



WORK VIII 2025 Eta

WORKSHOP EM MODELAGEM NUMÉRICA DE TEMPO, CLIMA
E MUDANÇAS CLIMÁTICAS UTILIZANDO O MODELO ETA

Impacto das Mudanças Climáticas nos recursos Eólico e Solar

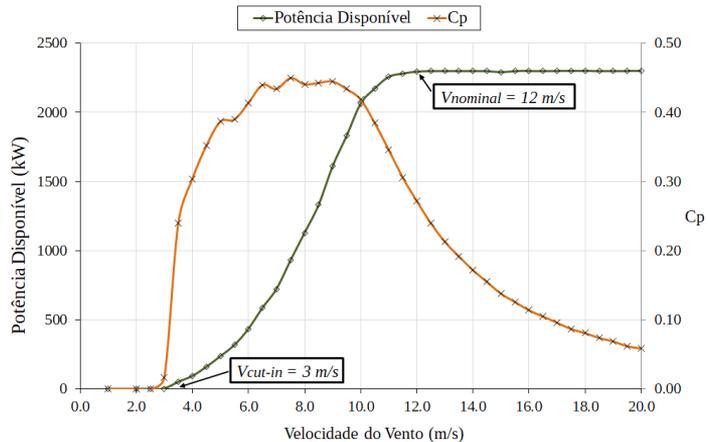
André R. Gonçalves

Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia
Divisão de Impactos, Adaptação e Vulnerabilidades
Coordenação-Geral de Ciências da Terra
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Conversão de Potência

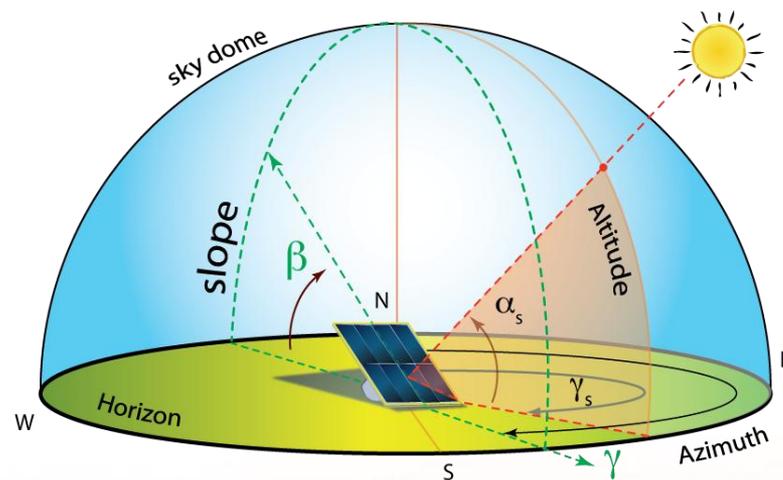
Eólica

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot C_p \rho V(z)^3$$



Solar

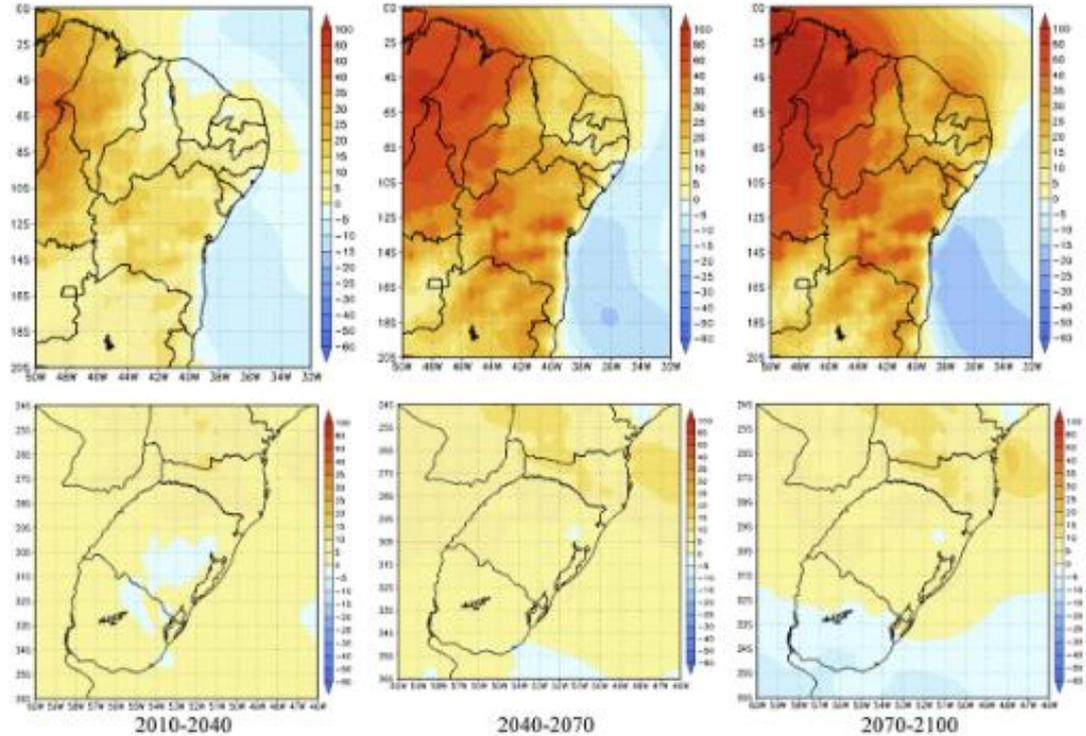
$$P_s = P_0 \cdot \frac{G_t}{G_0} \cdot FS \cdot PR(T)$$



Fonte: Brownson, R. S. J., Penn State University

CMIP3

- GCMs:
 - HadCM3
- RCM:
 - Eta (CPTEC-INPE)
- Método:
 - Fator de mudança
- Resultados
 - já indicavam um incremento nos ventos no NEB e Sul



Fonte: Pereira *et al.*, 2013)

CMIP5

● GCMs:

- HadGEM2
- MIROC
- CanESM2

● RCM:

- Eta (CPTEC-INPE)

● Método:

- Downscaling dinâmico e estatístico
- Mapeamento de quantis (Solar)
- Regressões de parâmetros C, K (Eólica)

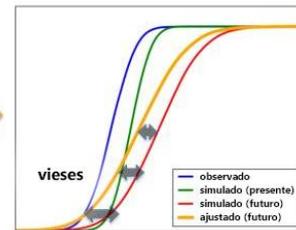
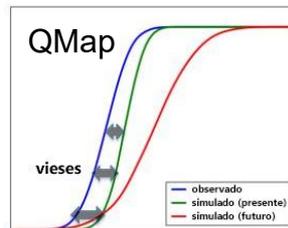
● Resultados

