

Avaliação do Potencial de Geração de Energia Solar e Eólica no Estado da Paraíba com o Uso de Base de Dados Interpolada

Miguel Marques Ferreira* Júlia Alves Santos**
Lincon Rozendo da Silva** Helon David Macêdo Braz*
Flavio da Silva Vitorino Gomes**

* Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba - UFPB (e-mail: helon@cear.ufpb.br).

** Departamento de Engenharia de Energias Renováveis, Universidade Federal da Paraíba - UFPB (e-mail: flavio@cear.ufpb.br)

Abstract: The generation of electricity through renewable sources, such as solar and wind, is constantly growing due to the ecological and economic advantages associated with its use. Thus, the monitoring and analysis of climate variables such as wind speed and solar irradiation is of paramount importance to define the wind and solar generation potential of a region. In this context, the present study highlights the elaboration of a Paraíba State database (PB) making use of spatial data interpolation techniques to determine values where there are no measurements. Thus, from the official National Aeronautics and Space Administration (NASA) database, two interpolation procedures were evaluated. In sequence, the Kriging method for creating a base with exclusive resolution of 0.05° was applied (latitude and longitude) in relation to the original base for analysis of the wind, solar and hybrid potential of the state. Finally, it was seen, based on the developed index, that the intermediate geographical region of Patos is favorable for solar power generation and the regions of Campina Grande and João Pessoa have a high wind potential, while some cities in the Campina Grande region had good rates for hybrid generation, i.e., wind and solar.

Resumo: A geração de energia elétrica por meio de fontes renováveis, como solar e eólica, está em constante crescimento devido às vantagens ecológicas e econômicas associadas ao seu uso. Deste modo, é de suma importância o monitoramento e a análise de grandezas climáticas como a velocidade do vento e a irradiação solar para definição do potencial de geração eólica e solar de uma região. Nessa conjuntura, o presente estudo evidencia a elaboração de uma base de dados do estado da Paraíba (PB) fazendo uso de técnicas de interpolação espacial de dados para determinação de valores onde não há medições. Assim, a partir da base de dados oficial da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), dois procedimentos de interpolação são avaliados, *Inverse Distance Weighted* (IDW) e *Kriging*. Na sequência, foi aplicado o método *Kriging* para criação de uma base com resolução exclusiva de 0.05° (latitude e longitude) em relação à base original para análise do potencial eólico, solar e híbrido do estado. Finalmente, foi visto, baseado no índice desenvolvido, que a região geográfica intermediária de Patos é favorável para geração de energia solar e as regiões de Campina Grande e João Pessoa possuem um alto potencial eólico, enquanto alguns municípios da região de Campina Grande possuíam bons índices para geração híbrida, ou seja, eólica e solar.

Keywords: Potential; Generation; Energy; Wind; Solar; Interpolation; Database.

Palavras-chaves: Potencial; Geração; Energia; Eólica; Solar; Interpolação; Base de dados.

1. INTRODUÇÃO

Minimizar a emissão de gases que intensificam o efeito estufa na atmosfera, buscar novas fontes de geração e ampliação dos processos quanto à eficiência energética são algumas das dificuldades enfrentadas no mundo atual. Alinhada a essa conjuntura, a busca por fontes de energia renovável se tornou fundamental para garantir um desenvolvimento ambientalmente seguro para as gerações futuras. Assim, alternativas como energia solar e eólica

são consideradas fundamentais para construção deste novo cenário de sustentabilidade energética (Paul et al., 2021).

De acordo com o relatório *World Energy Outlook* de 2021, publicado pela Agência Internacional de Energia (IEA), a produção de energia solar no ano de 2022 terá um crescimento de aproximadamente 30%, em escala global (IEA, 2021). As regiões com altos índices de irradiação solar, são cenários atrativos para produção de energia solar. Diante disso, o monitoramento da irradiação solar é fundamental para os estudos e avaliações de recursos energéticos,

relacionados a sistemas de energia fotovoltaica. Por meio das informações referentes a essa variável meteorológica, é possível compreender os principais processos que compõem a dinâmica da entrada da energia solar na atmosfera e definir as melhores estratégias para a obtenção da máxima eficiência energética neste tipo de sistema (Santos and Pereira, 2014).

A energia eólica é outro pilar importante para o alcance do cenário energético sustentável. Com base no relatório *Global Wind Energy Council 2022*, a energia eólica é a segunda maior fonte de geração de energia do Brasil (Brasil, 2022). Contudo aspectos relacionados com a natureza intermitente da energia eólica, devem ser considerados para garantir a qualidade da energia gerada (Aguilar and Souza, 2019). A previsão da velocidade do vento é fundamental, visto que a volatilidade e a aleatoriedade dessa variável impactam diretamente na eficiência da geração de energia eólica (Lv and Li, 2018).

Desse modo, assegurar que um parque eólico seja instalado em uma localidade em que a oscilação dos valores referentes a velocidade média do vento seja baixa, é essencial, já que o ideal para geração eólica é que a grandeza, em questão, tenha o menor desvio padrão possível.

