica da estratificação térmica da atmosfera (Businger, 1973; Dyer, 1974) e L é chamado de comprimento de Monin-Obukhov. O software WindMap™ realiza, através da escolha de diferentes valores de L , a simulação das condições de atmosfera neutra, instável e estável.

Nos cálculos do presente mapeamento, os parâmetros de estabilidade térmica vertical da atmosfera foram determinados pelos resultados do MesoMap para cada microrregião do Estado do Rio Grande do Sul.

4.4 VALIDAÇÃO

Avaliações de aproveitamentos eólico-elétricos são bastante sensíveis à velocidade média anual do vento, podendo-se portanto tomá-la como principal parâmetro de referência para validação da metodologia e resultados do mapeamento.

Nas posições das torres anemométricas utilizadas no cálculo deste Atlas, o mapeamento final apresentado no Capítulo 5 reflete exatamente as velocidades médias anuais medidas, já corrigidos os efeitos de subescala e realizados os ajustes climatológicos. Tal condição é intrínseca à metodologia MesoMap/WindMap/Camargo-Schubert na forma aqui utilizada.

Para as demais regiões do Estado, os mapas de potencial eólico refletem os valores da simulação de mesoescala MesoMap, ajustados pelas condições de contorno dadas pelas medições das torres anemométricas. Neste processo, pode-se considerar que a influência dos ajustes das torres decai na proporção do inverso do quadrado da distância, sendo que no caso limite - em regiões do Estado muito distantes de medições efetivas - os mapas tendem a apresentar valores oriundos de simulações MesoMap.

Nas metodologias tradicionais - eg. WAsP - as condições de vento das regiões restantes do Estado seriam obtidas por pura *extrapolação* a partir das torres anemométricas, por considerações relativamente simples de vento geostrofico. Qualquer extrapolação geográfica de uma variável física complexa, como é o movimento estocástico da atmosfera, pode representar a ampliação de margens de incerteza a patamares desconhecidos. No presente caso, a simulação atmosférica de mesoescala, realizada pelo MesoMap, efetivamente *interpola* as condições dos dados de reanálise (NCAR), consolidados na resolução original aproximada de 200km x 200km. Isto significa que as condições aqui calculadas do vento, para regiões distantes das medições anemométricas de referência, são

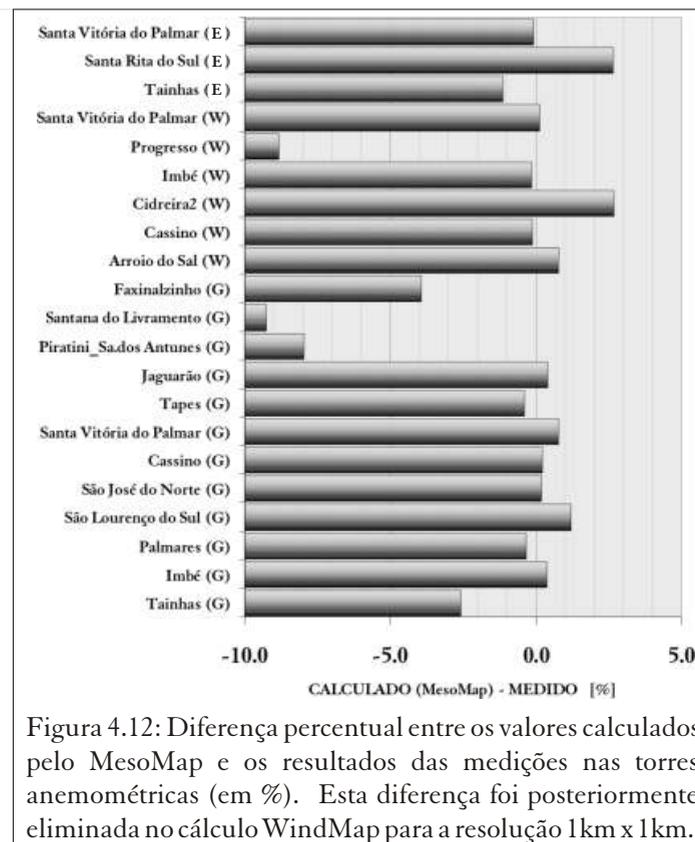


Figura 4.12: Diferença percentual entre os valores calculados pelo MesoMap e os resultados das medições nas torres anemométricas (em %). Esta diferença foi posteriormente eliminada no cálculo WindMap para a resolução 1km x 1km.

interpoladas de dados meteorológicos efetivos, consolidados por modelos de simulação global da atmosfera, e detalhados geograficamente para todas as microrregiões do Estado, por consideração completa das equações de mesoescala e camada-limite.

Uma estimativa das margens de incerteza contidas no modelamento MesoMap foi realizada pela sua comparação com os resultados das medições efetivamente realizadas, ajustadas climatologicamente. Esta comparação é apresentada na Figura 4.12, que mostra a diferença percentual entre os valores de velocidades médias anuais de vento calculados pelo MesoMap e aqueles obtidos das medições nas torres anemométricas. Inicialmente observa-se que estas diferenças máximas foram conservadoras quanto a aspectos econômicos de aproveitamentos eólico-elétricos, pois as velocidades previstas foram menores do que as efetivamente medidas. Pode-se observar que em apenas 3 locais as diferenças foram superiores a 5% - efetivamente aproximando-se de 10%. Estas 3 estações são justamente aquelas com o relevo menos plano, conforme apresentado no Apêndice I, o que está refletindo o fato de que os resultados MesoMap, nesta comparação, não foram corrigidos para o efeito de subescala. É importante ressaltar que na etapa do cálculo final dos mapas na resolução de 1km x 1km pelo WindMap, estas diferenças foram eliminadas e os mapas finais apresentam de forma exata os valores efetivamente medidos, corrigidos para o efeito de subescala e para a representatividade climatológica.

A amostragem de validação apresentada acima se refere a locais relativamente favoráveis quanto às condições de rugosidade e não-complexidade de terreno, pois foram meticulosamente selecionados para monitoramento anemométrico de estudos de viabilidade de usinas eólicas.

Face à falta de uma rede maior e melhor distribuída de estações anemométricas confiáveis, considerações adicionais quanto à incerteza nos dados finais tornam-se necessárias para uma avaliação da representatividade dos mapas apresentados no Capítulo 5. Quanto a regiões bastante distantes das torres de referência, a análise sinaliza que para terrenos não-complexos, as margens de incerteza tendem a ser inferiores a 10%. No entanto, para terrenos complexos - i.e. com declividades superiores a 30% e grandes variações de declividade em distâncias de poucas centenas de metros a poucos quilômetros - estima-se que estas margens de incerteza nas velocidades médias anuais de vento sejam superiores a 10%. Comparações efetuadas na prática indicam que modelos de simulação de camada-limite (WAsP, NOABL, WindMap) podem apresentar erros da ordem de até 25% em terrenos complexos^[4,5]. No mapeamento atual, este limite superior de incerteza tende a ser significativamente reduzido, visto que na grande maioria das regiões de relevo complexo do Estado do Rio Grande do Sul o modelamento MesoMap foi realizado em resolução de 3.6km x 3.6km; neste caso, a consideração dos principais fenômenos físicos atuantes na atmosfera, considerados no modelo de mesoescala, tende a ser muito mais representativo dos fenômenos em terreno complexo, se comparado às considerações simplificadas de conservação de massa e quantidade de movimento - base dos modelos de camada-limite.

Também para o interior do Estado, a falta de referências confiáveis de longo prazo para a realização de ajustes climatológicos constitui um elemento adicional de incerteza nas velocidades médias.

Apesar da relativa alta resolução representada pelo mapeamento em 1km x 1km, deve-se sempre levar em consideração que as velocidades de vento podem ter variações significativas entorno das médias apresentadas, devido aos efeitos de subescala no relevo, rugosidade e eventuais obstáculos. Adicionalmente, deve-se ressaltar que as validações efetuadas nos modelos de relevo e rugosidade foram efetuadas por amostragem nas áreas mais promissoras do Estado, permanecendo porém a possibilidade de ocorrência eventual de discrepâncias - especialmente nos modelos de rugosidade, elaborados por interpretação de imagens Landsat 5, comparadas a modelos de uso do solo e vegetação.

Dentro das considerações acima, foi desenvolvido o mapa das incertezas nas velocidades médias anuais de vento apresentadas no Capítulo 5 do presente Atlas.

O presente Atlas pode ser adotado, como ferramenta de referência confiável e útil, na identificação das melhores áreas para aproveitamentos eólicos dentro do território gaúcho. Salienta-se que a exatidão dos valores aqui estimados pode não ser suficiente para o atendimento das margens de incerteza admissíveis em estudos de viabilidade econômica de usinas eólicas, o que pode requerer medições adicionais no local em estudo.

4.5 VENTOS MÁXIMOS, RAJADAS

Este Atlas Eólico apresenta uma análise dos *Ventos Máximos* sobre todo o território do Rio Grande do Sul, buscando estabelecer uma referência geograficamente mais detalhada para a análise dos esforços devidos ao vento em edificações e estruturas de interesse em aproveitamentos energéticos do vento, tais como torres de medições e máquinas eólicas. Assim, foram desenvolvidos mapas de ventos extremos, corrigidos pelos *Fatores* S_2 - conforme definido pela Norma Brasileira NB-599/1978 e NBR-6123/1988 “Forças Devidas ao Vento em Edificações” - calculados a partir do Modelo de Rugosidade, para as alturas de 30m e 50m. Os mapas temáticos apresentam as informações por escalas de cores, extrapoladas para todo o Estado na resolução de 1km x 1km. Deve ser observado, entretanto, que os resultados apresentados por este Atlas constituem uma contribuição adicional ao estudo dos ventos extremos no Estado, não substituindo, sequer em parte, os procedimentos e resultados contidos na Norma Brasileira.

Define-se a *velocidade básica do vento*, como a máxima velocidade média medida sobre 3 segundos, que pode ser excedida, em média, uma vez em 50anos, a 10m sobre o nível do terreno em lugar aberto e plano^[10].

A extrapolação da *velocidade básica* para todo o território rio-grandense foi realizada a partir das considerações do Balanço Geostrófico, em conformidade com as metodologias descritas nas bibliografias referenciadas. O cálculo e a incorporação do fator de correção S_2 à *velocidade básica* segue os procedimentos descritos na Norma Brasileira, aplicados ao Modelo de Rugosidade.

Como a representatividade climatológica das distribuições estatísticas de ventos extremos requer dados anemométricos de longo prazo, foram adotadas as séries de velocidades máximas anuais de rajadas com até 25 anos de abrangência, obtidas em estações anemométricas de aeroportos (MAER/DPV) em alguns locais do Estado e região Sul, extraídos da Norma Brasileira.

4.5.1 Estimativa de Ventos Extremos

Ventos de pouca freqüência, que são meteorologicamente distintos e mais intensos que os ventos máximos anuais, são denominados de ventos extraordinários (e.g. furacões, tornados). Climas em que não se espera a ocorrência de ventos extraordinários são chamados de climas bem-comportados. Em tais climas, é razoável assumir-se que cada registro de uma série de ventos máximos anuais contribui para a descrição do comportamento probabilístico dos ventos extremos, podendo-se esperar que uma análise estatística destas séries anuais possa fornecer predições dos valores extremos de vento a longo prazo. Desse modo, pode-se definir uma variável aleatória a partir das séries de ventos máximos anuais. Existindo vários anos consecutivos de registros de dados de vento, a Função Distribuição Cumulativa dessa

variável aleatória pode ser estimada, modelando o comportamento dos ventos máximos anuais^[11]. Aos ventos extremos são associados períodos de recorrência, ou seja, a velocidade do vento que, na média, é excedida uma vez no período.

4.5.1.1 Distribuição para Ventos Extremos

Uma Função Distribuição Cumulativa para valores extremos é referida como Distribuição de Valores Extremos Tipo I, ou ainda, Distribuição de Gumbel, sendo definida por^[11]

$$F_I(x) = \exp\left\{-\exp\left[-\left(\frac{x - x_0}{\sigma}\right)^{\tau}\right]\right\}$$

onde x_0 é a moda da distribuição, o valor mais comum, e σ o fator de escala, uma medida da dispersão dos dados. Decorrendo assim, que a Função Densidade de Probabilidade para Valores Extremos Tipo I seja dada por

$$f_I(x) = \frac{dF_I(x)}{dx} = \frac{1}{\sigma} \exp\left[-\left(\frac{x - x_0}{\sigma}\right)^{\tau}\right] \exp\left[-\left(\frac{x - x_0}{\sigma}\right)^{\tau}\right]^{\tau}$$

Utilizando-se as definições de valor esperado e variância, pode ser mostrado que o valor médio e o desvio-padrão da variável aleatória X são expressos, respectivamente, por^[11]

$$E(X) = x_0 + \frac{0.577216}{\tau} \sigma \quad SD(X) = \frac{\sigma}{\sqrt{6}}$$

onde $\gamma = 0.577216$ é a constante de Euler.

4.5.1.2 Intervalo de Recorrência

Considerando que a variável aleatória represente as velocidades máximas anuais em uma dada localidade, designada por V , a Distribuição de Gumbel pode ser escrita como

$$P(v) = \exp\left\{-\exp\left[-\left(\frac{v - v_0}{\sigma}\right)^{\tau}\right]\right\}$$

onde $P(v)$ é a probabilidade de que a velocidade máxima em um ano qualquer seja menor ou igual a v ($\text{Prob}(V \leq v)$). Se o período de recorrência associado à velocidade v for de T anos, então a probabilidade de que a velocidade v seja excedida em um ano qualquer é $1/T$ ($\text{Prob}(V > v)$)^[12]. Portanto,

$$P(v) = 1 - \frac{1}{T}$$

e assim^[12]

$$1 - \frac{1}{T} = \exp\left\{-\exp\left[-\left(\frac{v - v_0}{\sigma}\right)^{\tau}\right]\right\}$$

Explicitando v , na expressão anterior, tem-se

$$v_T = v_0 + \sigma \left[\ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right)\right]^{1/\tau}$$

Assim, conhecendo-se os parâmetros v_0 e σ da distribuição, pode-se estimar a velocidade do vento extremo v_T associada ao período de recorrência T .

4.5.1.3 Determinação dos Parâmetros da Distribuição

A literatura apresenta vários estimadores para os parâmetros da Distribuição de Valores Extremos Tipo I (Distribuição de Gumbel), tais como: Simulação de Monte Carlo, Método dos Momentos, Ajuste por Mínimos Quadrados, Método da Ordem Estatística, Método dos Momentos Ponderados.

No presente projeto os parâmetros foram determinados a partir das séries de valores máximos anuais utilizando-se o *Método dos Momentos Probabilisticamente Ponderados (Probability-Weighted Moment Method)*^[13,14].

Os registros de velocidades máximas anuais para um certo período (n anos) são classificados em ordem ascendente $v_1^{\max}, v_2^{\max}, v_3^{\max}, \dots, v_n^{\max}$, calculando-se então o parâmetro^[14]

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{i-1}{n-1} v_i^{\max}$$

Os parâmetros v_0 e σ podem então ser estimados a partir das seguintes expressões^[14]

$$\frac{1}{\ln 2} \left[2 \frac{v_0^{\max}}{v_0^{\max}} \right] = \frac{v_0^{\max}}{v_0^{\max}}$$

onde v_0^{\max} é o valormédio dasérie devalores máximos.

No Apêndice II são listadas as estações utilizadas na análise de ventos máximos sobre o Estado, os parâmetros da distribuição e a *Velocidade Básica do Vento*.

Conforme descrito a seguir, a partir das considerações da Lei de Arrasto Geostrófico e dos procedimentos contidos na Norma Brasileira, foram extrapoladas as velocidades básicas do vento, corrigidas pelo *Fator* S_2 ^[10], para todo o Estado do Rio Grande do Sul.

4.5.2 Arrasto Geostrófico e Vento Básico

O vento na camada-limite é gerado por gradientes de pressão causados - principalmente - pelos mecanismos sinóticos, de mesoescala e microescala, atuantes na dinâmica atmosférica. Como a camada-limite tem uma resposta razoavelmente rápida às variações de pressão, existe um equilíbrio aproximado entre as forças de pressão e as forças viscosas na superfície da Terra. O vento que escoia na atmosfera livre, no topo da camada-limite, é chamado de Vento Geostrófico. O resultado desse balanço de forças é referido como Lei de Arrasto Geostrófico, que

relaciona a velocidade de fricção na superfície u_* e o Vento Geostrófico G , matematicamente expressa por^[15]

$$G = \frac{u_*}{f} \sqrt{\ln \frac{u_*}{f z_o} \left(A^2 + B^2 \right)}$$

onde $f = 0.4$ é a constante de *von Kármán*, z_o é a rugosidade do terreno, A e B são funções da estabilidade térmica da atmosfera e f é um termo associado à Força de Coriolis, calculado pela expressão^[15]

$$f = 2 \omega \sin(\phi)$$

sendo ω a velocidade angular de rotação da Terra e ϕ a latitude local. Em condições de ventos extremos, espera-se que a camada-limite esteja neutramente ou quase-neutramente estratificada e, portanto, os desvios entre o perfil vertical real de velocidade do vento e o perfil logarítmico de camada-limite devem ser pequenos. Nessas condições, atmosfera neutra, os parâmetros A e B assumem os valores 1.8 e 4.5, respectivamente^[16].

A velocidade de fricção u_* pode ser calculada a partir da velocidade do vento extremo v_T para cada estação considerada, pela relação

$$u_* = \frac{v_T}{\ln \left(\frac{z}{z_o} \right)}$$

onde z é a altura em relação ao terreno.

Introduzindo u_* na expressão da Lei Geostrófica, calcula-se o valor da velocidade do vento geostrófico na região de cada estação, extrapolando-se a seguir, para toda a área do Estado. Como o escoamento geostrófico é, por definição, independente das condições do terreno, pode-se, assim, calcular a velocidade de fricção u_{*D} sobre terrenos com rugosidades quaisquer z_{oD} , pela solução da equação^[15]

$$G = \frac{u_{*D}}{f} \sqrt{\ln \frac{u_{*D}}{f z_{oD}} \left(A^2 + B^2 \right)}$$

A expressão anterior pode ser rearranjada de modo a aplicar-se o Método de Newton, resultando na equação seguinte^[15]

$$x^2 \left[\ln(x) - \ln(R_o) - \frac{A^2}{x^2} - B^2 \right] - 1 = 0$$

onde $x = \frac{u_{*D}}{G}$ e $R_o = \frac{G}{f z_{oD}}$ é o número de Rossby.

Objetivando-se estimar a *velocidade básica do vento* em conformidade com a Norma Brasileira, foi considerada, no cálculo das *velocidades de fricção* u_{*D} , uma mesma categoria de comprimento de rugosidade para toda a área do Estado: Categoria II ($z_{oD} = 0.07$ m), terreno aberto e plano^[10].

Assim, a velocidade básica do vento pode então ser calculada pela relação logarítmica, sob condições neutras de estabilidade térmica, pela expressão

$$V_{Bas} = \frac{u_{*D}}{0.4} \ln \left(\frac{10 z_D}{z_{oD}} \right)$$

4.5.3 Cálculo e Incorporação do Fator S_2

A partir do vento básico, foram calculadas as velocidades corrigidas pelo *Fator* S_2 , para as alturas de 30m e 50m, para todo o Estado. Tal fator é definido pela Norma Brasileira e insere uma correção na velocidade básica do vento, considerando os efeitos de rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno. Juntamente com os *Fatores* S_1 (fator topográfico) e S_3 (fator estatístico), define-se a velocidade característica do vento V_k , utilizada no cálculo das forças devidas ao vento nas edificações^[10]

$$V_k = V_{Bas} S_1 S_2 S_3$$

O *Fator* S_2 é calculado a partir da seguinte expressão

$$S_2(z, z_o, \bar{t}(h)) = b(z_o, \bar{t}(h)) F_R(\bar{t}(h), I_u) \frac{z}{10}^{p(z_o, \bar{t}(h))}$$

onde \bar{t} é o intervalo de tempo para cálculo da velocidade média, sendo função das dimensões da edificação em análise h ; b e p são parâmetros meteorológicos, variáveis com a rugosidade do terreno e o intervalo de média; F_R é o fator de rajada, que permite relacionar os valores das velocidades médias calculadas sobre intervalos de tempo distintos, sendo função do intervalo de média e da intensidade de turbulência do escoamento I_u .

O intervalo de média associado às dimensões de uma edificação é determinado pela sua resposta dinâmica induzida pelo espectro de frequências de uma rajada. De um modo geral, edificações pequenas são mais afetadas por rajadas de curta duração e edificações grandes, por rajadas de duração maior. No cálculo de S_2 , considerou-se um intervalo de média de 3s (edificações da Classe A^[10]), correspondendo a um fator de rajada unitário.

As funções dos parâmetros meteorológicos foram calculadas a partir da interpolação dos valores associados às diferentes categorias de rugosidade apresentados na Norma Brasileira, utilizando-se as classes de rugosidade constantes no Modelo de Rugosidade e considerando um fator de rajada unitário (rajada com tempo de média de 3s), calculando-se assim, os *Fatores* S_2 para todo o Estado, nas alturas de 30m e 50m.

Como resultado final, foram desenvolvidos mapas das *velocidades básicas de vento corrigidas pelo Fator* S_2 , para todo o Estado do Rio Grande do Sul, nas alturas de 30m e 50m, em resolução de 1km x 1km. Tais mapas são apresentados no Capítulo 5.

MAPAS EÓLICOS DO RIO GRANDE DO SUL

5. MAPAS EÓLICOS DO RIO GRANDE DO SUL

5.1 FREQUÊNCIAS x DIREÇÕES ANUAIS

5.2 VELOCIDADES x DIREÇÕES ANUAIS

5.3 POTENCIAL EÓLICO SAZONAL E ANUAL A 50m DE ALTURA

5.4 POTENCIAL EÓLICO SAZONAL E ANUAL A 75m DE ALTURA

5.5 POTENCIAL EÓLICO SAZONAL E ANUAL A 100m DE ALTURA

5.6 POTENCIAL EÓLICO SOBRE LAGOAS E MAR (*OFFSHORE*)

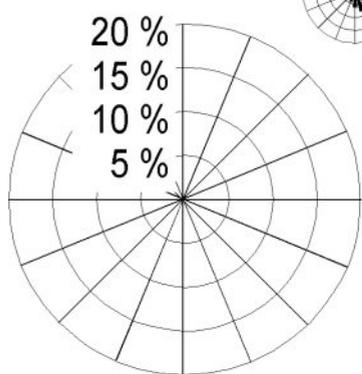
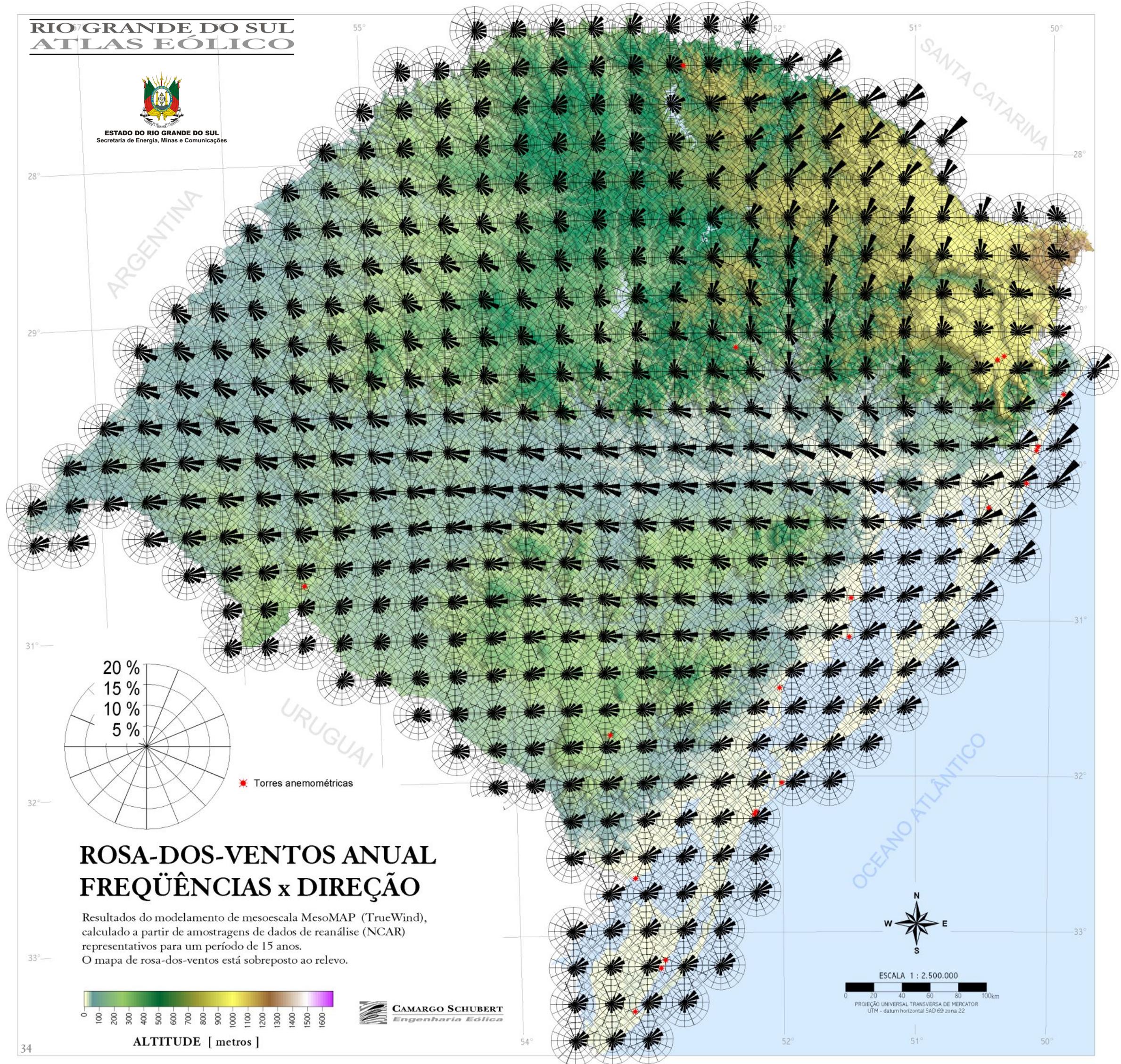
5.7 FATOR DE FORMA k DE WEIBULL, ANUAL

5.8 INCERTEZA NAS VELOCIDADES MÉDIAS

5.9 VENTOS EXTREMOS A 30m E 50m DE ALTURA



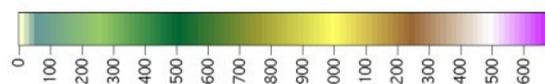
ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL
Secretaria de Energia, Minas e Comunicações



★ Torres anemométricas

ROSA-DOS-VENTOS ANUAL FREQUÊNCIAS x DIREÇÃO

Resultados do modelamento de mesoescala MesoMAP (TrueWind),
calculado a partir de amostragens de dados de reanálise (NCAR)
representativos para um período de 15 anos.
O mapa de rosa-dos-ventos está sobreposto ao relevo.