- Grande dispersão entre modelos

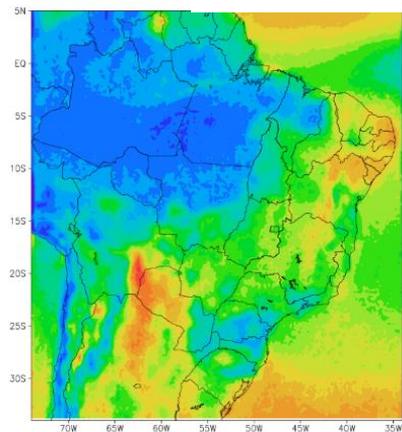
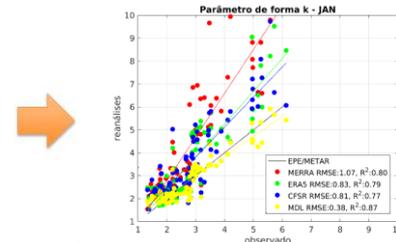
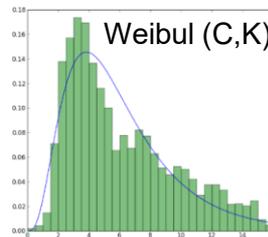


(CHOU et al., 2014)

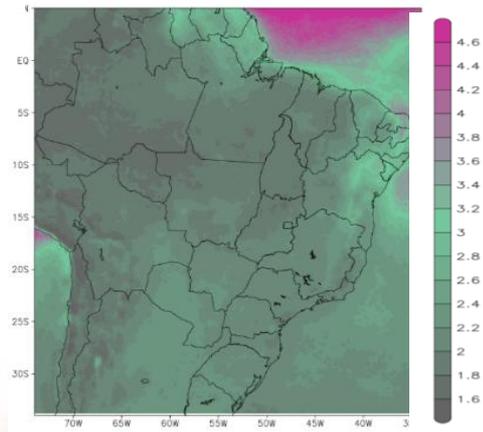
Solar



Eólica

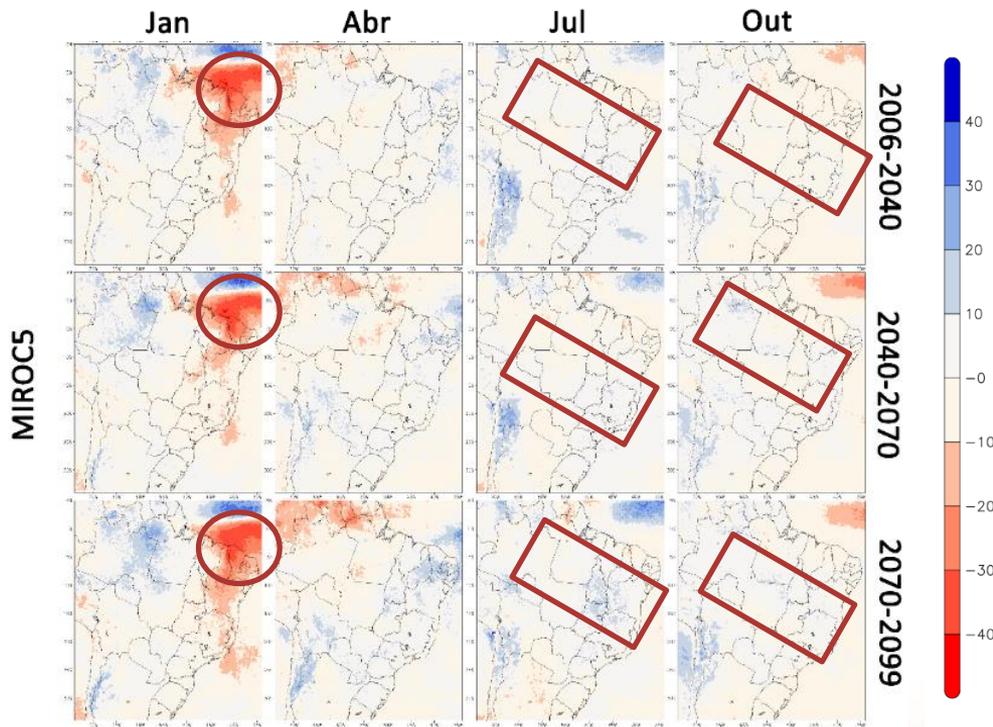
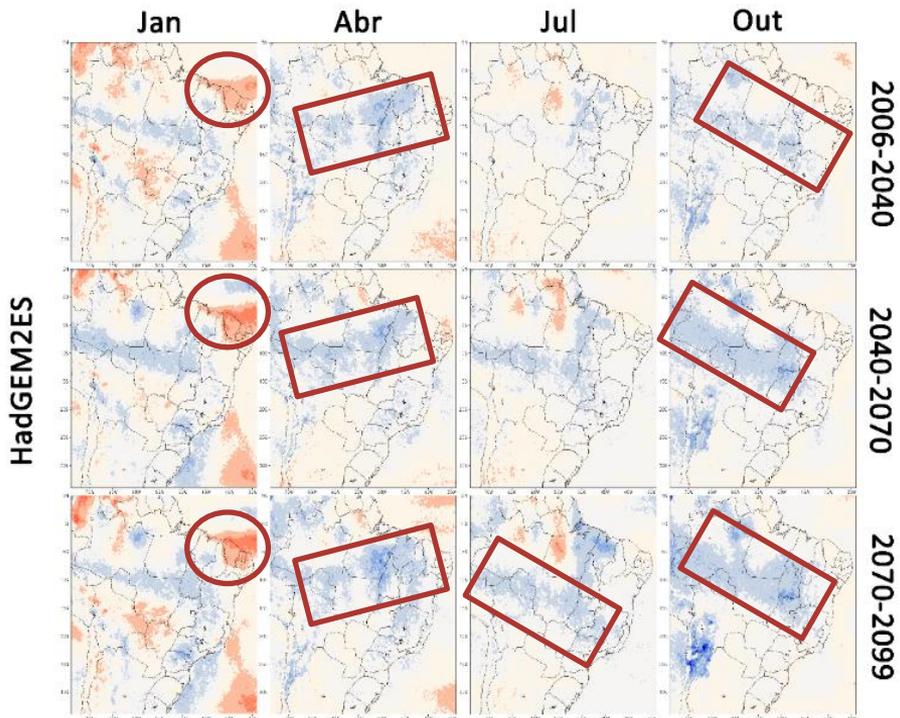


Fator de Escala C



Fator de Forma K

CMIP5



CMIP6

● GCMs:

- 41 modelos – Solar
- 24 modelos - Eólico

● RCM:

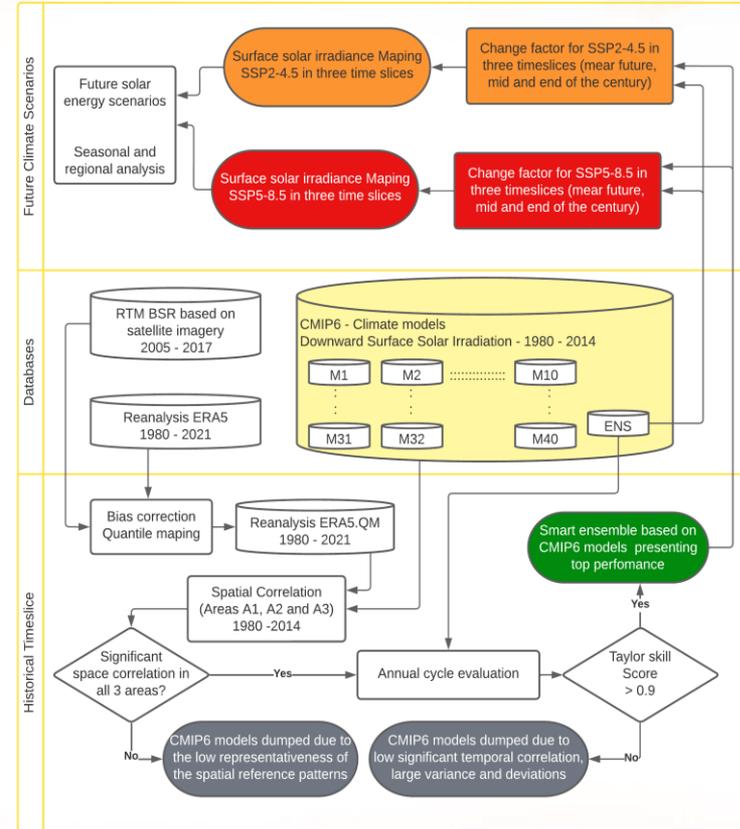
- Sem downscaling dinâmico

● Método

- Sem correção ou downscaling estatístico
- Apenas Fator de Mudança
- Conversão em Potência Eólica
- Produzir um “Smart Ensemble”

● Resultados:

- Sinais de mudança convergentes
- Importância da redução da incerteza

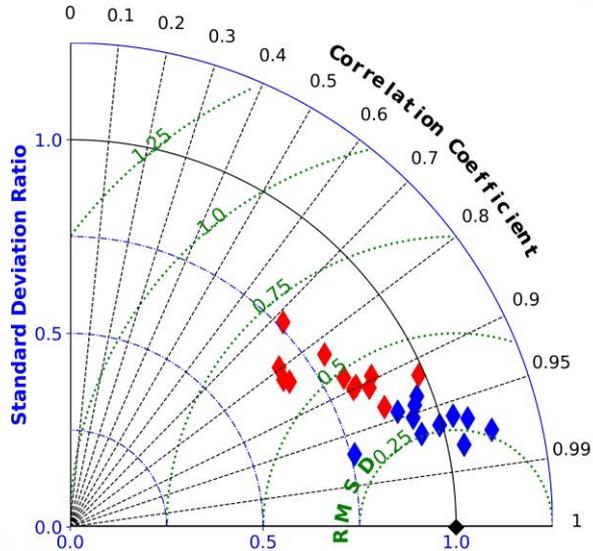


Fonte: Lima *et al.*, (2024)

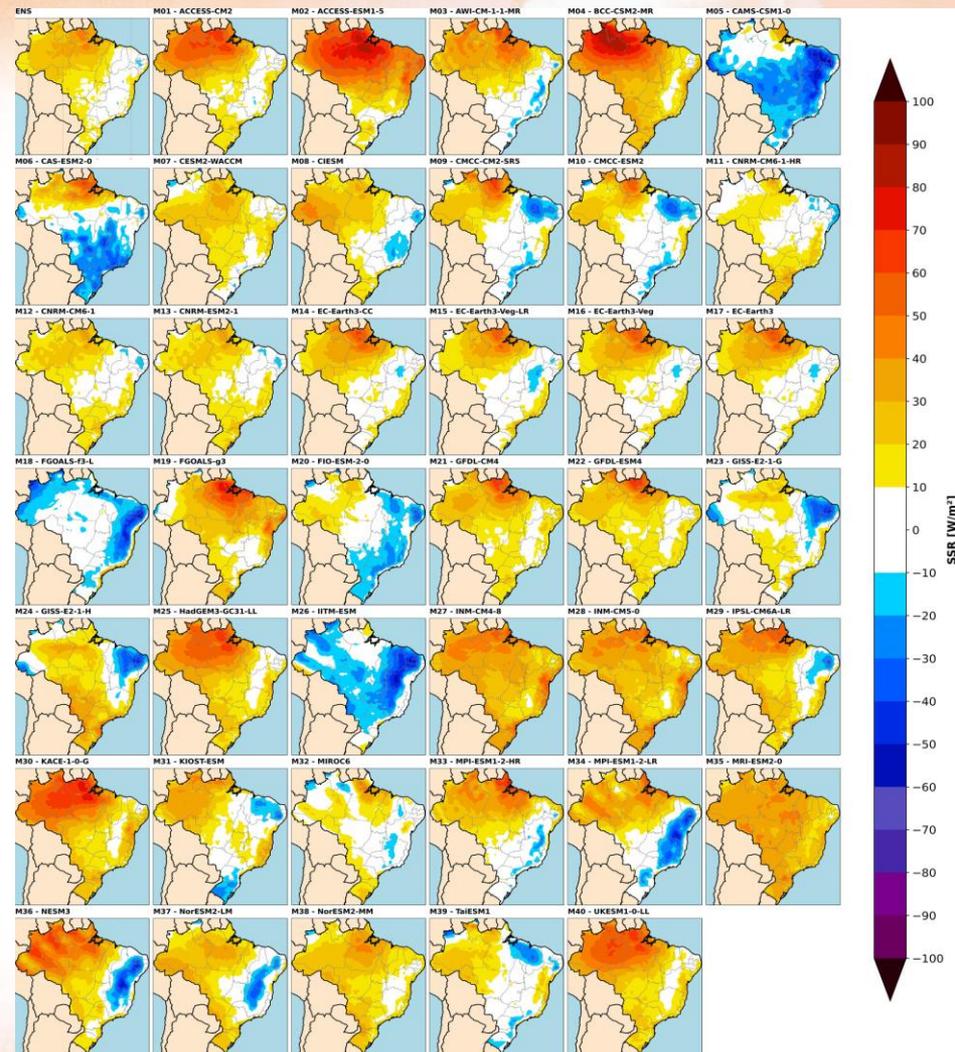
CMIP6 - Solar

Avaliação dos GCMS:

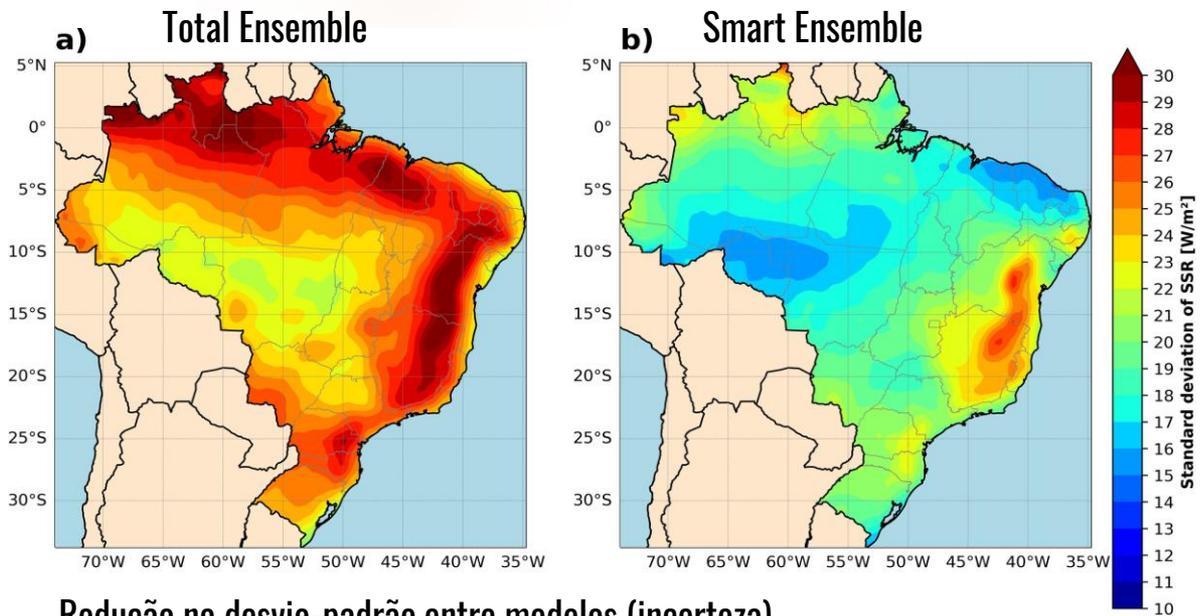
- Padrão espacial
- Ciclo sazonal
- PDFs /CDFs



Fonte: Lima *et al.*, (2024)



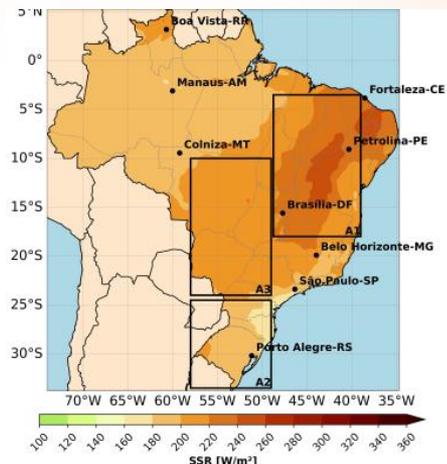
CMIP6 - Solar



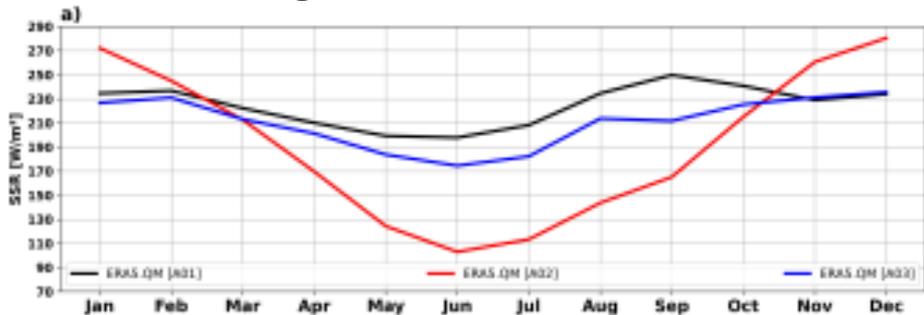
Redução no desvio-padrão entre modelos (incerteza)

Fonte: Lima *et al.* (2024)

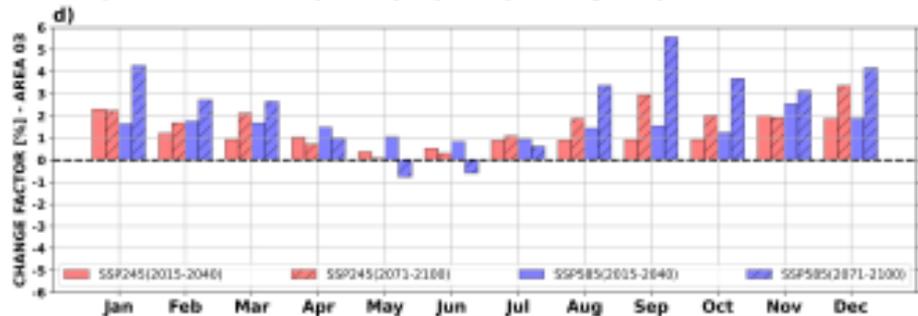
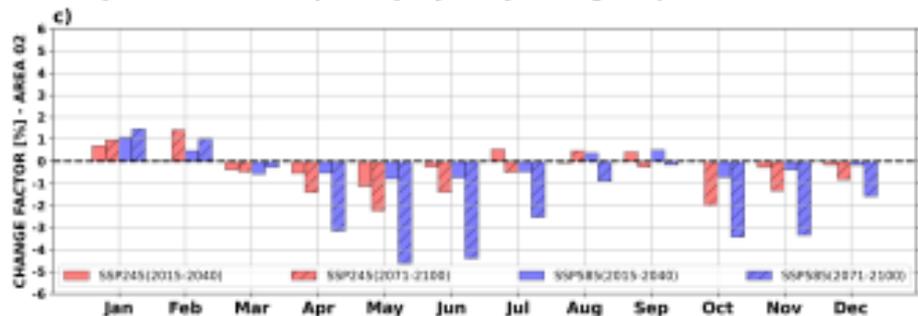
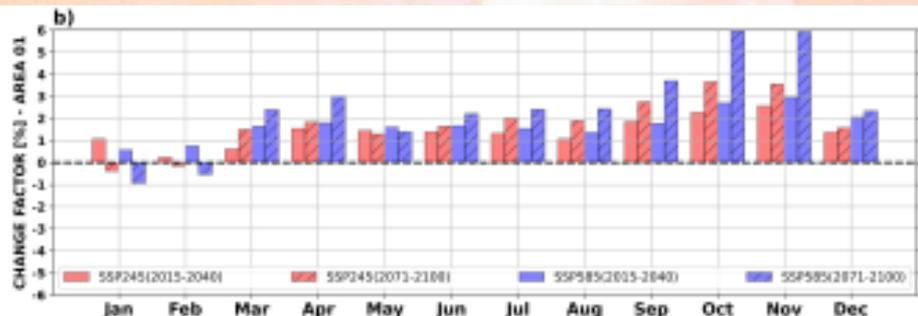
CMIP6 - Solar