Nesse contexto, o monitoramento climático da irradiação solar e da velocidade do vento, através de estações climáticas/solarimétricas, é fundamental para garantir a diversificação da matriz energética brasileira e, sobretudo, a viabilidade do uso destas fontes de geração de energia. Para obter dados históricos destas variáveis, bases de dados públicas como as do *Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)* e da *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*, são recursos de suma importância para estudos e aplicações acerca do potencial energético de um local específico de interesse.

Entretanto, essa quantificação em determinadas localidades brasileiras é prejudicada, já que o número de locais de monitoramento não é suficiente para definição de séries temporais, contínuas de longa duração, com distribuição regular e frequente (Brasil, 2022).

Para determinar dados em localidades em que não há valor de medições, uma alternativa comumente utilizada é a interpolação espacial de dados, no qual é possível estabelecer dados para uma coordenada específica, a partir de um agrupamento de dados conhecidos das coordenadas vizinhas. Tal alternativa é apresentada em (Yagli et al., 2019) para avaliar a variável de irradiação solar, em que foi utilizado o modelo *Kriging* como método de reconstituição do processo de irradiação normal do feixe. Alinhado a esse contexto ainda, em (Lv and Li, 2018) o modelo *Kriging* foi proposto para previsão da velocidade do vento.

Já no trabalho (Martinez Martinez and Narducci, 2020), é abordada a aplicação dos métodos geoestatísticos, *Inverse Distance Weighted (IDW)* e *Kriging*, para previsão da variação temperatura no solo fazendo uso de dados georreferenciados e a análise da acurácia das previsões desta.

Por fim, o presente trabalho destaca uma ação do Projeto Plataforma Multi-Mapa PB desenvolvido no Centro de Energias Alternativas e Renováveis (CEAR) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), relacionada à criação de

uma base de dados estadual interpolada a partir de dados públicos disponíveis. Além disso, foi avaliado o potencial de geração de energia eólica, solar e híbrida no estado da Paraíba (PB).

O trabalho está organizado em cinco seções, sendo: (1) Introdução, (2) Fundamentação Teórica, (3) Metodologia e Desenvolvimento, (4) Resultados e Discussões e (5) Conclusões.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Coleta de Dados

A base de dados utilizada neste trabalho foi implementada a partir do projeto *Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER)*, administrado pela NASA desde 2003, com o propósito de melhorar os conjuntos de dados solares e climatológicos atuais a partir de um sistema de satélites (NASA, 2022). Além disso, as informações que caracterizam as condições físicas da atmosfera estão disponíveis nesta base com período de amostragem diário.

2.2 Métodos de Interpolação Espacial de Dados

Para o desenvolvimento de uma base de dados com maior resolução, foram estudados dois métodos de interpolação espacial de dados: o *Inverse Distance Weighted (IDW)* e o *Kriging*. Existem diversos métodos de interpolação, partindo de modelos mais simples, tal como a interpolação linear, até modelos baseados em *Machine Learning* tais como as *Artificial Neural Networks (ANNs)*, que são mais complexos e demandam um maior esforço computacional. Os métodos IDW e *Kriging* foram escolhidos por apresentarem, de forma simples e eficaz, a estimativa de valor para cada ponto desconhecido da base de dados desenvolvida considerando o contexto espacial regular e a não necessidade de um alto esforço computacional (Brubacher et al., 2020).

O método determinístico de ponderação do inverso da distância, ou IDW, estima valores para uma determinada coordenada a partir das coordenadas vizinhas com valores conhecidos. Nesse procedimento, é atribuído um peso calculado por meio do inverso da distância entre o ponto a interpolar e o ponto vizinho mais próximo e, assim, um ponto mais próximo do ponto interpolado terá maior influência sobre o valor resultante.

Na Equação 1, a fórmula utilizada para o cálculo do IDW é apresentada, em que N é o número de vizinhos mais próximos e λ é o peso calculado pela Equação 2 com base na distância d . $Z(s_i)$ é o valor conhecido do vizinho na posição i e $\hat{Y}(s_0)$ é o valor interpolado.

$$\hat{Y}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{d_{i0}^2}{\sum_{i=1}^N d_{i0}^2} \quad \text{onde} \quad \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad (2)$$

Por outro lado, a estratégia *Kriging* é um modelo geográfico estatístico que inclui a autocorrelação e o uso de

gráficos do tipo semivariograma para determinar a relação existente entre os dados de interesse. Além disso, o método assume que a distância e direção entre pontos amostrais refletem na correlação espacial e explicam a variação no valor interpolado para uma determinada coordenada.

A Equação 3 é utilizada para obter o valor por meio do método *Kriging* com modelo de variograma exponencial, onde c_0 é o valor da semivariância quando a distância entre cada par de pontos tende a zero (Efeito Pepita), a é o alcance de cada par de ponto que estão correlacionadas espacialmente, h é a distância máxima e C é o patamar ou *sill* do semivariograma relacionado ao alcance.

$$\hat{Y}(h) = c_0 + C \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right] \quad (3)$$

Na Figura 1, é apresentado um exemplo de ponto a ser interpolado em vermelho com os seus 4 (quatro) pontos vizinhos mais próximos em verde e com valores conhecidos.