ALTITUDE [metros]

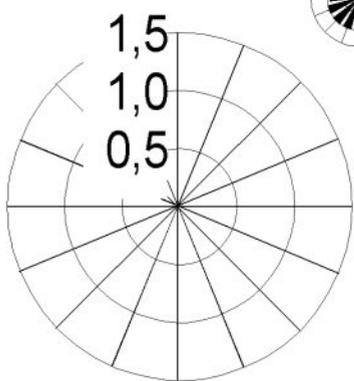
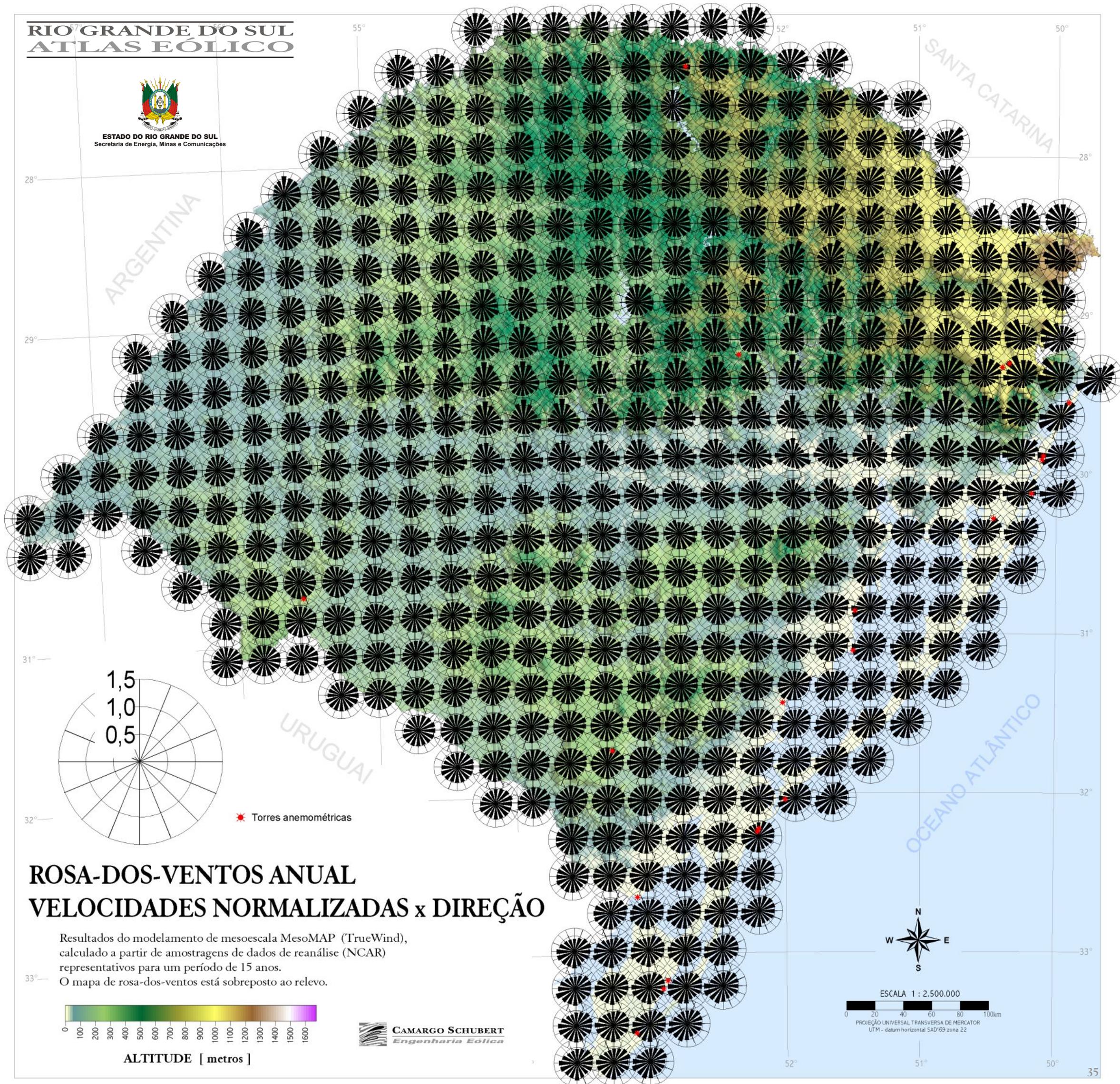
CAMARGO SCHUBERT
Engenharia Eólica



ESCALA 1 : 2.500.000
0 20 40 60 80 100km
PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
UTM - datum horizontal SAD/69 zona 22



ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL
Secretaria de Energia, Minas e Comunicações

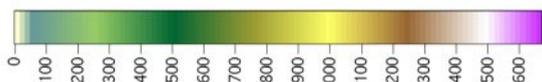


★ Torres anemométricas

ROSA-DOS-VENTOS ANUAL VELOCIDADES NORMALIZADAS x DIREÇÃO

Resultados do modelamento de mesoescala MesoMAP (TrueWind),
calculado a partir de amostragens de dados de reanálise (NCAR)
representativos para um período de 15 anos.

O mapa de rosa-dos-ventos está sobreposto ao relevo.



ALTITUDE [metros]

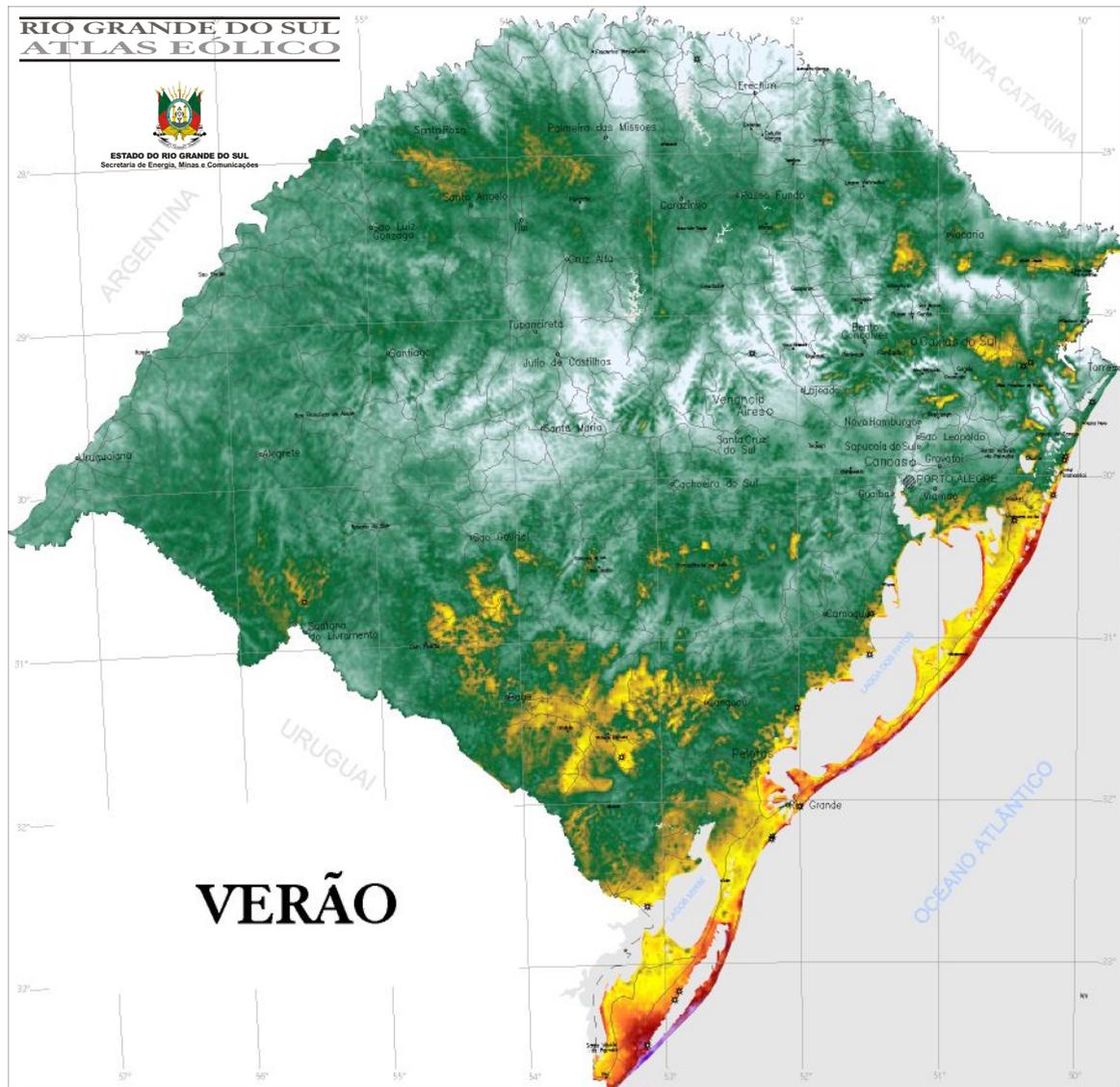
CAMARGO SCHUBERT
Engenharia Eólica



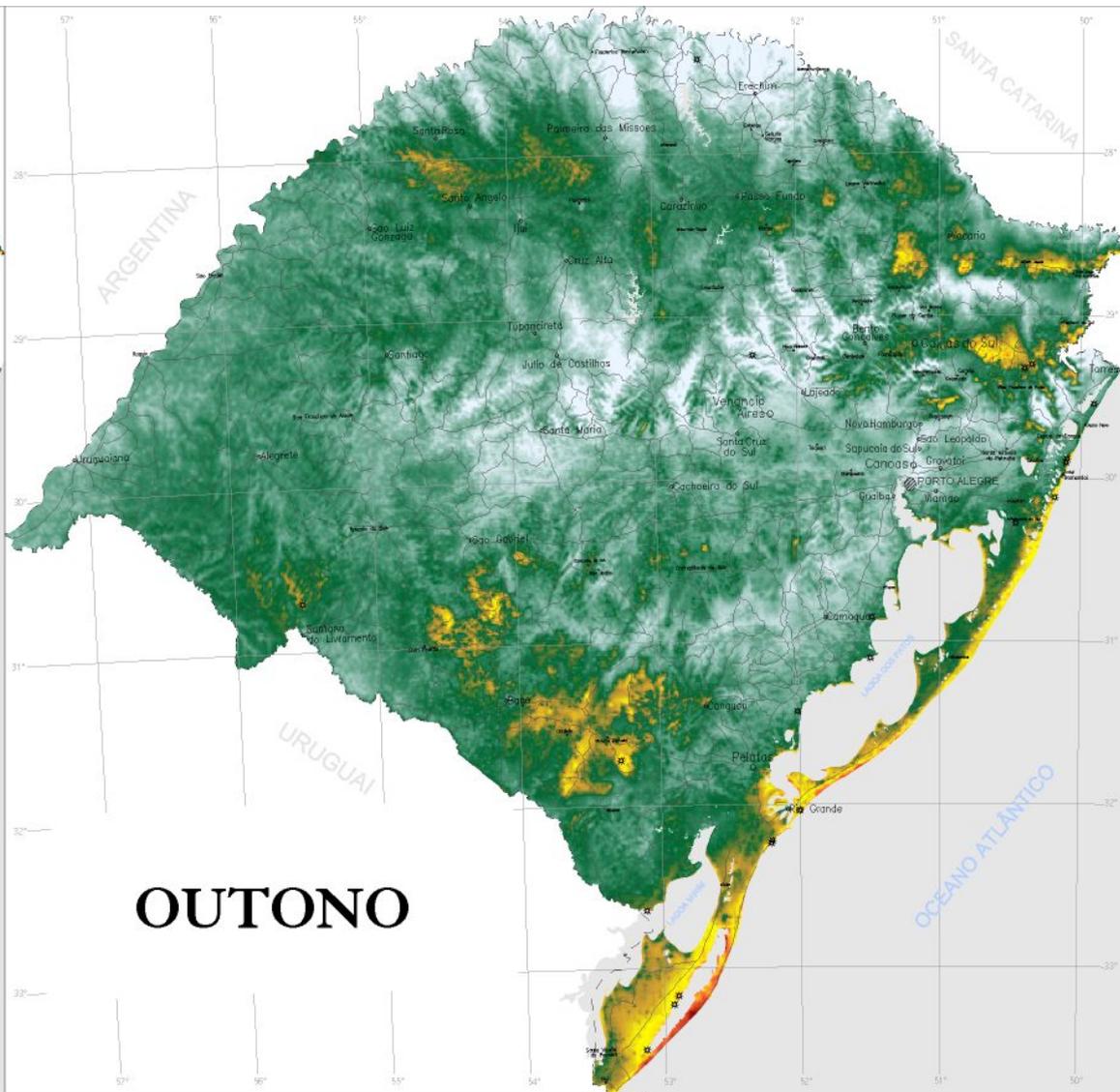
ESCALA 1 : 2.500.000



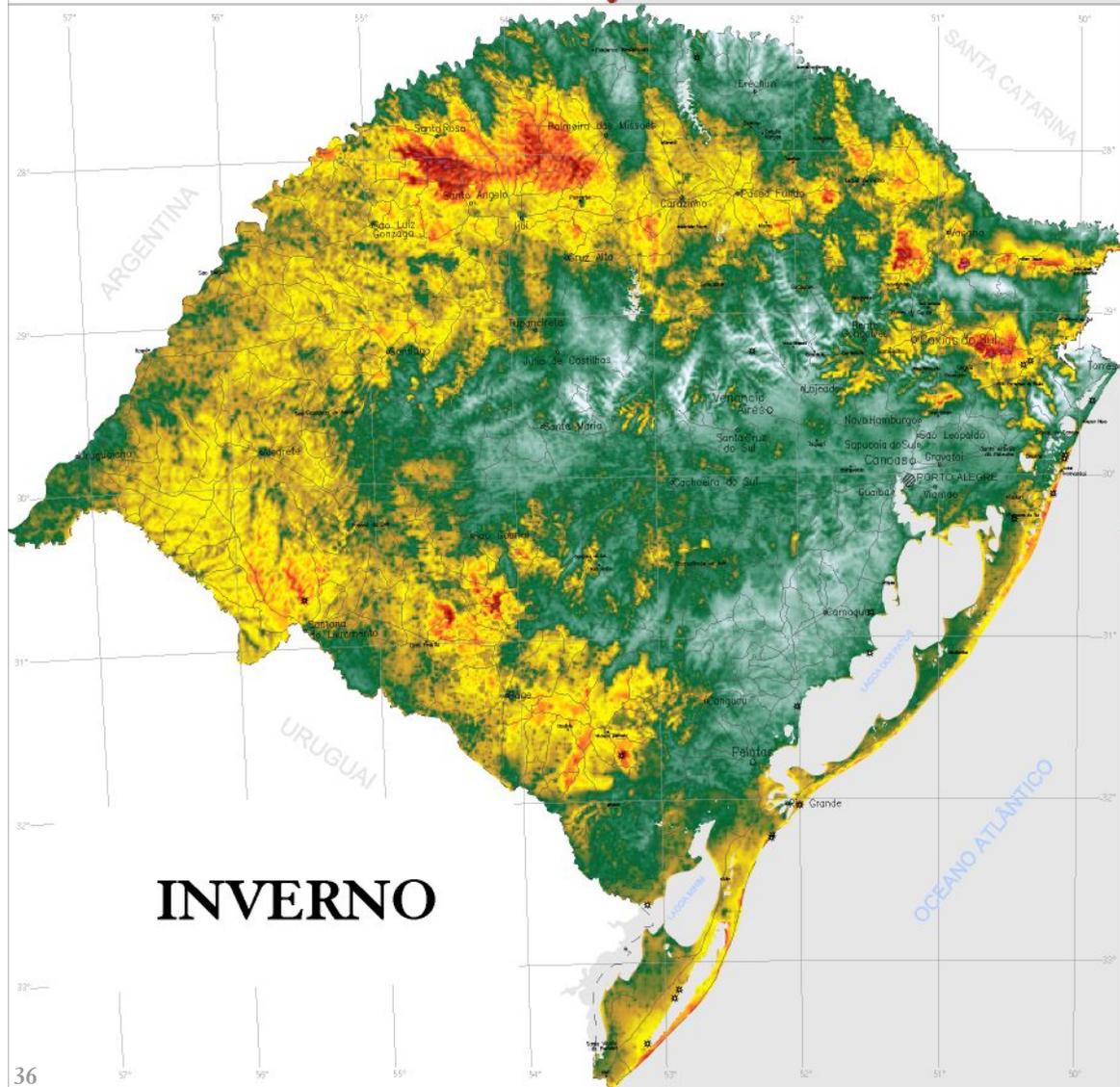
PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
UTM - datum horizontal SAD'69 zona 22



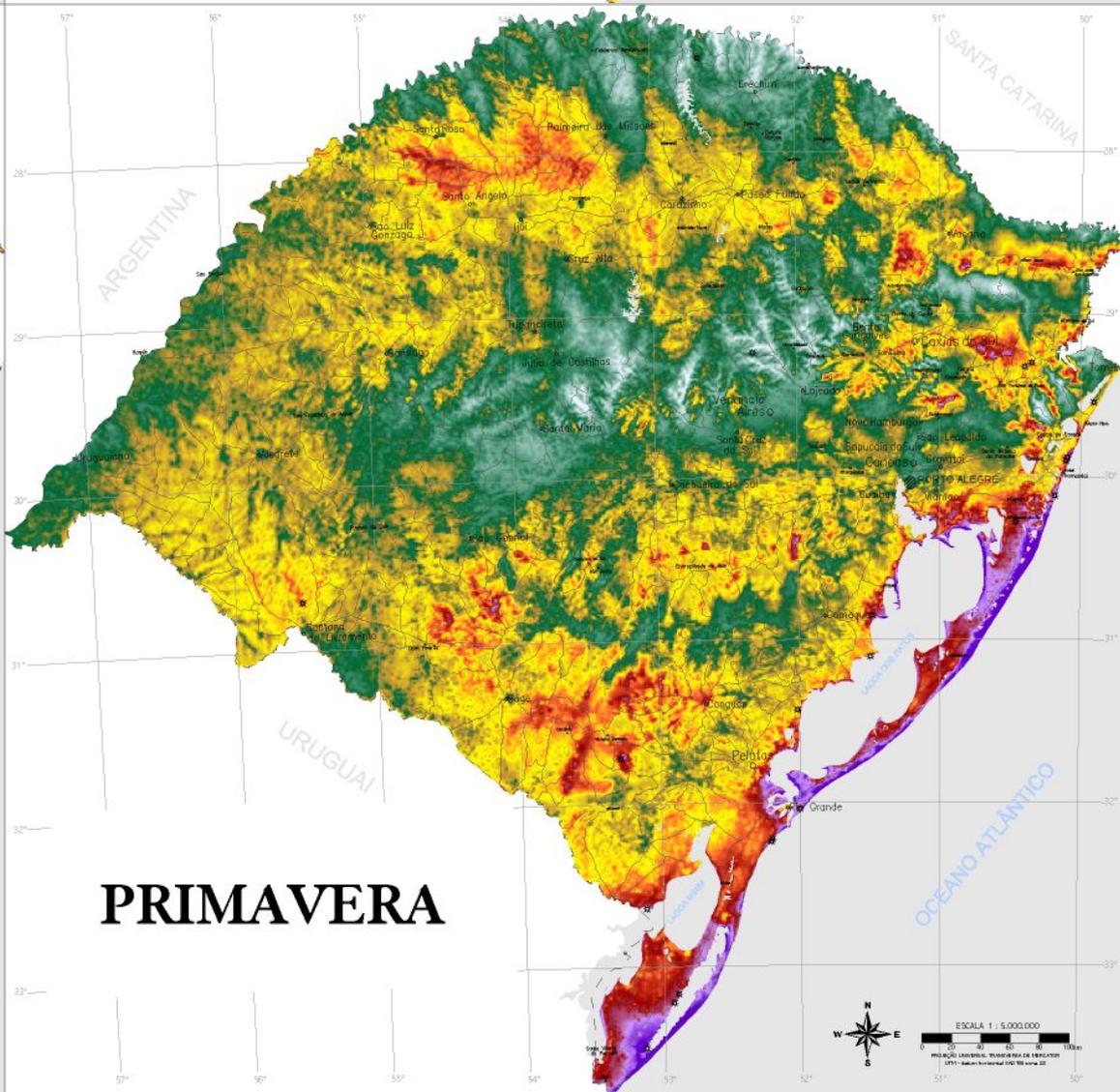
VERÃO



OUTONO



INVERNO

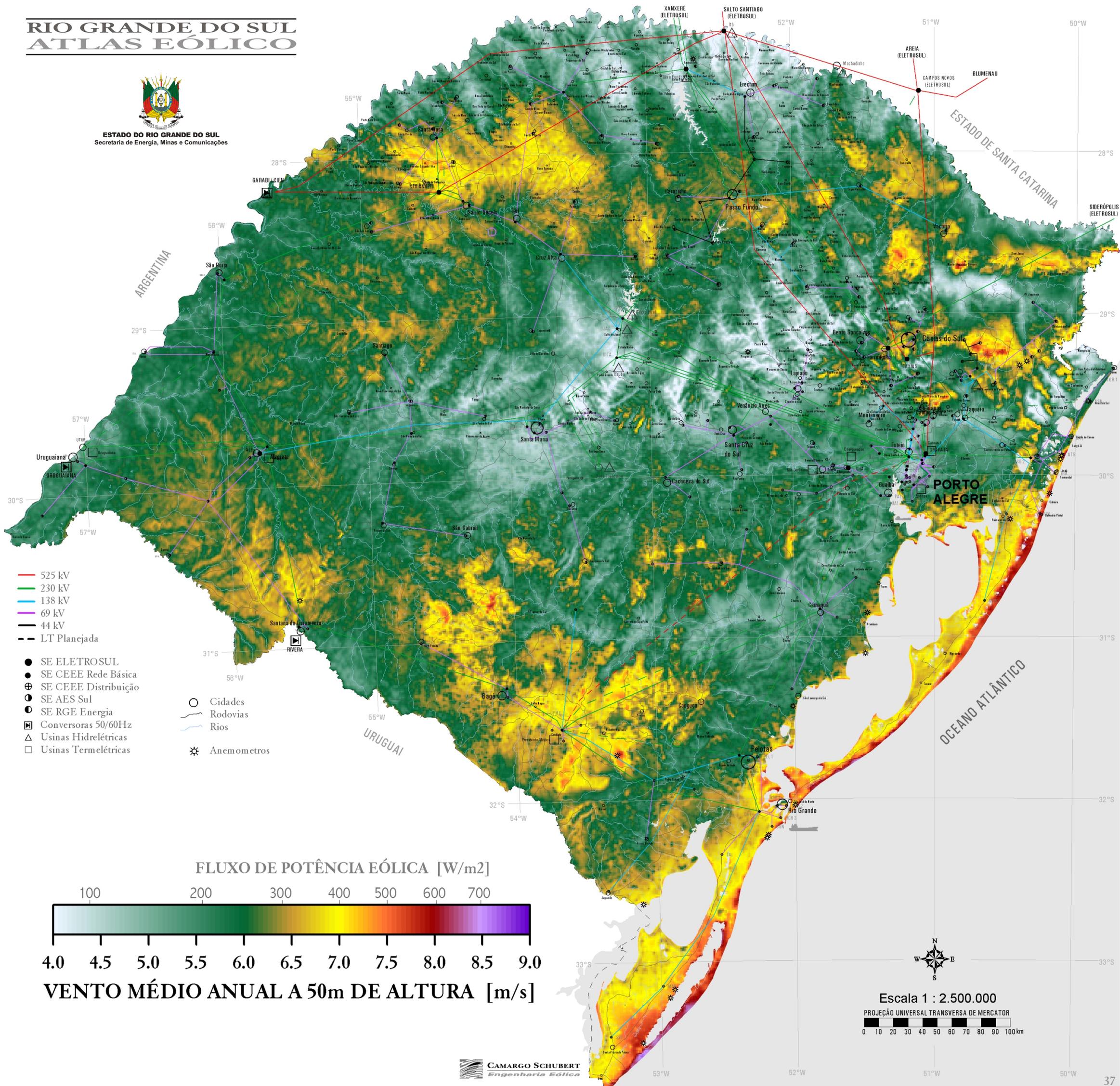


PRIMAVERA

RIO GRANDE DO SUL ATLAS EÓLICO



ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL
Secretaria de Energia, Minas e Comunicações

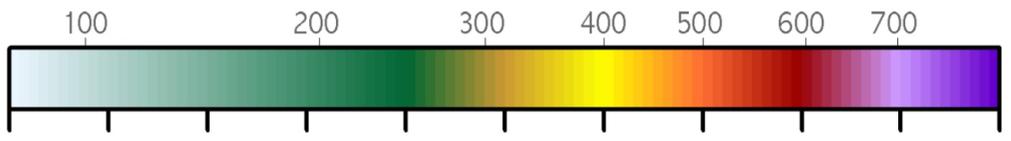


- 525 kV
- 230 kV
- 138 kV
- 69 kV
- 44 kV
- - - LT Planejada

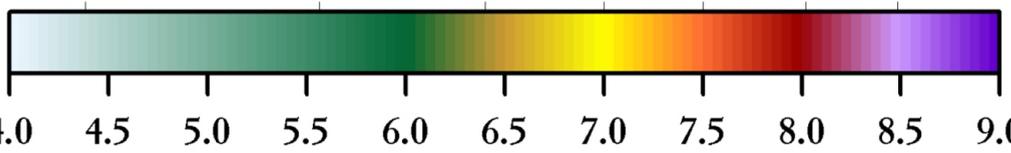
- SE ELETROSUL
- SE CEEE Rede Básica
- ⊕ SE CEEE Distribuição
- ⊙ SE AES Sul
- SE RGE Energia
- ▣ Conversoras 50/60Hz
- △ Usinas Hidrelétricas
- Usinas Termelétricas