Climatologia – Período de referência



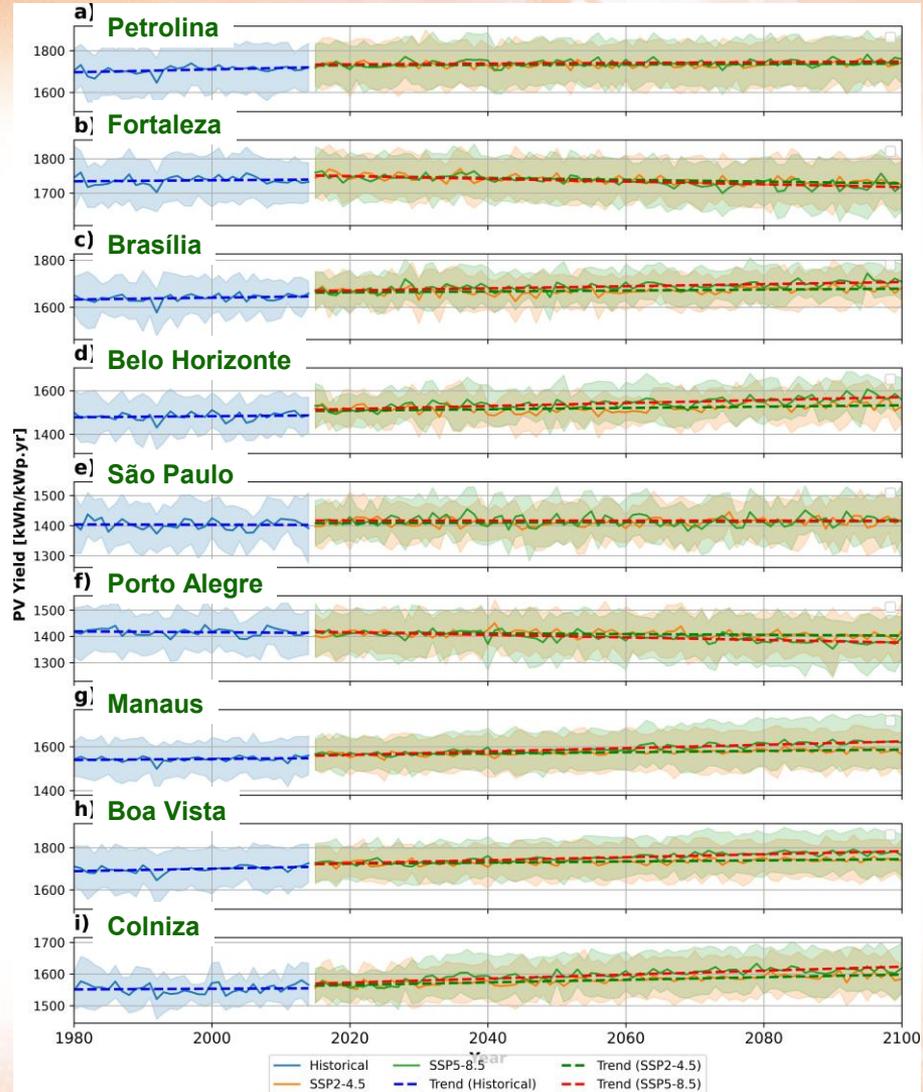
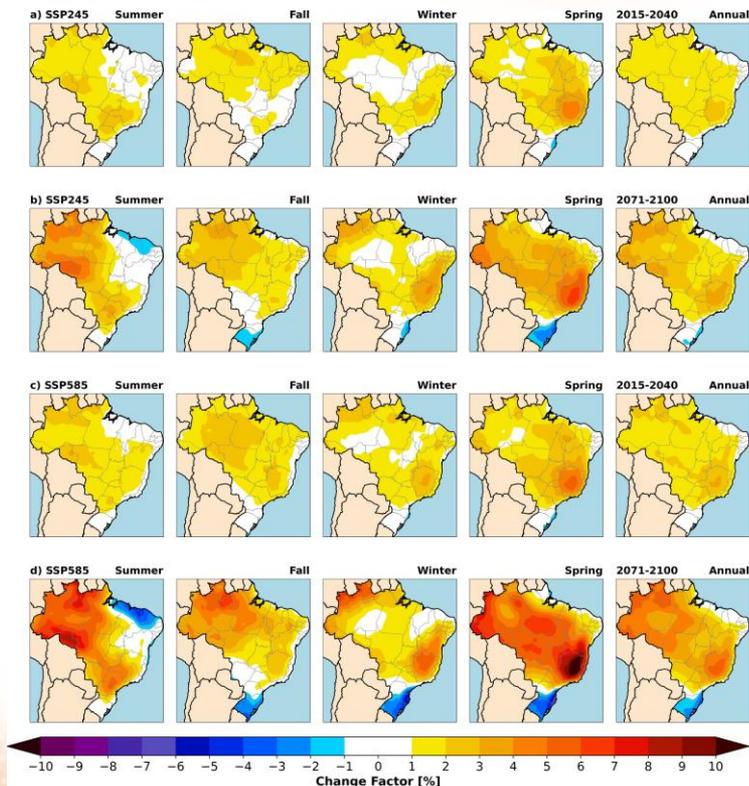
Fonte: Lima *et al.*, (2024)



Fator de Mudança

CMIP6 - Solar

Produtividade fotovoltaica até o fim do século para dois cenários futuros de clima

