

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**CAROLINA MUNIZ DE OLIVEIRA**

**DESENVOLVIMENTO DE ATLAS ENERGÉTICO PARA MICROGERAÇÃO  
HÍBRIDA: UM ESTUDO NA REGIÃO DA CAMPANHA**

**Bagé  
2024**

**CAROLINA MUNIZ DE OLIVEIRA**

**PROPOSTA DE ATLAS ENERGÉTICO PARA MICROGERAÇÃO HÍBRIDA:  
UM ESTUDO NA REGIÃO DA CAMPANHA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Pablo Fernando Soardi Costa

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Romero Moraes

**Bagé  
2024**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

Muniz de Oliveira, Carolina  
DESENVOLVIMENTO DE ATLAS ENERGÉTICO PARA  
MICROGERAÇÃO HÍBRIDA: UM ESTUDO NA REGIÃO DA  
CAMPANHA / Carolina Muniz de Oliveira.  
78 p.

M48d

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA DE ENERGIA, 2024.  
"Orientação: Pablo Fernando Soardi Costa".

1. Potencial de geração. 2. Energia renovável. 3. Energia eólica. 4. Energia solar. 5. Atlas energético. I. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal do Pampa

**CAROLINA MUNIZ DE OLIVEIRA**

**DESENVOLVIMENTO DE ATLAS ENERGÉTICO PARA MICROGERAÇÃO HÍBRIDA:  
UM ESTUDO NA REGIÃO DA CAMPANHA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para o Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 18 de dezembro de 2024.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Pablo Fernando Soardi Costa

Orientador  
UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Marcelo Romero de Moraes

Coorientador  
UNIPAMPA

---

Profa. Dra. Suelen Cristiane Freitag

UFSM

---

Prof. Dr. Enoque Dutra Garcia

UNIPAMPA

---



Assinado eletronicamente por **ENOQUE DUTRA GARCIA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/12/2024, às 15:31, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

---



Assinado eletronicamente por **Suelen Cristiane Freitag, Usuário Externo**, em 18/12/2024, às 15:34, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

---



Assinado eletronicamente por **PABLO FERNANDO SOARDI COSTA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/12/2024, às 15:34, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

---



Assinado eletronicamente por **MARCELO ROMERO DE MORAES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/12/2024, às 15:35, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1618347** e o código CRC **D2F235FD**.

---

Dedico este trabalho a minha família.  
Sem vocês, nada seria possível.

## **AGRADECIMENTO**

Este agradecimento não poderia começar sem exaltar o esforço e apoio incondicional da minha família! Mãe, pai e maninha, amo vocês mais que tudo nesta vida e sou extremamente grata por tudo!

Aos meus amigos, Caique Nunes, Rodrigo Buroni e Valentina Buroni, Vanessa Castro e Mariana Castrillon, obrigada por estarem ao meu lado nos momentos difíceis; Vanessa Otte, Aline Nogueira e Maria Eduarda Saes, por me fazerem recordar que existe vida além da academia, mesmo quando eu estava loucamente envolvida nela.

Ao meu parceiro de vida, Vinicius, eu não consigo encontrar palavras suficientes para descrever o quanto tu foste importante não apenas para este trabalho, mas também por toda minha trajetória acadêmica. Muito obrigada por ter escolhido estar ao meu lado neste momento e pelo resto de nossas vidas. Eu te amo!

Também não posso deixar de agradecer às pessoas que foram essenciais nos desafios acadêmicos, Enilton Moreira Goulart e Lauro Monteiro da Silveira Neto, muito obrigada!

Ao meu orientador Pablo Fernando Soardi Costa e ao meu coorientador Marcelo Romero Moraes, por aceitarem o desafio que lhes propus e nunca desencorajarem minhas ideias, minha gratidão é imensa!

"Todos nós temos um mundo dentro de nós,  
você só precisa aprender a navegá-lo."  
– Luna Lovegood (*Harry Potter e o Enigma do Príncipe*)

## RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um Atlas Energético para Microgeração Híbrida na região da Campanha, RS, com o objetivo de identificar áreas de potencial para geração renovável por meio da integração de fontes solar e eólica. A metodologia adotada envolveu a coleta de dados de fontes confiáveis, como o Global Wind Atlas e o Global Solar Atlas, seguida pelo processamento desses dados no software QGIS. Foram aplicadas técnicas de lógica Fuzzy para normalizar e assim integrar variáveis climáticas, como velocidade do vento e irradiação solar, resultando em mapas temáticos que representam o potencial energético híbrido da região. Os resultados demonstraram que a região possui características geográficas e climáticas favoráveis para a microgeração de energia, tanto solar quanto eólica, de forma isolada e integrada. Os mapas gerados destacaram áreas promissoras para a implementação de sistemas híbridos, oferecendo uma visão estratégica do potencial energético. Conclui-se que o atlas desenvolvido é uma ferramenta útil para orientar decisões de planejamento energético, incentivar investimentos em energias renováveis e embasar políticas públicas. O estudo reforça a viabilidade técnica e econômica da microgeração na região, contribuindo para a diversificação da matriz energética brasileira e promovendo práticas sustentáveis alinhadas à transição energética global.

**Palavras-chave:** Potencial de geração; Energia renovável; Energia eólica; Energia solar; Atlas energético.

## ABSTRACT

This work presents the development of an Energy Atlas for Hybrid Microgeneration in the Campanha region, RS, aiming to identify areas with potential for renewable energy generation through the integration of solar and wind sources. The methodology involved collecting data from reliable sources, such as the Global Wind Atlas and the Global Solar Atlas, followed by processing this data in QGIS software. Fuzzy logic techniques were applied to normalize and integrate climatic variables, such as wind speed and solar irradiance, resulting in thematic maps representing the region's hybrid energy potential. The results demonstrated that the region has favorable geographical and climatic characteristics for energy microgeneration, both solar and wind, in isolated and integrated forms. The generated maps highlighted promising areas for the implementation of hybrid systems, offering a strategic perspective on energy potential. It is concluded that the developed atlas is a valuable tool to guide energy planning decisions, encourage investments in renewable energy, and support public policies. The study reinforces the technical and economic feasibility of microgeneration in the region, contributing to the diversification of Brazil's energy matrix and promoting sustainable practices aligned with the global energy transition.

**Keywords:** Generation Potential; Renewable Energy; Wind Energy; Solar Energy. Energy Atlas.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Consumo de energia elétrica em função dos anos no Brasil.....	1
Figura 2 - Geração de energia por fonte em função dos anos no Brasil.....	1
Figura 3 - Emissão de gases de efeito estufa de fontes de energia em função dos anos. .	2
Figura 4 - Regiões da Campanha Gaúcha. ....	3
Figura 5 – Efeito Coriolis. ....	5
Figura 6 - Esquema de circulação atmosférica global.....	6
Figura 7 – Variação das velocidades do vento em diferentes alturas.....	7
Figura 8 - Esquema regiões de baixa e alta pressão. ....	8
Figura 9 - Centros de Ação da Atmosfera na América do Sul. ....	8
Figura 10 - Esquema do mecanismo orbital da terra. ....	9
Figura 11 – Média de irradiação diária.....	10
Figura 12 - Interface plataforma Global Wind Atlas.....	11
Figura 13 - Interface plataforma Global Solar Atlas. ....	12
Figura 14 - Interface software QGIS. ....	13
Figura 15 - Geração de energia no Brasil por fonte. ....	14
Figura 16 - Comparação da lógica Booleana e lógica Fuzzy. ....	16
Figura 17 - Fluxograma da metodologia do trabalho. ....	19
Figura 18 – Contorno externo Rio Grande do Sul.....	21
Figura 19 – Ferramenta de extração de camada raster no QGIS. ....	21
Figura 20 - Ferramenta de estatísticas zonais no QGIS.....	22
Figura 21 - Ferramenta de associação linear no QGIS.....	23
Figura 22 - Ferramenta de calculadora raster no QGIS.....	24
Figura 23 - Exemplo de configuração de simbologia do mapa de altitude. ....	25
Figura 24 - Conjunto de configuração de simbologia dos mapas gerados. ....	26
Figura 25 – Camadas vetoriais de cidades e microrregiões e mapa manipulado das cidades da Campanha. ....	27
Figura 26 – Mapa da elevação do solo na Campanha em metros. ....	28
Figura 27 - Mapa de velocidade do vento a 10 metros na região da Campanha, em m/s. .....	30
Figura 28 - Mapa final de irradiação solar horizontal da região da Campanha em kW/m <sup>2</sup> . .....	31
Figura 29 - Mapa de temperatura a 2 metros de altura em °C.....	33

Figura 30 - Mapa de densidade de potência solar nos meses de janeiro e fevereiro em kW/kWp. ....	34
Figura 31 - Mapa de densidade de potência solar nos meses de março e abril em kW/kWp. ....	34
Figura 32 - Mapa de densidade de potência solar nos meses de maio e junho em kW/kWp. ....	35
Figura 33 - Mapa de densidade de potência solar nos meses de julho e agosto em kW/kWp. ....	35
Figura 34 - Mapa de densidade de potência solar nos meses de setembro e outubro em kW/kWp. ....	35
Figura 35 - Mapa de densidade de potência solar nos meses de novembro e dezembro em kW/kWp.....	36
Figura 36 - Mapa de densidade de potência eólica em kW/m <sup>2</sup> .....	36
Figura 37 - Mapa final de irradiação solar normalizada.....	37
Figura 38 - Mapa final da velocidade de vento a 10 metros normalizada.....	38
Figura 39 - Mapa final de potencial híbrido solar e eólico.....	39

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Área territorial dos municípios analisados. ....	27
Tabela 2 - Média de altitude dos municípios analisados. ....	29
Tabela 3 - Média de velocidade do vento nos municípios analisados. ....	30
Tabela 4 - Média de Irradiação solar horizontal nos municípios analisados. ....	31
Tabela 5 - Média de temperatura do ar nos municípios analisados. ....	32
Tabela 6 - Médias de irradiação solar normalizada por município. ....	37
Tabela 7 - Médias da velocidade do vento normalizada por município. ....	39
Tabela 8 - Médias da combinação de irradiação solar e velocidade do vento por município. ....	40
Tabela 9 - Conjunto de dados obtidos. ....	41

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	A Região da Campanha e Seu Potencial Energético .....	3
1.2	Justificativa .....	4
1.3	Objetivo .....	4
1.3.1	Objetivos específicos .....	4
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>5</b>
2.1	Circulação atmosférica global .....	5
2.2	Irradiação Solar .....	9
2.3	Dados de reanálise .....	11
2.4	Software QGIS .....	12
2.5	Conceitos de Microgeração de Energia .....	13
2.6	Análise das gerações na matriz elétrica brasileira .....	14
2.6.1	Sistema híbrido de energia .....	15
2.7	Tomada de decisão por lógica Fuzzy .....	16
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>19</b>
3.1	Coleta de dados .....	20
3.2	Processamento de dados geoespaciais.....	20
3.3	Conversão para lógica nebulosa e integração de dados raster .....	22
3.4	Construção de Mapas Temáticos .....	25
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>27</b>

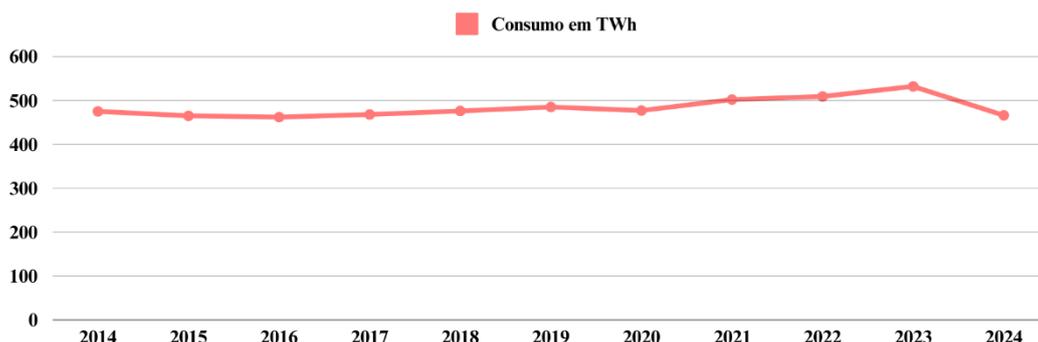
<b>4.1</b>	<b>Representação gráfica das variáveis analisadas .....</b>	<b>27</b>
4.1.1	Mapa de elevação do solo.....	28
4.1.2	Mapa de velocidade de vento .....	29
4.1.3	Mapa de Irradiação Horizontal.....	31
4.1.4	Mapa de temperatura do ar .....	32
4.1.5	Mapas de densidade de potência .....	33
4.1.6	Mapas de melhor potencial de microgeração híbrida - solar e eólica .....	37
<b>4.2</b>	<b>Análise final.....</b>	<b>40</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>42</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>43</b>
	<b>ANEXO A – ATLAS DE MICROGERAÇÃO HÍBRIDA DE ENERGIA – REGIÃO DA CAMPANHA .....</b>	<b>46</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica, nas últimas décadas, tornou-se uma componente indispensável para inúmeras atividades do cotidiano, indo além de trabalho e lazer, mas também para desempenhar funções essenciais que moldam nossa sociedade. Com o aumento contínuo do consumo de energia elétrica, tornou-se necessário expandir proporcionalmente a capacidade de geração.

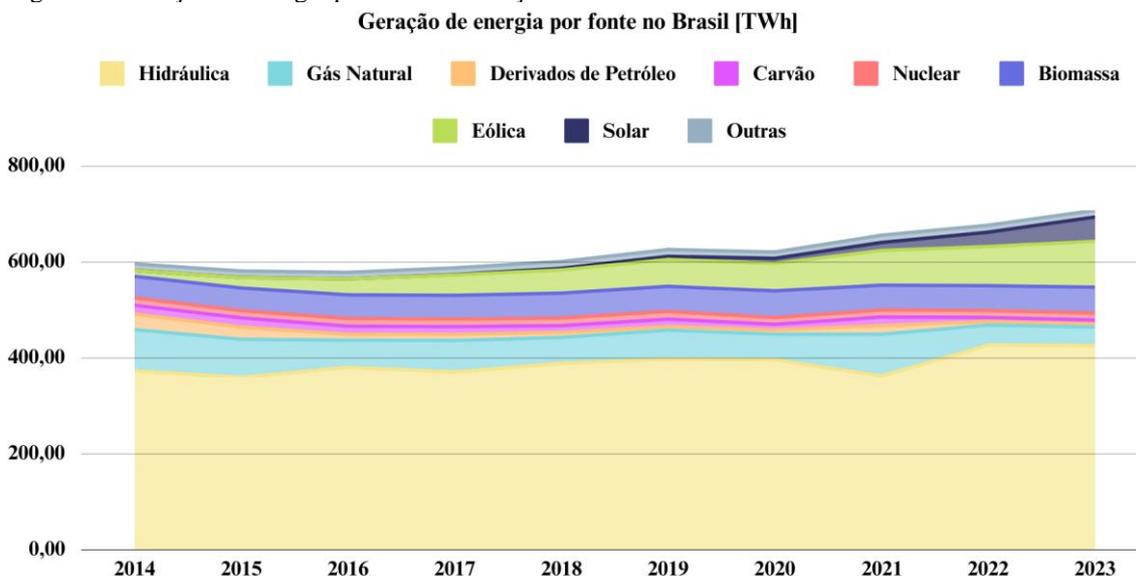
De acordo com os dados abertos da EPE (Empresa de Pesquisa Energética), entre 2014 e 2024, o Brasil apresentou um aumento de cerca de 134 TWh no consumo de energia elétrica, equivalente a 140,34% (Figura 1). Esse crescimento desencadeou a expansão da geração de energia no país, que aumentou em aproximadamente 111,83 TWh, um incremento de 118,75% (Figura 2) (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2022).

Figura 1 - Consumo de energia elétrica em função dos anos no Brasil.



Fonte: Adaptado de Empresa de Pesquisa Energética (2024).

Figura 2 - Geração de energia por fonte em função dos anos no Brasil.



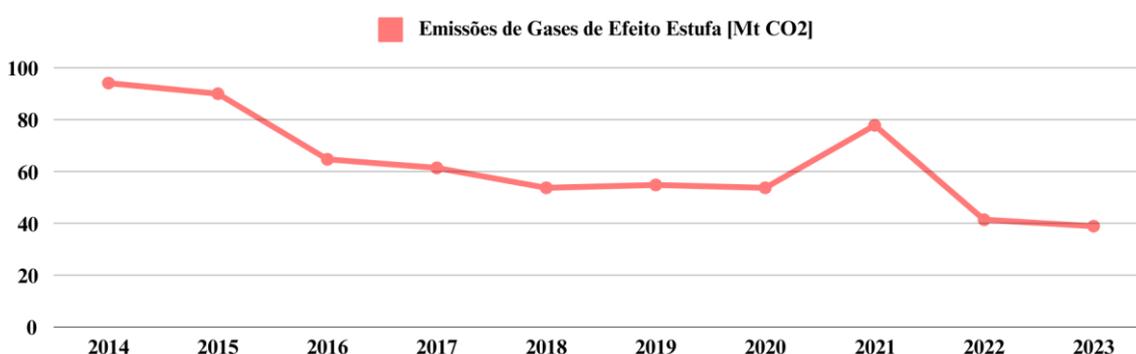
Fonte: Adaptado de Empresa de Pesquisa Energética (2024).

O aumento da eletrificação em tarefas do dia a dia é diretamente proporcional à dependência da energia elétrica. Contudo, a indisponibilidade, falta de qualidade ou escassez de redes elétricas em áreas remotas, o alto custo da extensão de linhas de transmissão e a topografia desafiadora frequentemente levam à exploração de alternativas energéticas. Neste contexto, uma das abordagens mais promissoras para atender às necessidades dessas regiões é o uso de sistemas híbridos de geração de energia interligados a redes elétricas interligadas (SINGH; RIZWAN, 2022).

Consumidores em localidades isoladas, como aldeias, fazendas distantes e áreas rurais, muitas vezes dependem de sistemas autônomos movidos a combustíveis fósseis para a geração de energia. Entretanto, esses sistemas contribuem significativamente para a emissões de gases de efeito estufa. A emergência climática requer ações urgentes para reduzir essas emissões, incluindo mudanças na geração de energia, transporte, manufatura e uso da terra até 2050 (THE NATURE CONSERVANCY, 2021).

No Brasil, a emissão de gases de efeito estufa provenientes da geração de energia elétrica apresentou um decréscimo significativo entre 2014 e 2024, evidenciando os esforços para uma matriz energética mais limpa. Nesse período, as emissões de CO<sub>2</sub> reduziram-se em aproximadamente 55 Mt CO<sub>2</sub>, resultado da expansão de fontes renováveis e de melhorias na eficiência energética (Figura 3) (EPE, 2024).

Figura 3 - Emissão de gases de efeito estufa de fontes de energia em função dos anos.



Fonte: Adaptado de Agência Internacional de Energia Elétrica (2023).

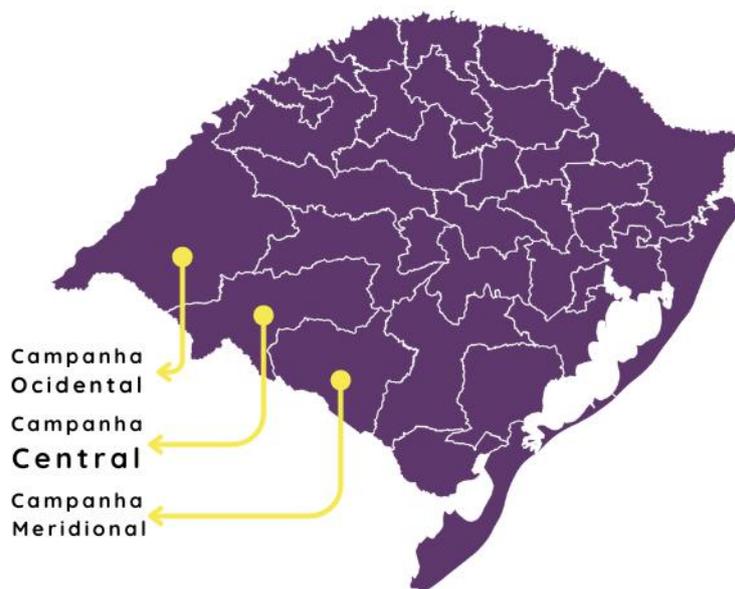
Diante desse cenário, o uso de fontes renováveis, como biomassa, energia solar, eólica, hidráulica e diversas mais, tornou-se uma necessidade para o auxílio da transição de matriz elétrica. Entre essas, destacam-se as tecnologias solar e eólica, amplamente exploradas devido à maturidade de seus projetos, à disponibilidade de recursos naturais e à integração em microrredes e redes inteligentes (SHEZAN et al., 2022). A geração distribuída, incluindo sistemas híbridos, surge como uma alternativa para diversificar as

combinações de fontes de energia, contribuindo para a expansão da capacidade instalada de forma sustentável.