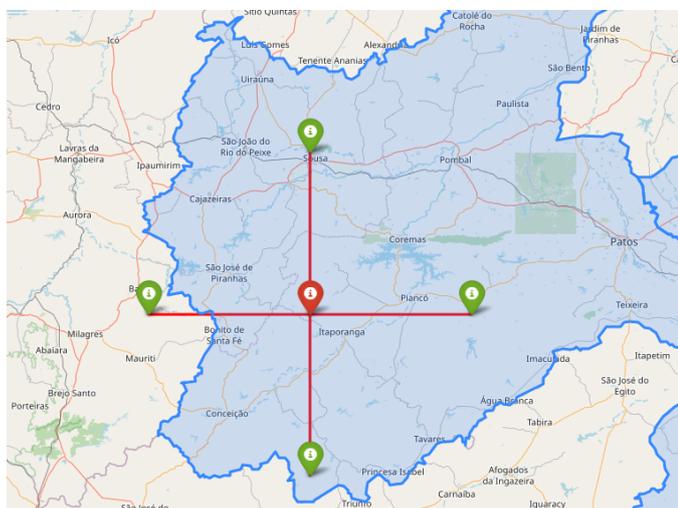


Figura 1. Ponto interpolado e seus vizinhos interpoladores.

2.3 Avaliação de Desempenho dos Métodos de Interpolação

Para a melhor utilização dos métodos de interpolação, é necessário medir o seu desempenho a partir da análise dos erros existentes entre valores reais e previstos. Dessa forma, foram utilizadas as seguintes métricas: *Mean Absolute Error* (MAE), *Mean Squared Error* (MSE) e *Root Mean Squared Error* (RMSE). O objetivo é escolher a ferramenta de interpolação que melhor se adéque para esta atividade, ou seja, o método que apresente menor erro de interpolação. Abaixo estão as equações matemáticas de cada uma das métricas utilizadas:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i - \hat{Y}_i| \quad (4)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad (6)$$

Em cada uma das Equações 4, 5 e 6, n representa o número de pares de valores real (Y) e interpolado (\hat{Y}).

2.4 Índice de Potencial de Geração Híbrida da Paraíba

O Índice Potencial de Geração Solar e Eólico da Paraíba (IP-PB) foi definido nesse trabalho, como sendo o valor atribuído a uma determinada localidade com base nas variáveis normalizadas de velocidade de vento histórica a 50 metros de altura (WS50M) e irradiação solar global do plano horizontal histórica (ALLSKY-SFC-SW-DWN).

O processo de normalização das informações de WS50M e ALLSKY-SFC-SW-DWN fez-se necessário, uma vez que as escalas eram distintas e, assim, os dados foram adequados para um intervalo comum. Então, o cálculo dessa normalização foi realizado a partir da Equação 7, fazendo uso dos valores de mínimo (x_{\min}) e máximo (x_{\max}) dos dados originais (Silva, 2018).

$$x_{\text{normalizado}} = \frac{x_{\text{original}} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (7)$$

3. METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

A primeira etapa do desenvolvimento do trabalho foi a coleta de dados da NASA. O projeto POWER disponibiliza uma *Application Programming Interface* (API), documentada em seu site oficial, para que o usuário possa acessar os dados armazenados (NASA, 2022).

Com a API, os dados foram coletados diretamente do banco de dados formando uma grade (*grid*) de pontos com uma resolução de 0.5° para latitude e longitude (aproximadamente 55 km entre os pontos), somando 37 pontos com informações georreferenciadas de interesse sobre e em torno do Estado da Paraíba. Além disso, os pontos possuem valores validados para o intervalo de 1984 a 2021 com informações referentes às variáveis detalhadas na Tabela 1.

Tabela 1. Variáveis coletadas da NASA.

Variável	Unidade	Estatísticas
Vel. do Vento	m/s	Média
Irradiação	kWh/m ²	Média

O acesso foi feito utilizando a linguagem de programação Python, uma ferramenta comumente utilizada em atividades voltadas à ciência de dados por ser de alto nível, interpretada, orientada a objetos, multiplataforma e ideal para análise exploratória de dados por possuir pacotes de códigos prontos para uso (Python, 2022).

Como pode ser observado na Figura 2, dos 37 pontos baixados da NASA, apenas 16 pontos estavam dentro dos limites do estado da Paraíba. Para esses pontos contidos na Paraíba foram adotadas cores de acordo com as Regiões Geográficas Intermediárias: Sousa - Cajazeiras (vermelho), Patos (rosa), Campina Grande (verde) e João Pessoa (azul) (IBGE, 2017). Restam 9 (nove) pontos localizados no Estado do Rio Grande do Norte (RN), 8 (oito) pontos localizados no Estado de Pernambuco (PE) e 4 (quatro) pontos localizados no estado do Ceará (CE), os quais foram identificados com a cor preta.