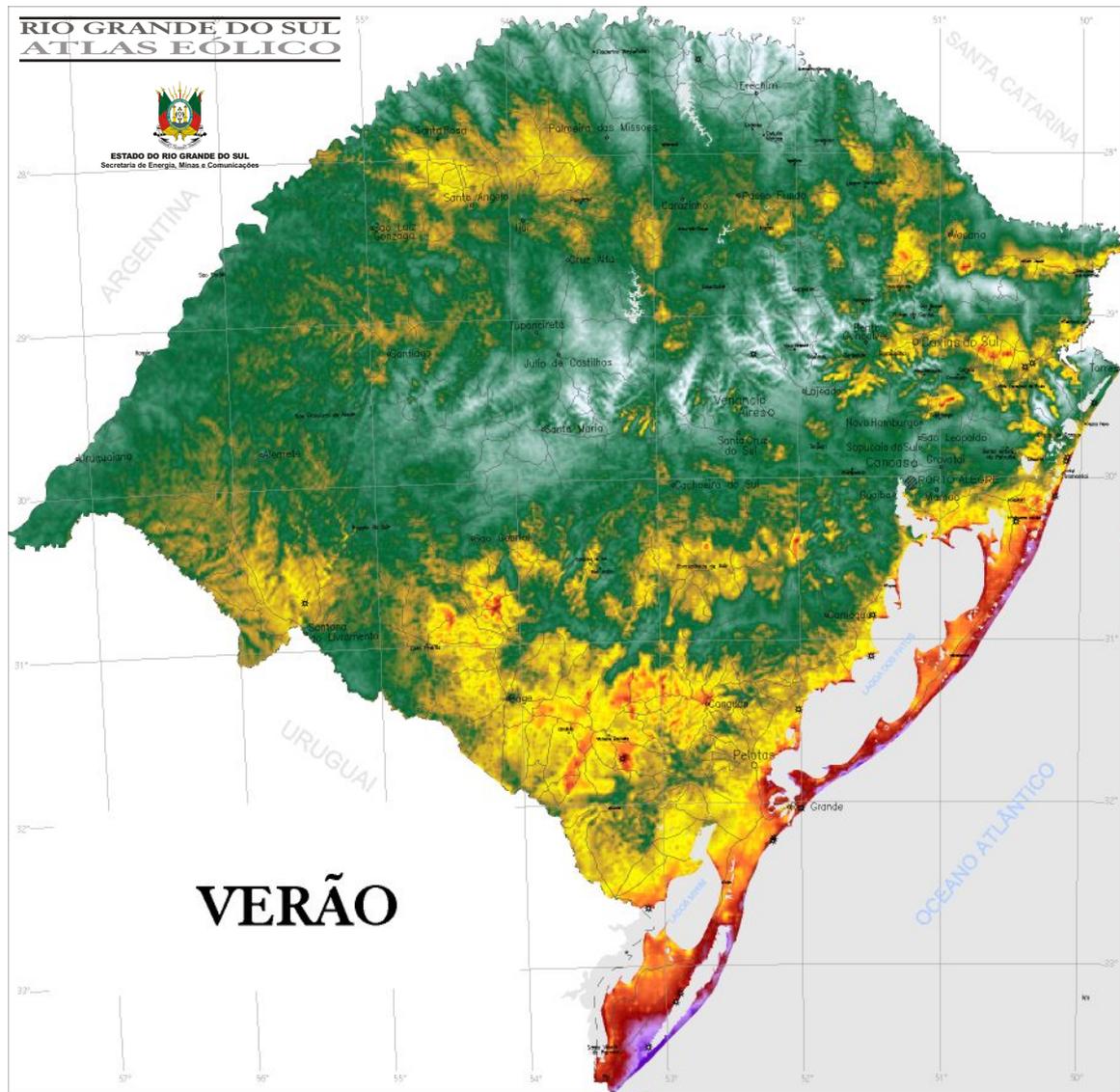
- Cidades
- Rodovias
- Rios
- ⊛ Anemômetros

FLUXO DE POTÊNCIA EÓLICA [W/m²]

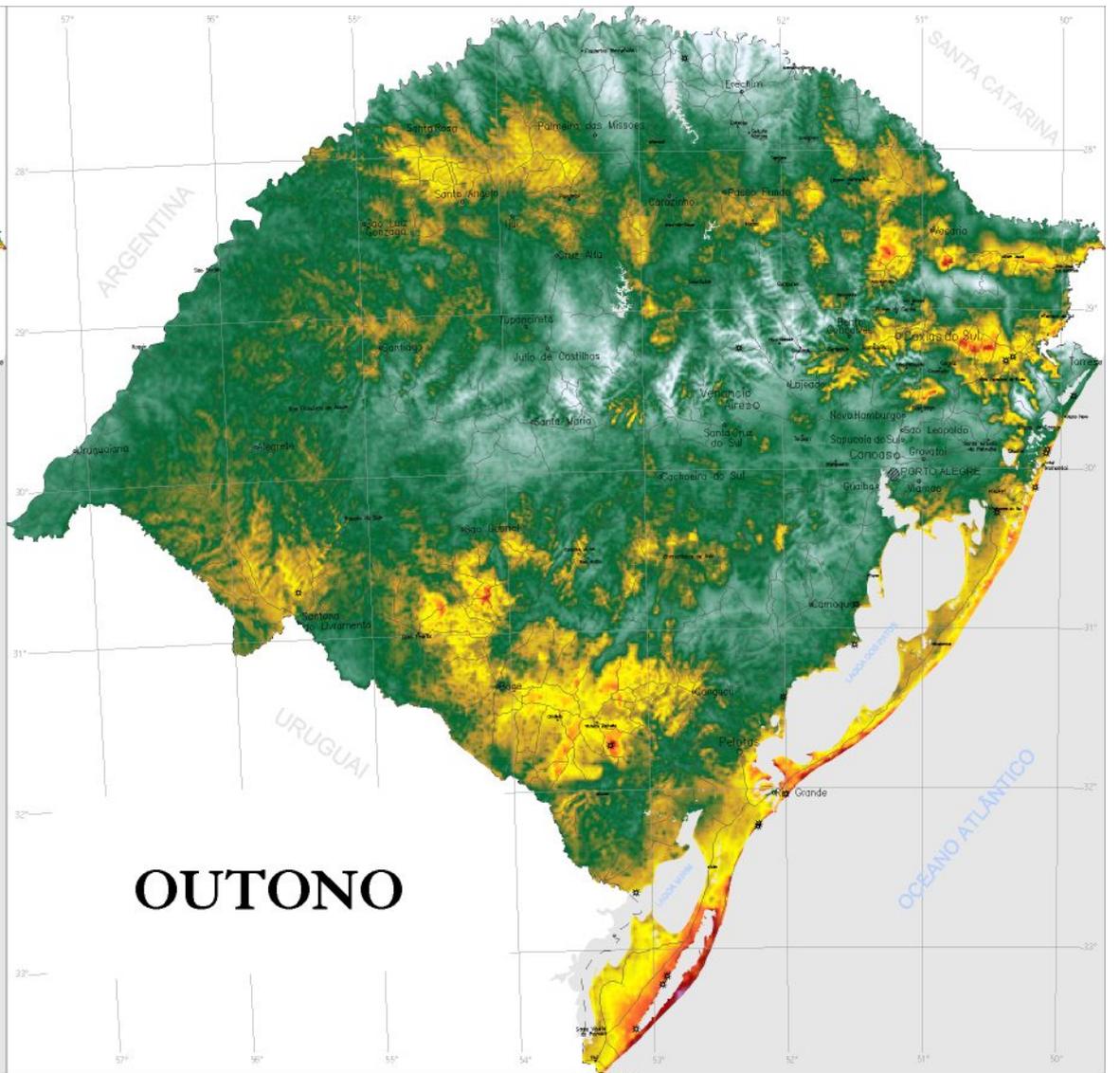


VENTO MÉDIO ANUAL A 50m DE ALTURA [m/s]

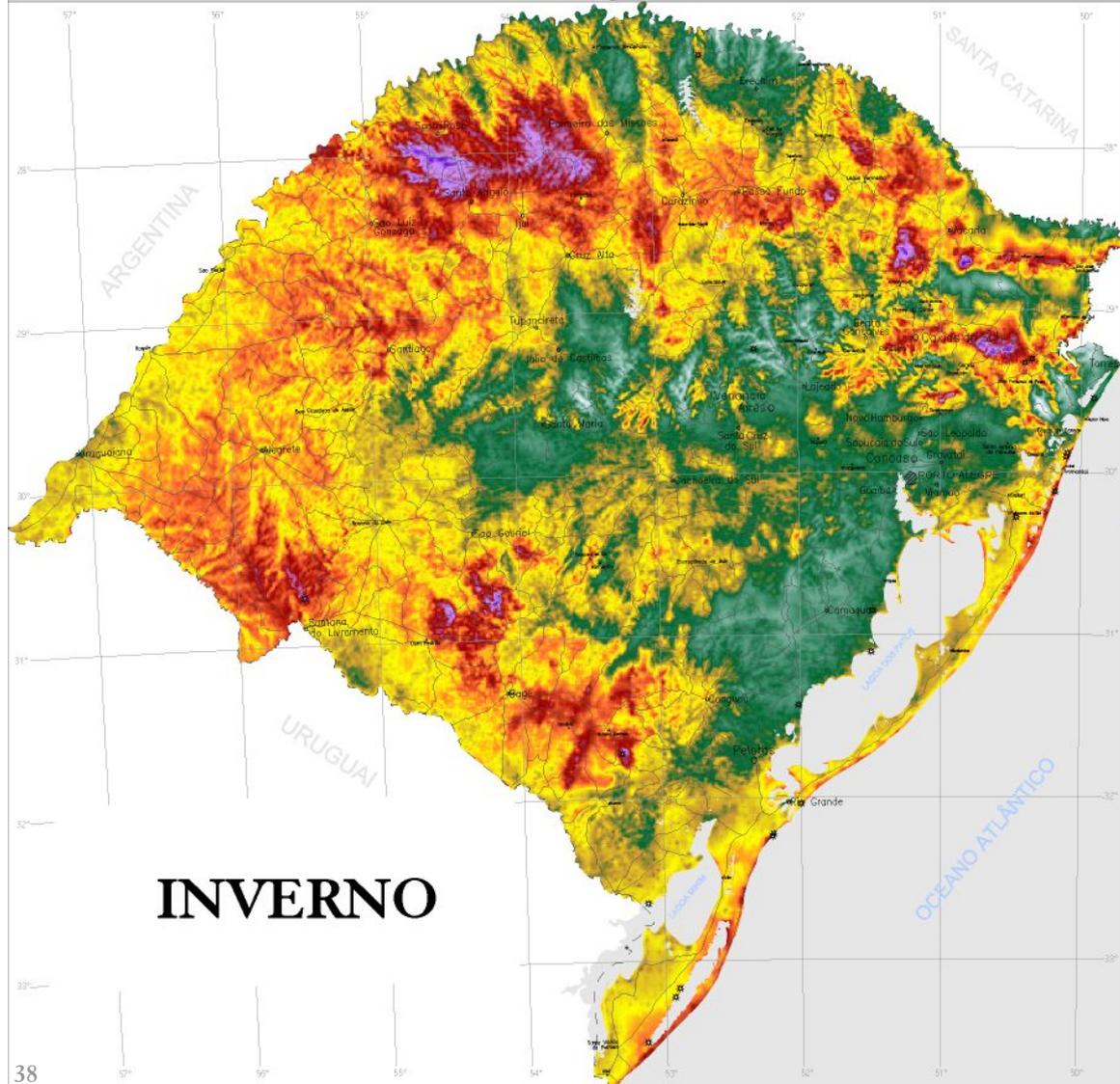




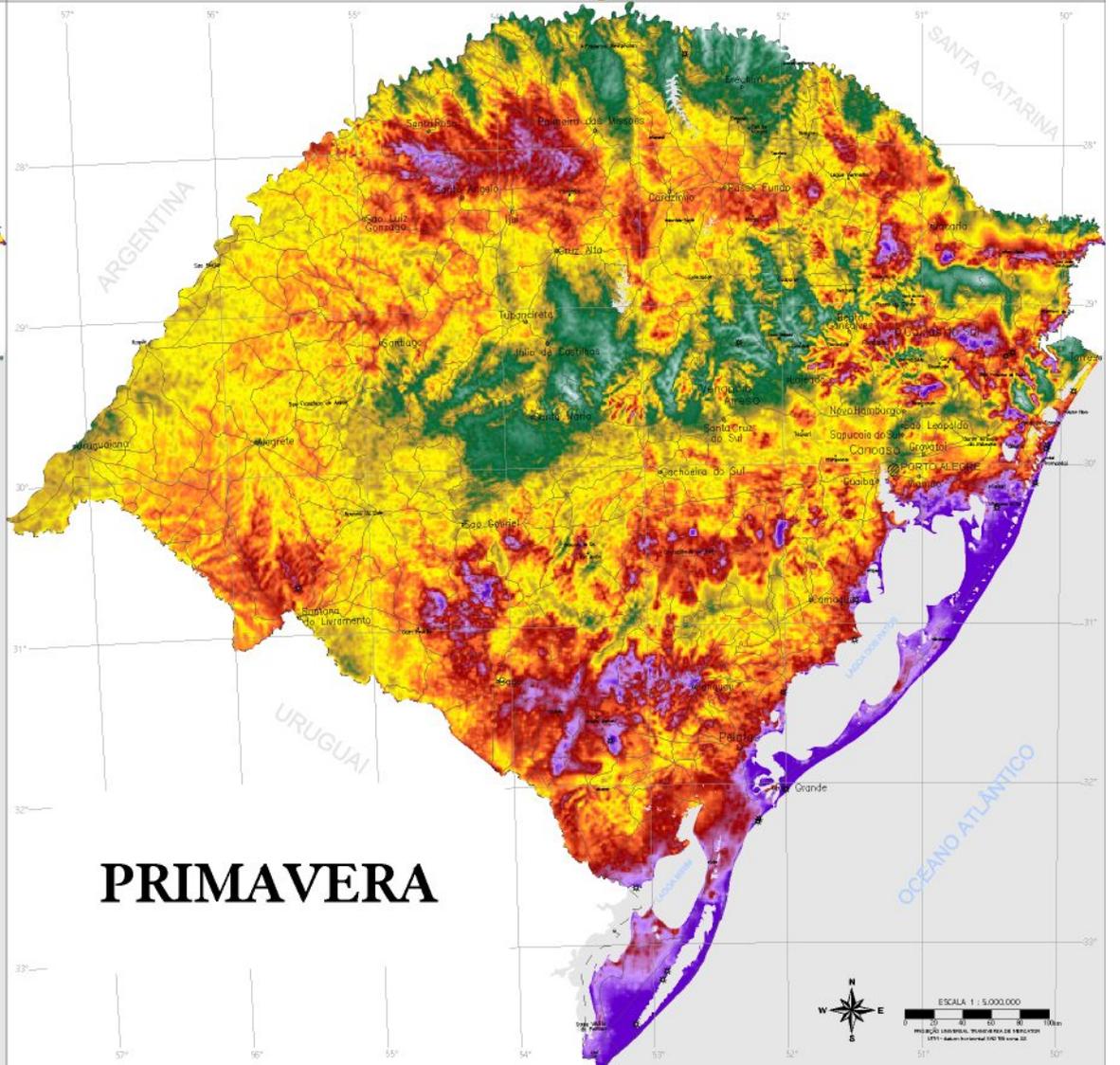
VERÃO



OUTONO



INVERNO

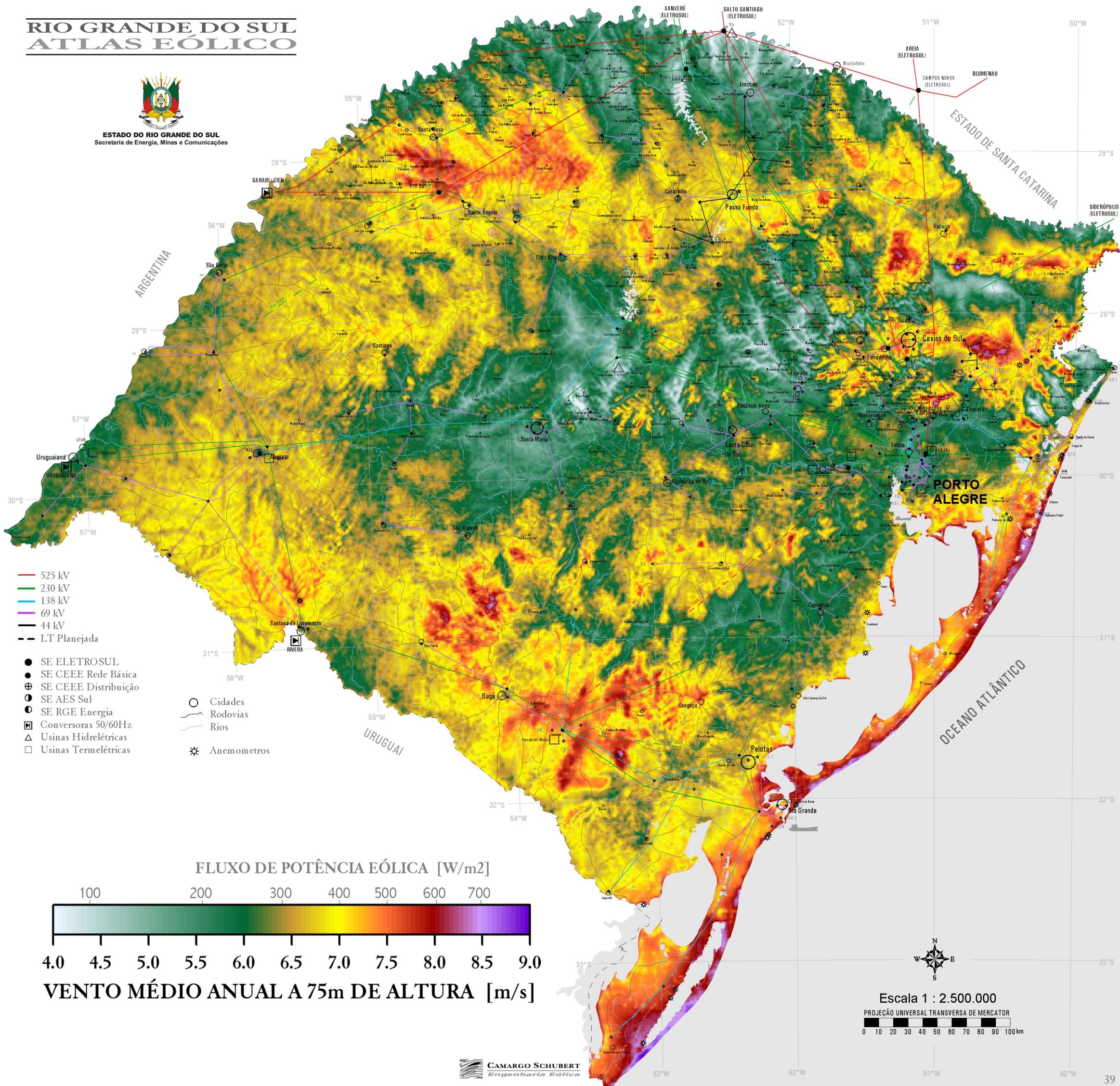


PRIMAVERA

RIO GRANDE DO SUL ATLAS EÓLICO



ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL
Secretaria de Energia, Minas e Comunicações



- 525 kV
- 230 kV
- 138 kV
- 69 kV
- 44 kV
- - - LT Planejada

- SE ELETROSUL
- SE CEEE Rede Básica
- ⊕ SE CEEE Distribuição
- ⊙ SE AES Sul
- SE RGE Energia
- ▣ Conversoras 50/60Hz
- △ Usinas Hidrelétricas
- Usinas Termelétricas

- Cidades
- Rodovias
- Rios
- ⊙ Anemômetros

FLUXO DE POTÊNCIA EÓLICA [W/m²]



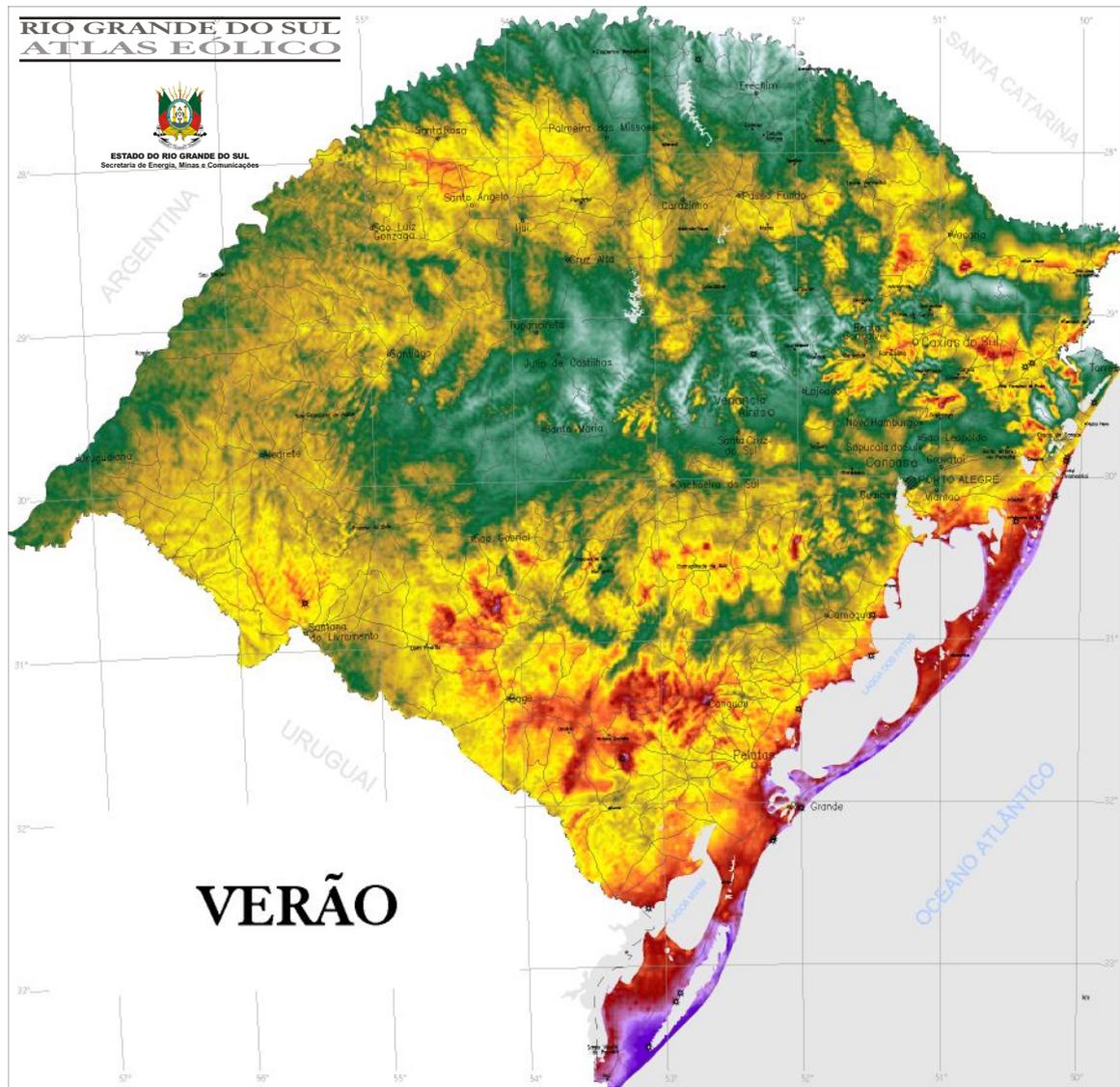
VENTO MÉDIO ANUAL A 75m DE ALTURA [m/s]



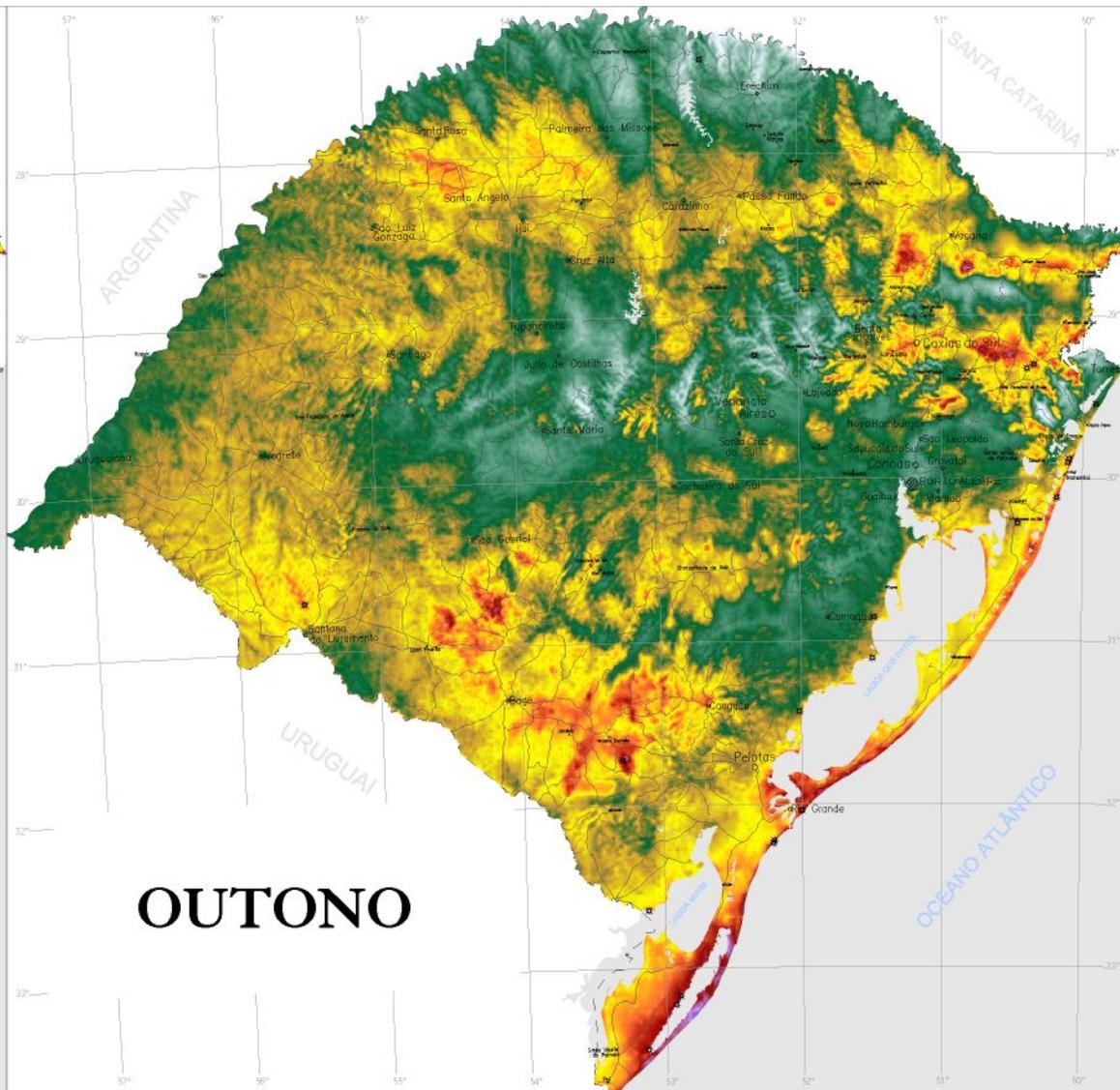
Escala 1 : 2.500.000
PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100km