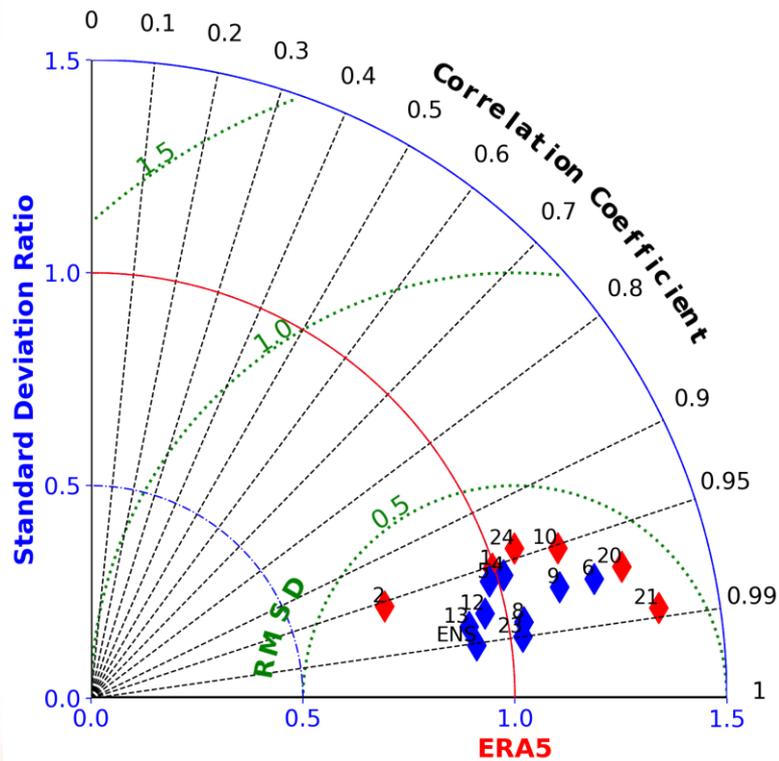


CMIP6 - Solar

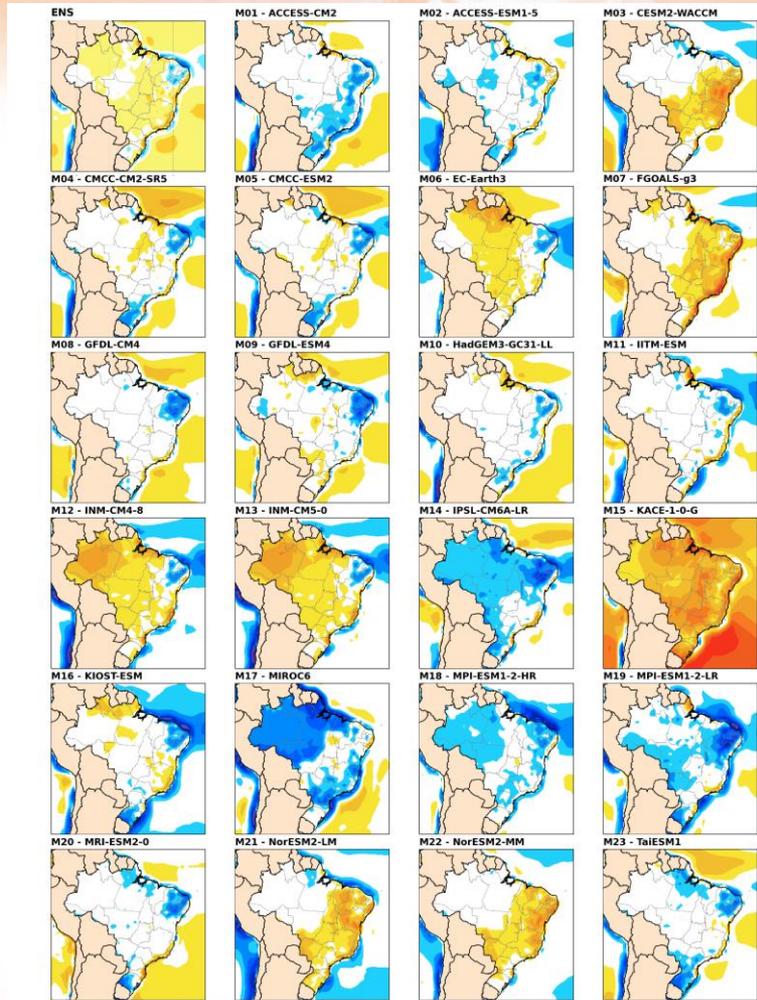
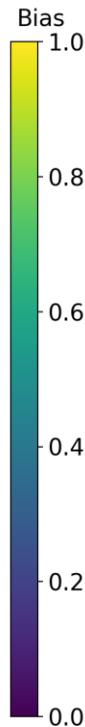
- Conjuntos de projeções climáticas futuras apresentam grandes incertezas
- As incertezas são reduzidas ao escolher um subconjunto apropriado de modelos
- Modelos CMIP6 superestimam a SSR na Amazônia
- Melhor desempenho na região Nordeste do Brasil
- Projeções futuras mostram um aumento na SSR de 2% a 8% na maioria das regiões brasileiras, com uma diminuição de cerca de 3% no Sul, particularmente no cenário SSP5-8.5
- Mudança na região Nordeste coincide com outros estudos, mas para o centro e sudeste do Brasil, os resultados variam dependendo dos métodos e modelos adotados, evidenciando a maior incerteza

A baixa magnitude das mudanças em comparação com a dispersão entre modelos é a principal fonte de incerteza

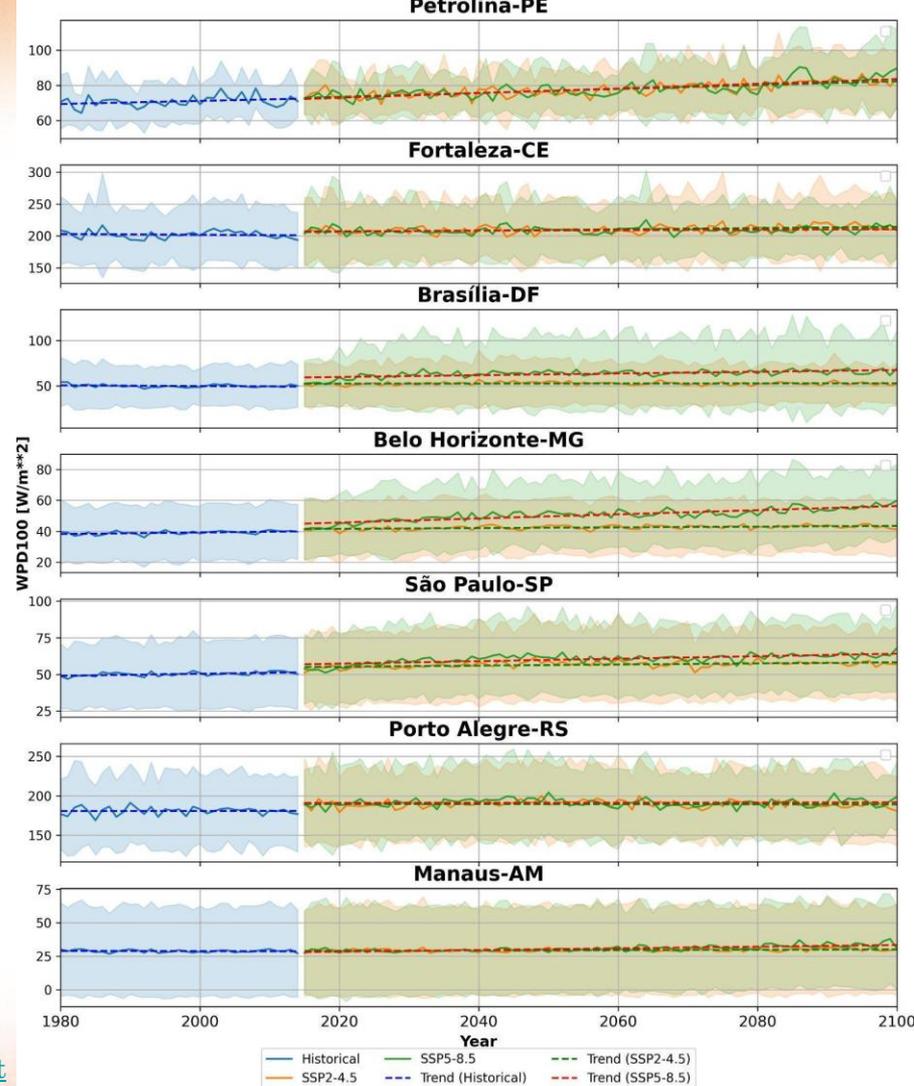
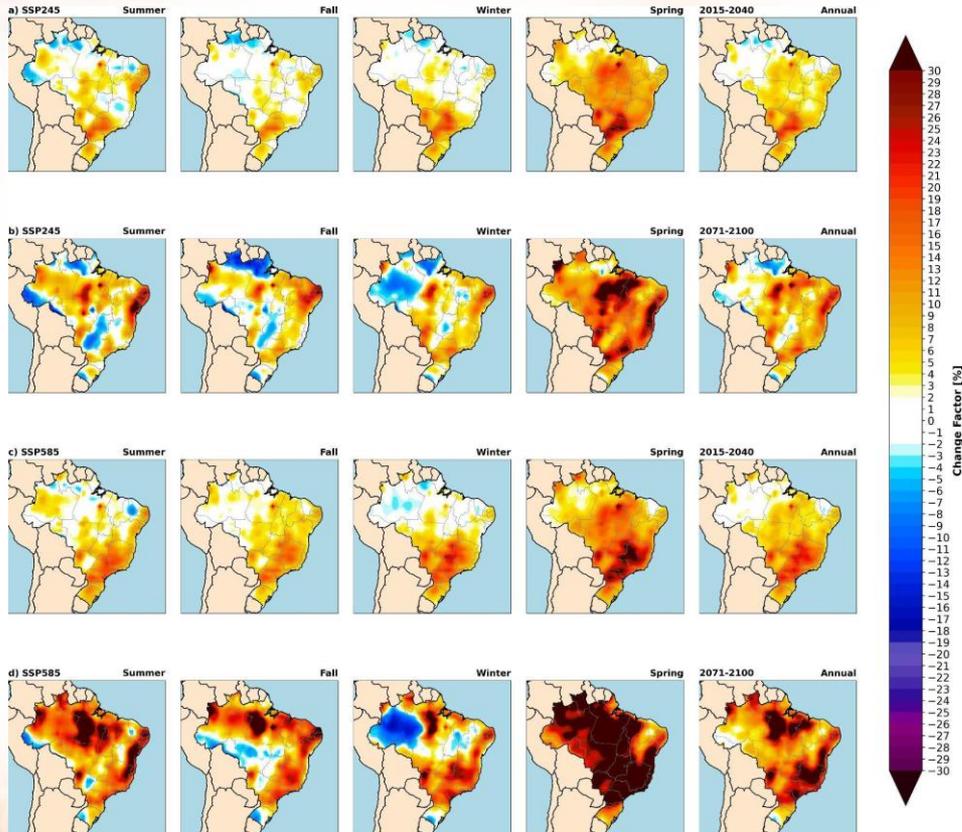
CMIP6 - Eólico