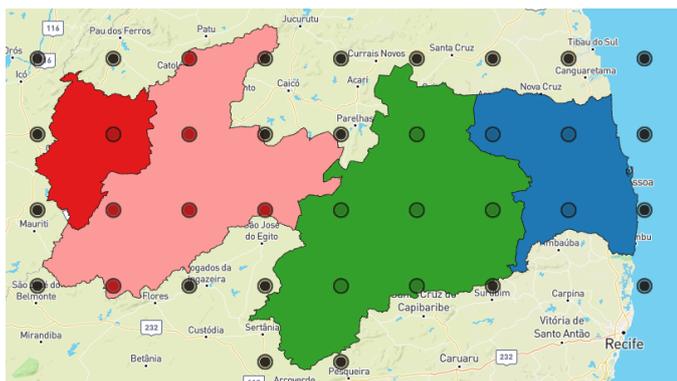


Figura 2. Pontos de dados da base da NASA sobre e em torno do Estado da Paraíba.

Os 21 pontos fora do estado da PB foram importantes para que os valores interpolados nas regiões próximas ao limite da Paraíba não fossem afetados pela ausência de dados mais significativos. Portanto, a utilização dos pontos da cor preta na Figura 2 serviu para contornar o problema de efeito de borda, independentemente do método de interpolação a ser utilizado.

A partir disso, fazendo uso de bibliotecas existentes na linguagem de programação Python, foi realizado o processamento dos dados obtidos por meio da aplicação de rotinas que eliminassem algumas anormalidades nos dados, tais como a presença de *outliers* (valores que divergem dos demais) e para que se realizasse o redimensionamento dos valores de um tempo de amostragem diário (período de amostragem original) para as médias anual e histórica.

Após a organização dos dados, os métodos de interpolação espacial de dados IDW e *Kriging* foram adotados como procedimento de determinação de dados para uma coordenada de interesse por oferecerem um desempenho geralmente adequado para estimação de valores, de acordo com a revisão bibliográfica realizada. Dessa forma, a escolha pelo melhor método de interpolação se deu a partir da análise comparativa do desempenho dos métodos IDW e *Kriging*.

Para isto, foram extraídos 6 (seis) pontos (16%) da base original e de forma aleatória, para que servissem como dados de validação. Assim, para as mesmas coordenadas (latitude e longitude) destas lacunas, foram recriados novos dados através da interpolação com base nos 4 vizinhos mais próximos para os 31 pontos restantes (84% da base original). Na Figura 3, é possível visualizar a base de teste (verde) e alguns dados da base usada para interpolação (vermelho).

A interpolação do conjunto destes 6 (seis) pontos para teste permitiu a realização da metodologia de validação cruzada. Tal procedimento consiste na interpolação de cada ponto do conjunto de pontos de teste levando em conta seus vizinhos mais próximos. A partir disso, é possível calcular os diferentes tipos de erros entre o valor real e valor estimado com os métodos IDW e *Kriging* para cada um dos 6 pontos de teste. Dessa forma, fazendo uso das métricas MAE, MSE e RMSE para as grandezas climáticas WS50M e ALLSKY-SFC-SW-DWN, verificou-se os resultados detalhados na Tabela 2.

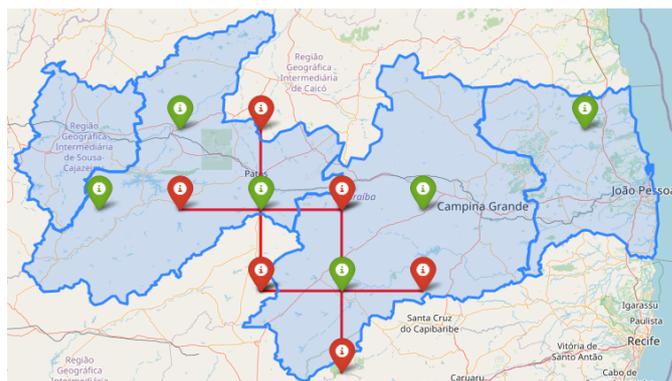


Figura 3. Pontos interpolados (verde) e vizinhos próximos a dois deles (vermelho)

Tabela 2. Comparação entre os Erros.

Variável	Método	RMSE	MSE	MAE
Vel. do Vento	IDW	0.1565	0.0266	0.1538
	<i>Kriging</i>	0.1528	0.0246	0.1459
Irradiação	IDW	0.0634	0.0051	0.0572
	<i>Kriging</i>	0.0425	0.0027	0.0343

A análise da Tabela 2 revela que o método *Kriging* apresentou uma melhor acurácia para ambas as variáveis, uma vez que resultou em valores inferiores de erro nas 3 (três) métricas avaliadas.

Na Figura 4, os valores reais e estimados de cada uma das variáveis da Tabela 2 são apresentados. É feito um comparativo dos métodos IDW e *Kriging* para o intervalo de 1984 a 2021 da base de dados.