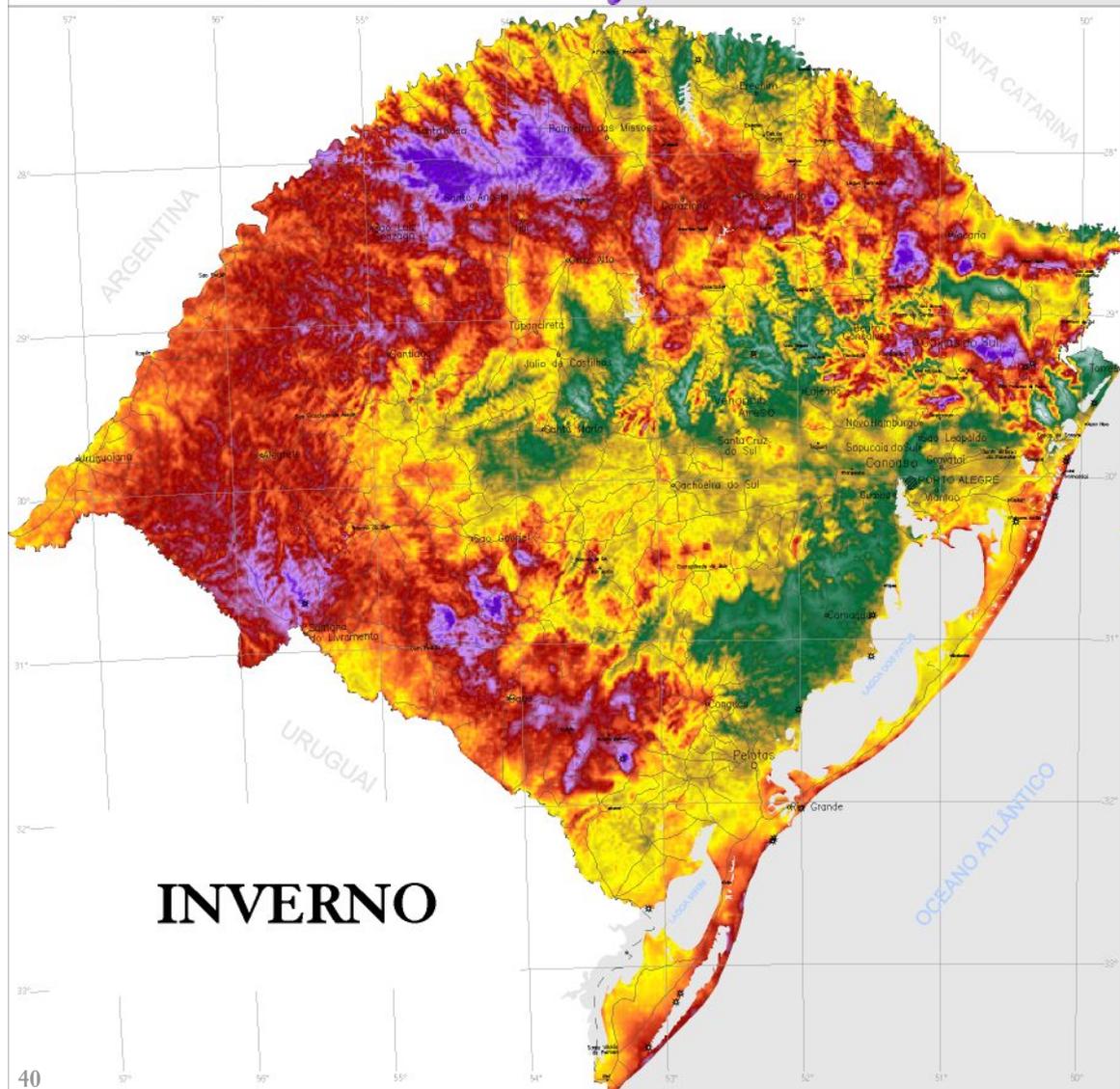
ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL
Secretaria de Energia, Minas e Comunicações



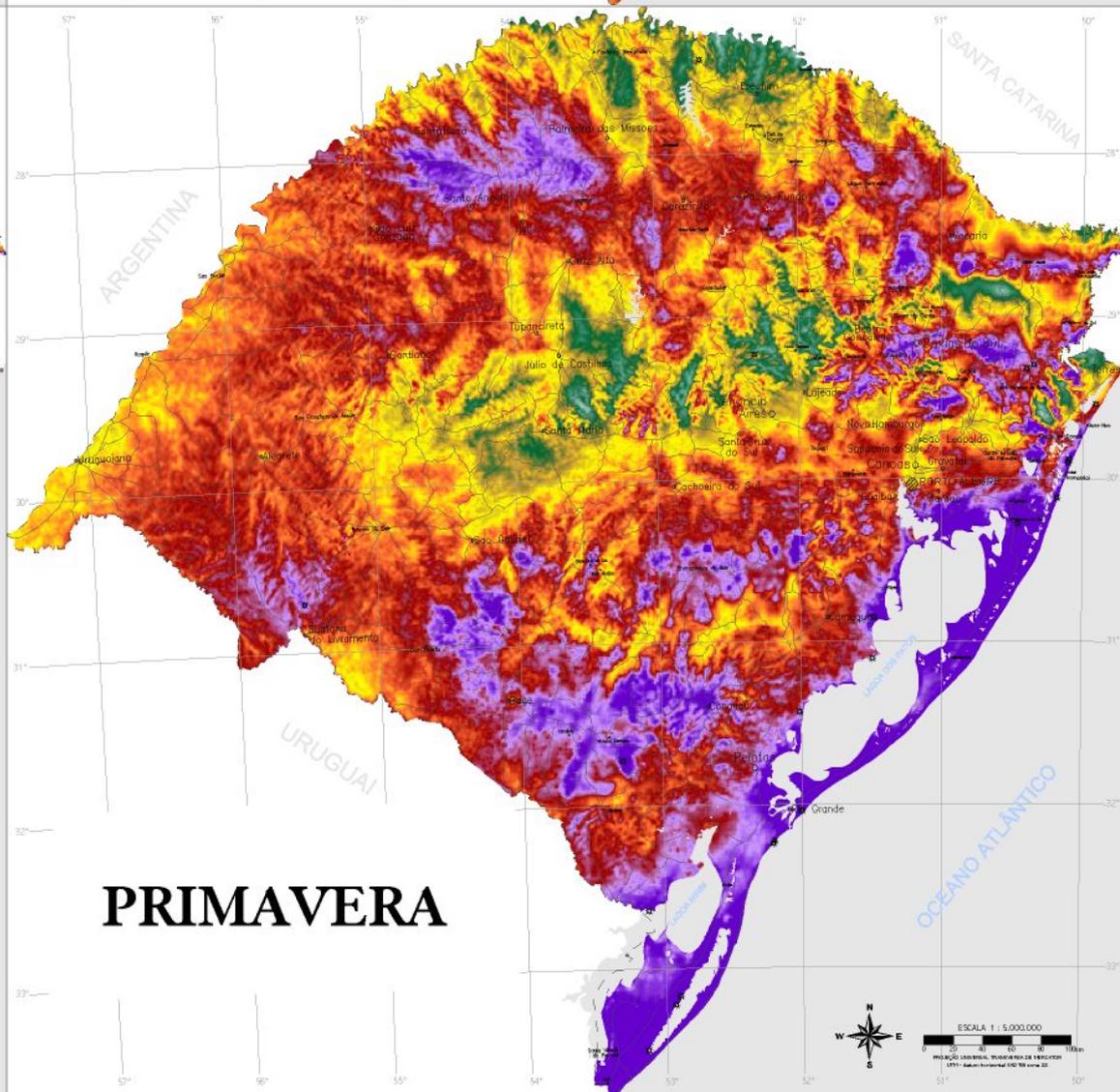
VERÃO



OUTONO



INVERNO

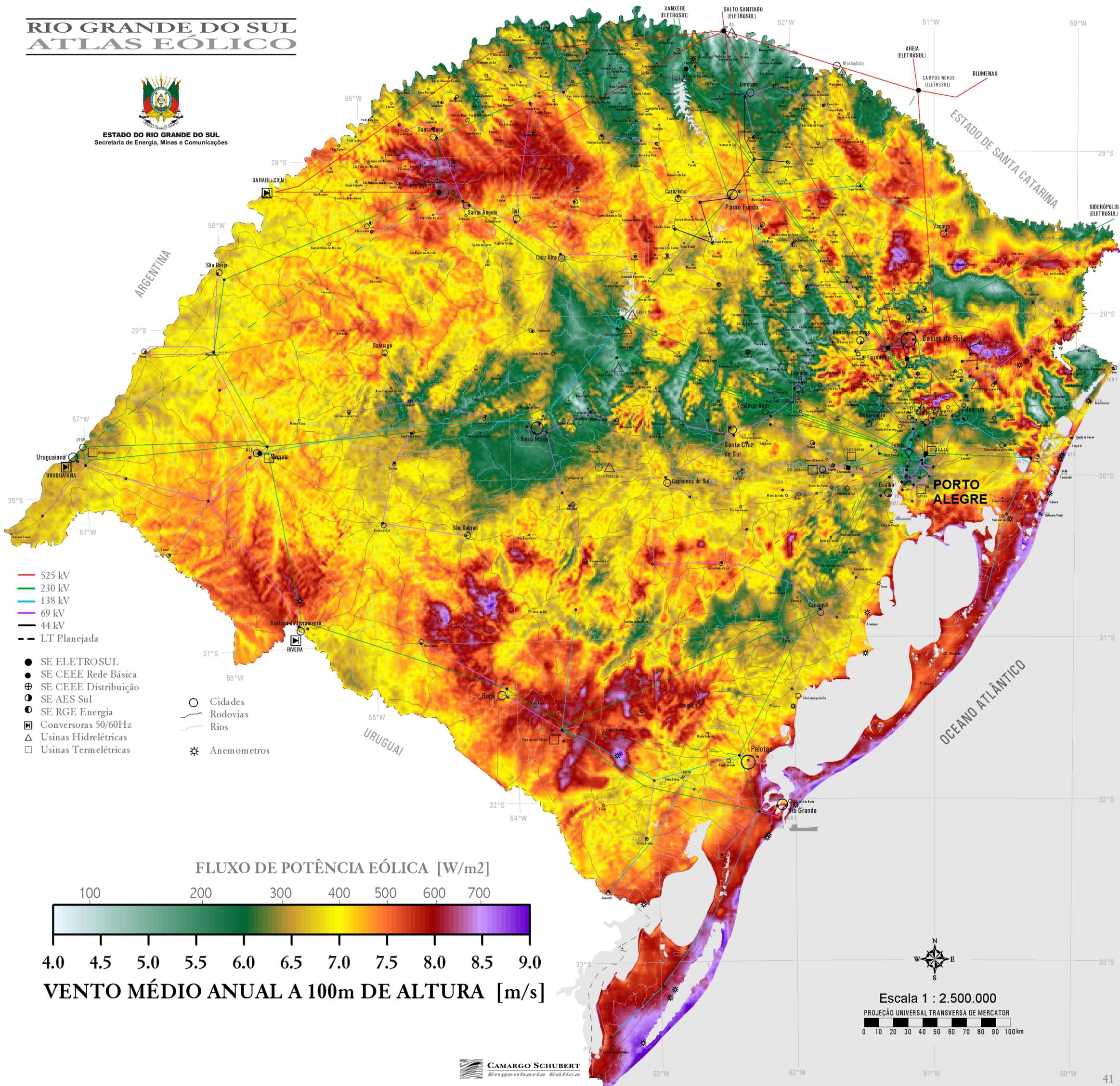


PRIMAVERA

RIO GRANDE DO SUL ATLAS EÓLICO



ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL
Secretaria de Energia, Minas e Comunicações

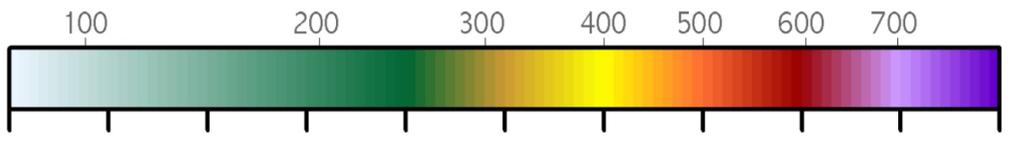


- 525 kV
- 230 kV
- 138 kV
- 69 kV
- 44 kV
- - - LT Planejada

- SE ELETROSUL
- SE CEEE Rede Básica
- ⊕ SE CEEE Distribuição
- ⊙ SE AES Sul
- SE RGE Energia
- ▣ Conversoras 50/60Hz
- △ Usinas Hidrelétricas
- Usinas Termelétricas

- Cidades
- Rodovias
- Rios
- ⊙ Anemômetros

FLUXO DE POTÊNCIA EÓLICA [W/m²]



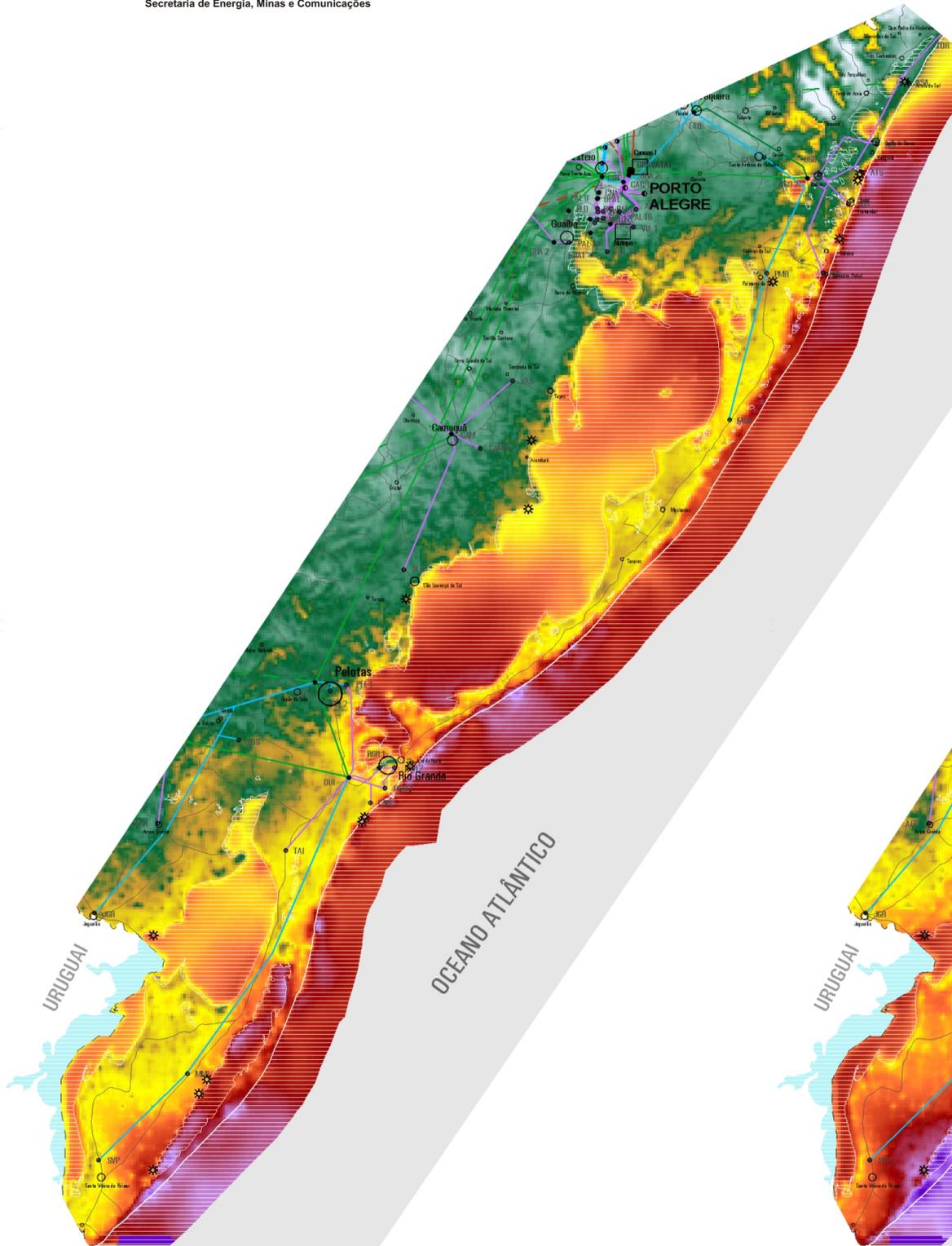
4.0 4.5 5.0 5.5 6.0 6.5 7.0 7.5 8.0 8.5 9.0

VENTO MÉDIO ANUAL A 100m DE ALTURA [m/s]

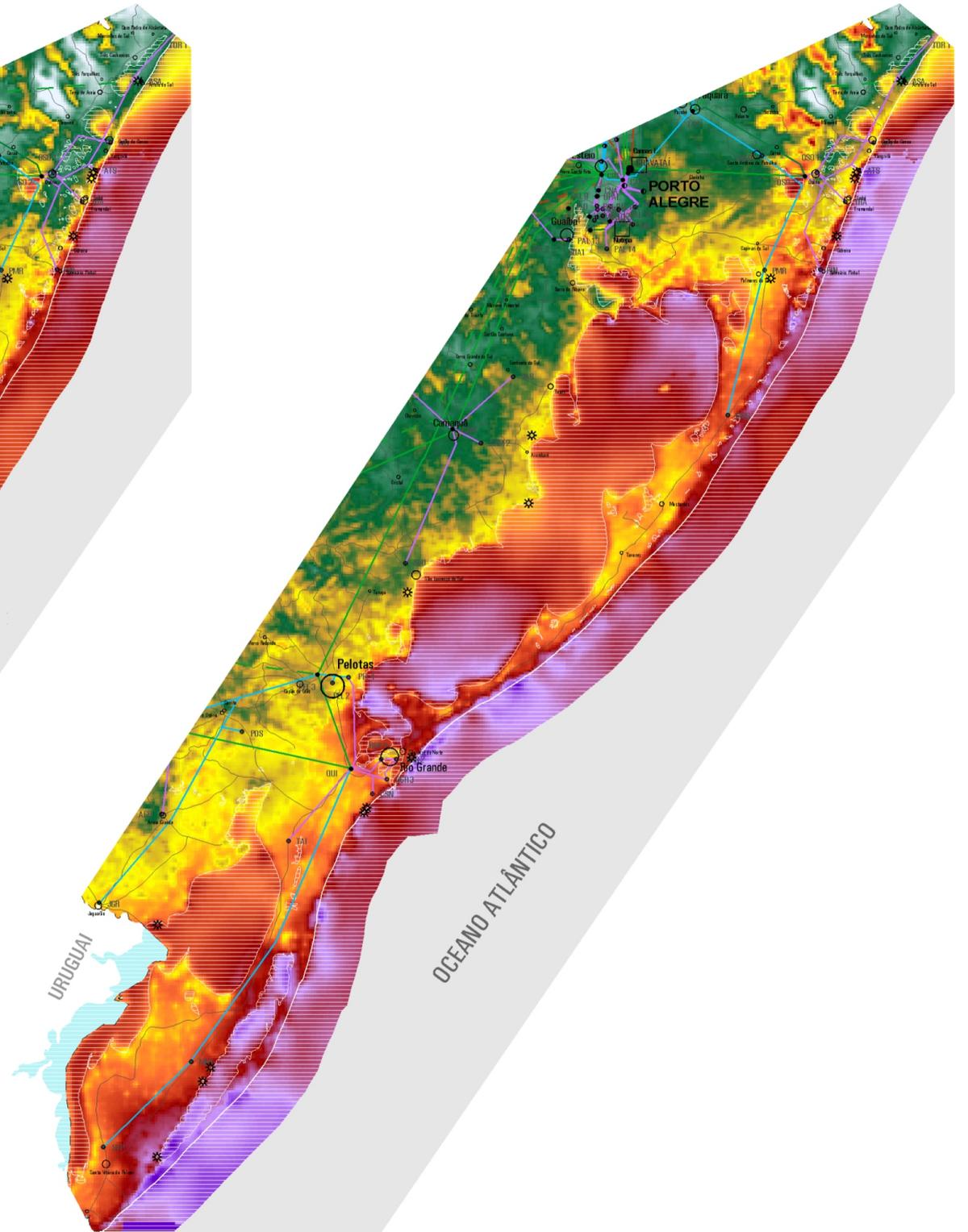
RIO GRANDE DO SUL ATLAS EÓLICO



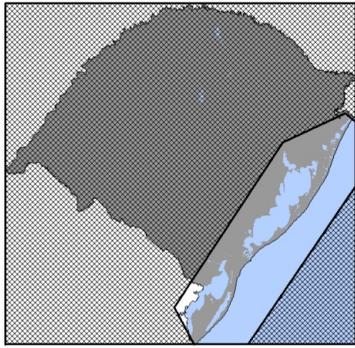
ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL
Secretaria de Energia, Minas e Comunicações



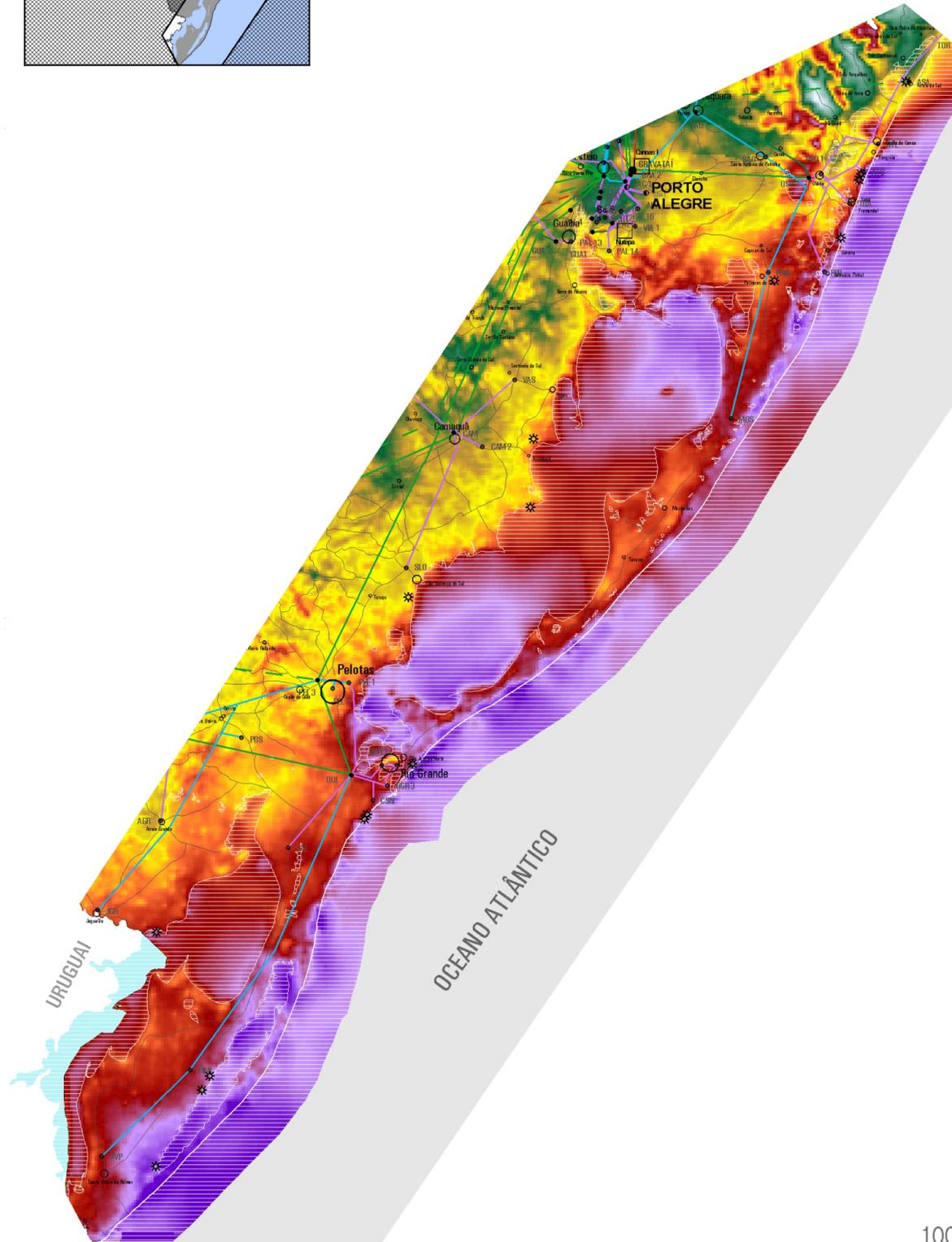
ALTURA 50m



ALTURA 75m



POTENCIAL EÓLICO *OFFSHORE* SOBRE LAGOAS E MAR



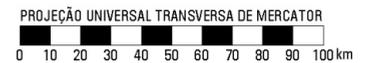
ALTURA 100m

- Cidades
- Rodovias
- Anemômetros
- 525 kV
- 230 kV
- 138 kV
- 69 kV
- 44 kV
- LT Planejada
- SE ELETROSUL
- SE CEEE Rede Básica
- SE CEEE Distribuição
- SE AES Sul
- SE RGE Energia
- Usinas Termelétricas

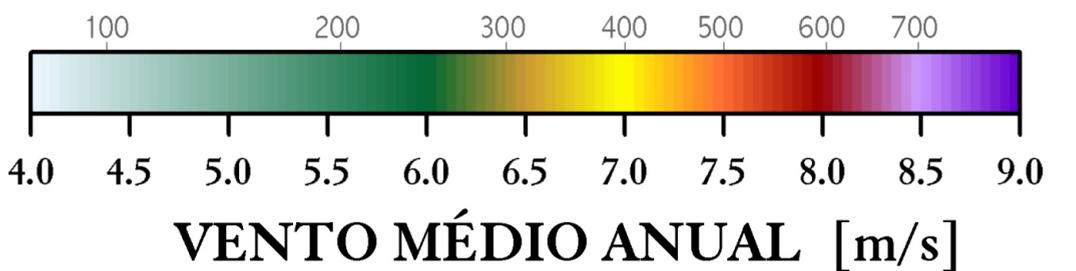
Áreas hachuradas: lagoas e mar



Escala 1 : 2.500.000



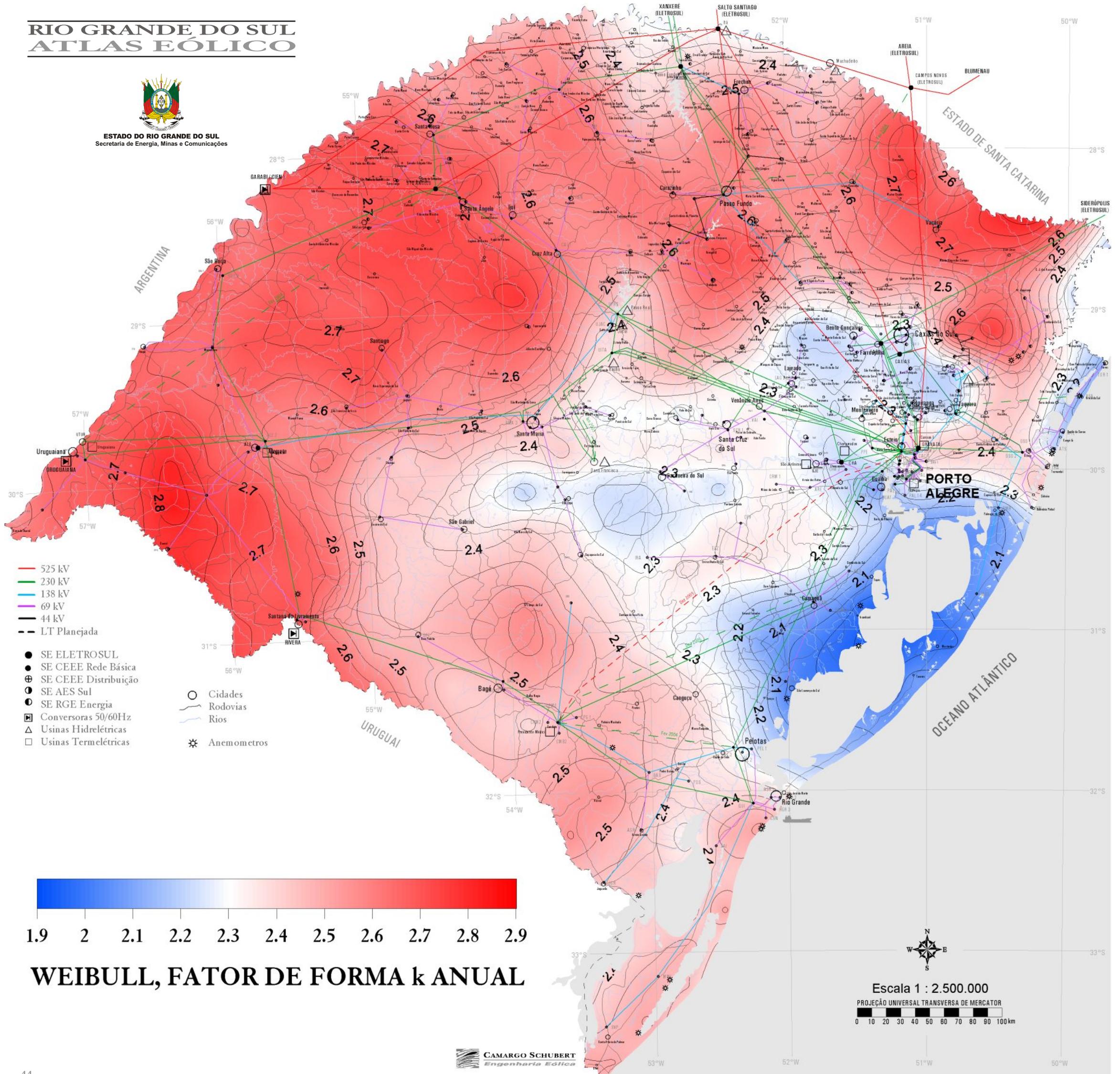
FLUXO DE POTÊNCIA EÓLICA [W/m²]