### 1.1 A Região da Campanha e Seu Potencial Energético

De acordo com o Mapa Econômico do Rio Grande do Sul, desenvolvido pela Federação das Indústrias do Estado do Rio Grande do Sul (FIERGS, 2023), em parceria com o Governo do Estado, o Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Rio Grande do Sul (CREA-RS), o Banco Regional de Desenvolvimento do Extremo Sul (BRDE) e o Centro de Integração Empresa-Escola (CIEE), o estado já produz 82% de sua energia a partir de fontes renováveis. As regiões da Campanha (Figura 4) — tanto oriental, central quanto meridional —, juntamente com a região sul, são consideradas estratégicas para que essa matriz energética se torne ainda mais limpa e inovadora. Mapas desenvolvidos no estudo da FIERGS destaca essas áreas como possuindo os maiores potenciais para geração eólica, solar e produção de hidrogênio verde no estado.

Figura 4 - Regiões da Campanha Gaúcha.



Fonte: Adaptação de IBGE (2024).

Em relação à energia fotovoltaica, o Atlas Solar do Rio Grande do Sul aponta a Campanha como a região de maior potencial no estado, com possibilidade de projetos que integrem geração eólica e solar para geração de energia elétrica (FIERGS, 2023).

## **1.2 Justificativa**

Apesar da crescente expansão da microgeração no Brasil, ainda há certa falta de estudos regionais detalhados que identifiquem as áreas de maior potencial para a instalação de sistemas solares e eólicos de pequena escala. A elaboração de um atlas energético que integre análises técnicas, climáticas e socioeconômicas pode oferecer informações estratégicas para direcionar iniciativas de geração de energia, tanto distribuída quanto de maior porte, promovendo o uso sustentável de fontes renováveis na região da Campanha Gaúcha. Este estudo busca explorar as condições climáticas da região, como irradiância solar e ventos constantes, para demonstrar como essas características podem ser aproveitadas para impulsionar a geração sustentável e a autonomia energética.

## **1.3 Objetivo**

O presente trabalho tem como objetivo a análise e o desenvolvimento de um atlas eólico e solar para a região da Campanha do Rio Grande do Sul, como intuito de facilitar o estudo preliminar para a implementação de sistemas de microgeração de energia elétrica.

### **1.3.1 Objetivos específicos**

- Mapear o potencial de microgeração da região da Campanha:
  - Identificar e classificar as áreas com maior potencial para sistemas de geração solar e eólica.
- Analisar variáveis meteorológicas:
  - Avaliar as condições climáticas da região, como irradiância solar, velocidade e temperatura.
- Desenvolver mapas temáticos:
  - Criar mapas que auxiliem na visualização do potencial de geração de energia solar e eólica em diferentes áreas da Campanha.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

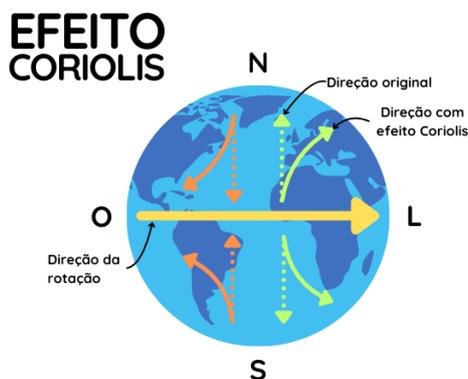
Nesta seção, são explorados os conceitos de circulação atmosférica global e irradiação solar, que são fundamentais para compreender o comportamento das fontes de energia renovável, como a eólica e a solar. Esses aspectos servem como base para contextualizar as análises realizadas nos tópicos seguintes, que abordam a microgeração de energia e os sistemas híbridos de geração. A partir desse panorama, a reanálise de dados meteorológicos e a aplicação da lógica Fuzzy são introduzidas como ferramentas cruciais para modelar e interpretar a variabilidade climática, otimizando o potencial de geração de energia renovável em diferentes contextos.

### 2.1 Circulação atmosférica global

O clima de qualquer região é amplamente influenciado pela circulação geral da atmosfera. Essa circulação é resultado do aquecimento desigual do planeta pela radiação solar, da distribuição assimétrica de oceanos e continentes, e das características topográficas dos continentes (ALVES *et al*, 2007).

O movimento dos ventos é impulsionado por forças que agem no ar, as quais podem sofrer interferências devido à influência da temperatura e umidade. Estas interações resultam no sistema complexo que compõe o que é chamado de clima. A formação dos ventos é descrita pela dinâmica atmosférica, fundamentada nas leis de movimento de Newton. A Segunda Lei de Newton estabelece que a força sobre um corpo é proporcional ao produto de sua massa e aceleração, sendo fundamental para descrever o movimento do ar. Em sistemas atmosféricos, é usualmente considerado um sistema Euleriano, onde o observador permanece fixo enquanto o ar se move, conforme visto na Figura 5 (STULL, 2017).

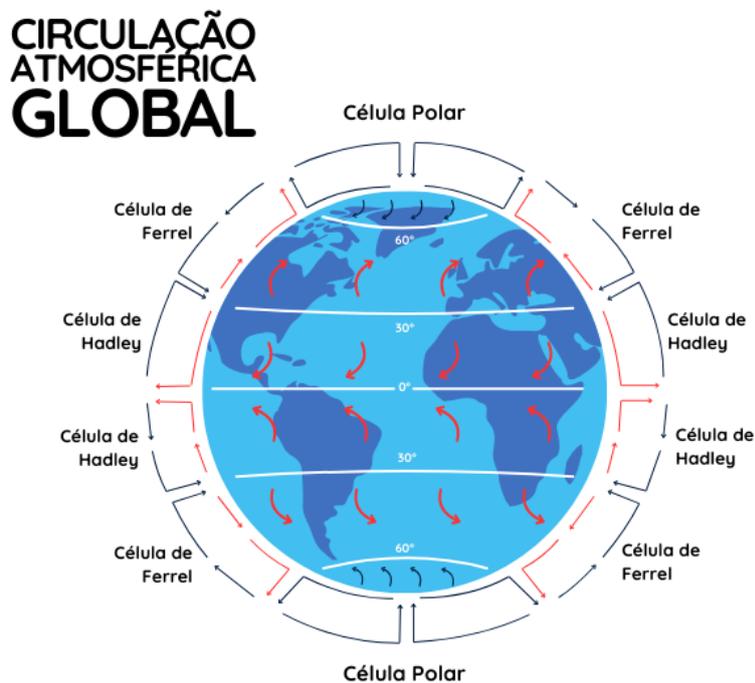
Figura 5 – Efeito Coriolis.



Fonte: Adaptado de Marques (2024).

As forças que atuam na atmosfera são fundamentais para entender a dinâmica climática e a formação de ventos, estas podem ser representadas na Figura 6. Destacam-se a força de gradiente de pressão, o arrasto friccional, as forças centrípeta e centrífuga, a gravidade e a força de Coriolis. O gradiente de pressão é o agente inicial do movimento do ar, empurrando-o de regiões de alta para baixa pressão e criando os ventos. Em proximidade com a superfície terrestre, o atrito reduz a velocidade das massas de ar, efeito conhecido como arrasto friccional, que age de forma mais intensa em terrenos irregulares e em altitudes mais baixas (STULL, 2017).

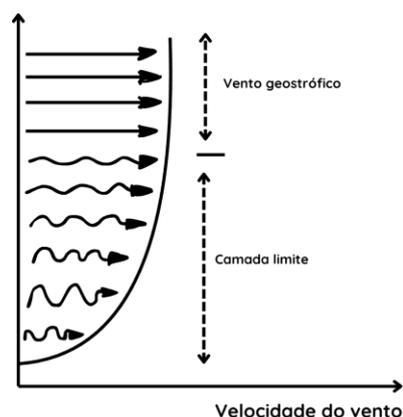
Figura 6 - Esquema de circulação atmosférica global.



Fonte: Adaptado de Internet Geography (2018).

Além disso, a velocidade do vento varia com a altura devido à redução do atrito com a superfície terrestre e dos obstáculos presentes. Essa variação é descrita em três regiões principais: a superfície, onde o escoamento é mais lento devido à interação direta com o terreno, como pode ser visto na Figura 7; a camada limite, com escoamento turbulento e influenciada por fatores como rugosidade e obstáculos; e o vento geostrófico, que flui livremente em altitudes mais elevadas (SANTOS, 2022).

Figura 7 – Variação das velocidades do vento em diferentes alturas.

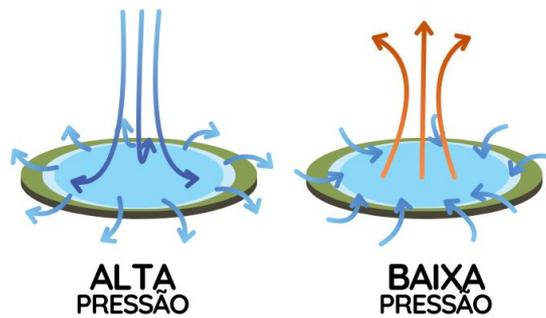


Fonte: Adaptado de Santos (2022).

A rugosidade do terreno desempenha um papel crucial na redução da velocidade do vento, com regiões de vegetação densa, bosques ou áreas urbanas apresentando maior rugosidade e dissipando energia do vento, enquanto superfícies planas como o mar ou aeroportos oferecem menor resistência e permitem maior intensidade dos ventos. Obstáculos como edifícios, árvores ou formações rochosas criam turbulências que podem se estender por até três vezes o tamanho do obstáculo, afetando diretamente o perfil dos ventos e devendo ser considerados ao planejar locais para parques eólicos. Em terrenos elevados, como no topo de colinas, a velocidade do vento tende a ser maior devido à ausência de obstáculos significativos e ao aumento da energia potencial, embora superfícies muito irregulares possam gerar turbulências que prejudicam a eficiência na geração de energia. A instalação de aerogeradores em pontos estratégicos, como picos de colinas, permite aproveitar ao máximo a intensidade dos ventos nessas regiões (SANTOS, 2022).

Além das forças mencionadas, as forças centrípeta e centrífuga atuam em sistemas de alta e baixa pressão, como apresentado na Figura 8, ajudando a equilibrar o movimento curvo dos ventos ao redor de centros de pressão e a manter a circulação do ar em padrões específicos. A gravidade, além de manter a atmosfera ligada à Terra, contribui para a estratificação do ar em camadas, com o ar mais denso nas regiões mais baixas e o ar menos denso em altitudes maiores. Outro fator essencial na formação de padrões de vento é a força de Coriolis, resultante da rotação terrestre, que desvia o movimento do ar para a direita no Hemisfério Norte e para a esquerda no Hemisfério Sul (STULL, 2017).

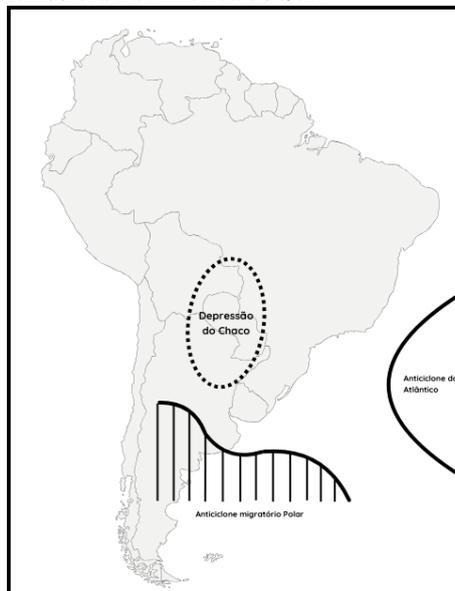
Figura 8 - Esquema regiões de baixa e alta pressão.



Fonte: Adaptado de Marques (2024).

No fluxo atmosférico sobre o Rio Grande do Sul, predominam os efeitos causados pela interação entre o Anticiclone Subtropical do Atlântico (área de alta pressão atmosférica localizada sobre o Oceano Atlântico), os deslocamentos intermitentes de massas de ar polar (grandes volumes de ar frio que se deslocam das regiões polares em direção às latitudes mais baixas) e a depressão barométrica (área de baixa pressão atmosférica que pode causar ventos fortes e tempestades) localizada no nordeste da Argentina. Estes efeitos são apresentados na Figura 9. Na região da Campanha, as velocidades do vento aumentam durante a noite e diminuem pela manhã, especialmente nas estações de verão e outono (WOLLMANN; GALVANI, 2012).

Figura 9 - Centros de Ação da Atmosfera na América do Sul.

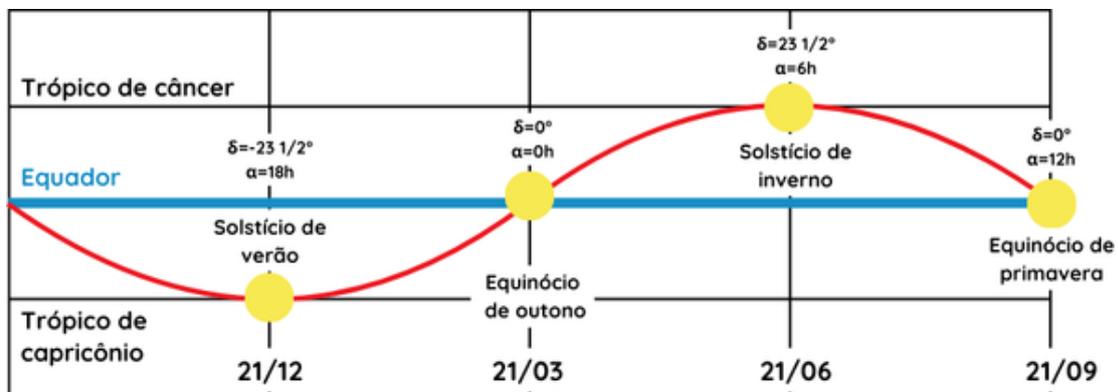


Fonte: Adaptação de Wollmann e Galvani (2012).

## 2.2 Irradiação Solar

A órbita da Terra e a inclinação do seu eixo desempenham um papel primordial na distribuição da radiação solar ao longo do ano. A inclinação de aproximadamente  $23,5^\circ$  em relação ao plano da eclíptica promove variações sazonais na intensidade da luz solar, moldando as estações do ano. Durante o verão, os hemisférios inclinados em direção ao Sol recebem maior incidência de radiação, elevando as temperaturas. No inverno, ocorre o oposto, resultando em temperaturas mais baixas. Esse mecanismo orbital, que pode ser vista na Figura 10, é essencial para o equilíbrio energético e para os ciclos climáticos que sustentam a vida no planeta (STULL, 2017).

Figura 10 - Esquema do mecanismo orbital da terra.



Fonte: Adaptado de Santiago (2005).

De acordo com Stull (2017), quando a radiação solar interage com a atmosfera e a superfície terrestre, ocorre um complexo fluxo de energia que regula o balanço térmico da Terra. Parte dessa radiação é absorvida por gases atmosféricos como o ozônio, enquanto outra parte é refletida por nuvens e pela superfície. A energia absorvida é reemitida sob a forma de radiação infravermelha, regulando as temperaturas e criando as condições climáticas necessárias para a vida.

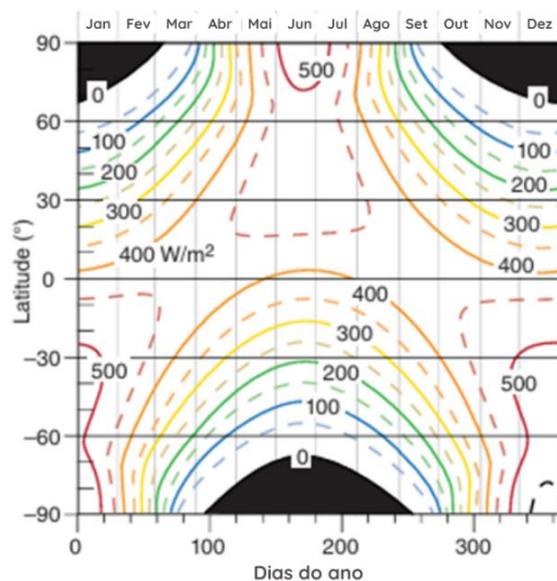
A radiação solar não é constante, variando tanto ao longo do dia quanto nas estações do ano. Durante o dia, a superfície da Terra aquece devido à radiação recebida, enquanto à noite, ocorre o resfriamento, pois a energia é reemitida na forma de radiação infravermelha. Essa alternância de aquecimento e resfriamento é intensificada pela inclinação axial da Terra, que gera variações sazonais na quantidade de radiação recebida, influenciando os padrões climáticos regionais (CHUERUBIM, 2012).

A distribuição da radiação solar também é influenciada por diversos fatores, como a localização geográfica, as condições atmosféricas e a sazonalidade. As regiões mais

próximas ao Equador, por exemplo, recebem radiação mais intensa devido à menor inclinação dos raios solares em relação à superfície terrestre, enquanto as regiões de alta latitude experimentam variações sazonais mais acentuadas (CHUERUBIM, 2012).

O ângulo zenital, formado entre o zênite local e os raios solares, é crucial para determinar a irradiância solar. Quanto menor o ângulo zenital, maior a intensidade da radiação recebida. Já ângulos maiores dispersam a energia sobre uma área maior, reduzindo sua intensidade. O movimento de translação da Terra e a inclinação de seu eixo em  $23^{\circ}27'$  em relação ao plano orbital resultam nas estações do ano. Esse movimento provoca variações na declinação solar, que influencia diretamente a irradiância em diferentes latitudes, especialmente entre os trópicos de Câncer e Capricórnio. A declinação solar, definida como o ângulo entre o plano do Equador e a linha que conecta o centro da Terra ao Sol, determina as latitudes que recebem radiação direta ao longo do ano. Esse fenômeno é essencial para entender a distribuição da energia solar na superfície terrestre (SANTIAGO, 2005). A Figura 11 apresenta um diagrama que mostra os valores de irradiância solar em função da latitude e do mês.

Figura 11 – Média de irradiância diária.



Fonte: Adaptado de Stull (2017).

A variabilidade interanual da irradiância é em função de fenômenos intertropicais globais. Para o estado do Rio Grande do Sul, tem-se a variabilidade interanual reduzida, onde nos meses de inverno é mais reduzida. No geral, a variabilidade da irradiância solar é relativamente baixa principalmente nas regiões ao oeste, como a Campanha Ocidental,

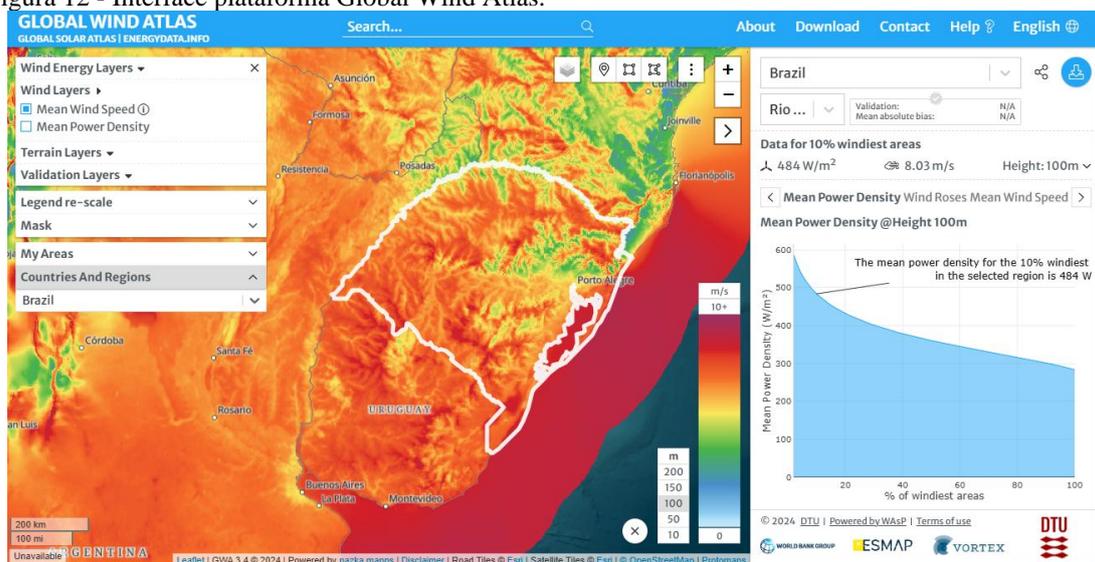
com os maiores valores de irradiação solar para aproveitamento de projetos centralizados (RIO GRANDE DO SUL, 2018).