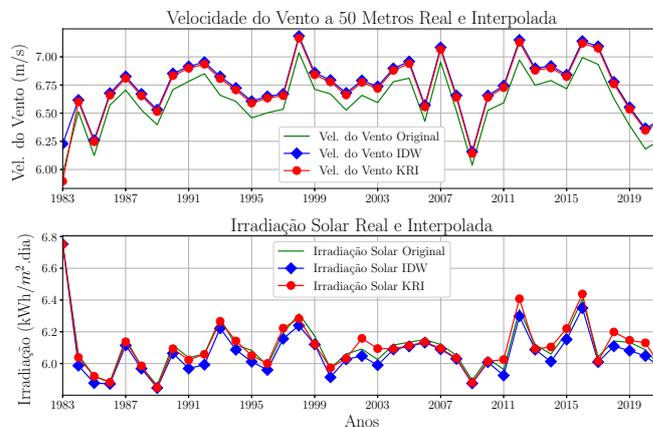


Figura 4. Dados anuais de Velocidade de Vento e Irradiação Global da base original e interpolações por IDW e *Kriging*

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a utilização do método de *Kriging*, foi possível criar a base de dados apresentada na Figura 5, a qual foi nomeada de grid MM (Multi-Mapa). Essa base referente ao Estado da Paraíba consiste em uma grade de 2054 pontos com uma resolução de 0.05° (latitude e longitude), o que resulta em uma distância de 5,5 km entre cada ponto. Nota-se que cada cor corresponde a uma média histórica da variável em questão.

Ainda na Figura 5, tem-se o *grid* MM e o *grid* da NASA para a irradiação global no plano horizontal, apresentados com uma escala de $5.7 \text{ kWh/m}^2.\text{dia}$ a $6.2 \text{ kWh/m}^2.\text{dia}$ dividida em cinco cores. Nota-se que, neste caso, os pontos do *grid* MM com melhores valores históricos de irradiação estão concentrados nas regiões geográficas intermediárias de Sousa - Cajazeiras e Patos, em ambas as bases.

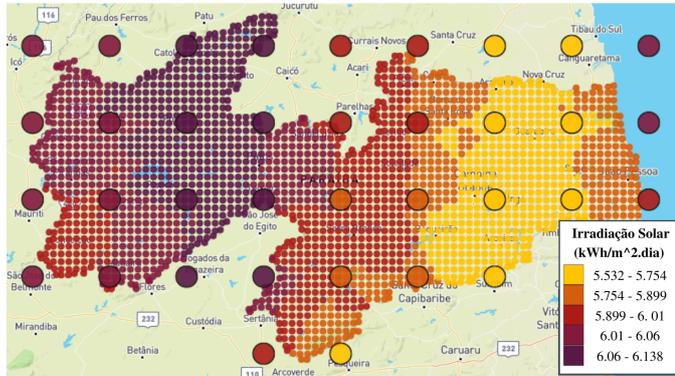


Figura 5. *Grid* MM e *grid* de ponto da NASA coloridos com base nos valores de irradiação global.

Na Figura 6, cada ponto foi identificado levando-se em consideração o seu valor para a variável velocidade do vento a 50 metros. É possível visualizar que os valores referentes a velocidade do vento para o *grid* MM são semelhantes aos valores dos pontos obtidos da NASA, considerando uma escala que vai de 5.7 m/s até 7.7 m/s dividida em cinco faixas. Essa conformidade é justificada pelo fato de o valor interpolado para cada ponto do *grid* MM ter sido influenciado pelos quatro pontos mais próximos na base de dados da NASA.

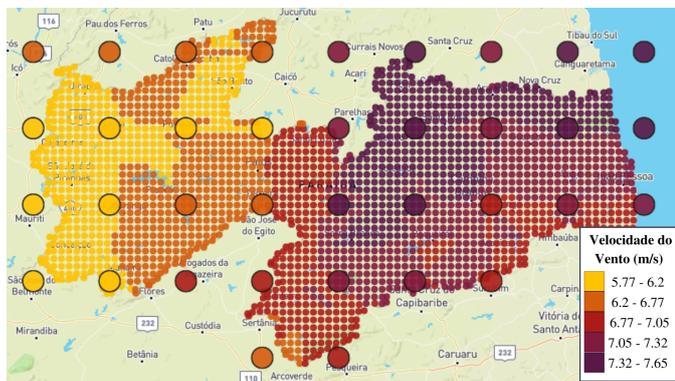


Figura 6. *Grid* MM e *grid* original da NASA com base nos valores de velocidade do vento.

Vale ressaltar também, pela Figura 6, que os pontos com os maiores valores de velocidade do vento estão concentrados nos municípios que compõem as regiões geográficas intermediárias de Campina Grande e Patos, em ambas as bases.

Os dados calculados no *grid* MM para as variáveis irradiação global e velocidade de vento permitem sugerir locais mais propícios na Paraíba para geração de energia eólica e solar, separadamente. Incontestavelmente, o potencial de geração depende de diversos fatores que vão além dessas grandezas. Mesmo assim, há uma forte correlação entre

essas grandezas e a capacidade de geração de uma localidade.