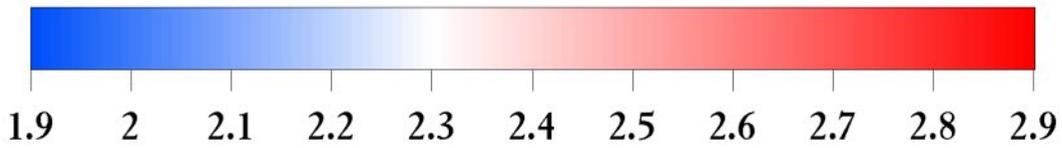
RIO GRANDE DO SUL ATLAS EÓLICO



ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL
Secretaria de Energia, Minas e Comunicações



- 525 kV
- 230 kV
- 138 kV
- 69 kV
- 44 kV
- - - LT Planejada
- SE ELETROSUL
- SE CEEE Rede Básica
- ⊕ SE CEEE Distribuição
- SE AES Sul
- SE RGE Energia
- ▣ Conversoras 50/60Hz
- △ Usinas Hidrelétricas
- Usinas Termelétricas
- Cidades
- Rodovias
- Rios
- * Anemômetros



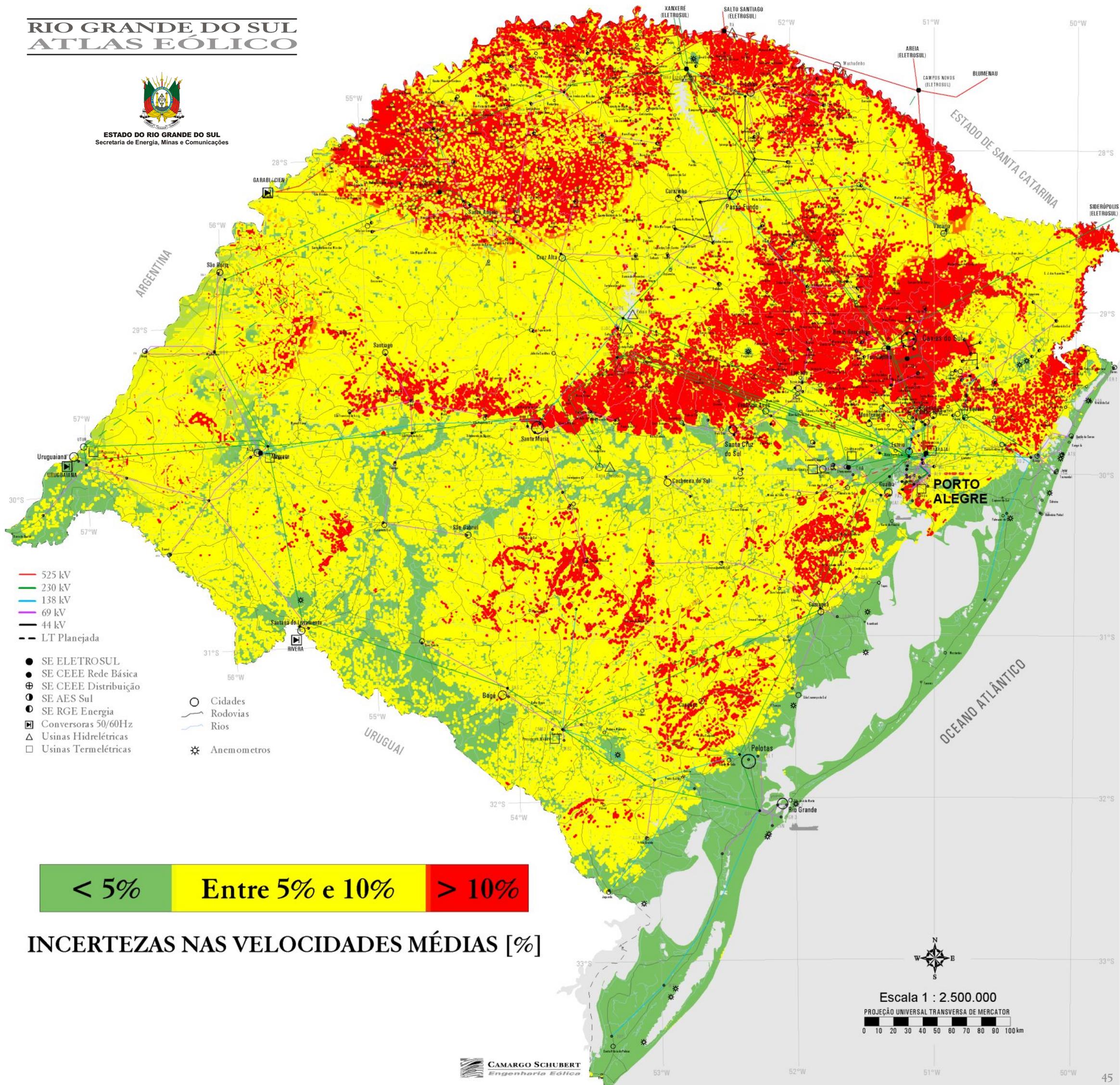
WEIBULL, FATOR DE FORMA k ANUAL



RIO GRANDE DO SUL ATLAS EÓLICO



ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL
Secretaria de Energia, Minas e Comunicações

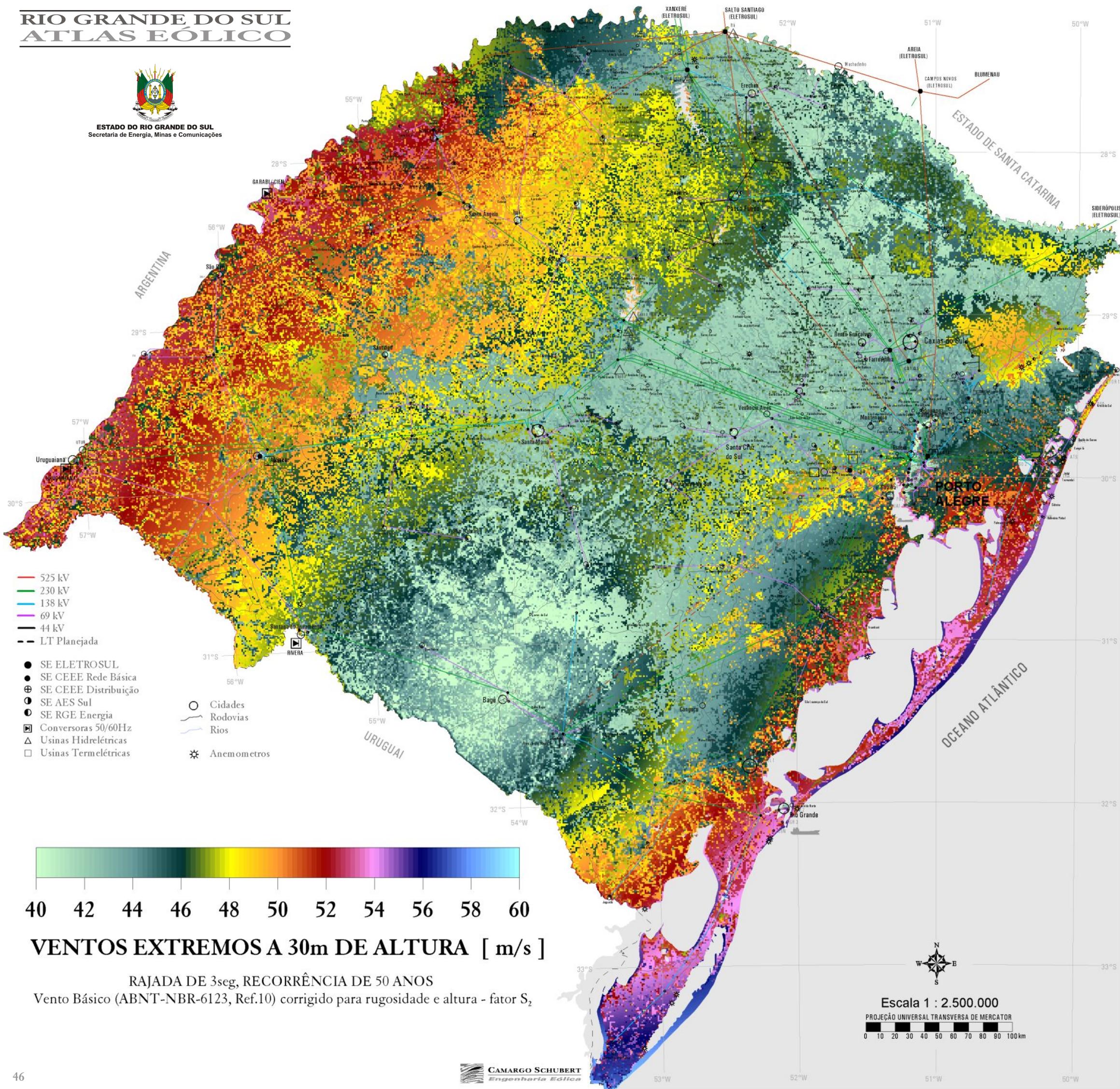


INCERTEZAS NAS VELOCIDADES MÉDIAS [%]

RIO GRANDE DO SUL ATLAS EÓLICO



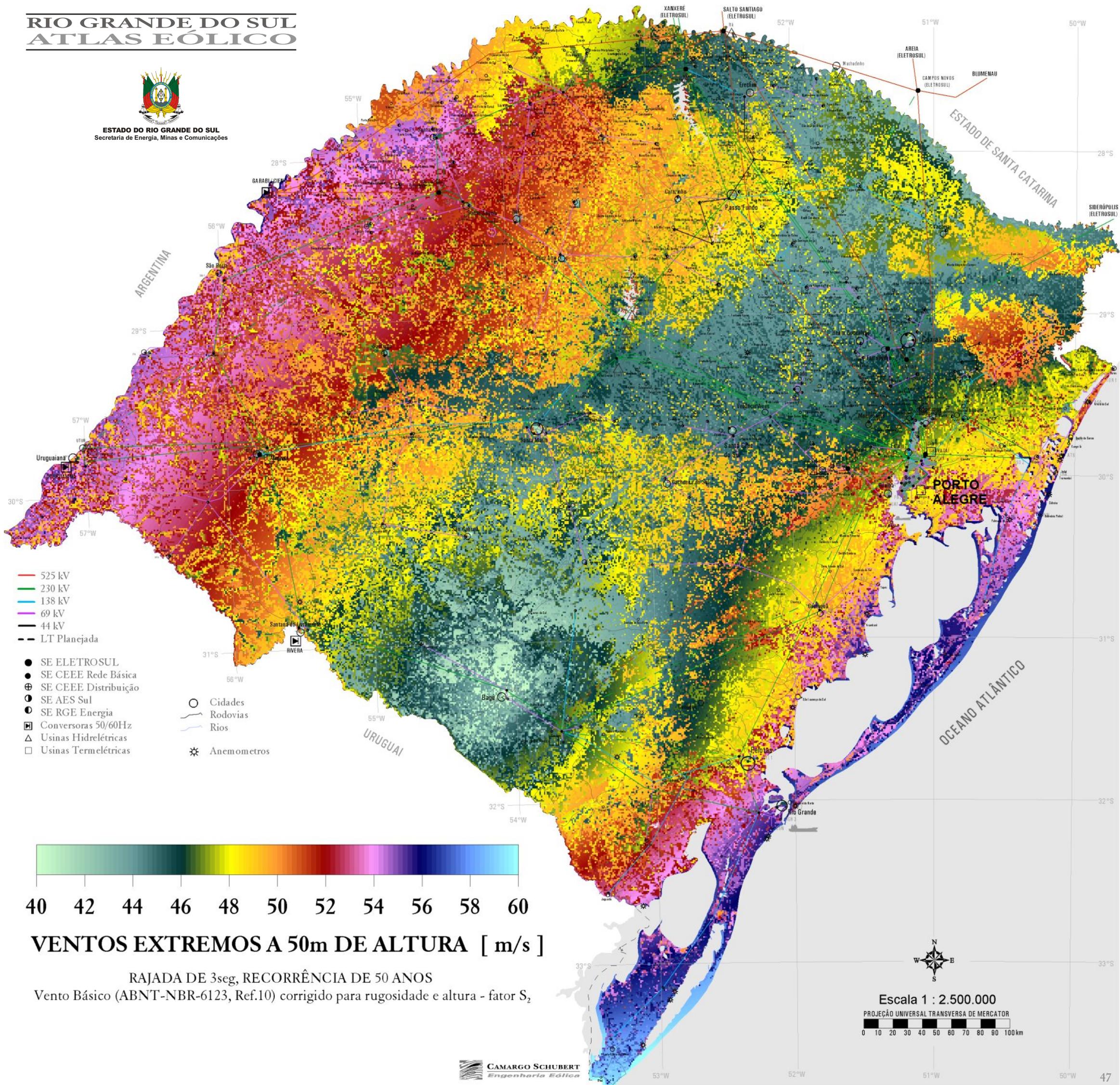
ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL
Secretaria de Energia, Minas e Comunicações



RIO GRANDE DO SUL ATLAS EÓLICO



ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL
Secretaria de Energia, Minas e Comunicações



6. ANÁLISES E DIAGNÓSTICOS

6.1 ÁREAS MAIS FAVORÁVEIS

6.2 O POTENCIAL EÓLICO ESTIMADO

6.3 ASPECTOS ESTRATÉGICOS

6.1 ÁREAS MAIS FAVORÁVEIS

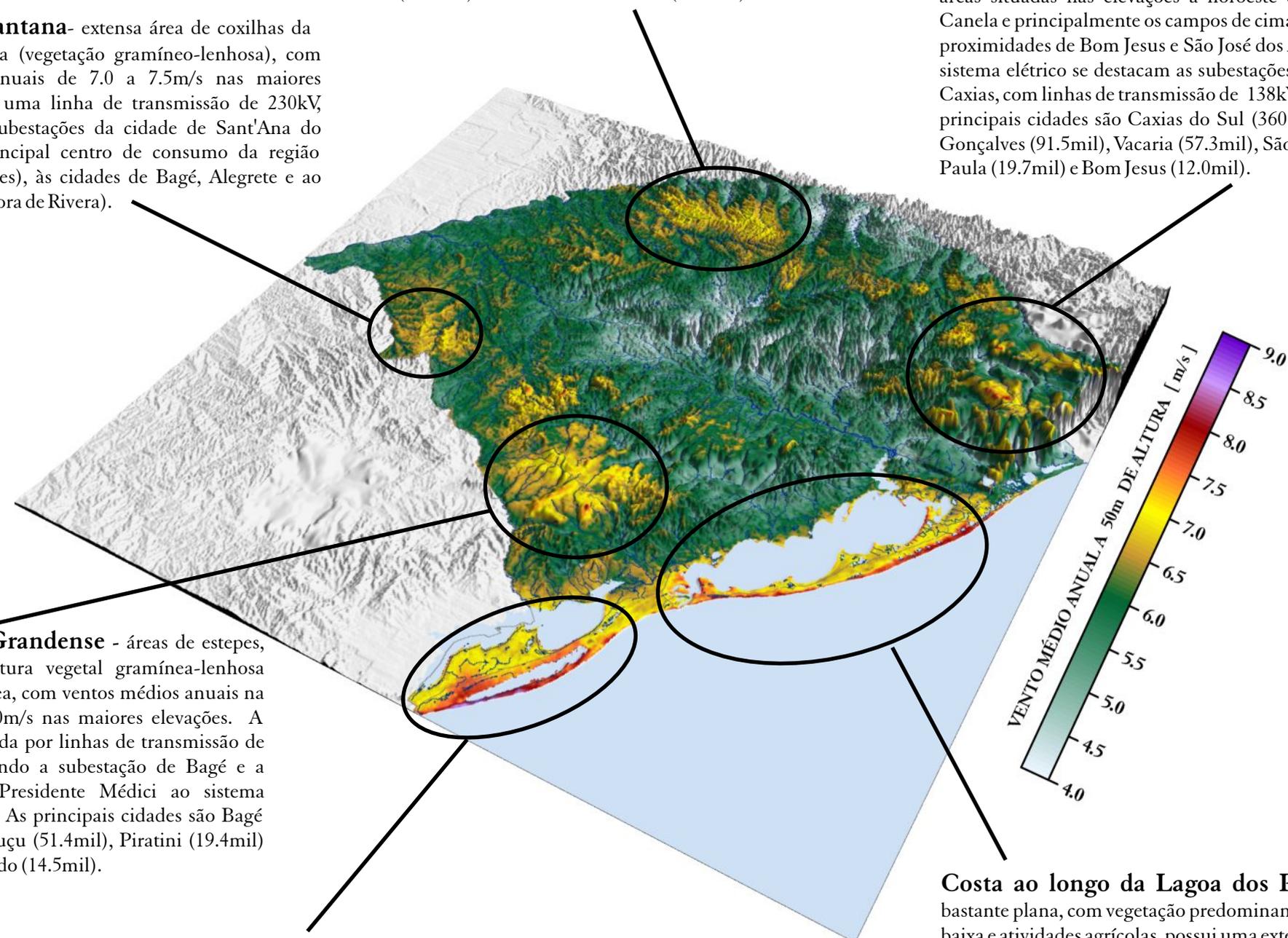
Coxilha de Santana - extensa área de coxilhas da campanha gaúcha (vegetação gramíneo-lenhosa), com ventos médios anuais de 7.0 a 7.5m/s nas maiores elevações. Existe uma linha de transmissão de 230kV, interligando as subestações da cidade de Sant'Ana do Livramento, principal centro de consumo da região (90.8mil habitantes), às cidades de Bagé, Alegrete e ao Uruguai (conversora de Rivera).

Escudo Rio-Grandense - áreas de estepes, alternando cobertura vegetal gramíneo-lenhosa (campos) e arbórea, com ventos médios anuais na faixa de 7.0 a 8.0m/s nas maiores elevações. A região é atravessada por linhas de transmissão de 230kV, interligando a subestação de Bagé e a termelétrica de Presidente Médici ao sistema elétrico estadual. As principais cidades são Bagé (118.8mil), Canguçu (51.4mil), Piratini (19.4mil) e Pinheiro Machado (14.5mil).

Litoral Sul - extensa área da planície costeira, coberta de restinga baixa, dunas e atividades agrícolas de baixa rugosidade, predominando a cultura de arroz e pastagens. Possui grandes extensões com ventos médios anuais entre 7.0 a 8.0m/s, a 50m de altura, reunindo condições promissoras para implantação de usinas eólicas de grande porte. Existe uma larga faixa de areia e dunas ao longo da costa da Lagoa Mangueira, onde as médias anuais excedem 8m/s. Acessa-se a área por estradas existentes entre as Lagoas Mangueira e Mirim. Uma linha de transmissão de 138kV interliga os municípios de Santa Vitória do Palmar a Rio Grande. Entre os potenciais centros de consumo de energia na região destacam-se as cidades de Pelotas (323 mil habitantes), Rio Grande (186.5mil habitantes) e Santa Vitória do Palmar (33.3mil), conforme dados do IBGE-Censo 2000.

Planalto das Missões - áreas que alternam estepes, floresta estacional e atividades agrícolas, com ventos médios anuais próximos a 7.0m/s nas maiores elevações. Na região situam-se as subestações de Santo Ângelo e Santa Rosa, com linhas de transmissão de 230kV e 500kV. Os principais potenciais centros de consumo são as cidades de Ijuí (78.5mil), Santo Ângelo (76.7mil), Santa Rosa (65.0mil) e Palmeira das Missões (38.2mil).

Serra Gaúcha - áreas que alternam a floresta ombrófila mista (floresta de araucária) e campos gramíneo-lenhosos, com ventos médios anuais na faixa de 7.0 a 7.5m/s nas maiores elevações, destacando-se as áreas situadas nas elevações a noroeste da cidade de Canela e principalmente os campos de cima da serra, nas proximidades de Bom Jesus e São José dos Ausentes. No sistema elétrico se destacam as subestações de Vacaria e Caxias, com linhas de transmissão de 138kV e 230kV. As principais cidades são Caxias do Sul (360.4mil), Bento Gonçalves (91.5mil), Vacaria (57.3mil), São Francisco de Paula (19.7mil) e Bom Jesus (12.0mil).



Costa ao longo da Lagoa dos Patos - área bastante plana, com vegetação predominante de restinga baixa e atividades agrícolas, possui uma extensa região de areia e dunas ao longo da costa, com ventos médios anuais de 7.0 a 8.0m/s. Região promissora para implantação de usinas eólicas de grande porte. O acesso pela BR101 possui longo trecho de estrada de terra, de trânsito precário. Existe uma linha de transmissão de 138kV interligando as cidades de Mostardas, Palmares do Sul e Osório. Os principais centros de consumo na região são as cidades de São José do Norte (23.8mil), Mostardas (11.7mil), Palmares do Sul (10.9mil) e, mais ao norte, as cidades de Osório (36.1mil), Tramandaí (31.0mil) e Imbé (12.2mil). Estas últimas são balneários e têm um notável acréscimo populacional e de consumo de energia durante o período de verão (Dezembro-Janeiro-Fevereiro).

6.2 O POTENCIAL EÓLICO ESTIMADO

A partir do cálculo dos regimes de vento médios anuais para todo o território rio-grandense, pode-se estimar o potencial eólico-elétrico efetivamente aproveitável por usinas eólicas no estado-da-arte mundial, através da integração dos mapas de velocidades, utilizando-se ferramentas de geoprocessamento e cálculos de desempenho e produção de energia elétrica para usinas eólicas típicas. Nesse processo, foram assumidas as seguintes considerações:

- Para as 3 alturas de velocidades de vento calculadas, 50m, 75m e 100m, foram consideradas curvas médias de desempenho de turbinas eólicas comerciais nas classes de 500kW, 1500kW e 3000kW, com diâmetros de rotor de 40m, 80m e 100m, e alturas de 50m, 75m e 100m, respectivamente. As curvas de potência utilizadas no cálculo encontram-se na Figura 6.1. Introduziu-se a classe de 3000kW, assumida como tendência de aumento da capacidade e tamanho dos aerogeradores, verificada na indústria eólica mundial. Neste caso, a curva de desempenho foi extrapolada a partir de curvas de potência típicas para turbinas de 1500kW e 2500kW, levando-se em consideração que a potência é proporcional à área varrida pelo rotor. As classes de potência e dimensões consideradas não foram baseadas em nenhuma turbina específica do mercado, e os resultados não apresentam variações significativas para turbinas com dimensões próximas das consideradas. Por exemplo, o potencial não se alterará de forma sensível caso se considerem turbinas de 600kW a 750kW ao invés de 500kW, ou 1200kW-1800kW ao invés de 1500kW.

- A partir de critérios usuais de espaçamento e densidade de aerogeradores em usinas eólicas comerciais, e ainda, da simulação da interferência aerodinâmica causada por aglomerados de aerogeradores, segundo um modelo matemático de esteira aerodinâmica^[19], considerando uma rosa-dos-ventos média representativa das áreas mais promissoras para aproveitamento eólico no Rio Grande do Sul, estimou-se uma taxa de ocupação média de 7.5MW/km², para uma eficiência energética de 97%, em terrenos planos e sem obstáculos. Entretanto, na prática, podem existir restrições técnicas que reduzam, na média, essa taxa de ocupação de terreno: topografia desfavorável, áreas habitadas, difícil acesso, áreas alagáveis ou outras restrições de uso do solo. Assim, considerou-se como suficientemente conservativa a premissa de ocupação média de 20% do realizável em terrenos planos e sem obstáculos, resultando em uma taxa de ocupação média de 1.5 MW/km².

- Para todo o território do Rio Grande do Sul, nos respectivos mapas com resolução de 1km x 1km, foram integradas as áreas com velocidades médias anuais a partir de 6m/s, em faixas de 0.5m/s.

- A integração e o cálculo do potencial de geração foi realizado em separado para os casos de usinas eólicas

implantadas em:

- SOLO FIRME** (*onshore*), onde descartaram-se as áreas abrangidas pelas principais lagoas, represas, açudes, rios e mar;
- SOBRE ÁGUA** (*offshore*), abrangendo apenas as áreas das 3 principais lagoas do Estado: a Lagoa dos Patos, a Lagoa Mirim e a Lagoa Mangueira. Por estarem situadas na extensa planície costeira, tais lagoas são naturalmente rasas mas com grande extensão horizontal, sendo potencialmente adequadas à instalação de usinas eólicas *offshore* no futuro. A Lagoa dos Patos, com 265 km de comprimento e mais de 10 000 km² de superfície, é caracterizada por um fundo relativamente plano, com 6m a 7m de profundidade média e ocorrência de pontais e menores profundidades ao longo de sua margem oeste. A Lagoa Mirim, com cerca de 180 km de extensão e área total de 3 750 Km² (parte da qual em território do Uruguai), tem profundidades da ordem de 1m a 2m na parte norte, aumentando para 4m na parte central, chegando a 5-6m na parte sul. Suas costas e margens são baixas e arenosas, com ocorrência de banhados e juncos. A Lagoa Mangueira, com 123km de comprimento e área aproximada de 800km², é a menor e mais rasa entre as três lagoas consideradas no cálculo do potencial para aproveitamento eólico *offshore* no Rio Grande do Sul.

- Para cada faixa de integração de velocidade de vento, foram considerados os fatores de capacidade correspondentes ao limiar mínimo de velocidade na faixa. Tais fatores de capacidade foram corrigidos para o

efeito da densidade local, a partir do Mapa de Densidade do Ar - apresentado na página 11 - o qual foi elaborado em resolução de 1km x 1km, a partir de dados climatológicos e do modelo de relevo.

- Foram considerados os Fatores de Forma de Weibull (k) locais, conforme apresentado no mapa correspondente no Capítulo 5.

- No cálculo do desempenho foi considerado ainda um fator de disponibilidade de 98%, e uma eficiência de usina (interferência aerodinâmica entre rotores) de 97%.