### 2.3 Dados de reanálise

A reanálise de dados meteorológicos é um processo essencial para a compreensão e modelagem do clima global. Este método envolve a assimilação de dados históricos de observações meteorológicas em modelos numéricos de previsão do tempo, resultando em conjuntos de dados consistentes e abrangentes que cobrem longos períodos. A reanálise utiliza técnicas avançadas de modelagem e assimilação de dados para corrigir e preencher lacunas nas observações, proporcionando uma visão detalhada das condições atmosféricas passadas (GLOBAL WIND ATLAS, 2024).

O Global Wind Atlas (Figura 12) combina dados de reanálise com modelos de mesoescala e microscale para fornecer mapas de alta resolução do potencial eólico global. A versão mais recente, GWA 3.0, utiliza dados de reanálise ERA5, que oferecem uma resolução espacial e temporal aprimorada, permitindo uma análise mais precisa dos recursos eólicos. Este processo envolve simulações de modelos de mesoescala ao longo de dez anos, cobrindo o globo a uma resolução de 3 km, e incorpora dados de elevação e cobertura do solo para melhorar a precisão das simulações de microscale (GLOBAL WINDATLAS, 2024).

Figura 12 - Interface plataforma Global Wind Atlas.



Fonte: Global Wind Atlas (2024).

A reanálise de dados meteorológicos é fundamental para diversas aplicações, incluindo a identificação de áreas com alto potencial para geração de energia, o

planejamento de infraestrutura e a pesquisa climática. Ao fornecer conjuntos de dados consistentes e de alta qualidade, a reanálise permite uma melhor compreensão das variabilidades climáticas e dos padrões atmosféricos, contribuindo para a tomada de decisões informadas em políticas ambientais e energéticas (GLOBAL SOLAR ATLAS, 2024).

Além disso, o Global Solar Atlas (Figura 13), desenvolvido pelo Banco Mundial e pela International Finance Corporation, fornece acesso rápido e fácil a dados de recursos solares e potencial de energia fotovoltaica em escala global. Este atlas utiliza dados de reanálise e metodologias avançadas para estimar o potencial de recursos solares, oferecendo camadas de GIS e mapas que mostram o potencial de recursos em nível global, regional e nacional (GLOBAL SOLAR ATLAS, 2024).

Figura 13 - Interface plataforma Global Solar Atlas.

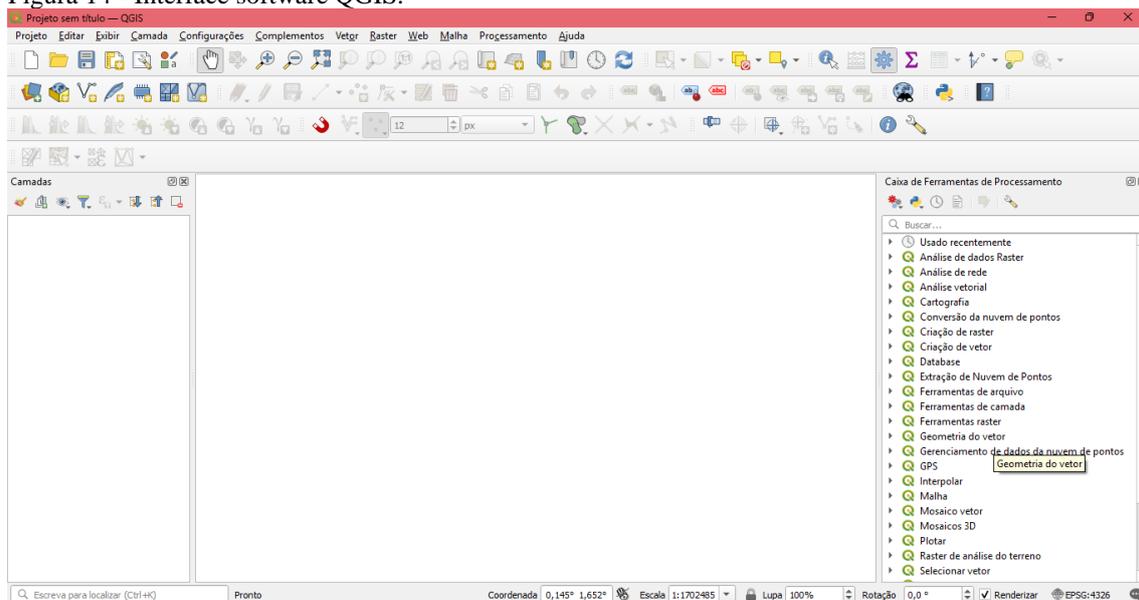


Fonte: Global Solar Atlas (2024).

## 2.4 Software QGIS

O QGIS é um Sistema de Informação Geográfica (SIG) de código aberto que oferece uma ampla gama de funcionalidades para a visualização, edição e análise de dados geoespaciais. Desenvolvido por uma comunidade global de voluntários, o QGIS é gratuito e está disponível para várias plataformas. O software, que tem a interface disposta na Figura 14, permite a integração de dados de diversas fontes, como *shapefiles*, bancos de dados espaciais e serviços web, proporcionando uma ferramenta poderosa e flexível para profissionais e pesquisadores da área de geoprocessamento (QGIS, 2024).

Figura 14 - Interface software QGIS.



Fonte: Autor (2024).

Além de suas funcionalidades básicas, o QGIS possui uma extensa documentação e uma comunidade ativa que contribui para o desenvolvimento contínuo do *software*. O manual de treinamento do QGIS oferece uma introdução abrangente ao uso do *software*, abordando desde conceitos básicos de SIG até técnicas avançadas de análise espacial. A documentação inclui tutoriais passo a passo, exemplos práticos e exercícios, tornando o QGIS acessível tanto para iniciantes quanto para usuários experientes (QGIS, 2024).

## 2.5 Conceitos de Microgeração de Energia

A Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022, institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída no Brasil, estabelecendo diretrizes para a geração de energia elétrica por pequenos produtores. A microgeração distribuída refere-se à produção de energia elétrica em pequena escala, com potência instalada de até 75 kW, utilizando fontes renováveis como solar, eólica, biomassa e cogeração qualificada. Essa modalidade permite que consumidores-geradores, sejam pessoas físicas ou jurídicas, produzam sua própria energia e injetem o excedente na rede de distribuição (BRASIL, 2022).

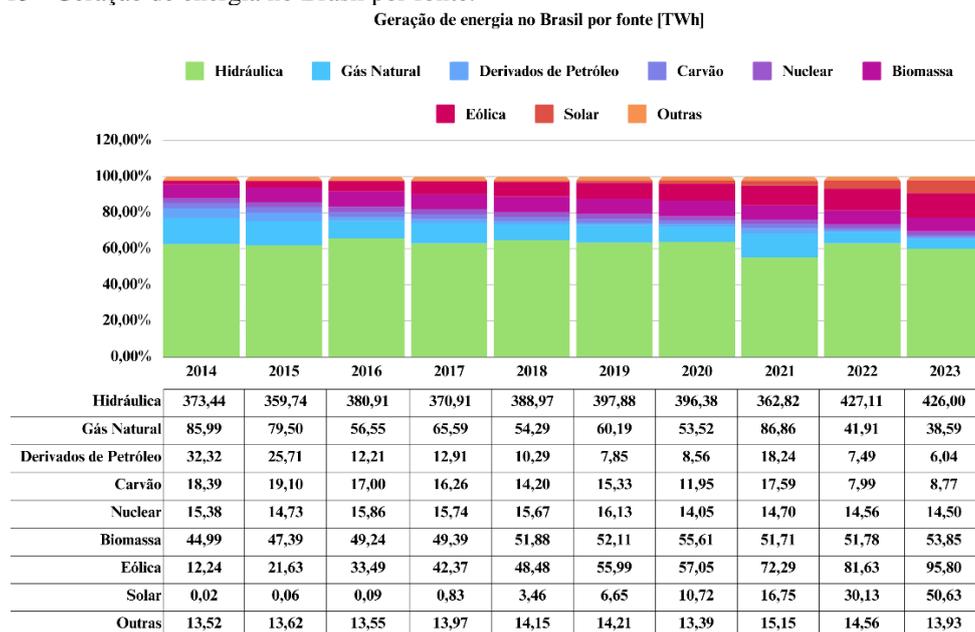
A alta contribuição de energia elétrica oriunda de fontes de energia renováveis é responsável por perturbações na confiabilidade e da operação correta da rede elétrica. Devido a estes problemas, as redes elétricas estão em constante aprimoramento para garantir um fornecimento adequado de eletricidade (BERRADA; LOUDIYI; EL MRABET, 2020).

Estudos recentes apontam que não há uma forma única de geração de energia que seja boa para todas as aplicações. Em uma balança ao mesmo tempo que a energia solar e eólica são variáveis, elas não são emissoras de gases poluentes e por outro lado tem-se os sistemas de geração a gás natural que tem baixo custo e são despacháveis, porém emitem gases poluentes. Para contornar estas questões são constantemente investigadas soluções inteligentes e a implantação de sistemas de energia híbridos é uma a qual ganha certo destaque (BERRADA; LOUDIYI; EL MRABET, 2020).

## 2.6 Análise das gerações na matriz elétrica brasileira

De acordo com o Balanço Energético Nacional, em 2023 a geração interna de energia elétrica no Brasil totalizou 708,11 TWh (EPE, 2024). Na Figura 15 As usinas hidrelétricas foram responsáveis pela maior parte da energia gerada, com 60,2% do total. O gás natural contribuiu com 5,4%, os derivados de petróleo com 0,9%, o carvão com 1,2%, a energia nuclear com 2%, a biomassa com 7,6%, a energia eólica com 13,5%, a energia solar com 7,2% e outras fontes com 2%.

Figura 15 - Geração de energia no Brasil por fonte.



Fonte: EPE, 2024.

Entre 2004 e 2023, a oferta interna de geração de energia elétrica no Brasil cresceu 118,75%, passando de 596,28 para 708,11 TWh. A geração hidráulica, tradicionalmente a principal fonte de energia do Brasil, apresentou flutuações ao longo do tempo, refletindo variações na disponibilidade hídrica devido a fatores climáticos. Em 2021, por exemplo,

houve uma queda significativa para 55,3%, evidenciando os efeitos de uma crise hídrica (EPE, 2024).

A energia eólica destacou-se pelo crescimento consistente, aumentando de 2,05% em 2014 para 13,53% em 2023. A energia solar também apresentou um crescimento exponencial, passando de uma participação insignificante em 2014 (0%) para 7,15% em 2023. A biomassa, por sua vez, manteve uma participação relativamente estável, com leves oscilações, contribuindo para a diversificação da matriz energética (EPE, 2024).

Por outro lado, as fontes fósseis, como gás natural, derivados de petróleo e carvão, registraram uma redução significativa em sua participação. O gás natural, que representava 14,42% da matriz em 2014, caiu para 5,45% em 2023, enquanto os derivados de petróleo e o carvão também tiveram reduções expressivas, indicando uma transição para energias mais limpas e sustentáveis. A energia nuclear manteve uma contribuição estável, girando em torno de 2% (EPE, 2024).

A transição energética no Brasil, marcada pelo crescimento das fontes renováveis, como eólica e solar, abre caminho para soluções inovadoras, como sistemas de geração híbrida. A combinação de diferentes fontes, como solar e eólica, permite otimizar a geração de energia, aproveitando as complementaridades sazonais e diárias de cada tecnologia.

### **2.6.1 Sistema híbrido de energia**

Sistemas de geração de energia elétrica por fontes renováveis oferecem diversas vantagens, sobretudo em relação ao seu potencial de crescimento. Todavia, existem desafios consideráveis em relação à investimentos e confiabilidade dos sistemas, devido a intermitência das fontes de geração (BERRADA; LOUDIYI; EL MRABET, 2020).

Sob a ótica elétrica, especialmente no que tange à operação do sistema, a diversificação das fontes e o efeito portfólio podem contribuir para mitigar os impactos sistêmicos provocados por flutuações instantâneas na disponibilidade de energia. Isso é especialmente relevante na geração de fontes renováveis variáveis, como a eólica e a solar fotovoltaica. Assim, ao manter a injeção de potência máxima em um único ponto de conexão, espera-se uma diminuição na variabilidade da geração, resultando em um aumento no fator de utilização do sistema de transmissão (EPE, 2019).

A integração de fontes de energia elétrica é definida como a união cada vez mais frequente de diversas fontes de energia. As soluções de sistemas de energia híbrida estão muito bem-posicionadas para enfrentar os desafios de gerenciar um sistema de energia

transformável à medida que mais tecnologias de energia renovável são integradas a uma rede que não possui recursos flexíveis adequados para garantir a confiabilidade (BERRADA; LOUDIYI; EL MRABET, 2020).

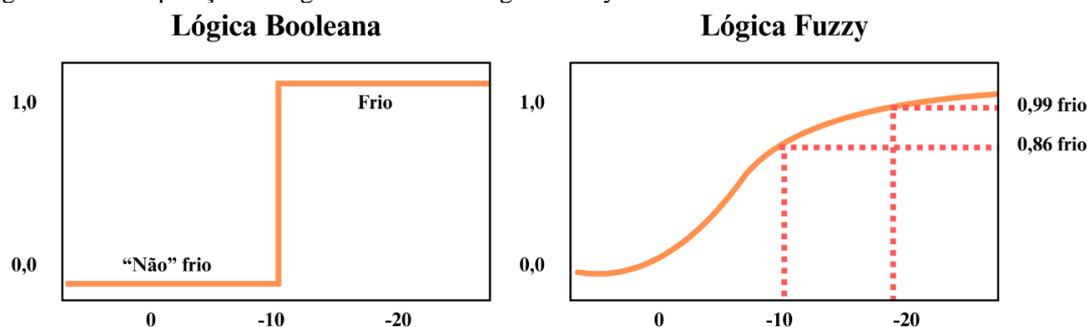
A disponibilidade do potencial energético é um dos critérios fundamentais para a seleção da fonte utilizada em um sistema híbrido. Esse potencial depende diretamente do local onde o sistema está instalado. A avaliação do potencial energético envolve a análise das condições ambientais e geográficas da região, como a intensidade da radiação solar, a velocidade e a constância dos ventos, e a disponibilidade de recursos hídricos, entre outros fatores. A escolha da fonte de energia mais adequada é crucial para garantir a eficiência e a sustentabilidade do sistema híbrido, maximizando a produção de energia renovável e minimizando a dependência de fontes convencionais (BERRADA; LOUDIYI; EL MRABET, 2020).

De acordo com o Atlas Solar do Rio Grande do Sul (2018), a região da Campanha apresenta o maior potencial de integração e complementaridade das fontes solar e eólica, principalmente pela vasta áreas aptas para instalações. A região ainda tem detém mais de 70% das áreas aptas, coincidindo com as de maior potencial de produtividade fotovoltaica do Estado (RIO GRANDE DO SUL, 2018).

## 2.7 Tomada de decisão por lógica Fuzzy

A lógica Fuzzy, introduzida por Lotfi Zadeh em 1965, é uma extensão da lógica clássica que permite trabalhar com valores de verdade que variam entre 0 e 1, ao invés de apenas 0 (falso) e 1 (verdadeiro) (Figura 16). Essa abordagem é especialmente útil em situações em que as fronteiras entre categorias não são claramente definidas e onde a tomada de decisões envolve incertezas e variáveis imprecisas (CHENCI; RIGNEL; LUCAS, 2011).

Figura 16 - Comparação da lógica Booleana e lógica Fuzzy.



Fonte: Adaptado de Pálková; Mašek (2024).

A lógica Fuzzy incorpora o modo de pensar humano em sistemas de controle, permitindo que operem de forma semelhante à tomada de decisões humanas. Um controlador Fuzzy é projetado para seguir um raciocínio dedutivo, assegurando que as conclusões sejam baseadas em informações já conhecidas e em um conjunto de regras predefinidas (SIMOES; SHAW, 2007).

A lógica Fuzzy foi utilizada pela primeira vez em 1974, em Londres, para projetar um controlador Fuzzy experimental para motores a vapor. Este sistema lógico pode ser descrito como um sistema lógico caracterizado pelo conceito de falsidade parcial, onde as declarações podem assumir valores de verdade entre completamente verdadeiros e completamente falsos. Diferentemente da lógica binária ou booleana, que lida apenas com valores de verdadeiro (1) e falso (0), a lógica Fuzzy não possui cortes claros e interpreta situações com base em porcentagens (PÁLKOVÁ; MAŠEK, 2024).

A lógica Fuzzy é uma extensão da lógica booleana, introduzida pelo Dr. Lotfi Zadeh da Universidade da Califórnia, Berkeley, em 1965. Foi desenvolvida para expressar o conceito de verdade parcial, de maneira que se possam determinar valores entre o limite "completamente verdadeiro" e "completamente falso". Isto significa que um valor lógico difuso é um valor qualquer no intervalo de 0 a 1. A lógica Fuzzy torna-se importante na medida em que o mundo em que vivemos não é constituído por fatos absolutamente verdadeiros ou falsos (SANCHEZ, 2009).

A lógica Fuzzy tem sido amplamente aplicada em diversas áreas, como controle de processos, inteligência artificial, sistemas de recomendação, e até mesmo em sistemas de controle de tráfego e automação industrial. A capacidade da lógica Fuzzy de lidar com incertezas e variáveis (CHENCI; RIGNEL; LUCAS, 2011).

De acordo com Chenci, Rignel e Lucas (2011), as operações entre conjuntos Fuzzy são semelhantes às operações entre conjuntos clássicos, mas adaptadas para lidar com graus de pertinência. Aqui estão algumas operações básicas:

- **União (OR):** A união de dois conjuntos Fuzzy A e B é um novo conjunto C, onde o grau de pertinência de um elemento em C é o máximo dos graus de pertinência desse elemento em A e B.
- **Interseção (AND):** A interseção de dois conjuntos A e B é um novo conjunto C, onde o grau de pertinência de um elemento em C é o mínimo dos graus de pertinência desse elemento em A e B.

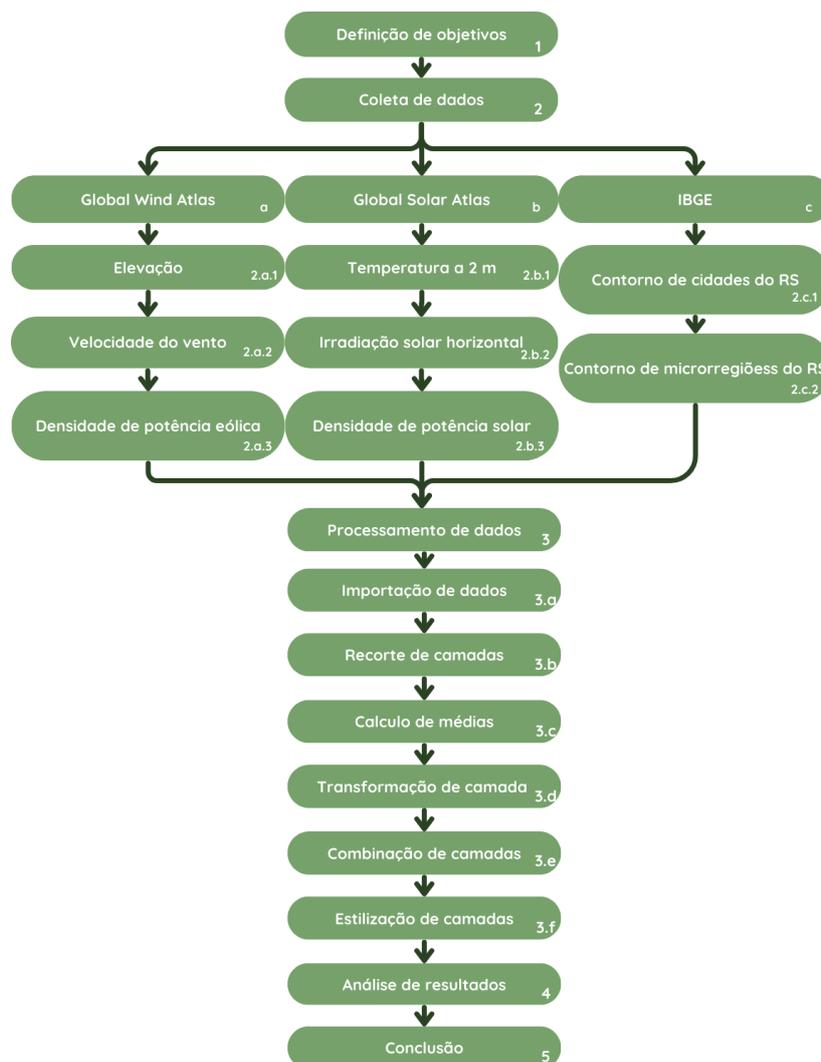
- **Complemento (NOT):** O complemento de um conjunto A é um novo conjunto B, onde o grau de pertinência de um elemento em B é 1 menos o grau de pertinência desse elemento em A.
- **Sistema de produto:** No sistema de produto, a operação de interseção entre dois conjuntos A e B é realizada multiplicando os graus de pertinência dos elementos em A e B. Essa abordagem é útil em sistemas de controle Fuzzy, onde a multiplicação dos graus de pertinência pode representar a interação entre diferentes regras Fuzzy de maneira mais suave e contínua.