A combinação desses potenciais é de interesse para o planejamento de plantas de geração híbridas eólico-solar. O índice IP-PB foi proposto visando avaliar esse potencial combinado. Calculou-se o Índice IP-PB utilizando os valores da velocidade do vento histórica normalizada no eixo X do gráfico, e os valores da irradiação histórica normalizada no eixo Y, como podem ser observados na Figura 7. As medianas de ambos os eixos foram mostradas por meio de retas na cor preta.

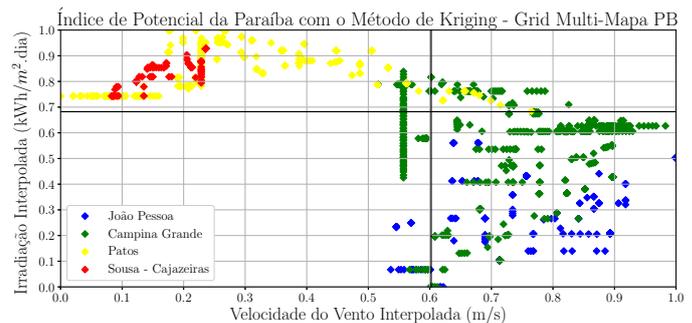


Figura 7. Gráfico de dispersão dos pontos do *grid* MM para determinação do IP-PB.

Com o gráfico da Figura 7 também é possível mapear os pontos do estado da Paraíba que possuem os melhores fatores para geração de energia solar e/ou eólica. Para isso, os pontos do *grid* MM foram agrupados por município e, assim, os 2054 pontos foram reduzidos a 223 pontos, ou seja, um único valor médio para cada um dos municípios no estado da Paraíba como ilustrado na Figura 8.

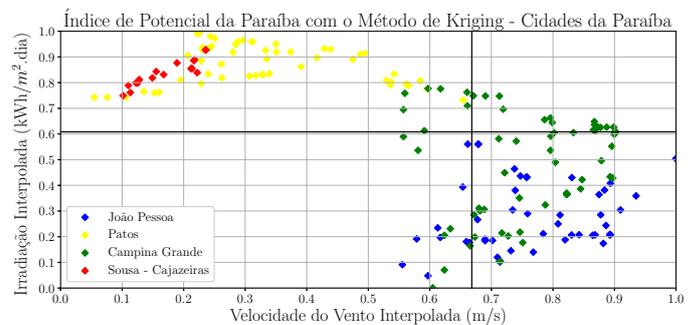


Figura 8. Gráfico de dispersão dos municípios da Paraíba para determinação do IP-PB.

Comparando as informações apresentadas nas Figuras 6 e 5 com o gráfico presente na Figura 8, nota-se que a premissa de que os municípios das regiões geográficas intermediárias Sousa - Cajazeiras e alguns municípios de região de Patos apresentam os melhores indicadores para geração de energia solar é confirmada, enquanto a região de Campina Grande e João Pessoa demonstram maior potencial para geração de energia eólica.

Como mostrado na Figura 9, os valores foram divididos com base nas medianas para os eixos X (eólico) e Y (solar) do gráfico, formando quatro grupos denominados: Bom/Bom, Bom/Ruim, Ruim/Bom e Ruim/Ruim. Tais

grupos foram utilizados visando determinar quais os melhores IP-PB em cada uma das energias renováveis analisadas (Solar/Eólica), respectivamente.

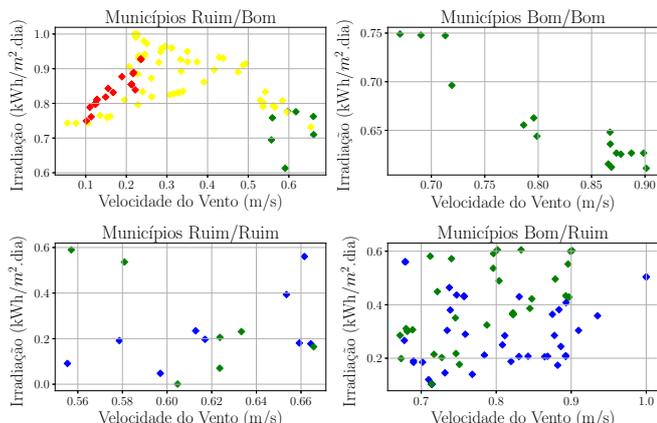


Figura 9. Gráfico de dispersão dos municípios da Paraíba para determinação do IP-PB.

A partir disso, os grupos Ruim/Bom, Bom/Bom e Bom/Ruim da Figura 9, com valores normalizados acima da mediana para irradiação solar e velocidade do vento, foram ordenados para a confecção de um ranking, em que foram selecionados os 5 (cinco) primeiros. As Tabelas 3, 4 e 5 mostram essa classificação dos municípios com maior potencial para geração solar, eólica e híbrida (combinação entre solar e eólica), apresentando também o valor médio anual para irradiação solar, o valor médio anual para velocidade do vento e o valor do IP-PB com valor máximo de 1.4142 (eixos X e Y são normalizados), respectivamente.

Tabela 3. Municípios da Paraíba com maiores potenciais solares.

Município	Irradiação (kWh/m ² .dia)	Vel. do Vento (m/s)
Brejo do Cruz	6.1382	6.1978
São Bento	6.1382	6.1853
Mato Grosso	6.1382	6.1853
Riacho dos Cavalos	6.1341	6.1946
Paulista	6.1324	6.1906

De acordo com a Tabela 3, os municípios com maior potencial para geração de energia solar por apresentarem valores máximos para a grandeza de irradiação solar estão localizados na região intermediária de Patos e fazem parte do grupo Ruim/Bom na Figura 9.

Tabela 4. Municípios da Paraíba com maiores potenciais eólicos.

Município	Irradiação (kWh/m ² .dia)	Vel. do Vento (m/s)
Mataraca	5.8377	7.6534
Baía da Traição	5.8377	7.6534
Jacaraú	5.7499	7.5311
Pedro Régis	5.7166	7.4834
Cubati	5.8973	7.4675

Conforme a Tabela 4, os municípios com maior potencial para geração de energia eólica estão inseridos no grupo Bom/Ruim na Figura 9 e estão localizados nas regiões intermediárias de Campina Grande e João Pessoa.

Tabela 5. Municípios da Paraíba e do grupo Bom/Bom com maiores IP-PB.

Município	Irradiação (kWh/m ² .dia)	Vel. do Vento (m/s)	IP-PB
Seridó	5.9121	7.4626	1.0956
Gurjão	5.9026	7.4673	1.0888
Juazeirinho	5.9121	7.4412	1.0863
Frei Martinho	5.9251	7.4034	1.0827
Pedra Lavrada	5.9114	7.4225	1.0776

Os municípios apresentados na Tabela 5 possuem os melhores valores de IP-PB para o grupo Bom/Bom, portanto, possuem as melhores combinações das grandezas solares e anemométricas. Nesse caso, há indicação de interesse para investimentos em geração híbrida de energia solar e eólica na região intermediária de Campina Grande.

Nas Figuras 10, 11 e 12, o posicionamento dos melhores municípios mostrados nas Tabelas 3, 4 e 5 são mostrados. Foi adotada uma escala de 4 (quatro) cores com base nos valores de irradiação solar, velocidade do vento e valor do IP-PB, respectivamente. A cor amarelo indica o menor valor, enquanto os tons escuros indicam os valores maiores para cada uma das grandezas em questão.

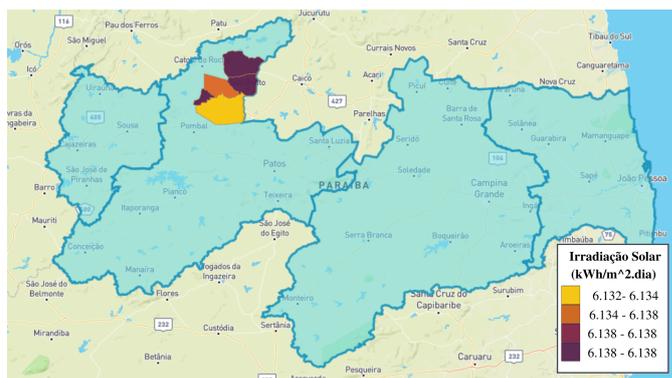


Figura 10. Top 5 dos municípios da Paraíba com os melhores valores para irradiação solar.

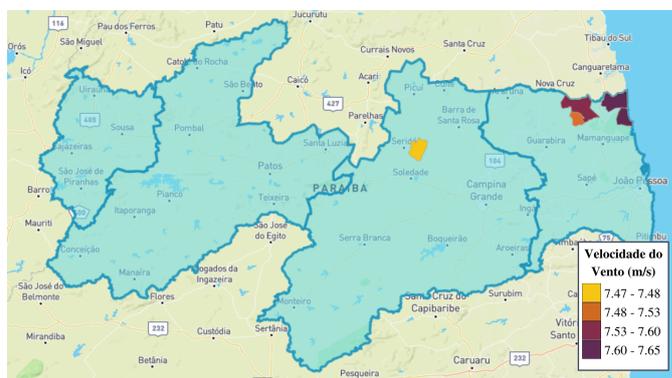


Figura 11. Top 5 dos municípios da Paraíba com os melhores valores para velocidade do vento.

Com base nestes resultados, pode-se sugerir gráfica e numericamente os melhores municípios da Paraíba em relação aos potenciais de geração solar, eólico e híbrido através de uma base com resolução adequada.