A Tabela 6.1 apresenta o resultado da integração dos mapas, por faixas de velocidade.

A Tabela 6.2 resume o potencial eólico estimado para o Estado do Rio Grande do Sul.

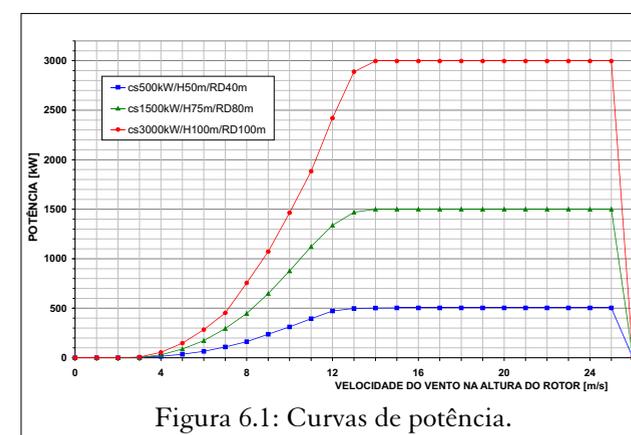


Figura 6.1: Curvas de potência.

POTENCIAL EÓLICO-ELÉTRICO ANUAL - INTEGRAÇÃO POR FAIXAS DE VELOCIDADE

SOLO FIRME (*Onshore*)

	VENTO [m/s]	ÁREA [km ²]	POTÊNCIA INSTALÁVEL [GW]	FATOR DE CAPACIDADE	ENERGIA ANUAL [TWh/ano]
50m	6.0-6.5	74 157	111.24	0.20	192.51
	6.5-7.0	29 045	43.57	0.25	92.03
	7.0-7.5	8 191	12.29	0.29	30.99
	7.5-8.0	1 993	2.99	0.34	8.82
	8.0-8.5	363	0.54	0.39	1.82
	> 8.5	11	0.02	0.43	0.06
75m	6.0-6.5	86 035	129.05	0.19	206.18
	6.5-7.0	73 197	109.80	0.23	215.12
	7.0-7.5	28 211	42.32	0.27	98.83
	7.5-8.0	6 744	10.12	0.32	27.70
	8.0-8.5	1 246	1.87	0.37	5.88
	> 8.5	83	0.12	0.41	0.44
100m	6.0-6.5	57 776	86.66	0.16	116.87
	6.5-7.0	96 247	144.37	0.20	243.56
	7.0-7.5	55 102	82.65	0.24	167.19
	7.5-8.0	18 397	27.60	0.28	66.00
	8.0-8.5	3 068	4.60	0.33	12.85
	8.5-9.0	228	0.34	0.37	1.07
> 9.0	2	0.003	0.41	0.01	

SOBRE ÁGUA (*Offshore*)

	ÁREA [km ²]	POTÊNCIA INSTALÁVEL [GW]	FATOR DE CAPACIDADE	ENERGIA ANUAL [TWh/ano]
50m	121	0.18	0.21	0.32
	760	1.14	0.25	2.48
	6 144	9.22	0.30	23.72
	5 363	8.04	0.35	23.90
	827	1.24	0.39	4.16
	12	0.02	0.43	0.07
75m	72	0.11	0.19	0.18
	204	0.31	0.23	0.62
	3 074	4.61	0.28	11.09
	6 653	9.98	0.33	27.87
	3 209	4.81	0.37	15.27
	70	0.11	0.41	0.37
100m	43	0.06	0.16	0.09
	105	0.16	0.20	0.27
	1 075	1.61	0.24	3.36
	7 206	10.81	0.29	26.54
	4 636	6.95	0.33	19.66
	242	0.36	0.37	1.16

Tabela 6.1: Resultado da integração do potencial eólico por faixas de velocidade.

POTENCIAL EÓLIO-ELÉTRICO ESTIMADO

SOLO FIRME (*Onshore*)

	VENTO [m/s]	ÁREA [km ²]	POTÊNCIA INSTALÁVEL [GW]	ENERGIA ANUAL [TWh/ano]
50m	> 6.0	113 760	170.64	326.23
	> 6.5	39 603	59.40	133.72
	> 7.0	10 558	15.84	41.69
	> 7.5	2 367	3.55	10.70
	> 8.0	374	0.56	1.88
	> 8.5	11	0.02	0.06
75m	> 6.0	195 516	293.27	554.16
	> 6.5	109 481	164.22	347.98
	> 7.0	36 284	54.43	132.86
	> 7.5	8 073	12.11	34.02
	> 8.0	1 329	1.99	6.32
	> 8.5	83	0.12	0.44
100m	> 6.0	230 820	346.23	607.55
	> 6.5	173 044	259.56	490.68
	> 7.0	76 797	115.19	247.11
	> 7.5	21 695	32.54	79.93
	> 8.0	3 298	4.94	13.93
	> 8.5	230	0.34	1.08

SOBRE ÁGUA* (*Offshore*)

* apenas sobre as Lagoas dos Patos, Mirim e da Mangueira.

	ÁREA [km ²]	POTÊNCIA INSTALÁVEL [GW]	ENERGIA ANUAL [TWh/ano]
50m	13 227	19.84	54.64
	13 106	19.66	54.32
	12 346	18.52	51.84
	6 202	9.30	28.12
	839	1.26	4.22
	12	0.02	0.07
75m	13 282	19.92	55.40
	13 210	19.82	55.22
	13 006	19.51	54.61
	9 932	14.90	43.52
	3 279	4.92	15.64
	70	0.11	0.37
100m	13 307	19.96	51.08
	13 264	19.90	50.99
	13 159	19.74	50.72
	12 084	18.13	47.36
	4 878	7.32	20.82
	242	0.36	1.16

Tabela 6.2: Resultado da integração cumulativa do potencial eólico.

Os limiares de atratividade para investimentos em geração eólica dependem dos contextos econômicos e institucionais de cada país, variando, em termos de velocidades médias anuais, entre 5.5m/s e 7.0m/s. Tecnicamente, médias anuais a partir de 6.0m/s já constituem condições favoráveis para a operação de usinas eólicas. Na análise a seguir será assumido como referência um limiar de 7.0 m/s.

Os resultados da integração cumulativa indicam uma grande magnitude para o potencial estimado de aproveitamento eólio-elétrico em terra (*onshore*) no Rio Grande do Sul, da ordem de 15.8GW, 54.4GW e 115.2GW, para áreas com ventos iguais ou superiores a 7.0m/s, nas alturas de 50m, 75m e 100m, respectivamente.

É também notável a magnitude do potencial eólico sobre água (*offshore*), consideradas apenas as três principais lagoas, resultante da integração das velocidades médias anuais calculadas sobre as Lagoas dos Patos, Mirim e Mangueira, estimado em 18.52GW, 19.51GW e 19.74GW, para ventos iguais ou superiores a 7.0m/s, nas alturas de 50m, 75m e 100m, respectivamente. Possuindo rugosidade baixíssima, nessas áreas a camada-limite atmosférica recupera parte da energia cinética perdida ao passar pelos terrenos da costa atlântica, registrando as maiores velocidades médias em território rio-grandense. Observa-se também que, devido à baixa rugosidade sobre a água, os potenciais eólicos nas 3 alturas diferem pouco, uma vez que a variação do perfil vertical de velocidade do vento na atmosfera é função da rugosidade do terreno, além da estabilidade térmica vertical.

O potencial eólico estimado para o Rio Grande do Sul é bastante elevado. Como referência comparativa aos valores resultantes da integração, o sistema elétrico brasileiro possuía uma capacidade total instalada de 77.0GW, até o final de 2001^[22], e o total de recursos hidráulicos no Brasil (inventariado mais estimado) é de 143.4GW^[20]. O Estado ocupa uma área de apenas 3.32% do território brasileiro e possui um potencial de geração eólica, a 50m de altura sobre solo firme e para velocidades a partir de 7.0m/s, equivalente a 15% do potencial eólico estimado para o Brasil^[27], se comparados sob os mesmos critérios. O consumo total de eletricidade do Estado foi de 19.31TWh no ano de 1999^[20], ou seja, 46.3% da geração eólica anual estimada (41.7TWh/ano).

6.3 ASPECTOS ESTRATÉGICOS

A energia eólica é a fonte energética que apresentou as maiores taxas de expansão no mundo nos últimos anos, gerando - além de energia para a produção e o desenvolvimento - externalidades importantes, tais como a criação de empregos em todo o ciclo de fabricação, instalação e operação/manutenção, o desenvolvimento econômico e a melhoria da qualidade de vida, a descentralização da geração e os benefícios ao meio ambiente global, pela substituição da energia termelétrica. Em 2001, foram acrescentados 6.77GW à capacidade eólica instalada mundial, resultando numa taxa de crescimento

anual de 38% e atingindo um total de 24.50GW^[21].

A modularidade, a inesgotabilidade, a rapidez de instalação, a descentralização da geração, os custos de instalação cada vez menores, a não agressão ao meio ambiente e a co-utilização das terras ocupadas pelas usinas eólicas com outras atividades como a pecuária e a agricultura, qualificam a energia do vento como a fonte energética do futuro.

O vento é um recurso natural e abundante no Estado do Rio Grande do Sul. O potencial de geração poderá ser aproveitado gradualmente, nos limites técnicos de inserção da capacidade eólica no sistema elétrico regional, alavancando o crescimento econômico e a auto-sustentabilidade energética do Estado.

O aproveitamento dos recursos eólicos nas melhores áreas identificadas, como o litoral centro-sul do Estado, proporcionaria um reforço à rede elétrica, justamente nas pontas do sistema elétrico estadual.

Os ventos sobre o Estado do Rio Grande do Sul são suficientes para ajudar a suprir a demanda energética para o bem-estar e o desenvolvimento econômico de muitas gerações.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AWS Scientific, Inc., "Wind Resource Assessment Handbook". National Renewable Energy Laboratory. WindPower '96 Training Seminar Edition, Denver, CO, June 23th, 1996.
- [2] do Amarante, O. A. C., da Silva, F. J. L., "Atlas do Potencial Eólico do Estado da Bahia". Camargo Schubert Engenharia Eólica, COELBA/Iberdrola Empreendimentos do Brasil. Outubro 2001.
- [3] Rohatgi, J. S., Nelson, V., "Wind Characteristics - An Analysis for the Generation of Wind Power". Alternative Energy Institute - West Texas A&M University, 1994.
- [4] Markus, M., Bailey, B., "Survey of Wind Flow Models". National Renewable Energy Laboratory, TAT-5-15208-01, October 1996.
- [5] Barnard, J. C., An Evaluation of Three Models Designed for Siting Wind Turbines in Areas of Complex Terrain. Solar Energy, Vol. 46 No.5 pp 283-294, 1991.
- [6] Obermeier, J. L., Blittersdorf, D., "Quality Precision and Accuracy of the Maximum #40 Anemometer", presented at the American Wind Energy Association National Conference "WindPower 96" in Denver, Colorado, 23-27 June 1996. Published at AWEA conference proceedings.
- [7] Legates, D.R., Willmott, C.J. 1992. "Monthly Average Surface Air Temperature and Precipitation". Digital Raster Data on a 30 minute Cartesian Orthonormal Geodetic (lat/long) 360x720grid. In: Global Ecosystems Database Version 2.0. Boulder, CO: NOAA National Geophysical Data Center. Forty-eight independent and four derived single attribute spatial layers. 47,846,439 bytes in 194 files. [first published in 1989].
- [8] do Amarante, O.A.C., Rocha, N.A., Schultz, D., Bittencourt, R. e Sugai, M. "Estabilização Sazonal da Oferta de Energia Através da Complementaridade Entre os Regimes Hidrológico e Eólico". XV SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Grupo de Planejamento de Sistemas Elétricos. Foz do Iguaçu, PR - 17-22 Out.1999.
- [9] Troen, I., Mortensen, N. G., Petersen, E. L., "Wind Atlas Analysis and Application Program". Risoe National Laboratory. Denmark.
- [10] NB-599/1978 e NBR-6123/1988 "Forças Devidas ao Vento em Edificações - Procedimento". Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro.
- [11] Simiu, E., Scanlan R. H., "Wind Effects on Structures". John Wiley & Sons, Inc. 1978.
- [12] Mayne, J. R., "The Estimation of Extreme Winds". Journal of Industrial Aerodynamics, Volume 5 (1979) 109-137. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam. 1979.
- [13] Abild, J., "Application of the Wind Atlas Method to Extremes of Wind Climatology". Report Riso-R-722(EN). Riso National Laboratory. Roskilde, Denmark. January 1994.
- [14] Frank, H. P., "Extreme Winds over Denmark from the NCEP/NCAR Reanalysis". Report Riso-R-1238(EN). Riso National Laboratory. Roskilde, Denmark. May 2001.
- [15] Kristensen, L., Rathmann, O., "Extreme Winds on Denmark". Report Riso-R-1068(EN). Riso National Laboratory. Roskilde, Denmark. February 1999.
- [16] Petersen, E. L., Mortensen, N. G., Landberg, L., Højstrup, J., Frank H. P., "Wind Power Meteorology Part I: Climate and Turbulence". Riso National Laboratory. Roskilde, Denmark. Published at Wind Energy Magazine, Volume 1, Number 1, September 1998.
- [17] Phillips, G.T. - "A Preliminary User's Guide for the NOABL Objective Analysis Code". DOE/ET/20280-T1, U.S. Department of Energy, July 1979.
- [18] Jensen, N.O., "A Note on Wind Generator Interaction". Riso National Laboratory, Report Riso-M-2411, Roskilde, Denmark, 1984.
- [19] "Energia Eólica", DEWI, Deutsches Windenergie-Institut, Wilhelmshaven, 1998.
- [20] "BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2000" - Ano Base 1999. DNDE Secretaria de Energia, Ministério de Minas e Energia. Brasília, 2000.
- [21] "Wind Market Status", WindPower Monthly News Magazine, Vol. 18, No.3, pp 33-65, March 2002.
- [22] ANEEL/ONS e SEMC
- [23] Molly, J. P., "Technical Trends in Wind Turbine Development", DEWI Magazin, No. 20, pp 52-59, February 2002.
- [24] Toldo Jr, E.E.; Almeida, L.E.S.; Barros, C. and Martins, L.R., 1999. Retreat of the Rio Grande do Sul Coastal Zone, Brazil. In: Martins, L.R. and Santana, C.I. (eds.). Non Living Resources of the Southern Brazilian Coastal Zone and Continental Margin. Porto Alegre, Brazil: Editora da UFRGS, pp.62-68.
- [25] SEMC/ELETROSUL/CIEN/CEEE/AES Sul/RGE.
- [26] BALANÇO ENERGÉTICO CONSOLIDADO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL 1999/2000. Secretaria de Energia, Minas e Comunicações, Governo do Estado do Rio Grande do Sul, 2002.
- [27] do Amarante, O.C., Brower, M., Zack, J.- ATLAS DO POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO. MME/ELETROBRÁS/CEPEL, 2001.

APÊNDICES

I. TORRES ANEMOMÉTRICAS

II. DISTRIBUIÇÕES DE VENTOS EXTREMOS

III. FÓRMULAS E MAPAS ÚTEIS

IV. SUBESTAÇÕES: COORDENADAS E TENSÕES

I. TORRES ANEMOMÉTRICAS

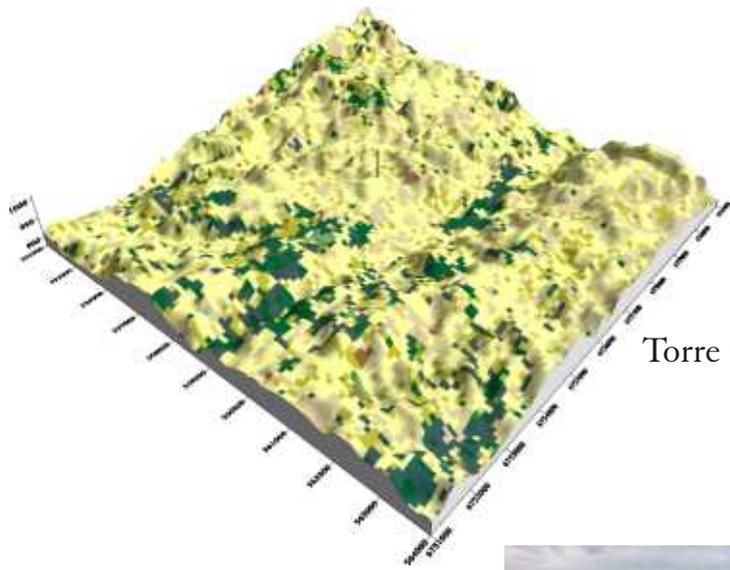
O mapa abaixo mostra a localização das torres anemométricas cujos dados fundamentaram o mapeamento eólico deste Atlas.

Nas páginas seguintes são apresentadas as fotografias

panorâmicas e os modelos de relevo e rugosidade em alta resolução (100m x 100m), cobrindo uma área de 10km x 10km no entorno do local de instalação de cada torre anemométrica. Os modelos de rugosidade estão sobrepostos ao relevo em perspectiva, com escala vertical ampliada em 10 vezes para visualização. Estes modelos digitais foram utilizados no processo de filtragem dos efeitos

de subescala, conforme descrito no Capítulo 4, bem como na validação dos modelos de relevo e rugosidade do Estado. Os modelos de rugosidade foram desenvolvidos a partir da interpretação do mosaico de imagens do satélite LANDSAT 5, do Mapa de Vegetação do Brasil (IBGE, USGS) e de amostragens realizadas em campo. Os modelos de relevo foram desenvolvidos a partir de Cartas IBGE 1:50 000.





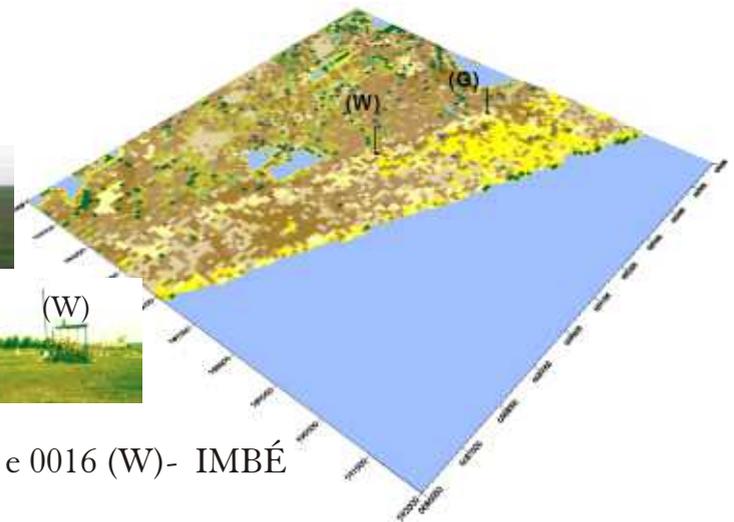
Torre 0001 - TAINHAS



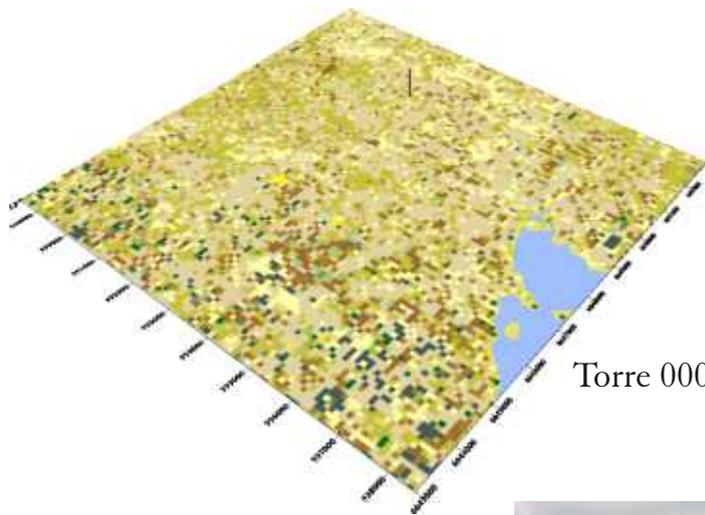
(G)



(W)



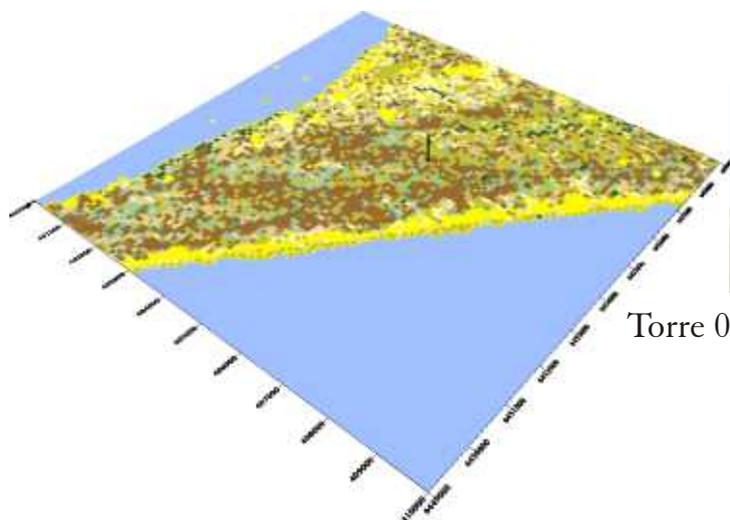
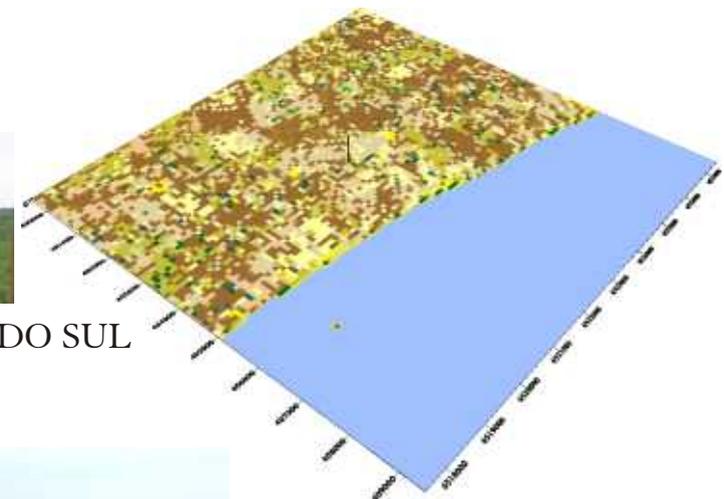
Torres 0002 (G) e 0016 (W)- IMBÉ



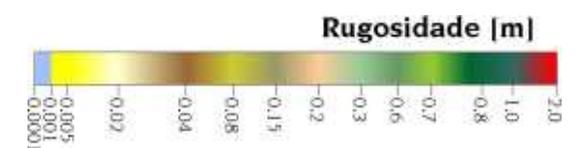
Torre 0003 - PALMARES



Torre 0004 - SÃO LOURENÇO DO SUL

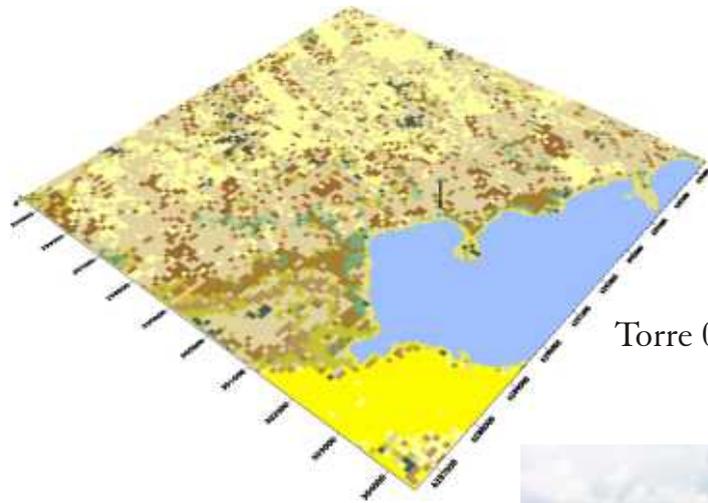
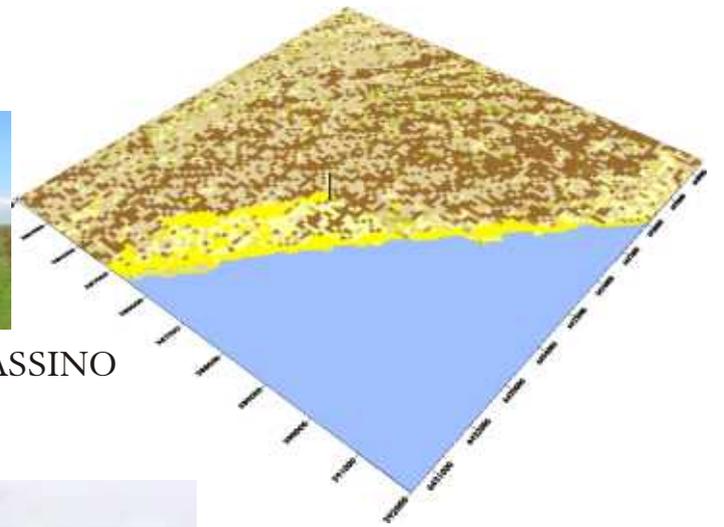


Torre 0005 - SÃO JOSÉ DO NORTE





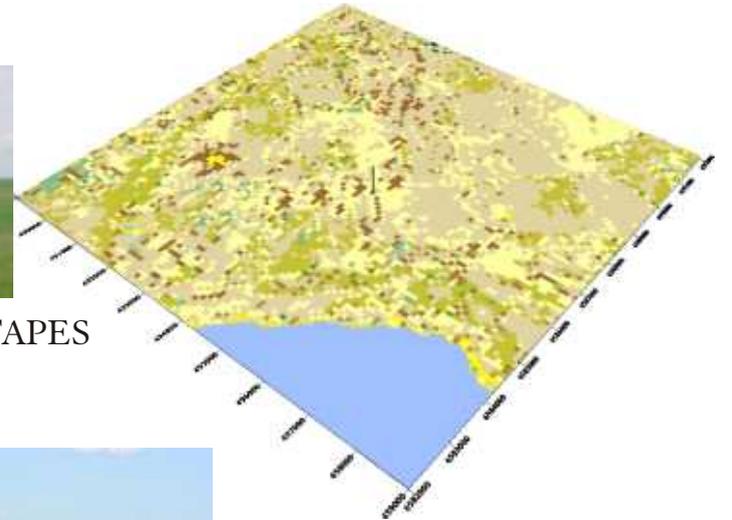
Torre 0006 - CASSINO



Torre 0007 - SANTA VITÓRIA DO PALMAR



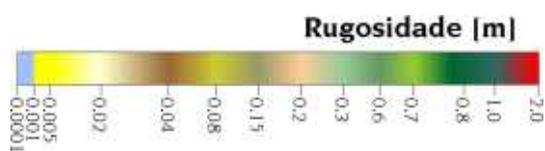
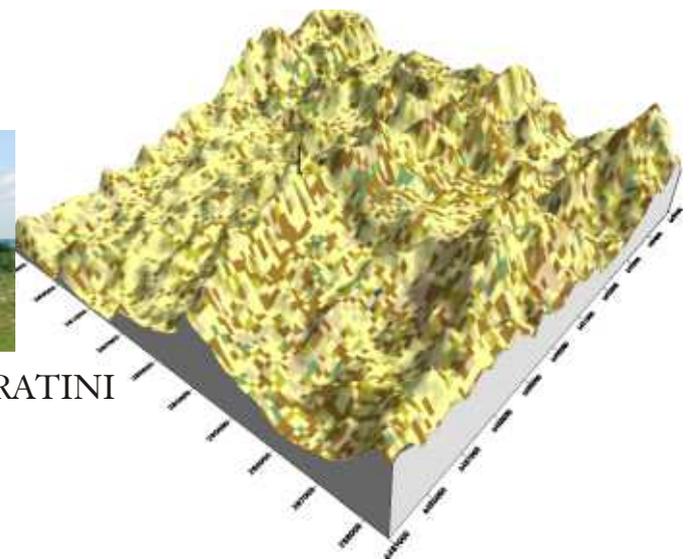
Torre 0008 - TAPES