### 3 METODOLOGIA

Este estudo tem como objetivo o desenvolvimento de um atlas geoespacial para a avaliação do potencial de microgeração eólica e solar na região da campanha, localizada no Rio Grande do Sul. O atlas visa fornecer uma análise detalhada das condições climáticas e geográficas da região, integrando dados sobre velocidade do vento, irradiação solar, elevação do terreno e outros.

O intuito é avaliar a viabilidade de sistemas de microgeração de energia renovável, utilizando uma metodologia que engloba a coleta de dados geoespaciais, processamento das informações, análise espacial, aplicação de modelos Fuzzy e a construção de mapas temáticos representativos do potencial de geração de energia renovável. Para alcançar esse objetivo, a metodologia foi dividida em etapas, conforme descrito na Figura 17.

Figura 17 - Fluxograma da metodologia do trabalho.



Fonte: Autor (2024).

### 3.1 Coleta de dados

Os dados de velocidade de vento utilizados foram obtidos no banco de dados abertos do Global Wind Atlas, em arquivos no formato TIFF. Esses arquivos contêm informações detalhadas sobre a velocidade do vento em diferentes alturas (10, 50 e 100 metros) para as localidades que compõem a Campanha gaúcha. Dado o foco deste estudo na microgeração de energia, as análises serão concentradas nas velocidades medidas a 10 metros de altura, que são mais representativas para esse contexto. Complementarmente, as informações sobre elevação, essencial para a modelagem do potencial eólico, também foram adquiridas em formato TIFF na mesma base de dados.

Os dados de irradiação solar foram extraídos do site Global Solar Atlas, igualmente em formato TIFF, contemplando informações sobre a irradiação solar global horizontal média, além das densidades de potência solar ao longo dos meses do ano. Essas informações detalhadas abrangem nas localizações que compõem a Campanha gaúcha, fornecendo um panorama completo das condições solares regionais.

Os dados de contorno das microrregiões, cidades e do estado do Rio Grande do Sul foram obtidos a partir dos dados abertos do IBGE, disponibilizados no formato *shapefile*. Por exemplo, os limites municipais representados em formato de polígonos permitem realizar análises geográficas, como o cálculo da área de cada município ou a visualização de sua localização em relação a outras regiões no mapa.

### 3.2 Processamento de dados geoespaciais

A segunda etapa do trabalho compreende o processamento detalhado dos dados previamente adquiridos e descritos, utilizando o *software* QGIS como principal ferramenta. Este software, amplamente reconhecido por sua robustez no tratamento e análise de dados geoespaciais, foi fundamental para a organização, manipulação e extração das informações necessárias para o desenvolvimento do estudo.

O processamento de dados, etapa 3 da metodologia, envolve etapas cuidadosamente planejadas, incluindo a importação e manipulação de camadas raster (camada que contêm a descrição de cada pixel sendo assim salvo como uma matriz) e vetoriais (forma de representação de dados geoespaciais, como contornos de regiões), o recorte das áreas de interesse e o cálculo de médias espaciais para as variáveis analisadas.

As camadas raster, que contêm informações contínuas georreferenciadas, como a velocidade do vento e a irradiação solar, são integradas ao ambiente do QGIS.

Simultaneamente, as camadas vetoriais, representadas por arquivos *shapefile*, incluem os limites administrativos dos municípios e a delimitação geográfica da região da Campanha Gaúcha, estas como a apresentada na Figura 18.

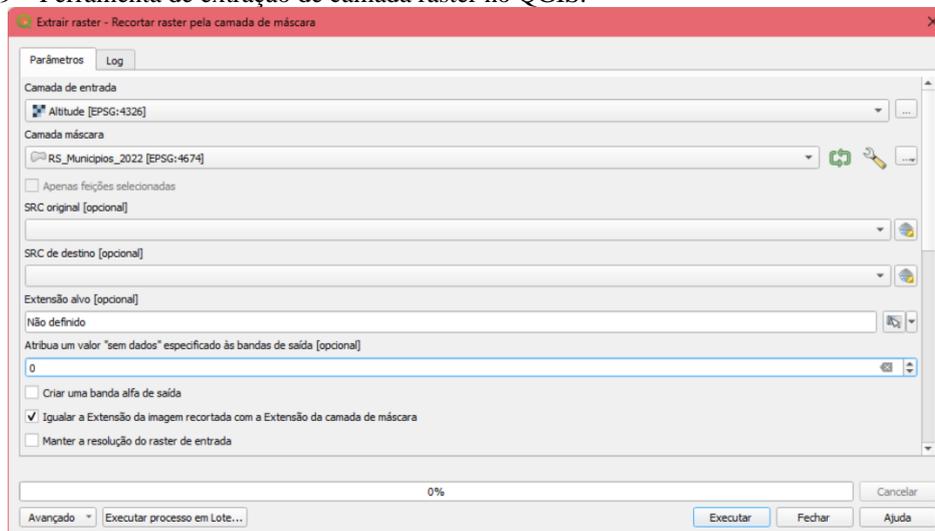
Figura 18 – Contorno externo Rio Grande do Sul.



Fonte: IBGE (2022).

Na etapa 3.a da metodologia, da metodologia, foi realizado a importação de todas as camadas raster de interesse no ambiente de trabalho do QGIS. As camadas raster, que abrangiam informações além dos limites estudados, foram submetidas a um processo de recorte geoespacial para focar exclusivamente na região de interesse. Para isto, utilizou-se uma camada vetorial representando os limites do estado do Rio Grande do Sul, a qual foi previamente ajustada de forma que compreendesse apenas o contorno da região da campanha. Este ajuste foi realizado por meio de ferramentas de edição vetorial no QGIS, apresentada na Figura 19, permitindo que as áreas que não compreendem a região de estudo fossem extraídas.

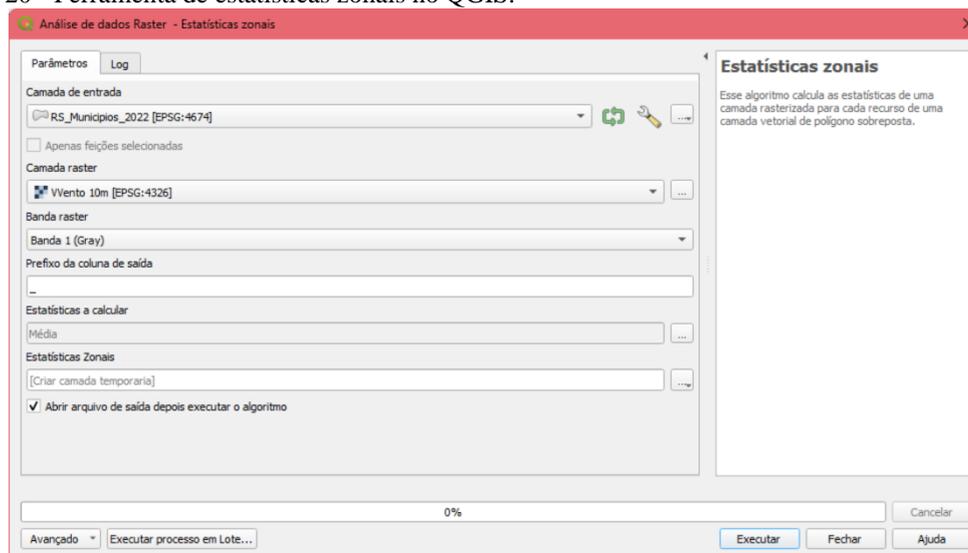
Figura 19 – Ferramenta de extração de camada raster no QGIS.



Fonte: Autor, 2024.

Após o recorte, foi realizada a análise espacial, vide tópico 3.c da metodologia, que inclui o cálculo de médias das variáveis para cada município pertencente à campanha, feito através da ferramenta de extração de estatísticas zonais no QGIS, realizado na seção 3.b da metodologia, sua interface é apresentada na Figura 20. Essa etapa foi essencial para a consolidação de dados que possam ser mais facilmente observados pelo leitor do atlas.

Figura 20 - Ferramenta de estatísticas zonais no QGIS.



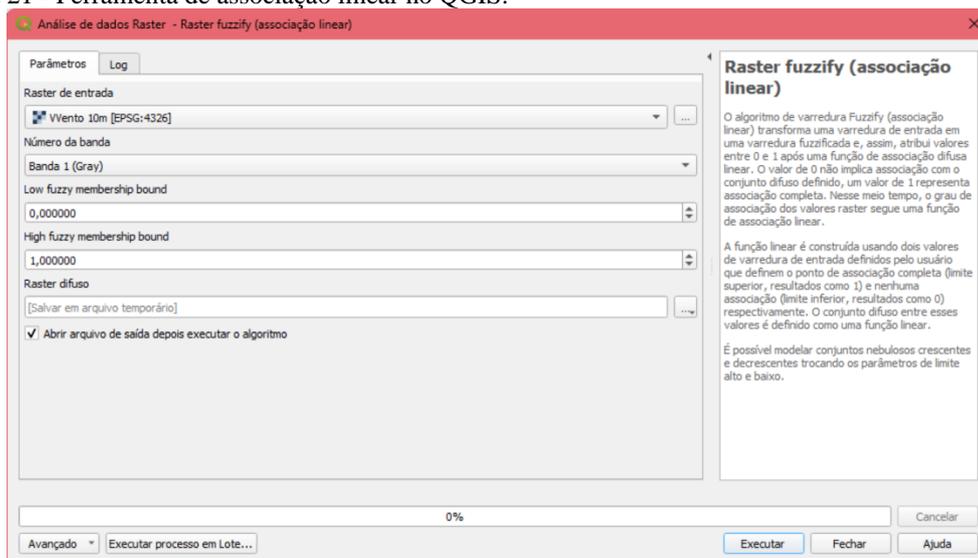
Fonte: Autor, 2024.

O processamento cuidadoso, conforme as etapas anteriores da metodologia, dos dados no QGIS não apenas assegurou a integridade e precisão deles, como também estabeleceu uma base sólida para as etapas subsequentes do trabalho, permitindo a construção de uma análise espacial detalhada e confiável do potencial energético da Campanha Gaúcha.

### 3.3 Conversão para lógica nebulosa e integração de dados raster

Na etapa 3.d, da metodologia, foi utilizada a ferramenta raster fuzzify (associação linear), disponível no QGIS, para transformar as camadas *raster* de entrada em camadas nebulosas, possibilitando a normalização dos valores originais em termos de pertinência com valores variando entre 0 e 1, na Figura 21 pode ser observado a interface da ferramenta. Este processo permitiu a construção de uma representação que reflete o grau de associação dos dados às condições favoráveis para a geração de energia, com base em uma função de associação linear.

Figura 21 - Ferramenta de associação linear no QGIS.



Fonte: Autor, 2024.

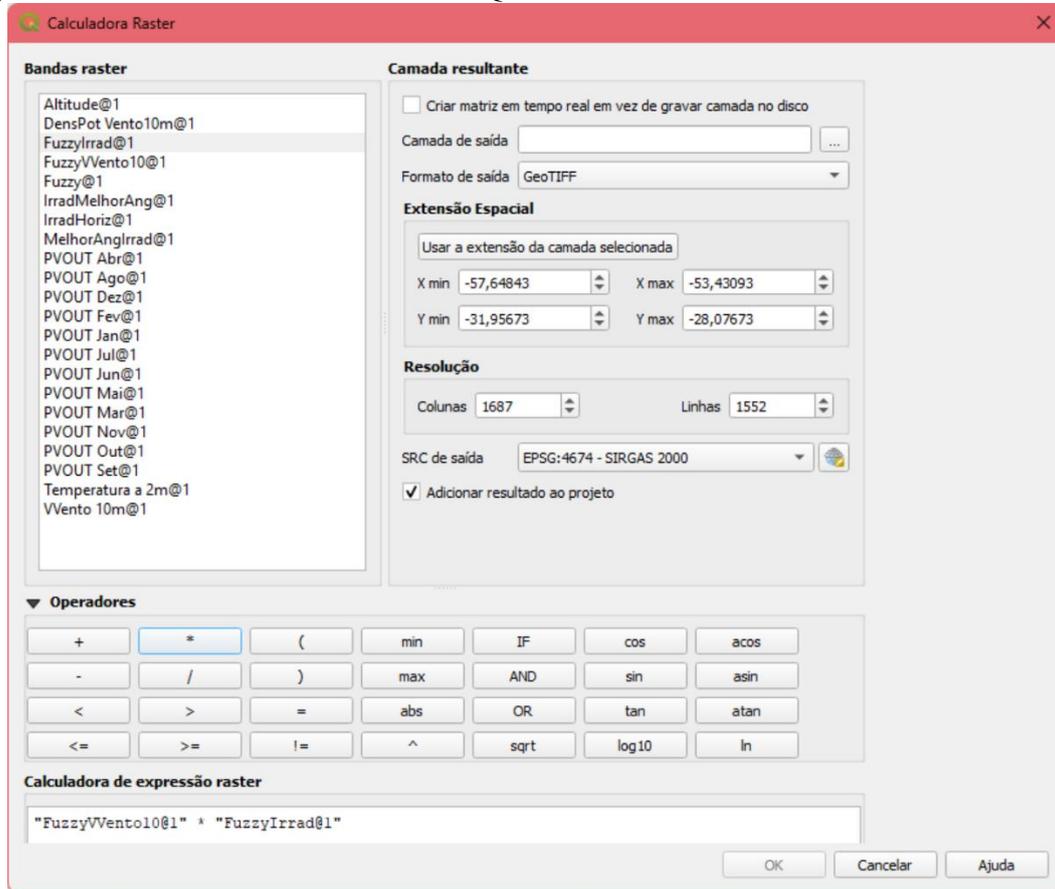
O método de conversão para lógica nebulosa foi baseado na metodologia apresentada no material de Santos *et al.* (2024), onde define que a conversão é configurada a partir de dois parâmetros principais: o limite inferior, que define o valor de entrada abaixo do qual a pertinência é igual a 0 (nenhuma associação ao conjunto difuso), e o limite superior, que define o valor acima do qual a pertinência é 1 (associação total ao conjunto). Entre esses limites, a pertinência dos valores segue uma função linear crescente ou decrescente, dependendo da configuração dos limites. Na Figura 21, é apresentado um exemplo de como é definido estes parâmetros no software QGIS.

Na etapa 3.f da metodologia, duas camadas raster foram preparadas utilizando essa abordagem: uma representando os valores de velocidade do vento a 10 metros de altura e outra representando a irradiação solar global horizontal. A escolha para estas se dá pelo fato de a metodologia escolhida não ser capaz de aplicar regras, necessário para a inserção de outros parâmetros. A conversão para lógica nebulosa foi realizada para normalizar os valores originais dessas variáveis, convertendo-os em graus de pertinência que indicam o quanto cada local atende às condições desejadas para a microgeração de energia. No caso da velocidade do vento, por exemplo, foi possível identificar áreas com maior pertinência em relação à intensidade ideal para microgeração eólica. O mesmo processo foi aplicado para a irradiação solar, indicando as áreas com maior potencial de geração fotovoltaica.

Após a conversão das camadas raster, na etapa 3.e da metodologia, foi realizada a combinação das camadas de velocidade do vento e irradiação solar para criar um mapa

que representasse o potencial híbrido de microgeração na região da campanha. Para isso, foi utilizado o método de multiplicação na calculadora raster do QGIS (Figura 22).

Figura 22 - Ferramenta de calculadora raster no QGIS.



Fonte: Autor, 2024.

Um controlador Fuzzy é projetado para seguir um raciocínio dedutivo, assegurando que as conclusões sejam baseadas em informações já conhecidas e em um conjunto de regras predefinidas. (SIMOES; SHAW, 2007). Este método considera que o grau de pertinência híbrido é dado pelo produto dos graus de pertinência das camadas individuais, enfatizando áreas onde ambas as condições (vento e irradiação) são simultaneamente favoráveis.

Para integrar as informações das camadas convertidas, foram testados diferentes métodos de combinação lógica com base em critérios difusos, como: a combinação por mínimo (AND), a qual retorna o menor valor entre as duas camadas, representando uma abordagem conservadora, onde o potencial híbrido depende do fator menos favorável; a combinação por máximo (OR), a qual retorna o maior valor entre as duas camadas, ideal para análises mais permissivas, onde qualquer fator pode indicar um bom potencial; a combinação por produto (multiplicativo), o qual multiplica os valores das camadas,

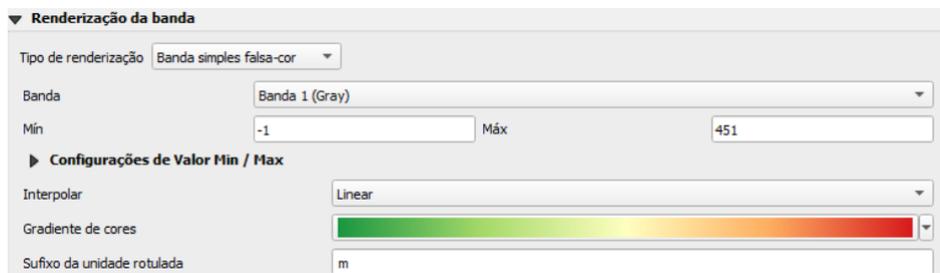
ênfatizando áreas onde ambas as variáveis possuem valores altos, mas penalizando quando um dos fatores é baixo. Portanto, foi utilizado o método de multiplicação por representar de forma equilibrada o potencial híbrido.

### 3.4 Construção de Mapas Temáticos

No software QGIS, após as ações feitas nas seções anteriores, de delimitação, recorte e estudo de médias e padrões de informação, iniciou-se etapa de estilização dos mapas construídos, conforme indicado na etapa 3.f da metodologia.

Com as camadas raster devidamente ajustadas para os limites da região da Campanha, utilizou-se propriedade de simbologia do QGIS, conforme mostrado na Figura 23, que permitiu a aplicação de paletas de cores cuidadosamente selecionadas, adequadas à natureza dos dados e ao objetivo de destacar os pontos de maior relevância de cada variável analisada. A escolha das cores segue critérios que não apenas privilegiam a aparência, mas principalmente, a clareza e a facilidade de interpretação visual.

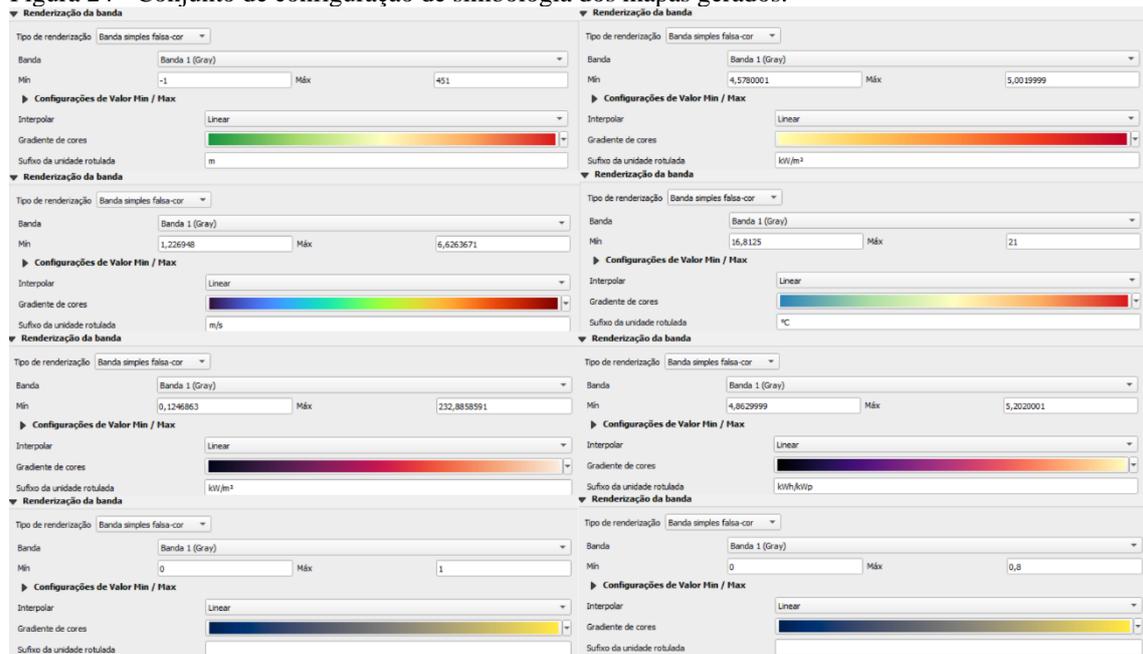
Figura 23 - Exemplo de configuração de simbologia do mapa de altitude.



