



Avaliação de Potência Eólica e Solar a Partir de Modelagem para o Tempo Presente no Estado do Rio Grande do Norte

Assessment of Wind and Solar Power Based on Present-Time Modeling in the State of Rio Grande do Norte

Augusto de Rubim Costa Gurgel

Erika Spencer de Albuquerque

Gisely Geovanna dos Santos Santiago

Eudes Soares Rumão

Marília Vieira da Fonseca

Cassia Raiane da Silva Oliveira

Resumo: Este estudo avalia o potencial eólico e solar no estado do Rio Grande do Norte, no período de 1995 a 2024, por meio de dados de reanálise climática ERA5 (ECMWF). Foram utilizadas séries mensais de velocidade do vento, radiação solar incidente e temperatura do ar para estimar a disponibilidade energética regional. O estado destaca-se nacionalmente na geração de energia renovável, com 308 parques eólicos e 10,3 GW de potência instalada, representando aproximadamente 30% da produção eólica brasileira. A metodologia baseou-se em equações físicas de potência eólica e modelos de desempenho fotovoltaico dependentes de irradiância solar e temperatura das células. Os resultados indicam maior potencial eólico no segundo semestre, com pico em agosto, associado à atuação dos ventos alísios de sudeste e ao gradiente térmico oceano-continente. O potencial solar apresenta máximos entre setembro e novembro e mínimos entre maio e julho, refletindo a sazonalidade da nebulosidade e a posição da Zona de Convergência Intertropical. A complementaridade entre as fontes eólica e solar contribui para uma oferta energética renovável estável ao longo do ano, reforçando a relevância estratégica do Rio Grande do Norte na transição energética brasileira. O uso dos dados ERA5 mostrou-se uma alternativa robusta e acessível às medições privadas, sendo útil para o planejamento energético, pesquisas acadêmicas e formulação de políticas públicas.

Palavras-chave: energia eólica; energia solar; reanálise era5; potencial energético; rio grande do norte; climatologia; modelagem; planejamento energético.

Abstract: This study evaluates the wind and solar potential in the state of Rio Grande do Norte from 1995 to 2024 using ERA5 (ECMWF) climate reanalysis data. Monthly time series of wind speed, incident solar radiation, and air temperature were used to estimate regional energy availability. The state stands out nationally in renewable energy generation, with 308 wind farms and 10.3 GW of installed capacity, accounting for approximately 30% of Brazil's wind power production. The methodology was based on physical equations for wind power and photovoltaic performance models dependent on solar irradiance and cell temperature. The results indicate a higher wind potential in the second half of the year, peaking in August, associated with the influence of the southeast trade winds and the ocean–continent thermal gradient. Solar potential reaches its maximum between September and November and

minimum between May and July, reflecting the seasonality of cloud cover and the position of the Intertropical Convergence Zone. The complementarity between wind and solar sources contributes to a stable renewable energy supply throughout the year, reinforcing the strategic relevance of Rio Grande do Norte in Brazil's energy transition. The use of ERA5 data proved to be a robust and accessible alternative to private measurements, being useful for energy planning, academic research, and public policy formulation.

Keywords: wind energy; solar energy; ERA5 reanalysis; energy potential; Rio Grande do Norte; climatology; modeling; energy planning.

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas constituem atualmente um dos maiores desafios enfrentados pela sociedade moderna, cujas causas remontam à Revolução Industrial do século XVIII. Nesse período, o mundo abandonou uma economia essencialmente agrícola e ingressou na era das máquinas movidas a carvão e, posteriormente, a petróleo. Esse salto tecnológico impulsionou o progresso econômico, mas resultou em profundos impactos ambientais. Desde então, a concentração atmosférica de dióxido de carbono (CO₂) aumentou de cerca de 280 ppm para 379 ppm (IPCC, 2007), com projeções de ultrapassar 400 ppm já na década de 2010 (Mendes, 2014).

Entre 2020 e 2024, o Brasil vivenciou um marco importante na sua transição energética. A energia eólica consolidou sua trajetória de expansão, elevando o potencial instalado de aproximadamente 15,4 GW no início de 2020 para cerca de 29 GW em 2024. Nesse mesmo período, o país ultrapassou a marca de mil parques eólicos em operação distribuídos pelo território nacional (ABEEólica, 2024).

A energia solar também apresentou crescimento expressivo na última década, destacando-se como a segunda maior fonte da matriz elétrica brasileira, atrás apenas da hidrelétrica. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a capacidade instalada de geração fotovoltaica ultrapassou 43 GW em 2024, impulsionada principalmente pela geração distribuída em telhados, fachadas e pequenos terrenos (ANEEL, 2024). Esse avanço resulta tanto da elevada disponibilidade de radiação solar em grande parte do território nacional — especialmente nas regiões Nordeste e Centro-Oeste — quanto de políticas regulatórias de incentivo, como a Resolução Normativa nº 482/2012, que instituiu o marco da geração distribuída no país (ANEEL, 2012).

Além de diversificar a matriz elétrica, a energia solar desempenha papel estratégico no cumprimento dos compromissos brasileiros de mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Estimativas da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) indicam que a fonte poderá representar mais de 15% da geração elétrica nacional até 2031, conforme os cenários de expansão do Plano Decenal de Energia (EPE, 2023). Ademais, sua implantação gera benefícios socioeconômicos significativos, como a criação de empregos locais, a redução de perdas na transmissão de energia e o fortalecimento da segurança energética em regiões remotas ainda pouco atendidas pelo sistema interligado nacional (ABEEólica e ABSOLAR, 2022; EPE, 2023).

Para subsidiar estudos científicos e aprimorar o planejamento energético, destaca-se a importância do uso de dados de reanálise, como os disponibilizados pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) por meio do conjunto ERA5. Esses dados integram observações atmosféricas históricas com modelos climáticos globais, possibilitando uma reconstrução consistente e de alta resolução temporal e espacial de variáveis meteorológicas (Hersbach *et al.*, 2020). No contexto brasileiro, o ERA5 é uma ferramenta essencial para pesquisadores, especialmente diante da limitação de acesso a bancos de dados privados de empresas do setor energético. Assim, seu uso torna-se indispensável para estimativas de potencial energético e comparações entre diferentes regiões do país (ECMWF, 2017).

Diante desse panorama, o objetivo geral deste trabalho é avaliar o potencial eólico e solar do estado do Rio Grande do Norte no tempo presente (1995-2024), utilizando dados de reanálise climática. A proposta busca compreender a relevância dessas fontes renováveis na matriz energética regional, contribuindo para o avanço científico e para o planejamento sustentável do setor energético no Nordeste brasileiro.

ÁREA DE ESTUDO E MÉTODOS

O estado do Rio Grande do Norte (Figura 1) destaca-se como um dos principais polos de geração de energia eólica do Brasil. Segundo dados da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), o estado conta atualmente com 308 parques eólicos em operação, totalizando 3.446 aerogeradores e uma potência instalada de aproximadamente 10,3 GW. Esse valor corresponde a cerca de 30% da produção eólica nacional, posicionando o Rio Grande do Norte como o segundo maior produtor do país, atrás apenas do estado da Bahia (ABEEólica, 2025).

Em uma perspectiva mais ampla, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) destaca que, em 2025, as fontes eólica e solar em conjunto atingiram 23,7% de participação na matriz elétrica brasileira, evidenciando o avanço expressivo das fontes renováveis modernas na composição energética nacional. Nesse contexto, o Rio Grande do Norte consolida-se como um território estratégico para a transição energética, contribuindo de forma decisiva para a diversificação e sustentabilidade do sistema elétrico brasileiro (EPE, 2025).

Figura 1 – Estado do Rio Grande do Norte.



Fonte: www.baixarmapas.com.br.

Dados

Reanálise ECMWF-ERA5

No presente trabalho, utilizou-se a reanálise ERA5 como principal fonte de dados meteorológicos de referência. O ERA5 representa a quinta geração de reanálises desenvolvida pelo European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), fornecendo estimativas consistentes do estado da atmosfera, da superfície terrestre e do oceano desde 1950 até o presente, com resolução temporal horária e resolução espacial aproximada de 31 km (Hersbach *et al.*, 2020). Essa base de dados resulta da assimilação de um extenso conjunto de observações em modelos numéricos de previsão do tempo, o que assegura maior coerência e completude espacial e temporal quando comparada a observações pontuais, embora ainda possam ocorrer vieses sistemáticos em determinadas regiões.

Neste estudo, foram extraídas as variáveis mensais referentes ao período de 1995 a 2024, a saber: velocidade do vento a 100 m de altura, radiação solar incidente na superfície (Surface Solar Radiation Downwards, SSR ou SSRD) e temperatura do ar a 2 m (2-m Air Temperature, T2m). Essas variáveis são fundamentais para a estimativa do potencial eólico e solar no estado do Rio Grande do Norte, pois combinam séries temporais de longo prazo, alta consistência física e compatibilidade com métodos de análise energética.

Metodologia

O objetivo é calcular o potencial eólico e solar do estado do Rio Grande do Norte, para isso, o potencial eólico será calculado através da equação (Diaconita, 2019):

$$P = \frac{1}{2} \times 1,225 \times v^3$$

Onde: v = velocidade do vento a 100m de altura e onde o valor de 1,225 será considerado a densidade da temperatura do ar.

Em relação ao potencial solar do estado do Rio Grande do Norte ou potencial de potência fotovoltaica (PVP), multiplicando a irradiância solar durante um período específico por um fator de desempenho, será utilizado a equação seguindo Mavromatakis *et al.* (2010):

$$PVP(t) = P_{r(t)} \frac{R_s(t)}{R_{STC}}$$

Onde: R_{STC} é a irradiância solar nas Condições de Teste Padrão igual a 1000 W m⁻².

$Pr(t)$ é o chamado performance ratio, que representa variações na eficiência das células fotovoltaicas em função de mudanças de temperatura (Jerez *et al.*, 2015) e é calculado por:

$$P_{r(t)} = 1 + \gamma [T_{cell} - T_{STC}]$$

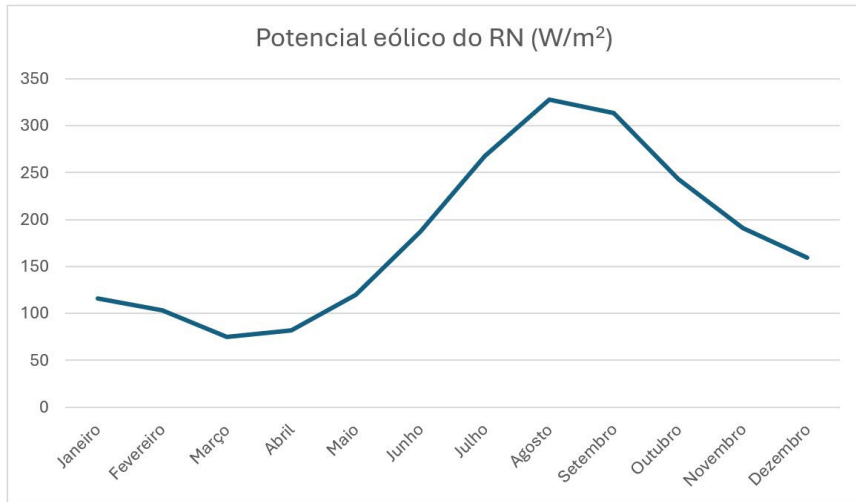
Onde T_{STC} é a temperatura do ar ambiente = 25°C; γ = depende do tipo de célula solar, usando uma célula de silício monocristalino ($\gamma = -0,005 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) (Jerez *et al.*, 2015). T_{cell} é a temperatura da célula solar, e sua equação é dado por:

$$T_{cell} = c_1 + c_2 \times TAS + c_3 \times R_s$$

Onde TAS = temperatura do ar a 2m, que será obtido na reanálise ERA5. R_s = radiação solar, obtido também na reanálise ERA5. c_1 , c_2 , c_3 = são coeficientes, onde $c_1 = 3,75 \text{ } ^\circ\text{C}$, $c_2 = 1,14$, e $c_3 = 0,0175 \text{ } ^\circ\text{C m}^2 \text{ W}^{-1}$ para uma célula de silício monocristalino foram obtidos de Lasnier e Ang (1990) e utilizados em Crook *et al.* (2011).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi estabelecida uma climatologia para o estado do Rio Grande do Norte a partir da média dos dados mensais ao longo dos 30 anos analisados (1995–2024). Para cada mês do ano, foi calculada a média climatológica de todos os respectivos meses do período, seguida da média espacial sobre todo o território potiguar. O resultado dessa análise é apresentado no Gráfico 1, que mostra a variabilidade sazonal do potencial eólico médio (W/m²) ao longo do ano.

Gráfico 1 - Potencial eólico do RN (W/m^2).

Fonte: autoria própria.

O gráfico evidencia que o mês de agosto apresenta o maior potencial eólico, com valores próximos de 320 W/m^2 , caracterizando o período de ventos mais intensos sobre o estado. Observa-se também que o segundo semestre concentra os maiores valores de densidade de potência do vento, entre julho e outubro, correspondendo ao período de maior produtividade eólica no Rio Grande do Norte. Essa sazonalidade está associada à atuação dos alísios de sudeste e à intensificação do gradiente térmico entre o oceano Atlântico tropical e o continente, fenômenos que favorecem o aumento da intensidade dos ventos sobre o litoral e o interior do estado durante o período seco.

Esses resultados estão em consonância com estudos prévios realizados em diferentes escalas. Reboita *et al.* (2018), ao analisarem a intensidade e a densidade de potência do vento simuladas pelo modelo regional RegCM4 sobre a América do Sul, identificaram um padrão semelhante de intensificação dos ventos no segundo semestre, particularmente no Nordeste brasileiro. Sawadogo *et al.* (2020) também destacam a importância desse período no continente africano, mostrando que os ventos alísios e os sistemas de alta pressão subtropicais exercem papel fundamental na sazonalidade da energia eólica em regiões tropicais e semiáridas — comportamento análogo ao observado no Nordeste do Brasil. De forma mais específica, Gurgel *et al.* (2024) analisaram a densidade de potência eólica em áreas do Nordeste brasileiro e confirmaram a predominância de valores máximos durante os meses de agosto e setembro, especialmente sobre o litoral norte, onde se localiza o estado do Rio Grande do Norte.

Portanto, o comportamento sazonal evidenciado no Gráfico 1 reforça o papel estratégico do Rio Grande do Norte na geração eólica nacional, ao concentrar sua máxima eficiência energética em períodos de menor pluviosidade e elevada estabilidade atmosférica, condições ideais para a operação dos parques eólicos.

O mesmo procedimento climatológico adotado para o cálculo do potencial eólico foi aplicado à variável de radiação solar incidente na superfície, a fim de estimar o potencial solar médio para todo o estado do Rio Grande do Norte. Para isso, foram calculadas as médias mensais da variável SSRD (Surface Solar Radiation Downwards) ao longo do período de 1995 a 2024, seguidas da média espacial sobre o território estadual. Os resultados obtidos encontram-se resumidos na Tabela 1.

Tabela 1 – Potencial solar para o estado do Rio grande do Norte em (% W/m^2).

Mês	% W/m^2
Janeiro	0.2340
Fevereiro	0.2355
Março	0.2247
Abril	0.2082
Maiο	0.1961
Junho	0.1816
Julho	0.1878
Agosto	0.2220
Setembro	0.2497
Outubro	0.2615
Novembro	0.2578
Dezembro	0.2443

Fonte: autoria própria.

Os resultados obtidos indicam uma variação sazonal do potencial solar ao longo do ano, com valores mínimos entre maio e julho, coincidindo com o período chuvoso sobre o litoral e o agreste potiguar, e máximos entre setembro e novembro, quando há maior disponibilidade de radiação solar direta. Essa sazonalidade está associada principalmente à variação da nebulosidade, à posição anual da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e à trajetória aparente do Sol, que influencia a incidência direta da radiação na superfície.

O comportamento observado no Rio Grande do Norte é consistente com os padrões de distribuição de radiação solar sobre o Nordeste brasileiro descritos em estudos de modelagem e reanálise climática. Sawadogo *et al.* (2020), ao analisarem o potencial solar no continente africano utilizando o conjunto RegCM4 CORDEX-CORE, encontraram valores médios superiores aos observados no Brasil, o que é esperado em função da menor cobertura de nuvens e da baixa variabilidade sazonal na faixa desértica e semiárida do Sahel. Entretanto, a amplitude intra-anual registrada no RN — entre 0,18 e 0,26 W/m^2 — demonstra a alta estabilidade da oferta solar, reforçando o potencial da região para a geração fotovoltaica em larga escala.

Jerez *et al.* (2015) destacam que a radiação solar global é um dos fatores mais determinantes para o desempenho de sistemas fotovoltaicos, sobretudo quando combinada com temperaturas médias moderadas e ventos constantes, características presentes na região litorânea e semiárida do Nordeste. No contexto brasileiro, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023) aponta que o Nordeste concentra o maior fator de capacidade solar do país, com médias superiores a 22%, sendo o Rio Grande do Norte uma das áreas mais promissoras devido à sua baixa nebulosidade e altos índices de insolação anual. Essa característica é confirmada por dados do Global Solar Atlas (World Bank, 2024), que indicam valores anuais de Global Horizontal Irradiation (GHI) superiores a 2.100 kWh/m² na maior parte do estado.

Comparando-se os resultados obtidos com o ERA5 aos dados do Atlas Solar Global, observa-se boa concordância geral, embora a reanálise tenda a subestimar a irradiância em áreas costeiras devido à maior resolução dos modelos e à representação idealizada da cobertura de nuvens. Assim, recomenda-se o uso combinado de dados de reanálise e observações de satélite (como CM SAF e SARA-2) para aprimorar futuras estimativas de potencial fotovoltaico regional.

Em síntese, os resultados apresentados confirmam que o potencial solar do Rio Grande do Norte é elevado e estável ao longo do ano, com ligeira redução nos meses mais úmidos e valores máximos no final do período seco. Essa estabilidade é um fator estratégico para o equilíbrio complementar entre as fontes eólica e solar, visto que os meses de menor irradiância coincidem com o pico da geração eólica, maximizando a disponibilidade energética renovável contínua no estado.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo é fruto de um projeto de iniciação científica que, mesmo em um curto período de desenvolvimento, alcançou resultados expressivos e cientificamente relevantes. Os resultados obtidos demonstram a consistência e a confiabilidade dos dados provenientes da reanálise ERA5 para estudos aplicados ao setor energético, em especial na avaliação do potencial eólico e solar do estado do Rio Grande do Norte.

Verificou-se que a variabilidade sazonal do potencial eólico e solar reproduz fielmente o comportamento observado em dados empíricos e em estudos anteriores realizados para o Nordeste brasileiro e outras regiões tropicais (Reboita *et al.*, 2018; Sawadogo *et al.*, 2020; Gurgel *et al.*, 2024). O ERA5 mostrou-se capaz de representar adequadamente os padrões sazonais de intensidade dos ventos e de radiação solar, revelando a complementaridade natural entre essas duas fontes: o pico da geração eólica ocorre justamente quando a disponibilidade solar é reduzida, e vice-versa. Essa característica é estratégica para o planejamento energético do estado e reforça o papel do Rio Grande do Norte como referência nacional na transição para uma matriz elétrica mais limpa e diversificada.

A importância deste trabalho reside, portanto, em evidenciar que os dados de modelagem climática, como os disponibilizados pelo ERA5, constituem uma alternativa robusta, gratuita e acessível às informações obtidas por meio de medições diretas — geralmente restritas e de alto custo para empresas do setor. Tais dados permitem não apenas ampliar o alcance das análises científicas, mas também promover a democratização do conhecimento climático e energético, fortalecendo a capacidade de pesquisa e inovação em instituições públicas e centros acadêmicos.

Assim, mesmo em caráter introdutório, este estudo contribui para consolidar o uso de bases de reanálise em estudos de potencial energético regional e abre caminho para investigações futuras que integrem séries observacionais, modelagem climática e dados de satélite, visando aprimorar as estimativas e reduzir as incertezas associadas às fontes renováveis no Nordeste brasileiro.

REFERÊNCIAS

ABEEÓLICA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. **Boletim Anual de Geração Eólica 2024**. São Paulo: ABEEólica, 2024. Disponível em: <https://abeeolica.org.br>. Acesso em: 29 set. 2025.

ABEEÓLICA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. **Boletim Anual 2025**. São Paulo: ABEEólica, 2025.

ABEEÓLICA; ABSOLAR – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. **Cenário das Fontes Renováveis no Brasil: Relatório Conjunto**. São Paulo, 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Boletim de Geração Distribuída**. Brasília: ANEEL, 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Brasília: ANEEL, 2012.

CROOK, J. A. *et al.* **Climate change impacts on future photovoltaic and concentrated solar power energy output**. *Energy & Environmental Science*, v. 4, n. 9, p. 3101–3109, 2011. <https://doi.org/10.1039/c1ee01495a>

DIACONITA, A.; ONEA, F.; RUSU, E. **An evaluation of the wind energy in the North Sea coast**. *Mechanical Testing and Diagnosis*, v. 9, p. 17–22, 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Decenal de Expansão de Energia 2031**. Brasília: EPE, 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2025**. Brasília: EPE, 2025.

EUROPEAN CENTRE FOR MEDIUM-RANGE WEATHER FORECASTS (ECMWF). **ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate**. Copernicus Climate Data Store (CDS), 2017. Disponível em: <https://cds.climate.copernicus.eu>.

GURGEL, A. R. C.; SALES, D. C.; LIMA, K. C. **Wind power density in areas of Northeastern Brazil from Regional Climate Models for a recent past.** PLoS ONE, v. 19, n. 7, p. e0307641, 2024.

HERSBACH, H. *et al.* **The ERA5 global reanalysis.** Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v. 146, n. 730, p. 1999–2049, 2020. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2007: The Physical Science Basis.** Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

JEREZ, S. *et al.* **The role of regional climate models in the estimation of photovoltaic energy resources and their long-term variability over Europe.** Solar Energy, v. 120, p. 79–93, 2015.

JEREZ, S. *et al.* **The impact of climate change on photovoltaic power generation in Europe.** Nature Communications, v. 6, p. 10014, 2015.

LASNIER, F.; ANG, T. G. **Photovoltaic Engineering Handbook.** Princeton: Adam Hilger, 1990.

MAVROMATAKIS, F. *et al.* **Modeling the photovoltaic potential of a site.** Renewable Energy, v. 35, n. 7, p. 1387–1390, 2010.

MENDES, J. C. **Impactos antropogênicos no clima global: uma análise histórica.** Revista Brasileira de Climatologia, v. 10, n. 1, p. 45–60, 2014. Disponível em: [inserir link do artigo]. Acesso em: 13 jun. 2025.

REBOITA, M. S.; AMARO, T. R.; DE SOUZA, M. R. **Winds: intensity and power density simulated by RegCM4 over South America in present and future climate.** Climate Dynamics, v. 51, p. 187–205, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3913-5>

SAWADOGO, W. *et al.* **Current and future potential of solar and wind energy over Africa using the RegCM4 CORDEX-CORE ensemble.** Climate Dynamics, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05377-1>.

AGRADECIMENTOS

O grupo de pesquisa agradece ao Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN) pelo apoio institucional e pela concessão da bolsa de pesquisa que tem contribuído de forma significativa para o desenvolvimento científico e para a formação acadêmica dos seus integrantes. Esse incentivo fortalece a produção de conhecimento e reafirma o compromisso do IFRN com a pesquisa e a inovação no âmbito de uma educação pública e de qualidade.