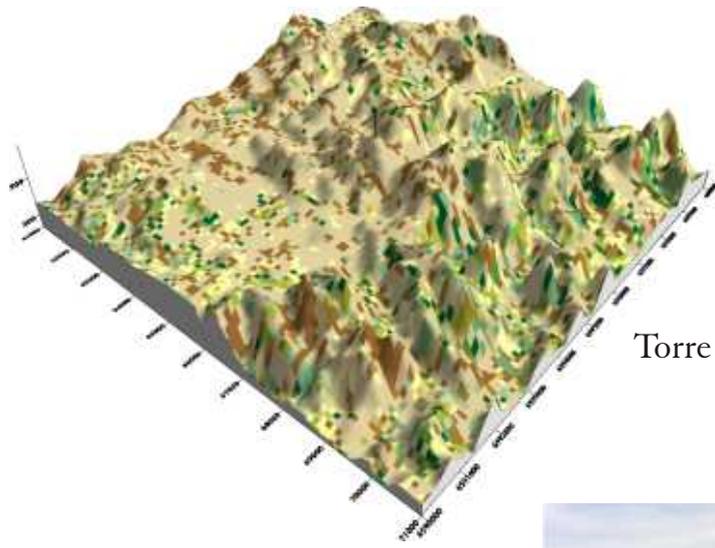


Torre 0009 - JAGUARÃO

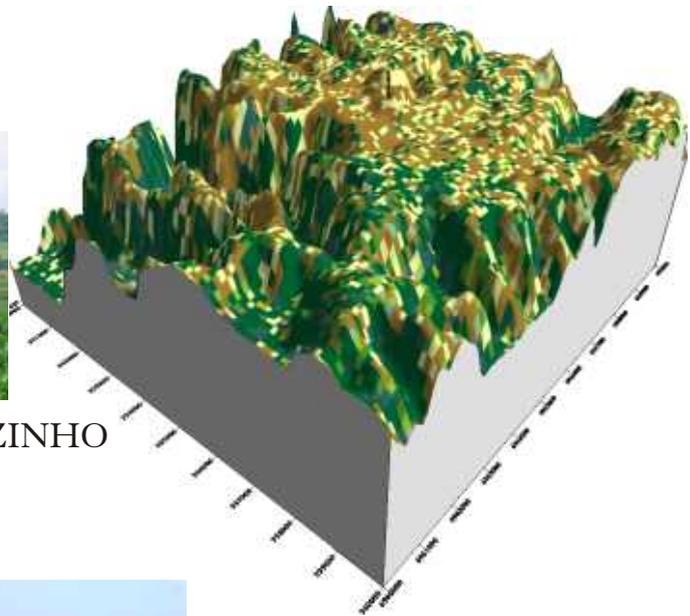


Torre 0010 - PIRATINI

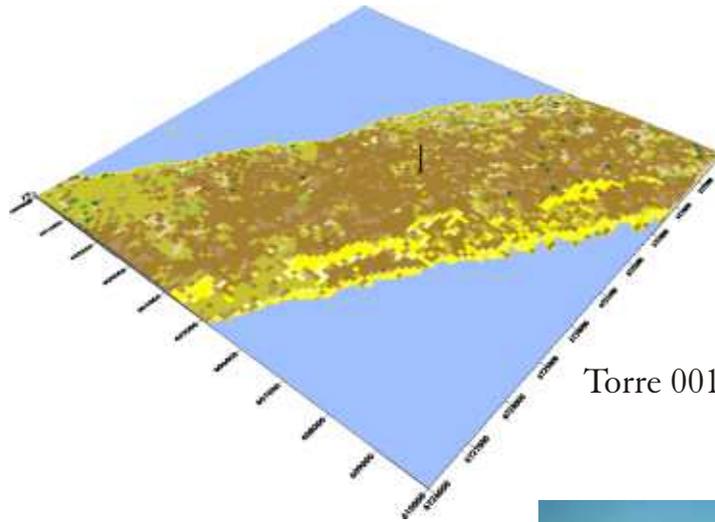




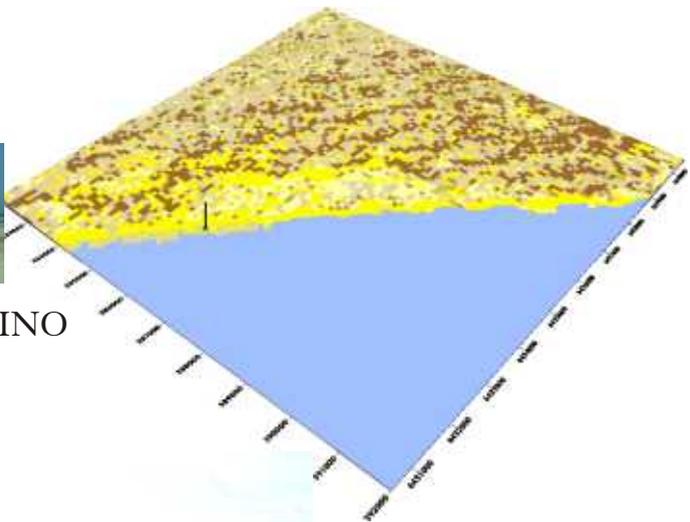
Torre 0011 - SANT'ANA DO LIVRAMENTO



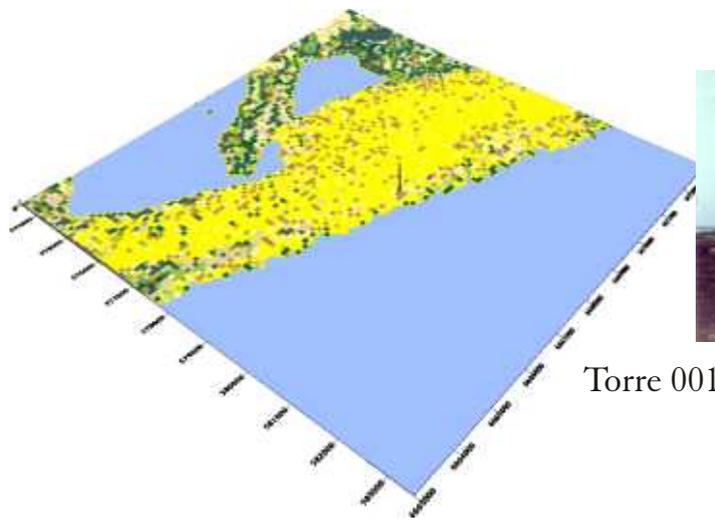
Torre 0012 - FAXINALZINHO



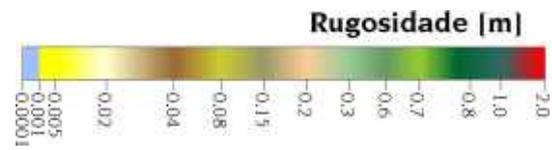
Torre 0013 - ARROIO DO SAL

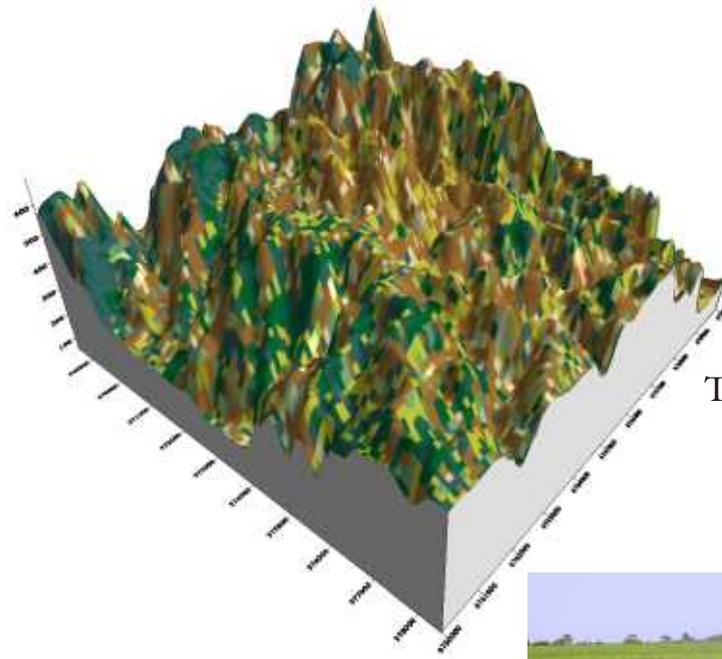


Torre 0014 - CASSINO



Torre 0015 - CIDREIRA

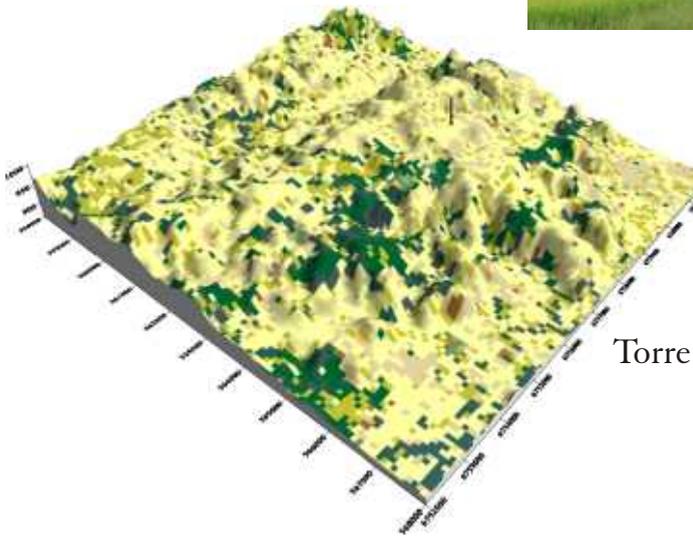
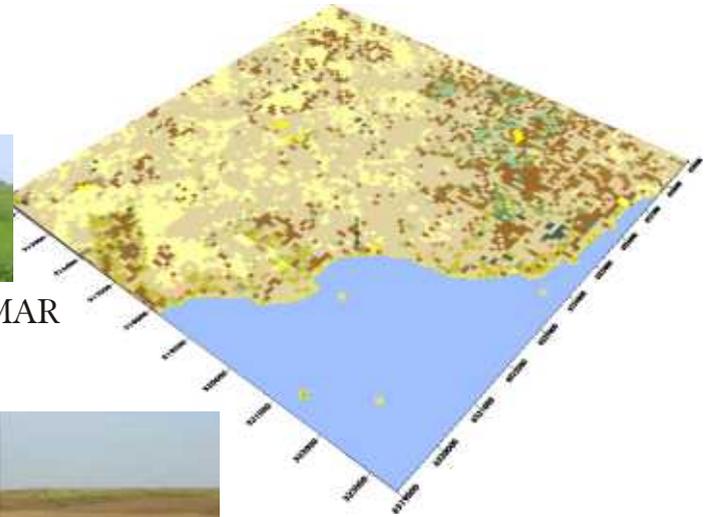




Torre 0017 - PROGRESSO



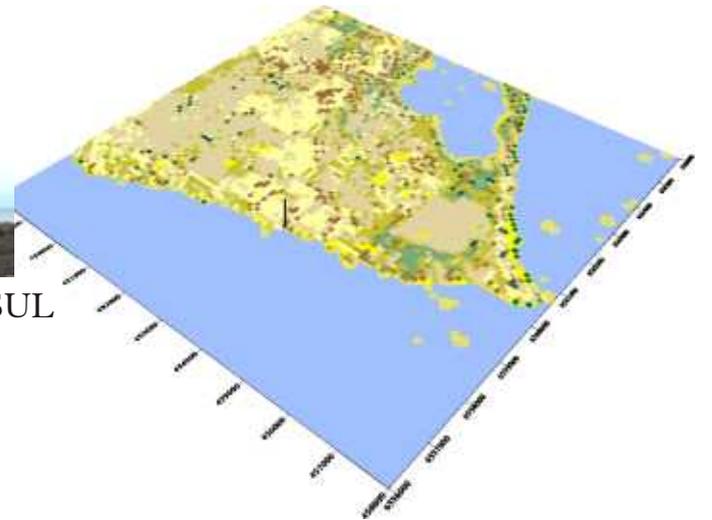
Torre 0018 - SANTA VITÓRIA DO PALMAR



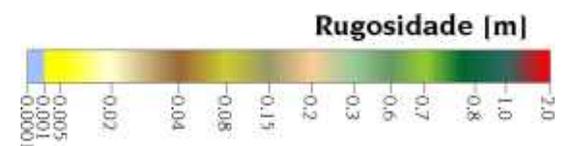
Torre 0019 - TAINHAS



Torre 0020 - SANTA RITA DO SUL



Torre 0021 - SANTA VITÓRIA DO PALMAR



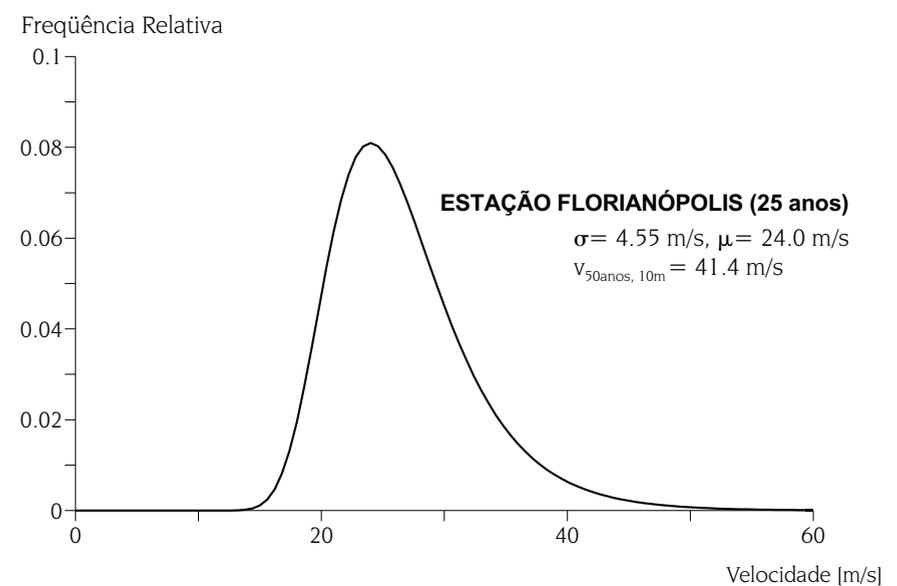
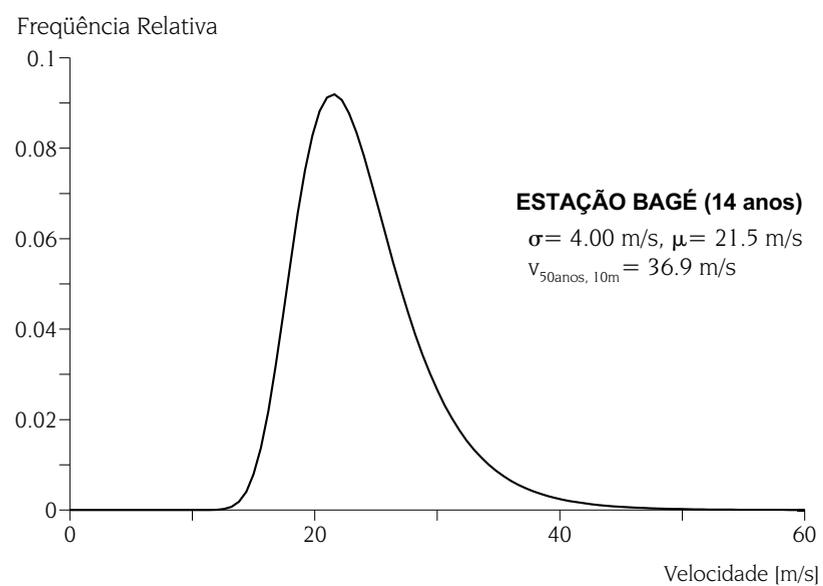
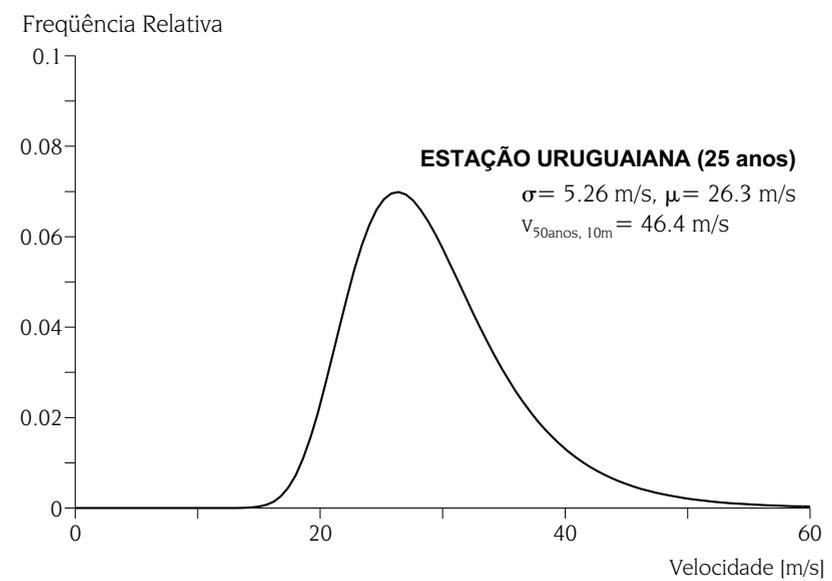
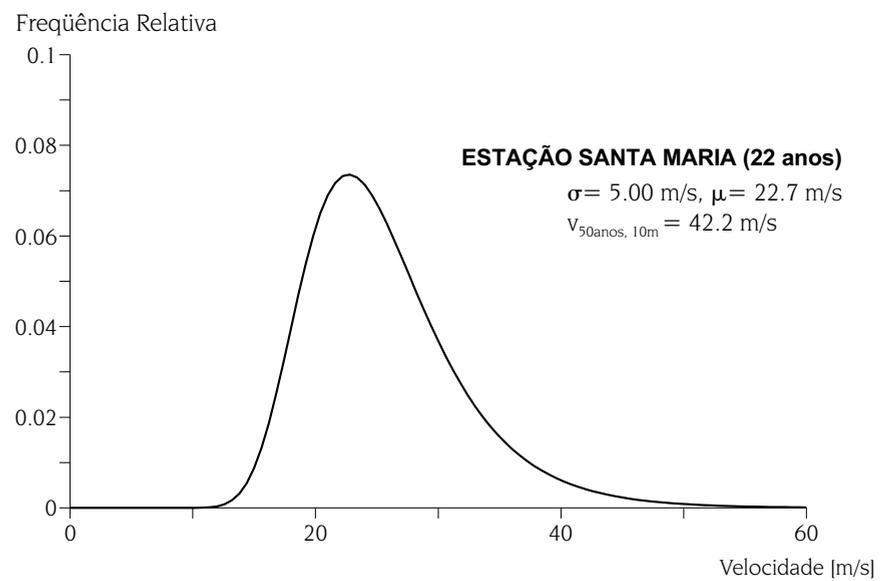
II. DISTRIBUIÇÕES DE VENTOS EXTREMOS

A seguir, são apresentadas as distribuições de probabilidade utilizadas no desenvolvimento dos mapas de ventos extremos para o Rio Grande do Sul, conforme descrito no Capítulo 4.

Função Densidade de Probabilidade para Ventos Extremos Tipo I (*Gumbel*)

$$p(v) = \frac{1}{\sigma} \exp\left(-\frac{v-\mu}{\sigma}\right) \exp\left[-\exp\left(-\frac{v-\mu}{\sigma}\right)\right]$$

Estação utilizada (Fonte: Norma Brasileira NB-599/78 e NBR-6123/88), número de anos da série de velocidades máximas anuais, parâmetros da distribuição e velocidade básica do vento, definida como a máxima velocidade média medida sobre 3s, que pode ser excedida, em média, uma vez em 50anos, a 10m sobre o nível do terreno em lugar aberto e plano.



III. FÓRMULAS E MAPAS ÚTEIS

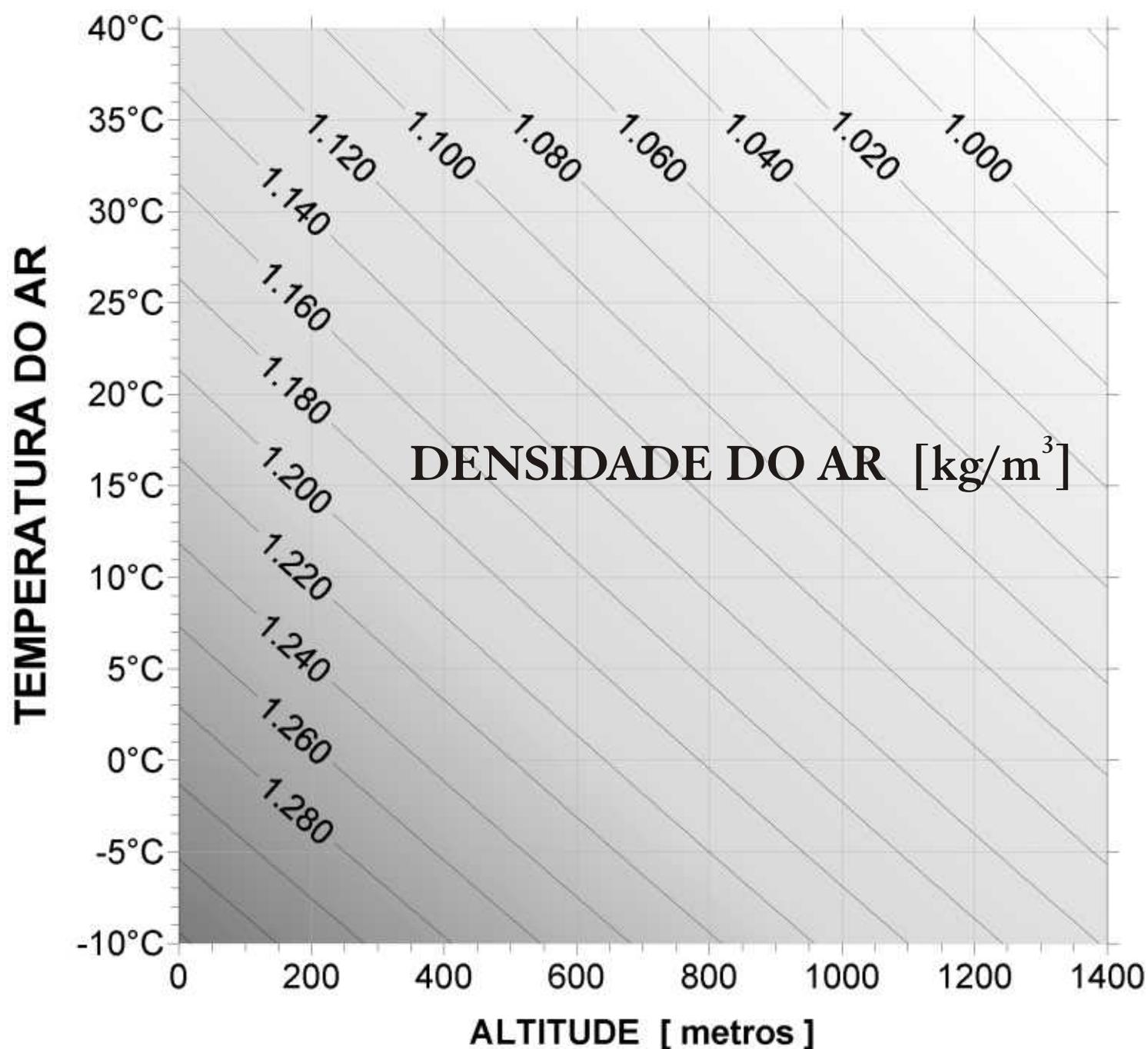
Densidade do Ar

A potência gerada por uma turbina eólica é função direta da densidade do ar que impulsiona o rotor. As curvas de potências fornecidas pelos fabricantes são usualmente dadas para condições padrão da atmosfera (15°C, nível do mar, densidade do ar 1.225 kg/m³). Portanto, o desempenho das máquinas nas diversas condições de operação, deve ser corrigido para o efeito da variação da densidade com a altitude e a temperatura locais. No Capítulo 2 foram apresentados mapas sazonais e anual da densidade para todo o Estado do Rio Grande do Sul, calculados a partir de dados climatológicos da Ref.7, corrigidos para altitude a partir do modelo de relevo na resolução de 1km x 1km.

Uma expressão útil para a estimativa da densidade do ar (ρ , em kg/m³), a partir de temperatura do ar (T , em °C) e altitude (Z , em metros) é dada por:

$$\rho = \frac{353.4}{(273.15 + T)} \left(1 - \frac{z}{45271} \right)^{5.2624}$$

O gráfico abaixo apresenta a variação da densidade de ar seco com a altitude e temperatura, conforme aplicação da fórmula acima.



III. FÓRMULAS E MAPAS ÚTEIS

Lei Logarítmica e Rugosidade

Em condições neutras de estratificação térmica vertical da atmosfera, o perfil de velocidade vertical do vento na camada-limite pode ser aproximado pela *Lei Logarítmica* segundo a relação

$$u(h) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{h}{z_o}$$

onde $u(h)$ é a velocidade do vento na altura h , z_o é a rugosidade do terreno, $\kappa = 0.4$ é a constante de von Kármán e u_* é a velocidade de fricção.

A partir da *Lei Logarítmica* é possível relacionar as velocidades do vento em duas alturas (h_1 e h_2) pela expressão

$$u(h_2) = u(h_1) \frac{\ln \frac{z_o}{h_2}}{\ln \frac{z_o}{h_1}}$$

De onde pode-se explicitar a rugosidade em função das velocidades de vento em duas alturas, resultando em

$$z_o = \exp \frac{u(h_2) \ln(h_1) - u(h_1) \ln(h_2)}{u(h_2) - u(h_1)}$$

Expoente de Camada-Limite

A velocidade vertical do vento na camada-limite também pode ser expressa em termos da *Lei de Potência* segundo a relação

$$u(h_2) = u(h_1) \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{\alpha}$$

onde $u(h)$ é a velocidade do vento na altura h e α é chamado de *expoente de camada-limite*.