Fonte: Lima *et al.* (2025) - Preprint



CMIP6 - Eólico



Fonte: Lima *et al.* (2025) - Preprint

CMIP6 - Eólico

- Aumento generalizado entre 5% e 30% no WPD100 em quase todas as regiões do Brasil no início do século
- Aumento de até 15% em áreas do Nordeste e Sul do Brasil **no verão** do futuro próximo
- Aumento de até 30% no leste do NEB, Sudeste e Amazonia Oriental para o fim do século
- Aumento de até 30% em todas as regiões do Brasil, durante **a primavera**
- Redução de até -4% em parte da região do Ceará no SSP2-4.5
- Redução de até 10% do WPD100 no Sul do RS no fim do século
- Offshore - aumento médio de até 3 a 7% na WSPD100 no litoral do Nordeste, Sudeste e Sul do Brasil para o fim do século
- Mudanças significativas nos padrões de vento em todo o país

CMIP6 - Secas eólicas (Extremos)

Modelos climáticos globais: HadGEM, MPI e NorESM;

Modelos climáticos regionais: Nex-GDDP (downs. estatísticos), CORDEX:

ICTP e GERICS (downs. dinâmicos);

Cenários: Nex-GDDP (SSP5-8.5) e CORDEX (RCP8.5);

Período de análise: Histórico (1970 a 2005);

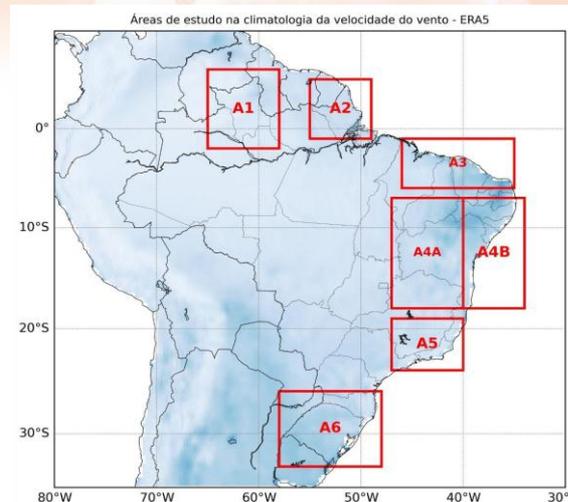
As informações iniciais são **médias diárias da velocidade do vento** a 10 metros;

Método:

- **Interpolação dos dados** em uma grade única. Isto resulta na mesma orientação dos pixels para todos os modelos;
- Seleção de **7 regiões** de interesse;
- Em cada box é feito a **média espacial** da informação do vento;
- **P05:** obtenção do **percentil 5** de cada área;

Retorno aos campos interpolados - P01 -

- **M3D:** obtenção dos campos das **médias móveis de 3 dias** da informação do vento;
- Em cada box é feito a **média espacial** da M3D;
- **Wind Drought:** contagem dos eventos com $M3D \leq P05$ em cada box;
- Variação do **Wind Drought no cenário futuro.**



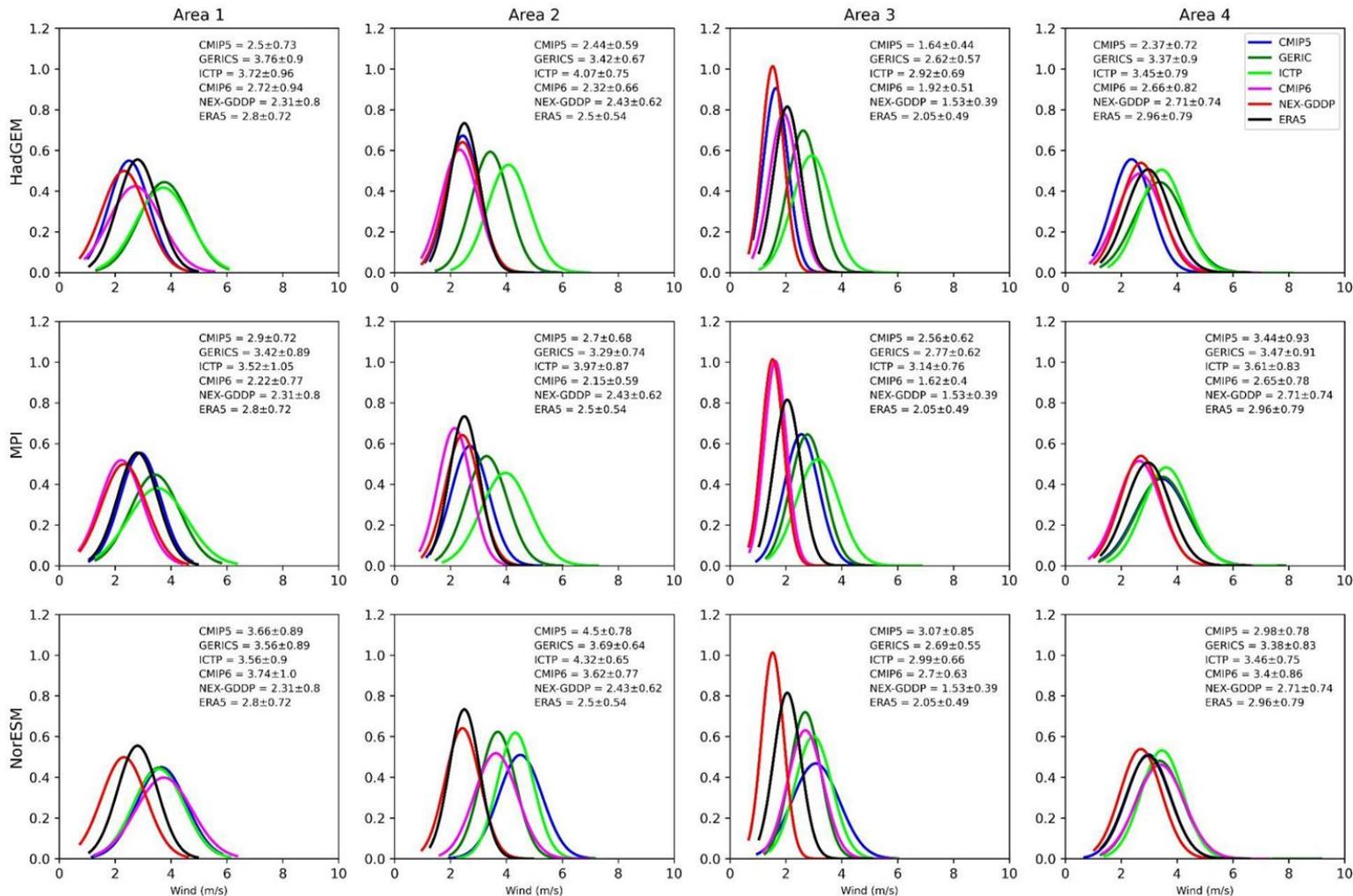
Fonte: Jesus *et al.*, 2025 (in prep.)