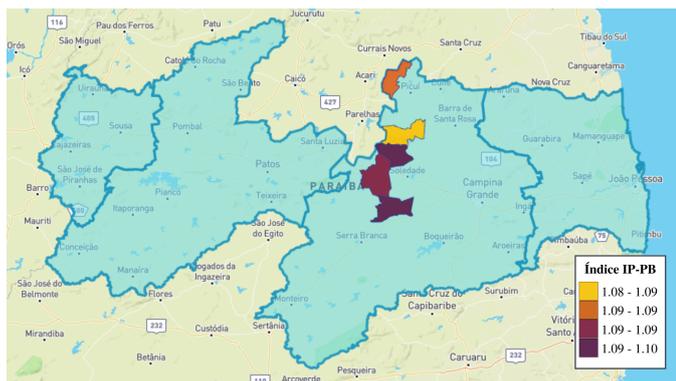


Figura 12. Top 5 dos municípios da Paraíba com os melhores índices de IP-PB.

5. CONCLUSÃO

O trabalho detalhado neste artigo foi realizado com objetivo de melhorar a resolução sobre as variáveis de irradiação solar e velocidade do vento do Estado da Paraíba e identificar os municípios com melhor potencial de geração de energia renovável (solar, eólico e híbrido) através da criação do Índice IP-PB.

Para isso, foi utilizada a base de dados da NASA para interpolação espacial de valores para regiões que não possuem dados oficiais gerando, assim, novas possibilidades de análises de dados acerca das variáveis climáticas e solarimétricas do Estado da Paraíba.

Entre as técnicas de interpolação espacial de dados utilizadas, o modelo que apresentou melhor resultado foi o modelo *Kriging* através da análise das métricas RMSE, MSE e MAE aplicadas para entender a efetividade dos modelos usados. Assim, o modelo *Kriging* apresentou os menores índices de variação e foi utilizado para o desenvolvimento da base de dados com 2054 pontos e uma resolução de 5,5 km de distância entre eles.

Por meio do Índice IP-PB, além de confirmar as premissas de que a região geográfica intermediária Patos apresenta melhores condições para geração de energia solar e de que as regiões de Campina Grande e João Pessoa possuem um alto potencial eólico, foi identificado que alguns municípios da região de Campina Grande, como Seridó, Gurjão, Juazeirinho, Frei Martinho e Pedra Lavrada, destacam-se com boas características para geração híbrida (eólica e solar).

Por fim, com os resultados obtidos, surgem possibilidades para novos estudos sobre os aspectos que permeiam regiões com poucas informações públicas, assim como a utilização de outras variáveis na elaboração do índice IP-PB ou novos gráficos e/ou resoluções incrementadas para uma melhor e mais precisa avaliação do potencial de geração de energia eólica, solar e híbrida em uma determinada região.

REFERÊNCIAS

Aguilar, S. and Souza, R.C. (2019). Regressão quantílica: Uma análise para a geração de energia eólica e velocidade do vento.
Brasil (2022). Brasil sobe para a sexta posição em ranking internacional de capacidade de energia eólica onshore.

[urlhttps://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2022/04/brasil-sobe-para-a-sexta-posicao-em-ranking-internacional-de-capacidade-de-energia-eolica](https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2022/04/brasil-sobe-para-a-sexta-posicao-em-ranking-internacional-de-capacidade-de-energia-eolica).

Brubacher, J.P., Oliveira, G.G.d., and Guasselli, L.A. (2020). Preenchimento de falhas e espacialização de dados pluviométricos: desafios e perspectivas. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 35, 615–629.

IBGE, C.d.G. (2017). In *Divisão regional do Brasil em regiões geográficas imediatas e regiões geográficas intermediárias : 2017*.

IEA (2021). World energy outlook 2021. [urlhttps://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021](https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021).

Lv, L. and Li, Y. (2018). The study of short term wind prediction with improved kriging method. In *2018 37th Chinese Control Conference (CCC)*, 7656–7658.

Martinez Martinez, D.C. and Narducci, M.S. (2020). Spatial variation prediction and mapping of soil temperature. In *2020 Virtual Symposium in Plant Omics Sciences (OMICAS)*, 1–6.

NASA (2022). Nasa power|prediction of worldwide energy resources. [urlhttps://power.larc.nasa.gov/](https://power.larc.nasa.gov/).

Paul, S., Dey, T., Saha, P., Dey, S., and Sen, R. (2021). Review on the development scenario of renewable energy in different country. In *2021 Innovations in Energy Management and Renewable Resources(52042)*, 1–2.

Python (2022). Welcome to python.org. [urlhttps://www.python.org/](https://www.python.org/).

Santos, R.M.B. and Pereira, E.B. (2014). Aplicação do método de kriging para estimar campos de radiação solar: um estudo para o nordeste do brasil.

Silva, H.B. (2018). Técnicas para redução de dimensionalidade de séries temporais e detecção de velocidades extremas do vento para geração eólica. [urlhttps://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/30016](https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/30016)., Dissertação (Engenharia Elétrica), UFPE (Universidade Federal do Pernambuco), Recife, Brasil.

Yagli, G.M., Tay, J.W.E., and Yang, D. (2019). Ensemble kriging for environmental spatial processes. In *2019 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, 3947–3950.