Dessa relação, pode-se explicitar o *expoente de camada-limite* em função das velocidades de vento em duas alturas, resultando em

$$\alpha = \frac{\ln \frac{u(h_2)}{u(h_1)}}{\ln \frac{h_2}{h_1}}$$

Distribuição de Weibull

A *distribuição estatística de Weibull* caracteriza-se por dois parâmetros: um de escala (C) (m/s) e outro de forma

(k). A frequência de ocorrência de uma velocidade u , $f(u)$, é representada matematicamente por

$$f(u) = \frac{k}{C} \left(\frac{u}{C} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{u}{C} \right)^k}$$

A função densidade de probabilidade cumulativa, $F(u)$, associada à probabilidade da velocidade do vento ser maior que u , expressa-se por

$$F(u) = \int_u^{\infty} f(u) du$$

resultando em

$$F(u) = e^{-\left(\frac{u}{C} \right)^k}$$

Distribuição de Rayleigh

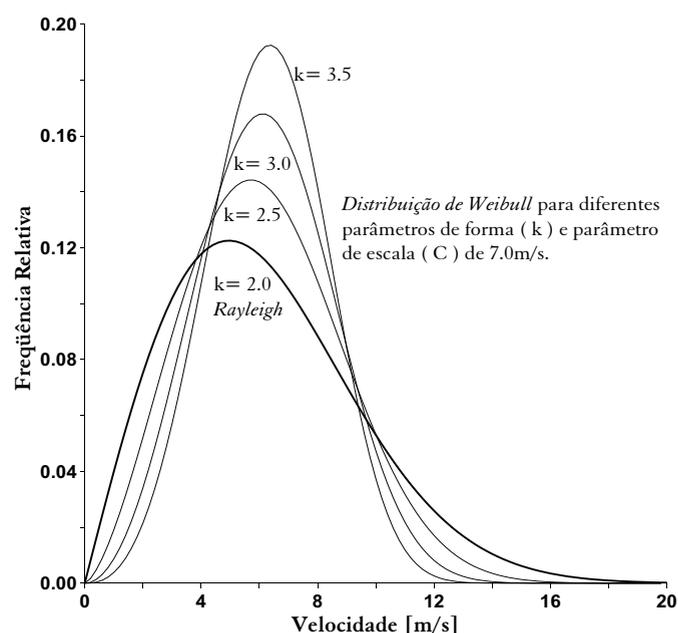
A *distribuição estatística de Rayleigh* representa um caso particular da distribuição de *Weibull* para um fator de forma igual a dois ($k=2$), caracterizando-se apenas por um parâmetro de escala (C) (m/s). Assim, a frequência de ocorrência de uma velocidade u , $f(u)$, é representada matematicamente por

$$f(u) = \frac{2}{C} \left(\frac{u}{C} \right) e^{-\left(\frac{u}{C} \right)^2}$$

A função densidade de probabilidade cumulativa, $F(u)$, associada à probabilidade da velocidade do vento ser maior que u , expressa-se por

$$F(u) = e^{-\left(\frac{u}{C} \right)^2}$$

A figura a seguir, ilustra a *Distribuição de Weibull* para diferentes valores do fator de forma (k).



Fluxo de Potência Eólica

O *Fluxo ou Densidade de Potência Eólica* é definido como a potência por unidade de área perpendicular ao escoamento, definido como

$$\bar{E} = \frac{1}{2} \rho \bar{u}^3 \quad (\text{W/m}^2)$$

onde u é a velocidade do vento. Expressando-se em termos da distribuição de Weibull, tem-se que

$$\bar{E} = \frac{1}{2} \rho C^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)$$

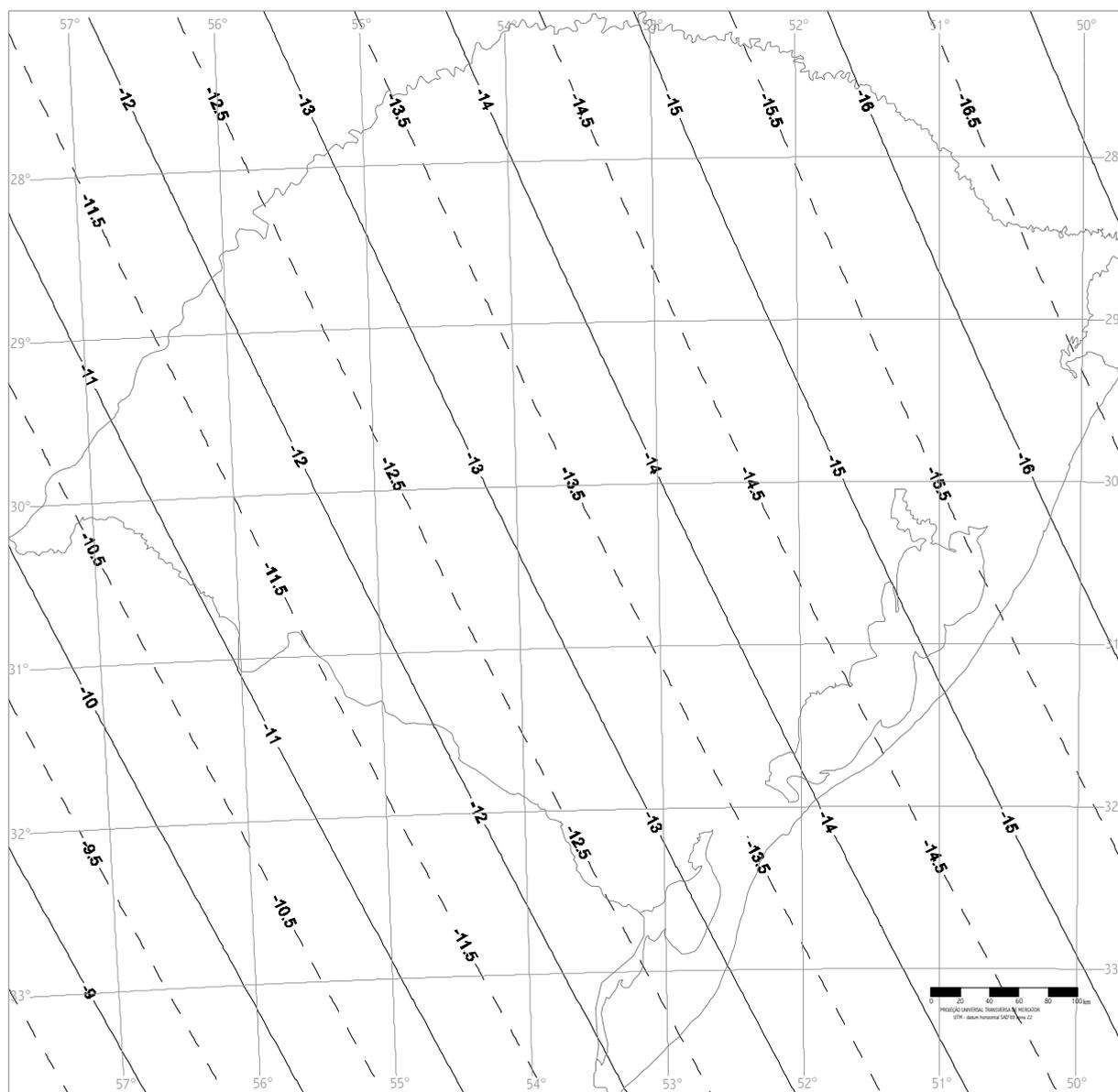
onde ρ é a densidade do ar e a *Função Gama* (Γ) é definida como

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt$$

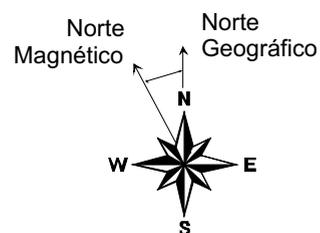
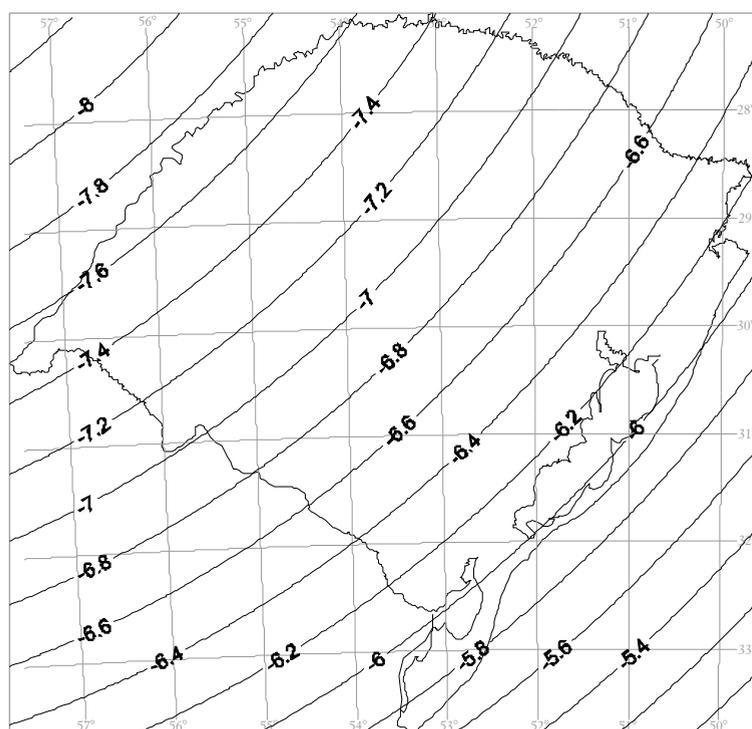
A tabela a seguir apresenta a correspondência entre valores de fluxo de potência eólica e velocidade média do vento, para diferentes fatores de forma de *Weibull*.

Nível do Mar, 15 °C (1.225 kg/m ³)					
Fluxo de Potência Eólica [W/m ²]	Velocidade do Vento [m/s]				
	Weibull-k	2.00	2.25	2.50	3.00
0		0.0	0.0	0.0	0.0
100		4.4	4.6	4.7	4.9
150		5.1	5.2	5.4	5.6
200		5.6	5.8	5.9	6.2
250		6.0	6.2	6.4	6.6
300		6.4	6.6	6.8	7.1
350		6.7	6.9	7.1	7.4
400		7.0	7.3	7.5	7.8
450		7.3	7.5	7.8	8.1
500		7.5	7.8	8.0	8.4
600		8.0	8.3	8.5	8.9
700		8.4	8.7	9.0	9.3
800		8.8	9.1	9.4	9.8
900		9.2	9.5	9.8	10.2
1000		9.5	9.8	10.1	10.5

DECLINAÇÃO MAGNÉTICA, Ano 2002 [graus]



VARIAÇÃO ANUAL [minutos de grau/ano]



Convenção de Declinação Magnética Negativa:
Norte Geográfico a nordeste do Magnético

Mapa desenvolvido a partir do programa ELEMAG
distribuído pelo OBSERVATÓRIO NACIONAL - CNPq
Departamento de Geofísica - Rio de Janeiro - RJ

Declinação Magnética

Como informação de auxílio à instalação de sensores de direção em futuras torres anemométricas a serem instaladas no Estado, é apresentado um mapa de declinação magnética e variação anual, para o ano de 2002 [Ref. Programa ELEMAG-Observatório Nacional].

Subestações de Transmissão (Rede Básica)

Sigla	Nome da Subestação	Tensão [kV]	Longitude (W)	Latitude (S)
CEEE				
ALE 2	Alegrete 2	230/69	55° 43' 23"	29° 46' 39"
BAG 2	Bagé 2	230/69/23	54° 04' 16"	31° 17' 18"
CAM	Camaquã	230/69/23	51° 48' 58"	30° 49' 39"
CBO	Campo Bom	230/69/23	51° 03' 53"	29° 41' 36"
CNA 1	Canoas 1	230/23	51° 11' 27"	29° 56' 51"
CAX 2	Caxias 2	230/69/13.8	51° 09' 27"	29° 08' 30"
CAX 5	Caxias 5	230/13.8	51° 11' 30"	29° 07' 58"
CIN	Cidade Industrial	230/138/23	51° 10' 40"	29° 53' 30"
ELD	Eldorado do Sul	230/23	51° 19' 02"	30° 00' 52"
GAR	Garibaldi	230/69/13.8	51° 30' 43"	29° 14' 15"
GRA 2	Gravataí 2	230/69/23	51° 03' 51"	29° 53' 07"
GUA 2	Guaíba 2	230/69	51° 22' 45"	30° 07' 46"
GRT	Guarita	230/69/23	53° 34' 10"	27° 36' 44"
LAG 2	Lageado 2	230/69/13.8	51° 59' 02"	29° 27' 50"
LIV 2	Livramento 2	230/69/13.8	55° 32' 33"	30° 51' 42"
MBR	Maçambará	230/69/23	56° 03' 54"	29° 09' 00"
NPR 2	Nova Prata 2	230/69/23	51° 36' 44"	28° 48' 20"
OSO 2	Osório 2	230/138/69	50° 18' 50"	29° 53' 43"
PEL 3	Pelotas 3	230/138/69/23/13.8	52° 24' 25"	31° 43' 37"
PPE	Pólo Petroquímico	230/69/34.5	51° 23' 17"	29° 52' 10"
PAL 4	Porto Alegre 4	230/13.8	51° 13' 43"	30° 02' 47"
PAL 6	Porto Alegre 6	230/69/13.8	51° 08' 35"	30° 03' 49"
PAL 9	Porto Alegre 9	230/69/13.8	51° 11' 45"	29° 58' 17"
PAL 10	Porto Alegre 10	230/13.8	51° 11' 46"	30° 02' 46"
PAL 13	Porto Alegre 13	230/13.8	51° 13' 31"	30° 05' 42"
UPME	Presidente Médici	230/138/69	53° 40' 55"	31° 33' 06"
QUI	Quinta	230/138/69/13.8	52° 16' 02"	32° 04' 32"
SCR 1	Santa Cruz 1	230/69/13.8	52° 25' 02"	29° 44' 57"
SMA 3	Santa Maria 3	230/69	53° 52' 33"	29° 40' 53"
SMT	Santa Marta	230/138/69/44/13.8	52° 25' 43"	28° 17' 01"
SRO 1	Santa Rosa 1	230/69/23	54° 27' 26"	27° 52' 34"
SAG 2	Santo Angelo 2	230/69/23	54° 17' 09"	28° 16' 13"
SBO 2	São Borja 2	230/69/23	55° 59' 46"	28° 41' 21"
SVI	São Vicente do Sul	230/69/23	54° 41' 46"	29° 41' 39"
SCH	Scharlau	230/138/69/13.8	51° 08' 52"	29° 43' 01"
TAQ	Taquara	230/138/13.8	50° 47' 32"	29° 39' 21"
URU 5	Uruquaiana 5	230/69	57° 00' 13"	29° 48' 28"
UITA	US Itaúba	230	53° 14' 02"	29° 15' 33"
UPRE	US Passo Real	230/138	53° 11' 20"	29° 01' 02"
VAI	Venâncio Aires	230/69/13.8	52° 09' 19"	29° 38' 02"
ELETROSUL				
ALE	Alegrete	138/69	55° 46' 17"	29° 47' 04"
CAX	Caxias	525/230	-	-
CHA	Charqueadas	230/69	-	-
FAR	Farrópilha	230/69	51° 19' 26"	29° 13' 06"
GRA	Gravataí	525/230	51° 03' 51"	29° 53' 07"
PFU	Passo Fundo	230/138	52° 43' 04"	27° 28' 54"
STA	Santo Ângelo	525/230	-	-

IV. SUBESTAÇÕES: COORDENADAS E TENSÕES

Como informação útil para estudos de conexão de usinas eólicas ao sistema elétrico gaúcho, as tabelas abaixo apresentam a localização das principais subestações constantes no Mapa do Sistema Elétrico da página 5.

CEEE Distribuição

Sigla	Nome da Subestação	Tensão [kV]	Longitude (W)	Latitude (S)
AGR	Arroio Grande	69/23	53°05'26"	32°13'50"
ALV	Alvorada	69/23	51°02'03"	30°00'35"
ARE	Areal	69/23	51°50'03"	30°06'46"
ASA	Arroio do Sal	69/13,8	49°53'55"	29°32'28"
ATL	Atlântida	69/13,8	50°01'25"	29°46'12"
ATS	Atlântida Sul	69/13,8	50°05'17"	29°52'13"
BAG 1	Bagé 1	69/13,8	54°03'52"	31°19'55"
BAS	Basílio	138/69/23	53°01'28"	31°52'33"
CHA 2	Charqueadas 2	69/13,8	51°36'34"	29°57'23"
CPV	Capivarita	69/23	52°19'59"	30°19'52"
CRM 1	Minas do Leão	69/23	52°04'34"	30°05'25"
CSN	Cassino	69/13,8	52°10'31"	32°10'08"
DPE	Dom Pedrito	69/13,8	54°40'30"	30°59'33"
ECZ	Encruzilhada do Sul	69/23	52°30'58"	30°32'07"
GUA1	Guaíba 1	69/23	51°19'44"	30°07'52"
IRA	Irapuazinho	69/13,8	53°00'37"	30°32'11"
JGR	Jaquarã	138/23	53°22'14"	32°33'14"
MML	Marmeleiro	138/23	52°59'04"	33°08'44"
MOS	Mostardas	138/69/23	50°38'16"	30°46'40"
OSO 1	Osório 1	138/23	50°15'54"	29°52'55"
PAL 1	Porto Alegre 1	69/13,8	51°10'18"	30°00'59"
PAL 12	Porto Alegre 12	69/13,8	51°10'18"	30°02'29"
PAL 14	Porto Alegre 14	69/13,8	51°09'18"	30°09'52"
PAL 16	Porto Alegre 16	69/13,8	51°06'13"	30°01'06"
PAL 2	Porto Alegre 2	69/13,8	51°11'50"	30°00'23"
PAL 3	Porto Alegre 3	69/13,8	51°12'26"	30°03'30"
PAL 5	Porto Alegre 5	69/13,8	51°11'40"	30°01'06"
PAL 8	Porto Alegre 8	69/13,8	51°08'27"	30°00'30"
PEL 1	Pelotas 1	138/69/13,8	52°18'11"	31°45'20"
PEL 2	Pelotas 2	138/13,8	52°20'33"	31°45'27"
PIN	Pinhal	69/13,8	50°14'44"	30°14'22"
PMR	Palmares do Sul	138/23	50°29'02"	30°14'33"
POS	Pedro Osório	138/23	52°44'15"	31°55'57"
RGR 1	Rio Grande 1	69/13,8	52°07'26"	32°02'32"
RGR 2	Rio Grande 2	69/13,8	52°05'16"	32°02'31"
RGR 3	Rio Grande 3	69/23/13,8	52°06'44"	32°06'59"
SAO	Santo A. da Patrulha	138/23	50°29'52"	29°49'11"
SLO	São Lourenço do Sul	69/23	52°01'21"	31°19'12"
SVP	Sta. Vitória do Palmar	138/23	53°22'40"	33°27'15"
TAI	Taim	69/23	52°32'34"	32°20'19"
TOR 1	Torres 1	69/23/13,8	49°44'02"	29°20'27"
TRA	Tramandaí	69/13,8	50°08'33"	29°59'15"
VAS	Vasconcelos	69/23	51°33'25"	30°38'04"
VIA 1	Viamão 1	69/23	51°02'40"	30°04'31"
USJE	UTE São Jerônimo	69	51°44'02"	29°59'03"
UCAN	UHE Canastra	138/69	50°44'46"	29°23'33"

AES Sul

Sigla	Nome da Subestação	Tensão [kV]	Longitude (W)	Latitude (S)
AGU	Agudo	69/23/13,8	53°15'27"	29°38'55"
ALE3	Alegrete 3	69/23	56°02'08"	29°22'57"
ALE4	Alegrete 4	69/23/13,8	55°50'35"	29°48'21"
CAV1	Caçapava do Sul 1	69/23/13,8	53°28'52"	30°31'12"
CBO	Campo Bom	230/69/23	54°49'26"	29°52'18"
CCE	Cachoeira Sul	69/23/13,8	52°54'23"	30°00'14"
CCQ	Cacequi	69/23	51°03'56"	29°41'37"
CDL	Candelaria	69/13,8	52°46'32"	29°40'57"
CND	Canudos	69/23	51°05'14"	29°40'41"
DIR	Dois Irmãos	138/23	51°06'23"	29°35'21"
ENC	Encantado	69/23	51°53'21"	29°13'32"
EST	Esteio	69/23	51°09'06"	29°39'04"
ETL2	Estrela 2	69/23/13,8	51°10'37"	29°50'28"
EVE	Estância Velha	138/23	51°57'39"	29°28'57"
FOR	Formigueiro	69/13,8	53°25'49"	29°35'26"
FSO	Faxinal Soturno	69/23/13,8	53°38'27"	30°05'14"
HAR	Harmonia	69/23	56°09'01"	30°03'50"
ITQ	Itaqui	69/23	56°32'38"	29°07'45"
JAG	Jaquari	69/23	54°42'00"	29°29'35"
LAI1	Lajeado 1	69/13,8	51°57'30"	29°26'22"
LIV1	Livramento 1	69/13,8	55°29'55"	30°52'14"
MON	Montenegro	138/23	51°27'36"	29°40'05"
NHA	Novo Hamburgo	69/23	51°07'37"	29°39'43"
PID	Parq Ind 3 GERA	69/23	51°24'47"	29°49'55"
QUA	Quaraí	69/23	56°26'26"	30°23'05"
ROS	Rosário do Sul	69/23	52°21'49"	29°57'47"
RPA	Rio Pardo	69/23/13,8	54°55'17"	30°14'29"
SAN	Santiago	69/23	51°21'36"	29°34'30"
SAP	Sapiranga	69/23	52°26'41"	29°42'05"
SBO1	São Borja 1	69/23	53°47'29"	29°39'35"
SCR2	Santa Cruz 2	69/13,8	53°44'32"	29°42'38"
SFR	S. Francisco de Assis	69/23	53°50'38"	29°42'10"
SGA	São Gabriel	69/23	54°51'54"	29°12'16"
SLE	São Leopoldo	69/23	56°01'00"	28°39'56"
SMA1	Santa Maria 1	138/13,8	55°07'53"	29°33'27"
SMA2	Santa Maria 2	69/13,8	54°19'59"	30°20'13"
SMA4	Santa Maria 4	69/13,8	51°06'47"	29°45'40"
SPE	São Pedro do Sul	69/23	54°10'11"	29°36'07"
SSC	S.S.Cai	138/23	53°35'25"	30°10'01"
SSE	São Sepe	69/13,8	51°00'27"	29°39'02"
TQR	Taquari	69/13,8	51°51'04"	29°48'17"
Triunfo	Triunfo	69/13,8	51°42'39"	29°56'22"
URU1	Uruguaiana 1	69/23/13,8	57°03'30"	29°46'51"
URU2	Uruguaiana 2	69/23	56°43'26"	29°54'04"
URU3	Uruguaiana 3	69/23	57°19'36"	30°06'14"
VAI1	Verâncio Aires 1	230/69/13,8	52°09'23"	29°38'02"
ZOO	Zoológico	138/23	51°09'47"	29°47'06"

RGE

Sigla	Nome da Subestação	Tensão [kV]	Longitude (W)	Latitude (S)
BGO 1	Bento Gonçalves 1	69/13,8	51°30'03"	29°09'36"
BGO 2	Bento Gonçalves 2	69/13,8	51°30'42"	29°11'02"
CAC 2	Cachoeirinha 2	69/23	51°04'52"	29°55'53"
CAS	Casca	138/23	51°59'17"	28°34'10"
CAX 1	Caxias do Sul 1	69/13,8	51°12'27"	29°10'58"
CAX 3	Caxias do Sul 3	69/13,8	51°09'39"	29°10'16"
CAX 4	Caxias do Sul 4	69/13,8	51°06'52"	29°06'54"
CBA	Carlos Barbosa	69/13,8	51°29'41"	29°16'22"
CBR	Cambará do Sul	69/13,8	50°08'25"	29°02'57"
CLA	Cerro Largo	69/23	54°43'06"	28°09'14"
CNL	Canela	69/13,8	50°51'02"	29°21'37"
CNO	Campo Novo	69/23	53°47'50"	27°40'51"
CRU	Cruzeiro	69/23	54°26'25"	27°51'30"
ENG	Englert	44/13,8	52°14'58"	28°02'40"
FCU	Flores da Cunha	69/13,8	51°10'06"	29°02'14"
FEL	Feliz	69/23	51°18'10"	29°26'59"
FWE	Frederico Westphalen	69/23	53°23'59"	27°22'29"
GAR 2	Garibaldi 2	230/13,8	51°29'41"	29°16'22"
GAU	Gaurama	69/23	52°06'38"	27°35'29"
GIR	Girúá	69/23	54°20'23"	28°01'36"
GPR	Guaporé	138/69	51°53'38"	28°50'06"
GRA 1	Gravataí 1	69/23	51°00'01"	29°57'09"
GVA	Getúlio Vargas	69/13,8	52°15'02"	27°54'21"
HOR	Horizontina	69/23	54°19'02"	27°38'09"
IBI	Ibirubá	69/23/13,8	53°05'27"	28°38'07"
JAQ	Jaquirana	69/23/13,8	50°18'14"	28°56'03"
LVE	Lagoa Vermelha	138/23	51°30'34"	28°12'53"
MAR	Marau	138/23	52°12'19"	28°27'27"
MIS	Missões	230/69	54°55'57"	28°23'18"
NMT	Não-Me-Toque	44/13,8	52°48'41"	28°28'16"
NPE	Nova Petrópolis	69/23	51°07'02"	29°22'38"
NPR 1	Nova Prata 1	69/23	51°36'13"	28°48'20"
PAR	Parobé	138/13,8	50°52'04"	29°38'14"
PFI	Paim Filho	69/23	51°46'02"	27°43'01"
PFU 1	Passo Fundo 1	138/13,8	52°21'26"	28°14'36"
PMI	Palmeira da Missões	69/23	53°18'33"	27°53'04"
RLU	Romano Lunardi	69/13,8	50°18'39"	29°16'10"
ROT	Rota do Sol	69/13,8	50°15'39"	29°14'03"
SAG 1	Santo Angelo 1	69/23	54°14'28"	28°17'47"
SAR	Sarandi	69/23	52°55'52"	27°56'21"
SAU	Santo Augusto	69/23	53°47'05"	27°51'41"
SFP	S. Francisco de Paula	138/69/13,8	50°33'57"	29°25'54"
SLG	São Luiz Gonzaga	69/23	54°56'35"	28°24'19"
SMC	São Marcos	69/13,8	51°03'37"	28°58'44"
SOL	Soledade	69/23	52°30'40"	28°48'54"
TAP	Tapejara	44/13,8	52°01'23"	28°03'49"
TCO	Três Coroas	138/13,8	50°46'13"	29°30'46"
TPA	Três Passos	69/23	53°55'59"	27°26'38"
TPR 1	Tapera 1	69/23/13,8	52°51'54"	28°38'05"
TUP	Tupanciretã	69/23	53°49'12"	29°05'06"
UERN	UHE Ernestina	44/13,8	52°32'54"	28°33'35"
UHPF	UHE Passo Fundo	138/23	52°43'04"	27°28'54"
VAC	Vacaria	138/23	50°54'46"	28°29'16"
VER	Veranópolis	69/23	51°32'45"	28°54'26"

RIO GRANDE DO SUL ATLAS EÓLICO



ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL
Secretaria de Energia, Minas e Comunicações

2002

Elaborado por

Odilon A. Camargo do Amarante
Fabiano J. Lima da Silva

 **CAMARGO SCHUBERT**
Engenharia Eólica