Fonte: Autor, 2024.

A estilização foi planejada com intuito de ênfatar as variações espaciais nos dados, possibilitando uma identificação intuitiva de padrões e tendências. Foram utilizados gradientes de cores para destacar diferenças entre as áreas, assegurando que as regiões de maior ou menor potencial estivessem claramente perceptíveis, na Figura 24 conta as informações de gradientes utilizados para cada mapa gerado.

Figura 24 - Conjunto de configuração de simbologia dos mapas gerados.



Fonte: Autor, 2024.

## 4 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS

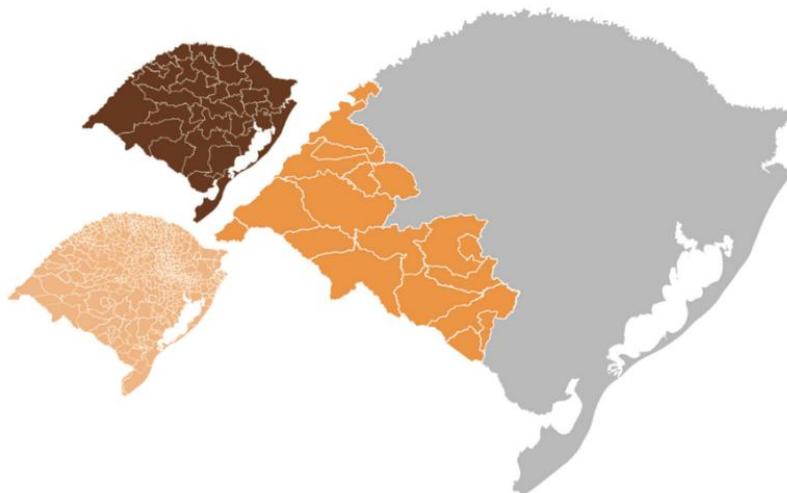
Nesta seção do trabalho são apresentados os resultados obtidos na seção de metodologia e prevista na etapa quatro, da mesma.

### 4.1 Representação gráfica das variáveis analisadas

Os mapas desenvolvidos com os métodos descritos na metodologia foram organizados em diferentes fases de acordo com seu desenvolvimento.

O mapa da região da Campanha é uma intersecção dos mapas de microrregiões do estado em marrom juntamente com o de municípios em rosa, realizando a exclusão das regiões externas a este, resultando assim em um *shapefile*, apresentado na Figura 25 em laranja, com a dimensão exata que se necessita para as análises subsequentes. Suas áreas são apresentadas na Tabela 1.

Figura 25 – Camadas vetoriais de cidades e microrregiões e mapa manipulado das cidades da Campanha.



Fonte: Autor, 2024.

Tabela 1 - Área territorial dos municípios analisados.

Município	Área [km <sup>2</sup> ]	Município	Área [km <sup>2</sup> ]
Aceguá	1551,3	Manoel Viana	1390,7
Alegrete	7800,4	Quaraí	3140,0
Bagé	4090,4	Rosário do Sul	4343,7
Barra do Quaraí	1055,9	Santa Margarida do Sul	955,3
Dom Pedrito	5194,1	Sant'Ana do Livramento	6946,4
Garruchos	803,7	São Borja	3616,7
Hulha Negra	822,6	São Francisco de Assis	2507,0
Itaqui	3748,2	São Gabriel	5053,5
Lavras do Sul	2601,0	Uruguaiana	5702,1
Maçambará	1682,8		

Fonte: Autor, 2024.

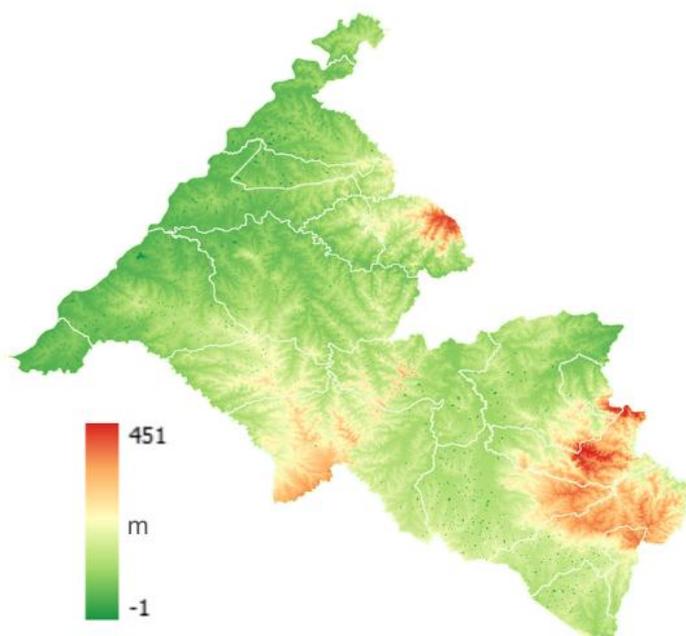
#### 4.1.1 Mapa de elevação do solo

O mapa de elevação do solo da região da Campanha foi elaborado a partir da extração da área de estudo do mapa de elevação do Estado, utilizando técnicas de recorte espacial que asseguraram a delimitação precisa dos municípios analisados. A área recortada apresenta valores de elevação variando de -1 metro, nas regiões mais baixas, até 451 metros, nas áreas de maior altitude. A análise evidenciou quatro principais áreas de elevação significativa, que estão localizadas principalmente nos municípios de Bagé, Lavras do Sul, Hulha Negra e São Borja, onde o relevo desempenha um papel relevante na caracterização geográfica e climática.

Essas áreas de maior elevação estão associadas a formações topográficas que influenciam diretamente fatores como o regime de ventos e a captação de energia solar, aspectos essenciais para a análise do potencial de microgeração de energia renovável. Por outro lado, as regiões de menor elevação estão concentradas nos municípios como Barra do Quaraí e Itaquí, cuja topografia plana pode favorecer características distintas para a implementação de projetos de energia renovável.

A visualização do mapa é apresentada na Figura 26, que ilustra a distribuição espacial das elevações dentro da área de estudo, utilizando uma escala cromática que facilita a identificação dos padrões topográficos.

Figura 26 – Mapa da elevação do solo na Campanha em metros.



Fonte: Autor, 2024.

Além da análise visual, foram calculadas as médias municipais de elevação para fornecer uma visão detalhada e quantitativa de como a altitude varia entre os municípios. Esses valores médios permitem identificar padrões específicos que podem influenciar as decisões técnicas no desenvolvimento de projetos energéticos. A Tabela 2 apresenta as médias de elevação por município, destacando diferenças significativas que podem impactar o potencial de geração de energia renovável, como a maior média em Lavras do Sul, com 269 metros, e a menor média em Barra do Quaraí, com 61,6 metros.

Tabela 2 - Média de altitude dos municípios analisados.

Município	Altitude [m]	Município	Altitude [m]
Aceguá	148,8	Maçambará	113,0
Alegrete	111,8	Manoel Viana	104,2
Bagé	240,2	Quaraí	165,7
Barra do Quaraí	61,6	Rosário do Sul	144,1
Dom Pedrito	185,9	Santa Margarida do Sul	168,5
Garruchos	102,0	Sant'Ana do Livramento	198,9
Hulha Negra	225,2	São Borja	91,7
Itaqui	79,9	São Francisco de Assis	191,2
Lavras do Sul	269,0	São Gabriel	140,7
Uruguaiana	93,3		

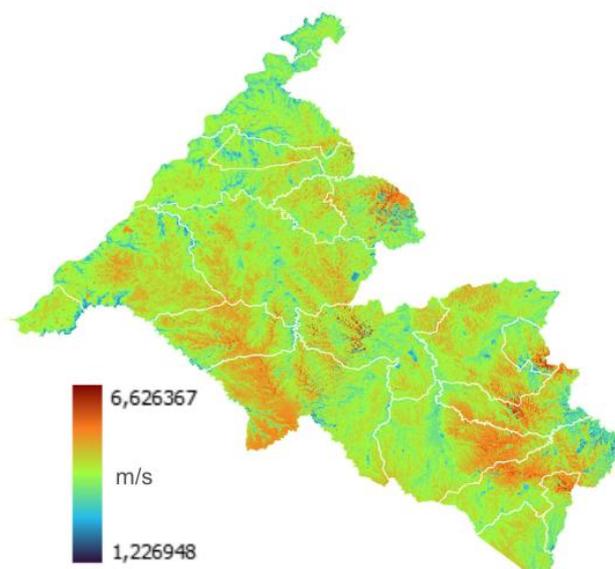
Fonte: Autor, 2024.

Os valores apresentados na tabela reforçam a diversidade topográfica da área estudada e sua relevância para a análise energética. Os resultados obtidos servirão como base para as próximas etapas da pesquisa, integrando os dados topográficos às demais variáveis de interesse, como velocidade do vento e irradiação solar, para criar uma visão mais abrangente do potencial de geração de energia renovável na região.

#### 4.1.2 Mapa de velocidade de vento

O mapa de velocidade de vento a 10 metros de altura em relação ao solo da Campanha teve sua feição retirada de um recorte retangular que compreende todo o Rio Grande do Sul, este pode ser observado na Figura 27. As médias dos limites municipais foram retiradas e apresentadas na Tabela 3 para análise posterior.

Figura 27 - Mapa de velocidade do vento a 10 metros na região da Campanha, em m/s.



Fonte: Autor, 2024.

Tabela 3 - Média de velocidade do vento nos municípios analisados.

Município	Velocidade [m/s]	Município	Velocidade [m/s]
Aceguá	4,0	Maçambará	3,9
Alegrete	4,1	Manoel Viana	4,1
Bagé	4,1	Quaraí	4,3
Barra do Quaraí	3,9	Rosário do Sul	4,0
Dom Pedrito	4,2	Santa Margarida do Sul	4,1
Garruchos	3,5	Sant'Ana do Livramento	4,2
Hulha Negra	4,2	São Borja	3,7
Itaqui	3,9	São Francisco de Assis	4,0
Lavras do Sul	4,2	São Gabriel	4,1
Uruguaiana	4,1		

Fonte: Autor, 2024.

A análise do mapa apresentou um panorama promissor para geração eólica. Onde as médias de velocidade de vento apresentadas variam entre 1,22 m/s em áreas mais encobertas e 6,62 m/s em regiões mais expostas, indicando uma diversidade significativa de densidade de vento na região da Campanha.

Em municípios como Quaraí, Lavras do Sul, Sant'Ana do Livramento e Dom Pedrito, onde as médias de velocidades de vento são mais expressivas, com variações de 4,1 m/s e 4,3 m/s, o potencial de geração de energia é mais alto.

Esses municípios se destacam como polos promissores para geração eólica, graças a topologia favorável e condições atmosféricas ideais, que contribuem para o panorama. A geração de energia nessas áreas tende a ser mais consistente e estável ao longo do tempo.

Por outro lado, regiões com terreno mais planos, como Garruchos e São Borja, apresentam velocidades de vento mais baixas, o que implica menor potencial de geração eólica. Nesses casos, é crucial considerar abordagens adaptativas, como o uso de turbinas de potência mais baixas e a combinação de fontes de geração renováveis para viabilizar os projetos.

### 4.1.3 Mapa de Irradiação Horizontal

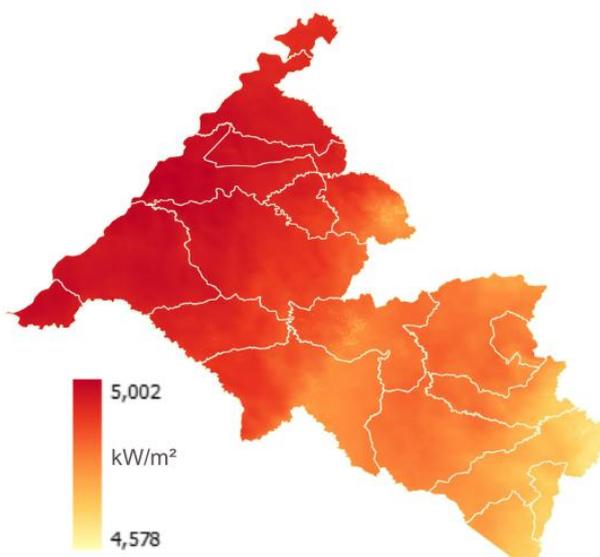
O mapa de irradiação solar horizontal da Campanha, apresentado na Figura 28 teve sua feição retirada de um mapa que representa todo o continente da América. As médias dos limites municipais foi retirado para análise posterior e inseridas na Tabela 4.

Tabela 4 - Média de Irradiação solar horizontal nos municípios analisados.

Município	Irradiação [kW/m <sup>2</sup> ]	Município	Irradiação [kW/m <sup>2</sup> ]
Aceguá	4,72	Maçambará	4,96
Alegrete	4,92	Manoel Viana	4,92
Bagé	4,71	Quaraí	4,91
Barra do Quaraí	4,97	Rosário do Sul	4,82
Dom Pedrito	4,80	Santa Margarida do Sul	4,83
Garruchos	4,09	Sant'Ana do Livramento	4,83
Hulha Negra	4,68	São Borja	4,95
Itaqui	4,97	São Francisco de Assis	4,85
Lavras do Sul	4,76	São Gabriel	4,81
Uruguaiana	4,97		

Fonte: Autor, 2024.

Figura 28 - Mapa final de irradiação solar horizontal da região da Campanha em kW/m<sup>2</sup>.



Fonte: Autor, 2024.

A análise da irradiação solar horizontal na região da Campanha se revela um panorama altamente promissor para geração de energia solar. Com valores que tem

variação entre 4,578 e 5,002 kW/m<sup>2</sup>, observa-se uma distribuição relativamente uniforme, evidenciando condições climáticas favoráveis para o aproveitamento dessa fonte de energia.

Municípios como Barra do Quaraí, Itaqui, Uruguaiana e Maçambará, que possuem valores próximos ao limite superior, são apresentadas como áreas estratégica para a instalação de sistemas fotovoltaicos. Mesmo que em localidades como Hulha Negra com 4,68 kW/m<sup>2</sup> e São Francisco de Assis com 4,85 kW/m<sup>2</sup> apresentem valores ligeiramente inferiores, elas continuam com sendo opções viáveis para geração solar. Esses dados indicam que toda a região da Campanha dispõe de condições adequadas para integrar em sistemas de microgeração de energia.

#### 4.1.4 Mapa de temperatura do ar

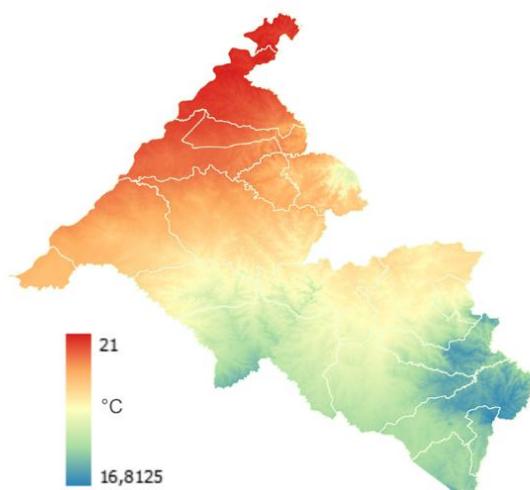
O mapa de temperatura do ar, apresentado na Figura 29 teve a feição da campanha retirada de um mapa mundo, disponibilizado pelo Global Solar Atlas, onde apresenta as medidas de temperatura do ar a uma altura de 2 metros da superfície. As médias de temperatura de cada município foi retirada e alocadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Média de temperatura do ar nos municípios analisados.

Município	Temperatura [°C]	Município	Temperatura [°C]
Aceguá	17,8	Maçambará	20,4
Alegrete	19,6	Manoel Viana	19,9
Bagé	17,6	Quaraí	19,9
Barra do Quaraí	19,2	Rosário do Sul	18,9
Dom Pedrito	18,2	Santa Margarida do Sul	18,6
Garruchos	20,8	Sant'Ana do Livramento	18,3
Hulha Negra	17,5	São Borja	20,7
Itaqui	20,4	São Francisco de Assis	19,5
Lavras do Sul	17,8	São Gabriel	18,9
Uruguaiana	19,8		

Fonte: Autor, 2024.

Figura 29 - Mapa de temperatura a 2 metros de altura em °C.



Fonte: Autor, 2024.

A variação de temperatura média anual da região da Campanha, que tem oscilação de 16,81°C à 21 °C, tem influência direta e indireta na geração de energia, tanto eólica quanto solar.

Em sistemas fotovoltaicos, temperaturas mais elevadas, como as observadas em Guarruchos, Itaqui e São Francisco de Assis, podem ocasionar a redução da eficiência de módulos fotovoltaicos. Neste sentido, os municípios que apresentam temperatura mais amenas, como Hulha Negra, Bagé, Lavras do Sul e Aceguá, apresentam condições mais favoráveis para geração solar com mais eficiência.

Para a geração eólica, a temperatura ambiente pode ser um diferencial a se considerar, mesmo que sua influência seja indireta, devido a ela afetar a densidade do ar, que por sua vez influencia a disponibilidade de ventos.

A análise das temperaturas médias da região é essencial para o planejamento de projetos de geração de energia solar e eólica, permitindo otimizar tanto o desempenho quanto os custos de operação de sistemas instalados.

#### **4.1.5 Mapas de densidade de potência**

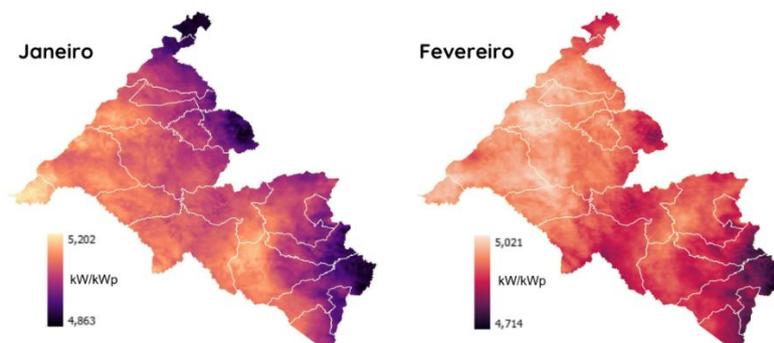
Os mapas de densidade de potência da Campanha, tanto solar quanto eólico foram extraídos de mapas de densidade do Brasil.

### 4.1.5.1 Solar

A análise da densidade de potência solar ao longo do ano na região da Campanha, oferece um panorama abrangente do potencial energético solar na região, evidenciando tanto a riqueza de recursos disponíveis quanto sua variabilidade sazonal.

Nos primeiros anos do ano, se destacam janeiro e fevereiro (Figura 30), cujas densidades de potência solar atingem os valores mais elevados, com valores máximos de 5,202 kW/kWp e 5,021 kW/kWp, respectivamente. Essa performance reflete a alta disponibilidade de radiação solar durante o verão, com destaque nas regiões de Uruguaiana e Alegrete, onde a intensidade solar se mantém mais constante.

Figura 30 - Mapa de densidade de potência solar nos meses de janeiro e fevereiro em kW/kWp.



Fonte: Autor, 2024.

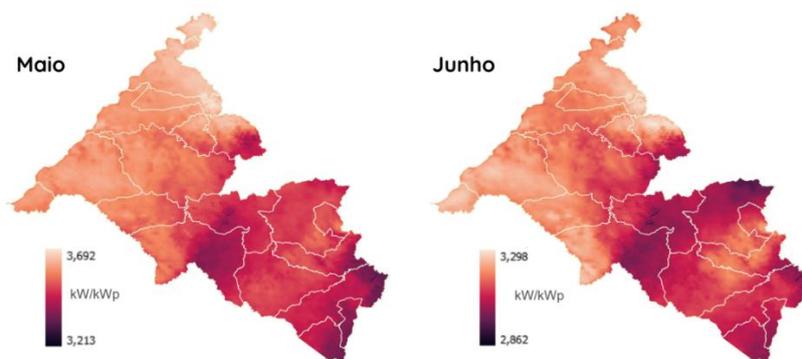
A partir de março (Figura 31), inicia-se um declínio gradual, com valor máximo de 4,878 kW/kWp, culminando em junho (Figura 32), quando registra-se o ponto mais baixo do semestre. Esse decréscimo é atribuído à transição para o outono e inverno, marcados por dias mais curtos e com menor índices de irradiação. Apesar disso, as áreas centrais e ocidentais da região da Campanha ainda apresentam condições favoráveis para a geração de energia solar.

Figura 31 - Mapa de densidade de potência solar nos meses de março e abril em kW/kWp.



Fonte: Autor, 2024.

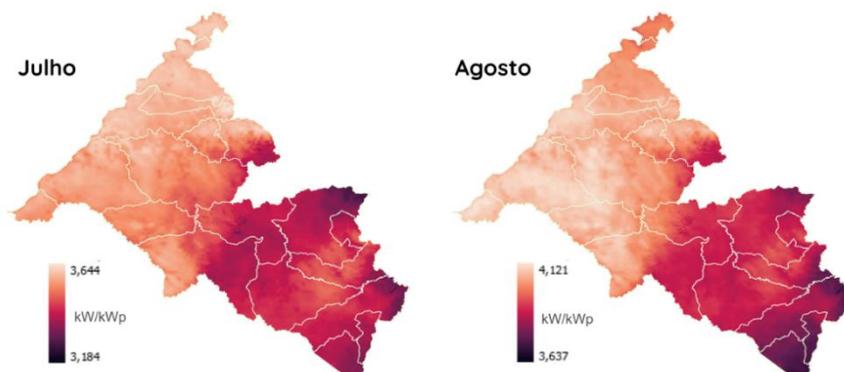
Figura 32 - Mapa de densidade de potência solar nos meses de maio e junho em kW/kWp.



Fonte: Autor, 2024.

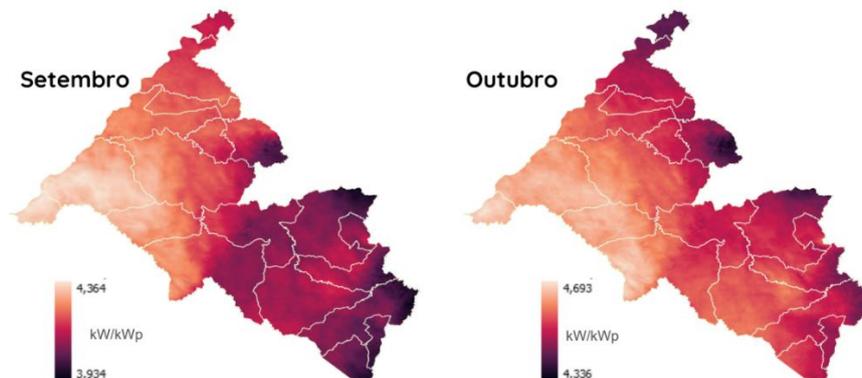
No segundo semestre a densidade de potência atinge seu ponto mais baixo em julho com 3,644 kW/kWp (Figura 33), entretanto uma recuperação gradual é observada nos meses subsequentes. Agosto e setembro (Figura 34) já apresentam aumento considerável e em outubro os valores chegam a 4,693 kW/kWp.

Figura 33 - Mapa de densidade de potência solar nos meses de julho e agosto em kW/kWp.



Fonte: Autor, 2024.

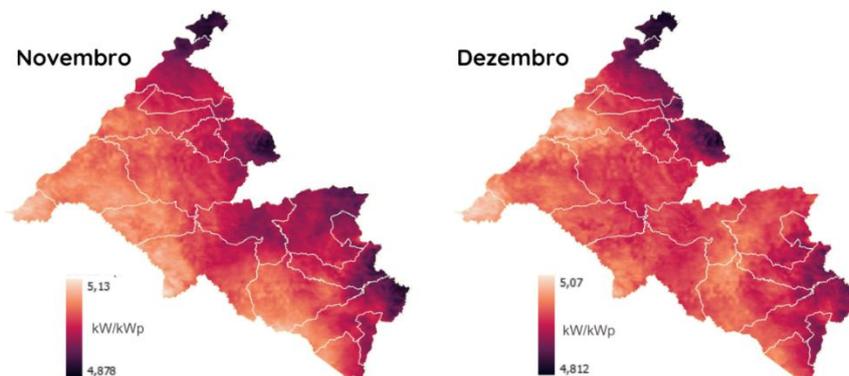
Figura 34 - Mapa de densidade de potência solar nos meses de setembro e outubro em kW/kWp.



Fonte: Autor, 2024.

Nos meses finais do ano, novembro e dezembro (Figura 35), trazem novamente densidades de potência próximas aos níveis máximos. Esse padrão reflete o retorno das condições de verão, com dias mais longos e de irradiação solar mais intensa.

Figura 35 - Mapa de densidade de potência solar nos meses de novembro e dezembro em kW/kWp.



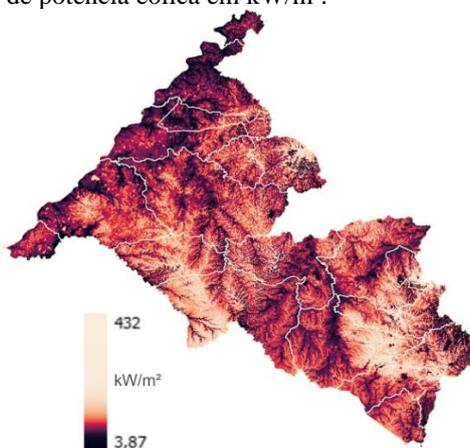
Fonte: Autor, 2024.

Os dados apresentados revelam um potencial solar significativo na Região da Campanha, regiões oeste e noroeste se destacando pela constância e intensidade da irradiação ao longo do ano. A variabilidade sazonal, entretanto, exige estratégias de planejamento energético para complementar meses de menor geração de energia.

#### 4.1.5.2 Eólica

Na Figura 36, através da análise, destaca que as áreas com menor densidade de potência, marcadas por tons mais escuros, concentram-se principalmente na região oeste e em partes da Campanha Gaúcha. Nessas regiões, valores baixos, com um mínimo registrado de aproximadamente 3,88 W/m<sup>2</sup>, podem estar associados à topografia mais irregular ou à presença de barreiras naturais que dissipam a energia cinética dos ventos.

Figura 36 - Mapa de densidade de potência eólica em kW/m<sup>2</sup>.



Fonte: Autor, 2024.

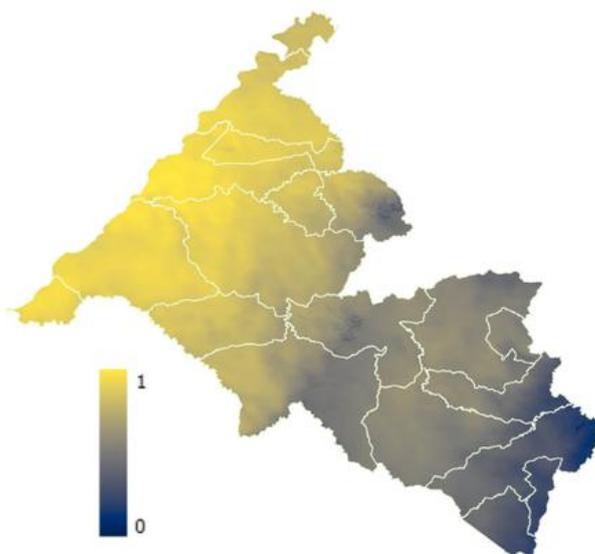
Por outro lado, as áreas mais claras, que indicam maior densidade de potência, estão localizadas na região sudeste. Nesses locais, valores que chegam a 432,69 W/m<sup>2</sup> destacam o potencial eólico elevado, resultado de ventos consistentes e ausência de obstáculos significativos.

#### 4.1.6 Mapas de melhor potencial de microgeração híbrida - solar e eólica

A análise dos potenciais de geração de energia renovável na região da Campanha foi feita com base nos mapas normalizados de irradiação solar, velocidade do vento e na combinação híbrida dessas fontes. Esses dados foram calculados para cada município, permitindo identificar as áreas com maior potencial energético para microgeração, tanto individualmente quanto de forma integrada.

Os valores médios de irradiação solar, que estão representados na Tabela 6, variaram entre 0,26 (Hulha Negra) e 0,93 (Barra do Quaraí e Itaqui). Municípios como Uruguaiana (0,91) e Maçambará (0,89) também apresentaram alto potencial, demonstrando que essas localidades possuem recursos solares abundantes e favoráveis para a geração fotovoltaica. Por outro lado, municípios como Hulha Negra (0,26) e Bagé (0,32) exibiram valores mais baixos, indicando menor disponibilidade solar. O Mapa de Irradiação Solar Normalizada, mostrado na Figura 37, ilustra a distribuição espacial desse recurso, destacando as diferenças entre os municípios.

Figura 37 - Mapa final de irradiação solar normalizada.



Fonte: Autor, 2024.

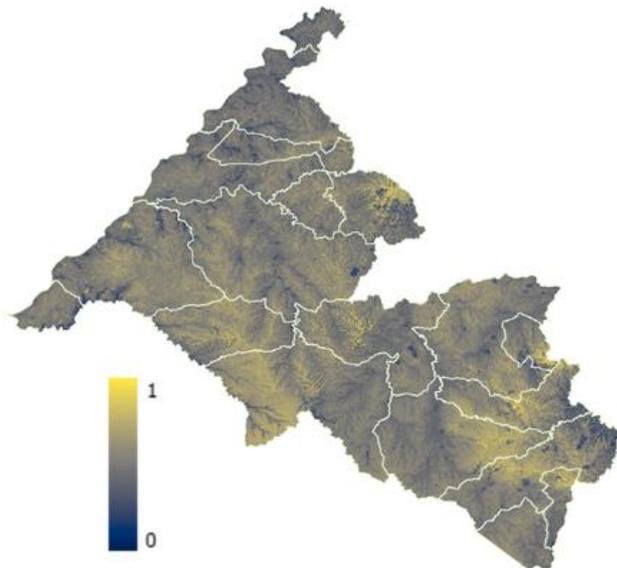
Tabela 6 - Médias de irradiação solar normalizada por município.

Município	Irradiação Solar	Município	Irradiação Solar
Aceguá	0,3301	Maçambará	0,8928
Alegrete	0,8146	Manoel Viana	0,8075
Bagé	0,3279	Quaraí	0,8015
Barra do Quaraí	0,9301	Rosário do Sul	0,5877
Dom Pedrito	0,5382	Santa Margarida do Sul	0,5394
Garruchos	0,8069	Sant'Ana do Livramento	0,6088
Hulha Negra	0,2600	São Borja	0,8781
Itaqui	0,9304	São Francisco de Assis	0,6442
Lavras do Sul	0,4510	São Gabriel	0,6532
Uruguaiana	0,9176		

Fonte: Autor, 2024.

Quanto à velocidade do vento, apresentada na Figura 38 e as médias presentes na Tabela 7 se situaram entre 0,42 (Garruchos) e 0,56 (Dom Pedrito). Municípios como Quaraí (0,56), Dom Pedrito (0,55) e Sant'Ana do Livramento (0,55) apresentaram os maiores valores, destacando-se como áreas com significativo potencial eólico. Em contrapartida, Hulha Negra (0,42) e Garruchos (0,42) tiveram os menores valores, indicando condições menos favoráveis para a geração eólica isolada.

Figura 38 - Mapa final da velocidade de vento a 10 metros normalizada.



Fonte: Autor, 2024.

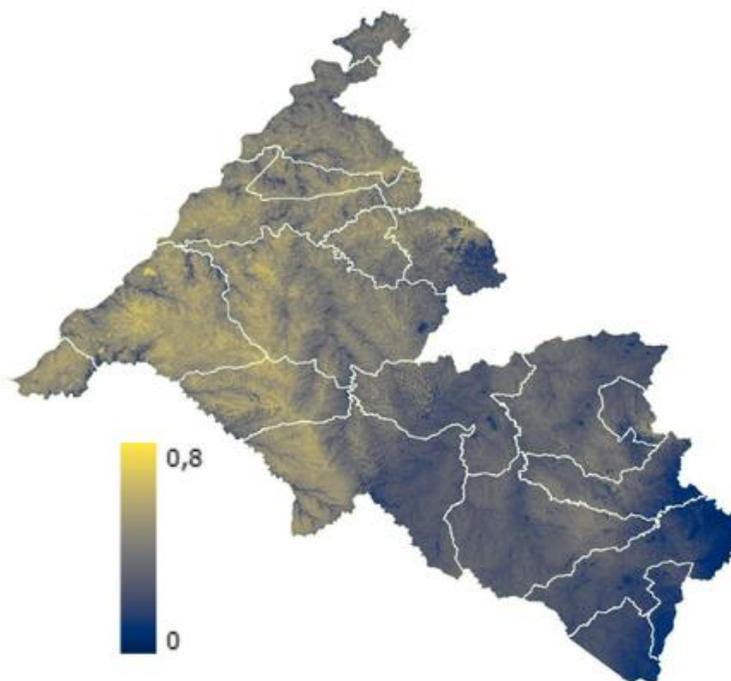
Tabela 7 - Médias da velocidade do vento normalizada por município.

Município	Velocidade do Vento	Município	Velocidade do Vento
Aceguá	0,5151	Maçambará	0,4912
Alegrete	0,5263	Manoel Viana	0,5281
Bagé	0,5318	Quaraí	0,5628
Barra do Quaraí	0,4917	Rosário do Sul	0,5173
Dom Pedrito	0,5468	Santa Margarida do Sul	0,5300
Garruchos	0,4295	Sant'Ana do Livramento	0,5547
Hulha Negra	0,5420	São Borja	0,4626
Itaqui	0,4915	São Francisco de Assis	0,5182
Lavras do Sul	0,5551	São Gabriel	0,5361
Uruguaiana	0,5260		

Fonte: Autor, 2024.

Na análise integrada, que combinou os mapas normalizados de irradiação solar e velocidade do vento, os valores médios, detalhados na Tabela 8, variaram entre 0,14 (Hulha Negra) e 0,48 (Uruguaiana). Municípios como Barra do Quaraí (0,46) e Itaqui (0,46) também se destacaram, evidenciando excelentes condições para projetos híbridos de geração renovável.

Figura 39 - Mapa final de potencial híbrido solar e eólico.



Fonte: Autor, 2024.

Tabela 8 - Médias da combinação de irradiação solar e velocidade do vento por município.

Município	Combinação	Município	Combinação
Aceguá	0,1717	Maçambará	0,3870
Alegrete	0,4292	Manoel Viana	0,4272
Bagé	0,1789	Quaraí	0,4529
Barra do Quaraí	0,4598	Rosário do Sul	0,4083
Dom Pedrito	0,2920	Santa Margarida do Sul	0,2870
Garruchos	0,3471	Sant'Ana do Livramento	0,3433
Hulha Negra	0,1442	São Borja	0,4068
Itaqui	0,4574	São Francisco de Assis	0,3383
Lavras do Sul	0,2559	São Gabriel	0,2948
Uruguaiana	0,4831		

Fonte: Autor, 2024.

## 4.2 Análise final

A Tabela 9 tem como objetivo compilar e centralizar as informações adquiridas ao longo do nosso trabalho em um único lugar. Ela reúne dados essenciais sobre diversos municípios da região da Campanha Gaúcha, incluindo área, altitude, velocidade do vento, irradiação solar, temperatura, e as respectivas normalizações de irradiação solar e velocidade do vento a 10 metros. Além disso, a tabela apresenta uma combinação desses fatores, facilitando a análise comparativa e a visualização das variáveis estudadas. Dessa forma, ela serve como uma ferramenta prática e eficiente para a consulta rápida e a compreensão dos dados coletados.

Tabela 9 - Conjunto de dados obtidos.

Município	Área [km <sup>2</sup> ]	Altitude [m]	Velocidade [m/s]	Irradiação [kW/m <sup>2</sup> ]	Temperatura [°C]	Irradiação Solar normalizada	Velocidade do Vento normalizada	Combinação
Aceguá	1551,3	148,8	4	4,72	17,8	0,3301	0,5151	0,1717
Alegrete	7800,4	111,8	4,1	4,92	19,6	0,8146	0,5263	0,4292
Bagé	4090,4	240,2	4,1	4,71	17,6	0,3279	0,5318	0,1789
Barra do Quaraí	1055,9	61,6	3,9	4,97	19,2	0,9301	0,4917	0,4598
Dom Pedrito	5194,1	185,9	4,2	4,8	18,2	0,5382	0,5468	0,292
Garruchos	803,7	102	3,5	4,09	20,8	0,8069	0,4295	0,3471
Hulha Negra	822,6	225,2	4,2	4,68	17,5	0,26	0,542	0,1442
Itaqui	3748,2	79,9	3,9	4,97	20,4	0,9304	0,4915	0,4574
Lavras do Sul	2601	269	4,2	4,76	17,8	0,451	0,5551	0,2559
Maçambará	1682,8	113	3,9	4,96	20,4	0,8928	0,4912	0,387
Manoel Viana	1390,7	104,2	4,1	4,92	19,9	0,8075	0,5281	0,4272
Quaraí	3140	165,7	4,3	4,91	19,9	0,8015	0,5628	0,4529
Rosário do Sul	4343,7	144,1	4	4,82	18,9	0,5877	0,5173	0,4083
Santa Margarida do Sul	955,3	168,5	4,1	4,83	18,6	0,5394	0,53	0,287
Sant'Ana do Livramento	6946,4	198,9	4,2	4,83	18,3	0,6088	0,5547	0,3433
São Borja	3616,7	91,7	3,7	4,95	20,7	0,8781	0,4626	0,4068
São Francisco de Assis	2507	191,2	4	4,85	19,5	0,6442	0,5182	0,3383
São Gabriel	5053,5	140,7	4,1	4,81	18,9	0,6532	0,5361	0,2948
Uruguaiana	5702,1	93,3	4,1	4,97	19,8	0,9176	0,526	0,4831

Fonte: Autor (2024).

Esses resultados evidenciam e podem ser comparados com a declaração do Mapa Econômico do Rio Grande do Sul (2023), o potencial da região da Campanha para a implementação de projetos de geração de energia renovável, tanto solar quanto eólica. Além disso, o mapeamento híbrido revelou áreas estratégicas para aproveitamento combinado, que podem maximizar a eficiência e a confiabilidade dos sistemas de geração.

Tais informações são fundamentais para o planejamento energético regional e para a tomada de decisões relacionadas a investimentos e políticas públicas na transição energética sustentável.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento de um Atlas Energético para microgeração Híbrida na região da Campanha permitiu identificar de forma abrangente e detalhada, o potencial energético da região, considerando as fontes solar e eólica em abordagens híbridas. A metodologia aplicada, que inclui coleta, processamento de dados climáticos no Software QGIS, normalização de escalas e combinações de dados, demonstrou ser eficaz na análise de variáveis complexas e na modelagem de incertezas, resultando em representações precisas e úteis do potencial energético da região.

Os mapas temáticos gerados apresentaram informações detalhadas sobre o potencial energético da região. Observou-se que as condições climáticas, como altos níveis de irradiação solar e velocidades de vento consistentes em altitudes específicas, favorecem a instalação de sistemas de geração híbrida. Como resultado, foi possível identificar áreas onde a combinação de fontes solares e eólicas oferece sinergia, maximizando o aproveitamento energético.

Um ponto importante a ser destacado é que, diferentemente de outros atlas, como o Atlas Eólico do Rio Grande do Sul, o presente trabalho foca exclusivamente na microgeração. Isso é evidente na escolha da altura de análise do vento, fixada em 10 metros, que reflete as condições reais de sistemas de pequena escala voltados para microgeração. Tal abordagem diferencia este estudo, pois busca atender diretamente às necessidades de pequenos produtores e comunidades descentralizadas, ao invés de priorizar grandes projetos de geração.

Além das condições naturais favoráveis, a análise revelou que a topografia da região influencia diretamente o potencial de geração. Áreas de maior elevação apresentaram melhores condições para aproveitamento do vento, enquanto regiões de menor variação altimétrica demonstraram alta eficiência na captação de energia solar. Por outro lado, a geração eólica mostrou-se mais estável ao longo do ano, complementando a variabilidade sazonal da energia solar.

Por fim, o trabalho contribui para o fortalecimento da independência energética regional, ao mesmo tempo em que promove práticas sustentáveis alinhadas aos objetivos globais de combate às mudanças climáticas. Espera-se que este atlas sirva como um modelo replicável para outras regiões, fomentando o uso racional de recursos naturais e incentivando iniciativas que combinem inovação tecnológica, desenvolvimento socioeconômico e responsabilidade ambiental.

## REFERÊNCIAS

ABDI, H. et al. Energy Storage Systems. Em: Distributed Generation Systems. [s.l.]: Elsevier, 2017. p. 333–368.

ALVES, R. C. M. de et al. Descrição e caracterização dos fenômenos atmosféricos mais frequentes no território brasileiro. Elaborado por: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Laboratório de Meteorologia e Qualidade do Ar. Para: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. Programa Energia Brasileiro-Alemão. Ndo programa, p. 4-001.00, 2007.

BERRADA, A.; LOUDIYI, K.; EL MRABET, R. Introduction to hybrid energy systems. Academic Press, 2020.

BRASIL. Lei n.º 14.300, de 06 de janeiro de 2022. Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2022.

CHENCI, Gabriel P.; RIGNEL, Diego G. S.; LUCAS, Carlos A. Uma Introdução à Lógica Fuzzy. Revista Eletrônica de Sistemas de Informação e Gestão Tecnológica, v. 1, n. 1, 2011. Disponível em: <http://periodicos.unifacef.com.br/resiget/article/view/153>. Acesso em: 16 nov. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Anuário Estatístico de Energia Elétrica. Brasília: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>. Acesso em: 18 dez. 2024.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL (FIERGS). Mapa Econômico do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: FIERGS, 2023. Disponível em: <https://digital.jornaldocomercio.com/jcomercio/2023/07/10/1818b2/issue10906.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2024.

GLOBAL SOLAR ATLAS. About. Disponível em: <https://globalsolaratlas.info/support/about>. Acesso em: 4 set. 2024.

GLOBAL WIND ATLAS. Introduction. Disponível em: <https://globalwindatlas.info/en/about/introduction>. Acesso em: 4 set. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Malha municipal digital 2022. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>. Acesso em: 21 set. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. World Energy Outlook 2022. IEA, 2022. Disponível no anuário em: Electricity Information - Data product - IEA. Acesso em: 15 jun. 2024.

INTERNET GEOGRAPHY. What is global atmospheric circulation? 2018. Disponível em: <https://www.internetgeography.net/topics/what-is-global-atmospheric-circulation/>. Acesso em: 24 nov. 2024.

MARQUES, V. Vento: o que é, como se forma e tipos de ventos. Toda Materia, 2024. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/vento/>. Acesso em: 24 nov. 2024.

MOREIRA, H. L.; BASTOS, A. M.; SANTOS, R. B. Análise comparativa da viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos e eólicos para microgeração de energia elétrica. Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.59627/cbens.2018.525>.

PÁLKOVÁ, A.; MAŠEK, J. Fuzzy Logic as a Decision-Making Tool for Transport Request Selection. Transportation Research Procedia, v. 77, 2024, p. 116-122. ISSN 2352-1465. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.01.015>.

QGIS Development Team. Manual de Treinamento QGIS. Versão 3.34. Disponível em: [https://docs.qgis.org/3.34/pt\\_BR/docs/training\\_manual/foreword/foreword.html](https://docs.qgis.org/3.34/pt_BR/docs/training_manual/foreword/foreword.html). Acesso em: 24 dez. 2024.

RESOLUÇÃO NORMATIVA nº 482, de 17 de abril de 2012. Agência Nacional de Energia Elétrica, Rio de Janeiro: ANEEL, 2012.

RESOLUÇÃO NORMATIVA nº 687, de 24 de novembro de 2015. Agência Nacional de Energia Elétrica, Rio de Janeiro: ANEEL, 2015.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura. Atlas Eólico do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Secretaria de Minas e Energia, 2014. Disponível em: <Atlas de energias renováveis - Sema - Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura>. Acesso em: 13 ago. 2024.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura. Atlas Solar do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Secretaria de Minas e Energia, 2018. Disponível em: <Atlas de energias renováveis - Sema - Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura>. Acesso em: 22 ago. 2024.

SANCHEZ, Eleazar Cristian Mejia. Controle por Aprendizado Acelerado e Neuro-Fuzzy de Sistemas Servo-Hidráulicos de Alta Frequência. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: [https://www.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0721406\\_09\\_pretextual.pdf](https://www.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0721406_09_pretextual.pdf). Acesso em: 16 nov. 2024.

SANTOS, A. R.; SCARAMUSSA, L. M.; BORGES, L. A. C.; MOREIRA, T. R.; SILVA, J. P. M.; FERRARI, J. L. Operadores Fuzzy: Guia Prático no QGIS. Alegre: CAUFES, 2024. <https://doi.org/10.29327/5407101>.

SANTOS, Dylan da Silva. Descrição de alguns fatores responsáveis pela geração de energia eólica: regime dos ventos, energia dos ventos, aerogerador e pás. [S.l.]: [s.n.], 2022.

SHEZAN, S. A. et al. Effective dispatch strategies assortment according to the effect of the operation for an islanded hybrid microgrid. *Energy Conversion and Management*: X, v. 14, 1 maio 2022.

SINGH, U.; RIZWAN, M. A Feasibility Study and Cost Benefit Analysis of an Off-grid Hybrid System for a Remote Area Electrification. *Solar Compass*, p. 100031, dez. 2022.

STULL, R. *Practical Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmospheric Science - version 1.02b*. Univ. of British Columbia, 2017. 940 p. ISBN 978-0-88865-283-6.

THE NATURE CONSERVANCY. *The Nature of Innovation*. 2021. Disponível em: <https://www.nature.org/en-us/what-we-do/our-insights/perspectives/nature-of-innovation-critical-natural-climate-solutions/>. Acesso em: 16 ago. 2024.

WOLLMANN, C. A.; GALVANI, E. CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA REGIONAL DO RIO GRANDE DO SUL: DOS ESTUDOS ESTÁTICOS AO ENTENDIMENTO DA GÊNESE. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 11, 2012.



ATLAS DE MICROGERAÇÃO  
HÍBRIDA DE ENERGIA  
**REGIÃO DA  
CAMPANHA**

**Trabalho de Conclusão de Curso**  
Carolina Muniz de Oliveira

Este atlas tem como objetivo principal apresentar o potencial energético da região da Campanha, no Rio Grande do Sul, para microgeração híbrida, integrando sistemas solares e eólicos.

Este documento é dividido em seções temáticas que abordam:

- As características naturais da região.
- O potencial solar e eólico individual.
- A integração híbrida de ambas as fontes de energia.

Este atlas faz parte do trabalho de conclusão de curso da discente Carolina Muniz de Oliveira.

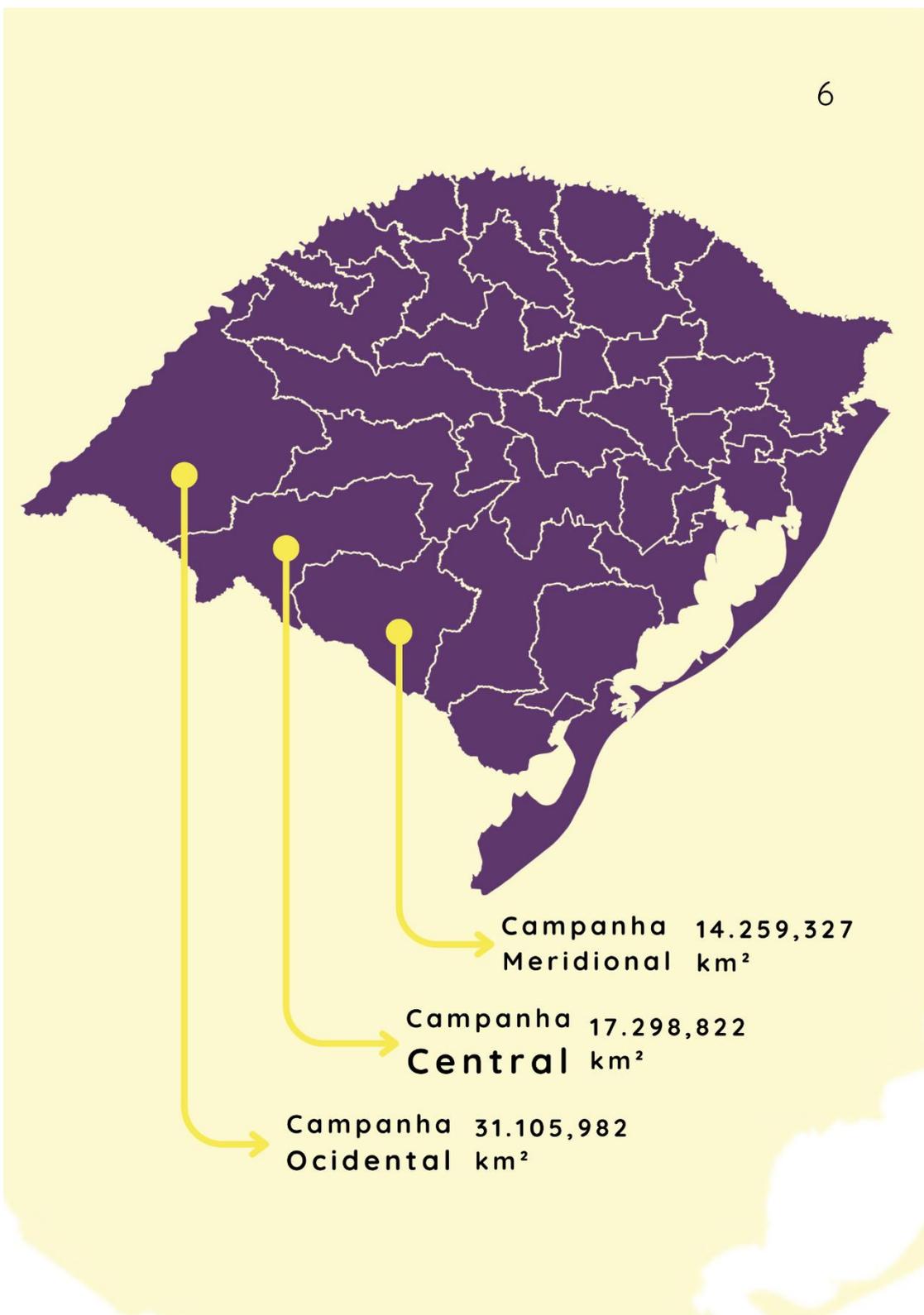
# SUMÁRIO

Caracterização geográfica	4
Mapa elevação do solo	6
Mapa temperatura a 2 metros	7
Mapa velocidade doo vento a 10 metros	8
Mapa irradiação solar horizontal	9
Mapa densidade de potencia eólica	10
Mapa densidade de potencia solar	11
Mapa de irradiação solar normalizada	14
Mapa velocidade do vento normalizada	15
Mapa potencial eólico e solar	16

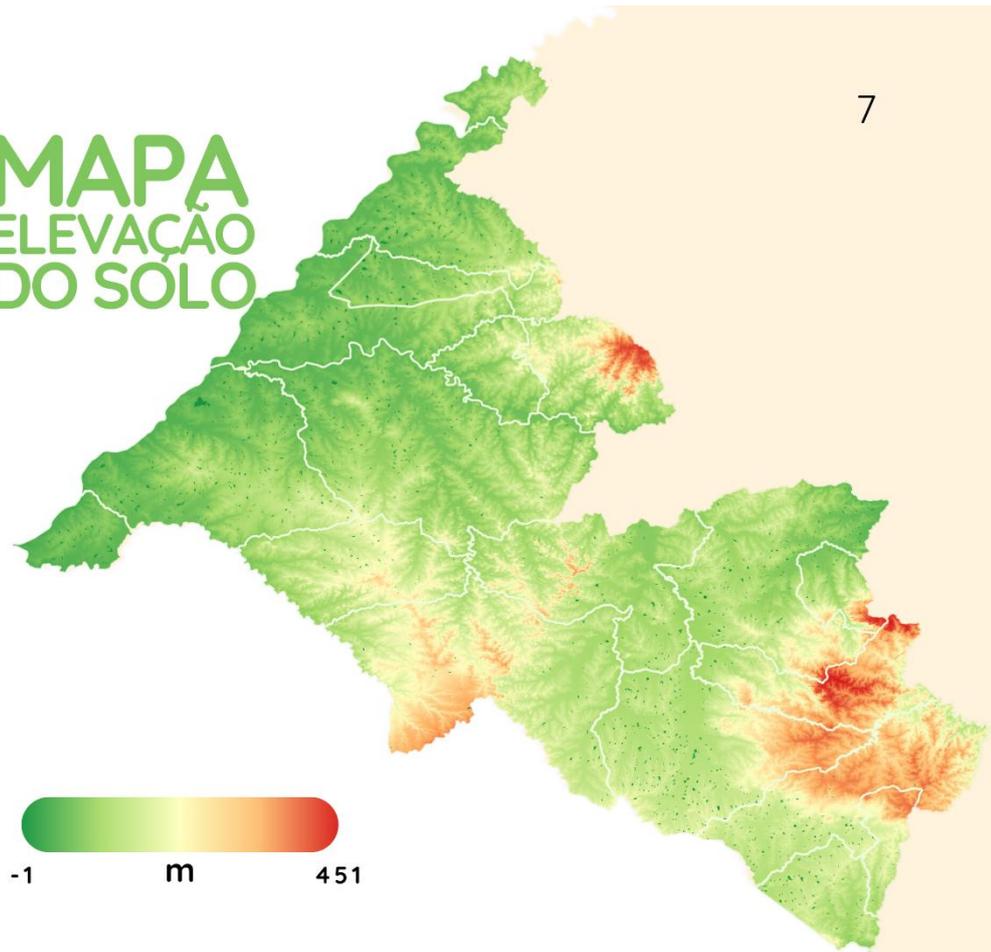
## CARACTERIZAÇÃO GEOGRÁFICA

O Rio Grande do Sul é o estado brasileiro localizado mais ao sul do país, com uma área total de 281.707,151 km<sup>2</sup>. É dividido em 37 microrregiões, sendo as regiões da campanha as de maior extensão, ocupando a primeira, segunda e quinta posições. Sendo estas a região da Campanha Ocidental, Campanha Central e Campanha Meridional.

Município	Área [km <sup>2</sup> ]	Município	Área [km <sup>2</sup> ]
Aceguá	1551,3	Manoel Viana	1390,7
Alegrete	7800,4	Quaraí	3140
Bagé	4090,4	Rosário do Sul	4343,7
Barra do Quaraí	1055,9	Santa Margarida do Sul	955,3
Dom Pedrito	5194,1	Sant'Ana do Livramento	6946,4
Garruchos	803,7	São Borja	3616,7
Hulha Negra	822,6	São Francisco de Assis	2507
Itaqui	3748,2	São Gabriel	5053,5
Lavras do Sul	2601	Uruguaiana	5702,1
Maçambará	1682,8		

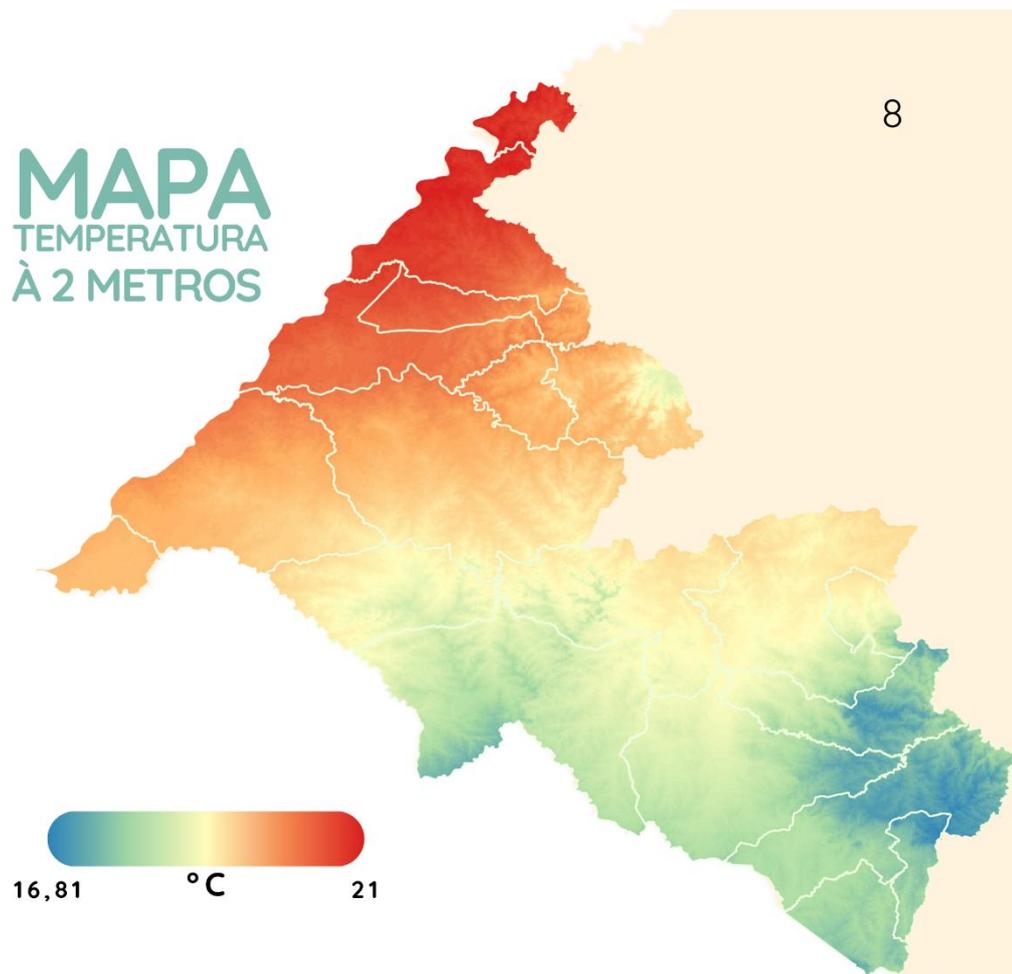


# MAPA ELEVACÃO DO SOLO



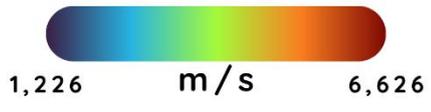
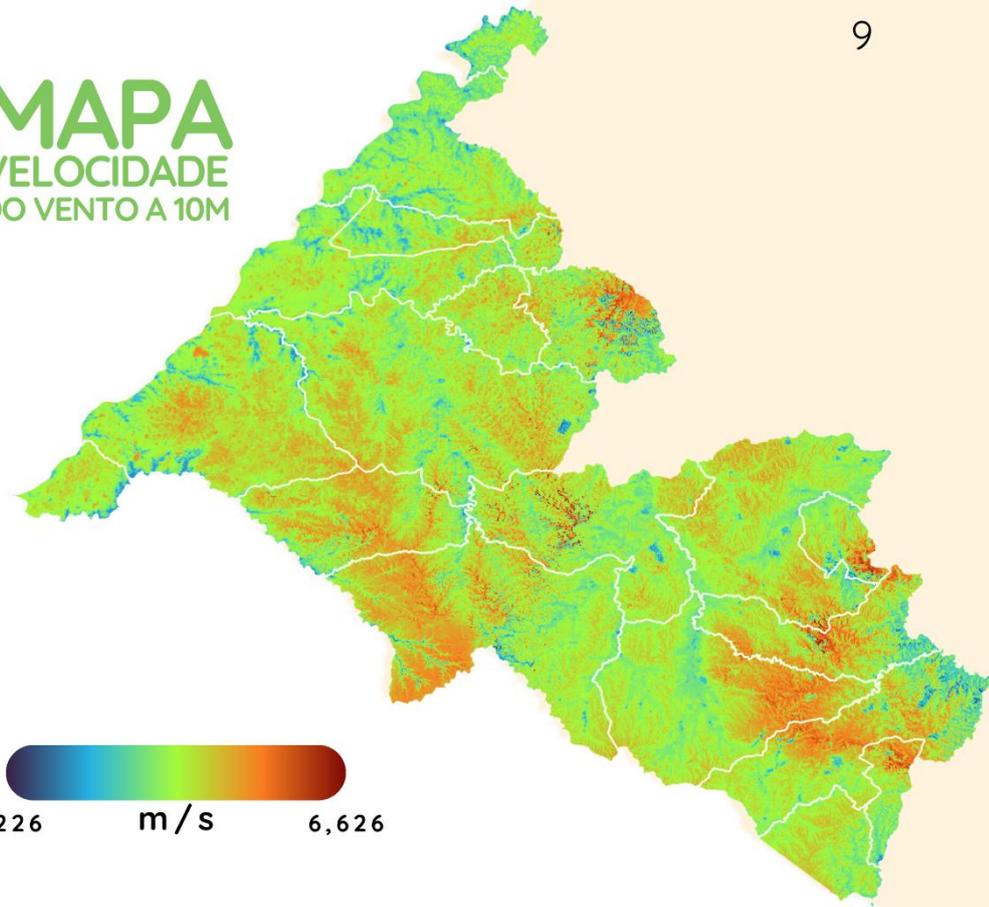
Município	Altitude [m]	Município	Altitude [m]
Aceguá	148,8	Manoel Viana	113
Alegrete	111,8	Quaraí	104,2
Bagé	240,2	Rosário do Sul	165,7
Barra do Quaraí	61,6	Santa Margarida do Sul	144,1
Dom Pedrito	185,9	Sant'Ana do Livramento	168,5
Garruchos	102	São Borja	198,9
Hulha Negra	225,2	São Francisco de Assis	91,7
Itaqui	79,9	São Gabriel	191,2
Lavras do Sul	269	Uruguaiana	140,7
Maçambará	93,3		

# MAPA TEMPERATURA À 2 METROS



Município	Temperatura [°C]	Município	Temperatura [°C]
Aceguá	17,8	Manoel Viana	20,4
Alegrete	19,6	Quaraí	19,9
Bagé	17,6	Rosário do Sul	19,9
Barra do Quaraí	19,2	Santa Margarida do Sul	18,9
Dom Pedrito	18,2	Sant'Ana do Livramento	18,6
Garruchos	20,8	São Borja	18,3
Hulha Negra	17,5	São Francisco de Assis	20,7
Itaqui	20,4	São Gabriel	19,5
Lavras do Sul	17,8	Uruguaiana	18,9
Maçambará	19,8		

# MAPA VELOCIDADE DO VENTO A 10M



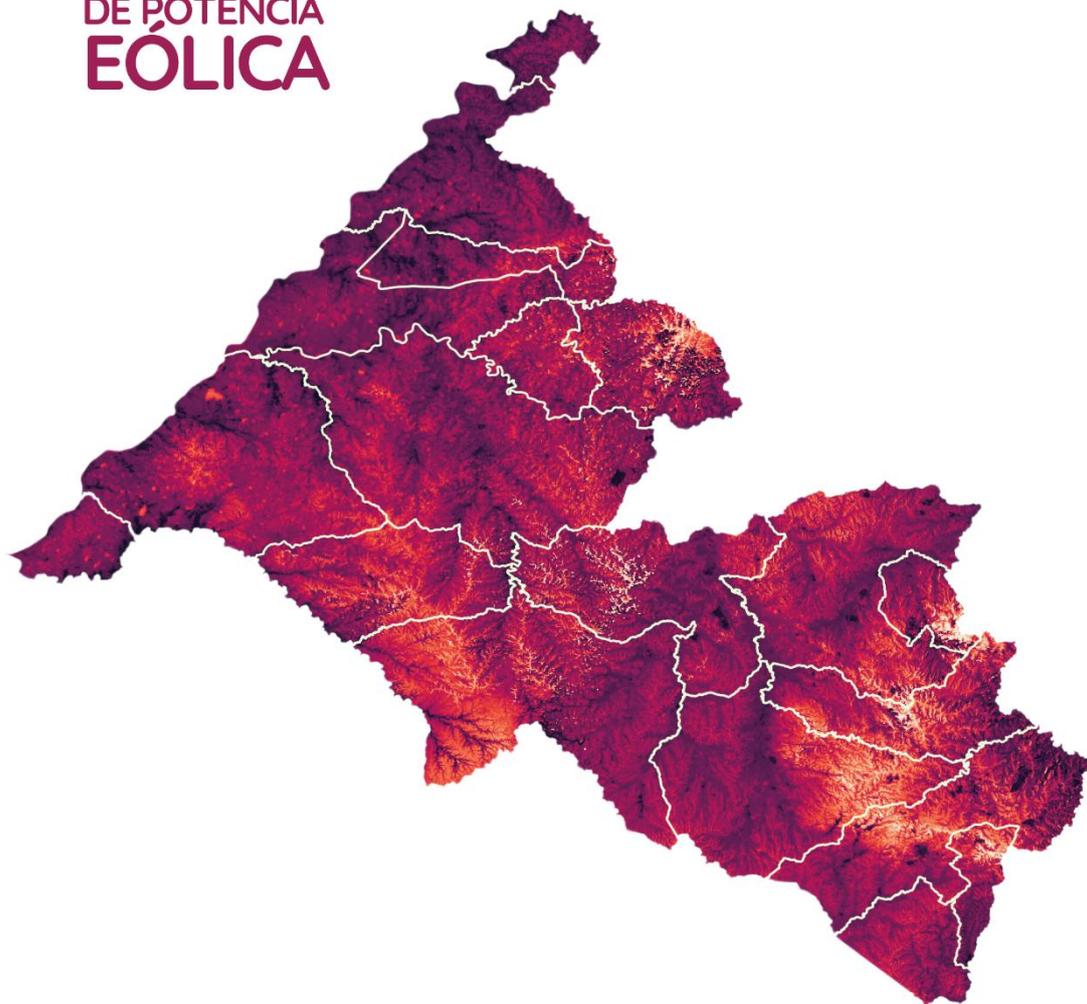
Município	Velocidade [m/s]	Município	Velocidade [m/s]
Aceguá	4,0	Manoel Viana	4,1
Alegrete	4,1	Quaraí	4,3
Bagé	4,1	Rosário do Sul	4,0
Barra do Quaraí	3,9	Santa Margarida do Sul	4,1
Dom Pedrito	4,2	Sant'Ana do Livramento	4,2
Garruchos	3,5	São Borja	3,7
Hulha Negra	4,2	São Francisco de Assis	4,0
Itaqui	3,9	São Gabriel	4,1
Lavras do Sul	4,2	Uruguaiana	4,1
Maçambará	3,9		

# MAPA IRRADIAÇÃO SOLAR HORIZONTAL



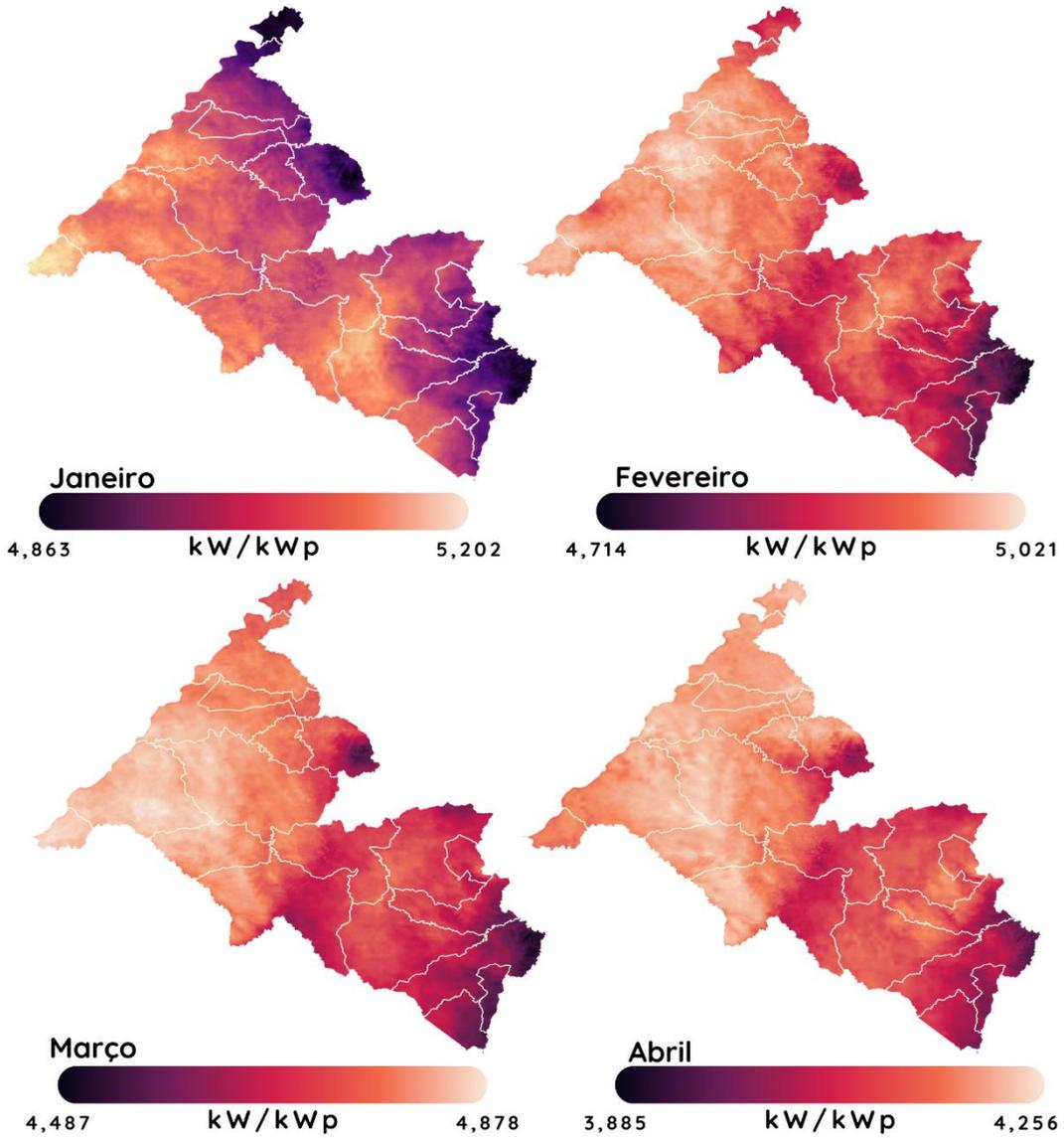
Município	Irradiação [kW/m <sup>2</sup> ]	Município	Irradiação [kW/m <sup>2</sup> ]
Aceguá	4,72	Manoel Viana	4,92
Alegrete	4,92	Quaraí	4,91
Bagé	4,71	Rosário do Sul	4,82
Barra do Quaraí	4,97	Santa Margarida do Sul	4,83
Dom Pedrito	4,80	Sant'Ana do Livramento	4,83
Garruchos	4,09	São Borja	4,95
Hulha Negra	4,68	São Francisco de Assis	4,85
Itaqui	4,97	São Gabriel	4,81
Lavras do Sul	4,76	Uruguaiana	4,97
Maçambará	4,96		

# MAPA DENSIDADE DE POTÊNCIA EÓLICA



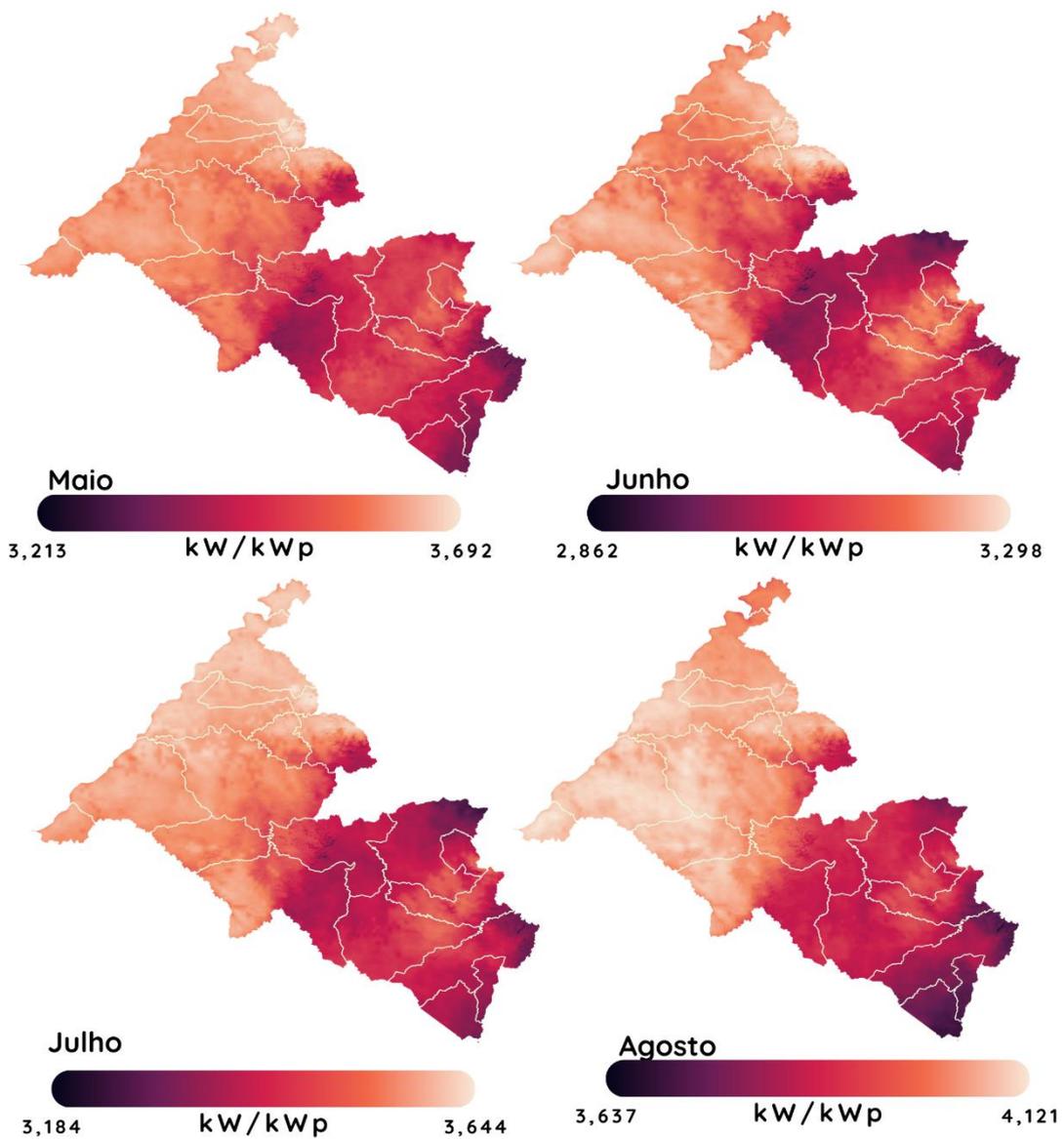
# MAPA DENSIDADE DE POTÊNCIA SOLAR

Valores de densidade de potência solar variando de 3,885 kW/kWp a 5,202 kW/kWp;



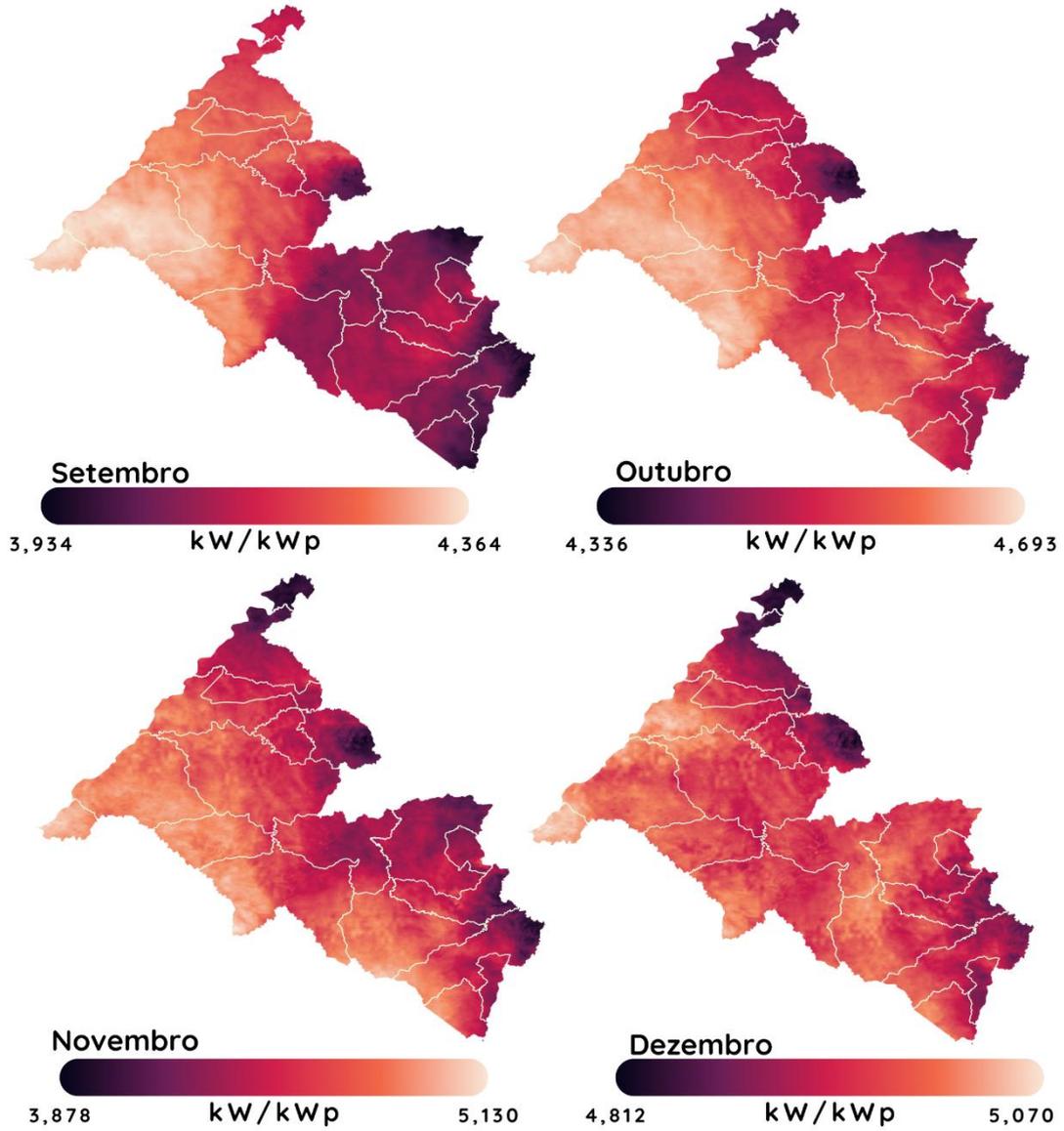
# MAPA DENSIDADE DE POTÊNCIA SOLAR

Valores de densidade de potência solar variando de 2,862 kW/kWp a 4,121 kW/kWp;



# MAPA DENSIDADE DE POTÊNCIA SOLAR

Valores de densidade de potência solar variando de 3,878 kW/kWp a 5,130 kW/kWp;



# MAPA IRRADIAÇÃO SOLAR NORMALIZADA



Município	Irradiação solar	Município	Irradiação solar
Aceguá	0,3301	Manoel Viana	0,8075
Alegrete	0,8146	Quaraí	0,8015
Bagé	0,3279	Rosário do Sul	0,5877
Barra do Quaraí	0,9301	Santa Margarida do Sul	0,5394
Dom Pedrito	0,5382	Sant'Ana do Livramento	0,6088
Garruchos	0,8069	São Borja	0,8781
Hulha Negra	0,2600	São Francisco de Assis	0,6442
Itaqui	0,9304	São Gabriel	0,6532
Lavras do Sul	0,4510	Uruguaiana	0,9176
Maçambará	0,8928		

# MAPA EOLICO NORMALIZADO



Município	Velocidade vento	Município	Velocidade vento
Aceguá	0,5151	Manoel Viana	0,5281
Alegrete	0,5263	Quaraí	0,5628
Bagé	0,5318	Rosário do Sul	0,5173
Barra do Quaraí	0,4917	Santa Margarida do Sul	0,5300
Dom Pedrito	0,5468	Sant'Ana do Livramento	0,5547
Garruchos	0,4295	São Borja	0,4626
Hulha Negra	0,5420	São Francisco de Assis	0,5182
Itaqui	0,4915	São Gabriel	0,5361
Lavras do Sul	0,5551	Uruguaiana	0,5260
Maçambará	0,4912		

# MAPA POTENCIAL EOLICO E SOLAR



Município	Combinação	Município	Combinação
Aceguá	0,1717	Manoel Viana	0,4272
Alegrete	0,4292	Quaraí	0,4529
Bagé	0,1789	Rosário do Sul	0,4083
Barra do Quaraí	0,4598	Santa Margarida do Sul	0,2870
Dom Pedrito	0,2920	Sant'Ana do Livramento	0,3433
Garruchos	0,3471	São Borja	0,4068
Hulha Negra	0,1442	São Francisco de Assis	0,3383
Itaqui	0,4574	São Gabriel	0,2948
Lavras do Sul	0,2559	Uruguaiana	0,4831
Maçambará	0,3870		

# MAPA POJENCIAL EOLICO E SOLAR