Componente eólica

O CMIP5 tem semelhanças com observações nos modelos HadGEM e MPI para as áreas 1 e 2, e discrepâncias acentuadas no NorESM para as áreas 1 e 2. Estes dados tendem a subestimar as observ.

O downscaling dinâmico se comporta de forma semelhante para REMO e RegCM4.

Os resultados da Área 1 indicam que a aplicação desta metodologia distanciou as estimativas das observações.



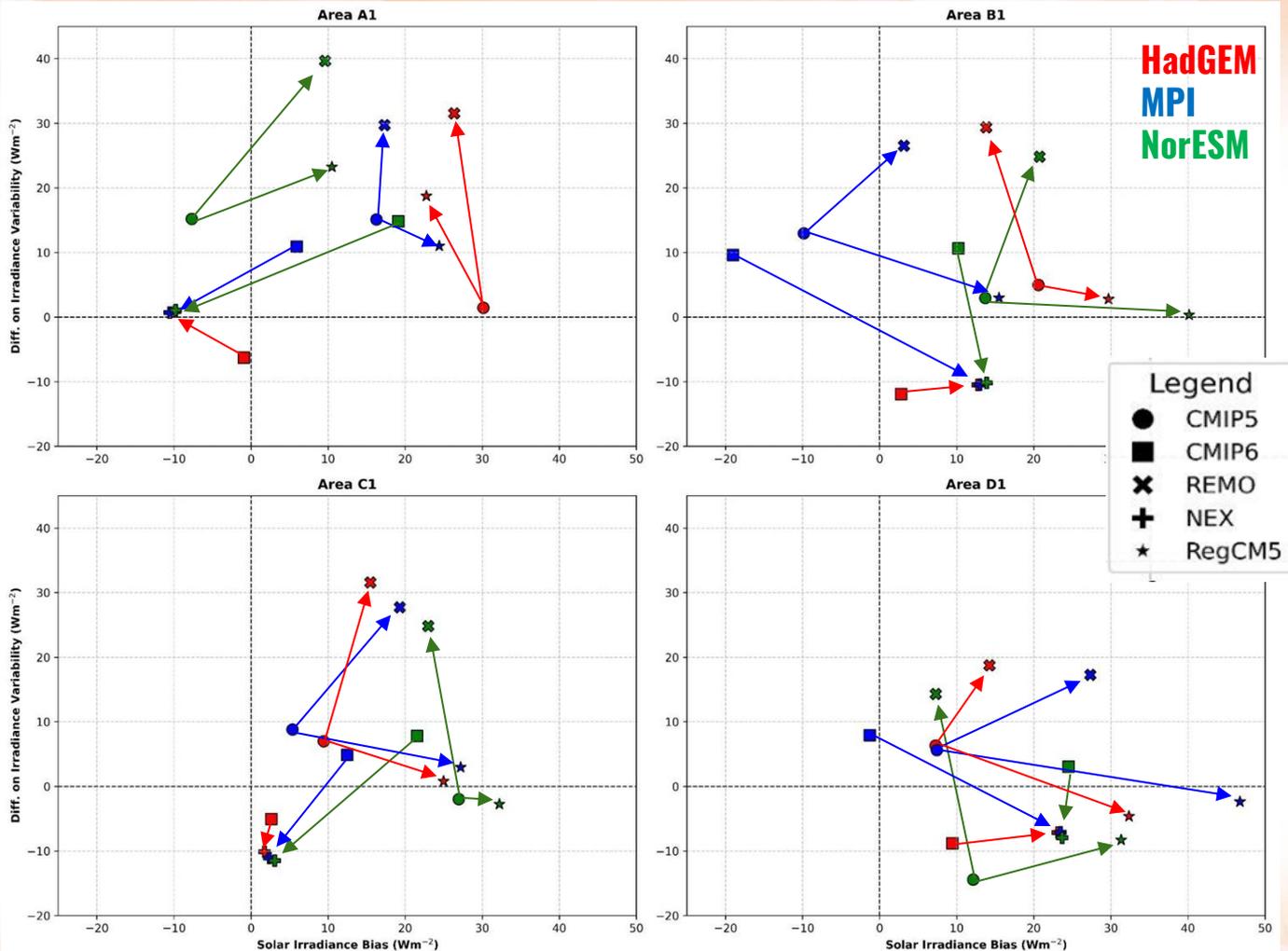
Radiação

HadGEM proporcionou as menores diferenças de média e variabilidade climatológicas

NEX-GDDP (downscaling estatístico) apresentam desempenho semelhante para todos os modelos

Downscaling dinâmico não apresentou melhora consistente para a maioria das regiões

- REMO e
- RegCM4 apresenta as maiores diferenças em média e menor variabilidade dos dados.



Resumindo

- Atenção às escalas – Seu evento é compatível com a resolução espacial e temporal do modelo?
- Cuidado com Deep Learning – O clima futuro pode estar fora domínio de treinamento
- Sempre avalie o viés do seu modelo global
- Sempre avalie o viés do seu modelo regional
- GCM é Problema de Contorno – Não espere correlações temporais no histórico
- Não calcule vento sobre médias de U e V – Não calcule potencial eólico sobre médias de vento
- Evite tirar conclusões com base em um único experimento
- Descartar modelos ruins é mais importante que escolher os bons
- Nem sempre o Downscaling dinâmico vai te entregar um resultado melhor
- Nem sempre o Downscaling estatístico vai te entregar um resultado melhor
- Nem sempre você vai precisar de Downscaling!



OBRIGADO!

André R. Gonçalves

andre.goncalves@inpe.br



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÃO

