

## **Avaliação de métodos para atualização do mapeamento eólico do Estado de Alagoas**

Evaluation of methods for update of wind mapping in the State of Alagoas

Evaluación de métodos para actualización de cartografía eólica en el Estado de Alagoas

Recebido: 12/01/2023 | Revisado: 25/01/2023 | Aceitado: 26/01/2023 | Publicado: 01/02/2023

### **Luan Santos de Oliveira Silva**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9676-1327>

Universidade Federal de Alagoas, Brasil

E-mail: [luan.silva@icat.ufal.br](mailto:luan.silva@icat.ufal.br)

### **Rosiberto Salustiano da Silva Junior**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7152-0095>

Universidade Federal de Alagoas, Brasil

E-mail: [rosiberto@icat.ufal.br](mailto:rosiberto@icat.ufal.br)

### **Roberto Fernando da Fonseca Lyra**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4066-7451>

Universidade Federal de Alagoas, Brasil

E-mail: [rffl@ccen.ufal.br](mailto:rffl@ccen.ufal.br)

### **Fernando Ramos Martins**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7618-4462>

Universidade Federal de São Paulo, Brasil

E-mail: [fernando.martins@unifesp.br](mailto:fernando.martins@unifesp.br)

### **Marcos Antônio Lima Moura**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1523-7647>

Universidade Federal de Alagoas, Brasil

E-mail: [malm@ccen.ufal.br](mailto:malm@ccen.ufal.br)

### **João Bosco Verçosa Leal Junior**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7636-7050>

Universidade Estadual do Ceará, Brasil

E-mail: [jblealjr@gmail.com](mailto:jblealjr@gmail.com)

### **Kelvy Rosalvo Alencar Cardoso**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4391-8167>

Universidade Federal de Alagoas, Brasil

E-mail: [kelvy.cardoso@icat.ufal.br](mailto:kelvy.cardoso@icat.ufal.br)

### **Resumo**

O presente trabalho apresenta o estudo do mapeamento eólico no estado de Alagoas, nordeste do Brasil, utilizando o modelo mesoescala Weather Research Forecast (WRF), versão (4.1.2), e aproximações de estabilidade atmosférica e declividade do terreno. As simulações foram executadas diariamente por um período de 8 anos (2007 - 2015), com resolução horizontal de 5 km e realizado um refinamento da resolução para 250 metros. Foram validadas estatisticamente com dados de 5 estações anemométricas de superfície situadas nas seguintes cidades: Água Branca (sertão), Girau do Ponciano (agreste), Palmeira dos Índios (agreste), Maragogi (litoral) e Roteiro (litoral). A ordem de grandeza e os resultados dos padrões do vento semelhantes para as resoluções de 5km e 250m, indica boa representação pelo modelo atmosférico WRF, como também, valida o método downscaling proposto. Sendo os índices de correlação moderada, BIAS entre -1,89 a 1,76 m/s e REQM entre 1,94 a 3,82 m/s para velocidade do vento e direção predominante do vento variando entre Leste/Sudeste. A comparação espacial dos resultados com simulações do modelo WAsP reforça que a inclusão da estabilidade atmosférica e declividade possibilitou representar com maior clareza o efeito da topografia e rugosidade superficial, o que é crucial para redução da cascata de incertezas no sistema de energia eólica. O refinamento da saída do modelo WRF ressaltaram as áreas promissoras para aproveitamento eólico nas regiões serranas das cidades de Água Branca e Palmeira dos Índios, com intensidade anual acima de 8m/s para 100m de altura.

**Palavras-chave:** Modelagem atmosférica; Aproveitamento eólico; Processos de sub-grade; Estabilidade atmosférica; Declividade.

### **Abstract**

The present work presents the study of wind mapping in the state of Alagoas, northeastern Brazil, using the mesoscale model Weather Research Forecast (WRF), version (4.1.2), and approximations of atmospheric stability and terrain slope. The simulations were run daily for a period of 8 years (2007 - 2015), with a horizontal resolution of 5 km and a

resolution refinement to 250 meters. They were statistically validated with data from 5 surface anemometric stations located in the following cities: Água Branca (hinterland), Girau do Ponciano (wild), Palmeira dos Índios (wild), Maragogi (coast) and Roteiro (coast). The order of magnitude and similar wind pattern results for the 5km and 250m resolutions indicate good representation by the WRF atmospheric model, as well as validating the proposed downscaling method. Being the moderate correlation indices, BIAS between -1.89 to 1.76 m/s and REQM between 1.94 to 3.82 m/s for wind speed and predominant wind direction varying between East/Southeast. The spatial comparison of the results with simulations of the WASP model reinforces that the inclusion of atmospheric stability and slope made it possible to represent with greater clarity the effect of topography and surface roughness, which is crucial for reducing the cascade of uncertainties in the wind energy system. The refinement of the output of the WRF model highlighted the promising areas for wind use in the mountainous regions of the cities of Água Branca and Palmeira dos Índios, with annual intensity above 8m/s for 100m of height.

**Keywords:** Atmospheric modeling; Wind farm; Downscaling; Atmospheric stability; Slope.

### Resumen

El trabajo muestra el estudio del mapeo del viento en el estado de Alagoas, noreste del Brasil, utilizando el modelo de mesoescala Weather Research Forecast (WRF), versión (4.1.2), y aproximaciones de estabilidad atmosférica y pendiente del terreno. Las simulaciones se realizaron diariamente durante el período 8 años (2007 - 2015), con resolución horizontal de 5km y un refinamiento de resolución 250m. Fueron validados estadísticamente con datos de 5 estaciones anemométricas de superficie ubicadas en las siguientes ciudades: Água Branca (interior), Girau do Ponciano (salvaje), Palmeira dos Índios (salvaje), Maragogi (costa) y Roteiro (costa). El orden de magnitud y los resultados similares del patrón de viento para las resoluciones de 5km y 250m indican una buena representación del modelo WRF, además de validar el método de reducción de escala propuesto. Siendo los índices de correlación moderados, BIAS entre -1.89 a 1.76m/s y REQM entre 1.94 a 3.82m/s para la velocidad del viento y la dirección predominante del viento variando entre Este/Sureste. La comparación espacial de los resultados con simulaciones del modelo WASP refuerza que la inclusión de la estabilidad atmosférica y la pendiente permitieron representar con claridad el efecto de la topografía y la rugosidad de la superficie, siendo crucial para reducir la cascada de incertidumbres en la energía eólica. El refinamiento de la salida del modelo WRF destacó las áreas promisorias para el uso del viento en las regiones montañosas de las ciudades de Água Branca y Palmeira dos Índios, con intensidad anual mayor 8m/s para 100m de altura.

**Palabras clave:** Modelado atmosférico; Producción eólica; Reducción de escala; Estabilidad atmosférica; Pendiente.

## 1. Introdução

A preocupação referente às emissões de gases de efeito estufa tem sido recorrentes em debates sociais, científicos, governamentais ou noticiários ao redor do mundo. Afinal, ao longo dos anos, as emissões apresentam relação ao desenvolvimento acelerado dos países que, por sua vez, necessita atender maior demanda de energia de sua população. Contudo, partindo do pressuposto que a geração de energia com uso de combustíveis fósseis é finita, torna-se cada vez mais imprescindível a busca por fontes alternativas para geração de energia, ou melhoria na eficiência energética. As formas potenciais de enfrentar esses desafios incluem a diversificação da matriz de fornecimento de energia e a inclusão de estratégias de mitigação das mudanças climáticas no desenvolvimento de energia e suporte de infraestrutura (Mondal et al., 2018).

Para possibilitar o emprego de práticas sustentáveis em uma região é necessário compreender como é organizada sua matriz energética (Santos et al., 2021). A biomassa da cana (16,4%) e hidroelétricas (11%) são as fontes renováveis com maior participação na matriz energética brasileira (EPE, 2022). Revela-se que a fonte de energia hidráulica, por si só, não pode garantir o caráter de sustentabilidade à matriz energética brasileira. O uso do potencial hidroelétrico traz consigo uma série de impactos socioeconômicos e ambientais, ocasionalmente um dos principais sinalizadores da sustentabilidade da matriz energética nacional, uma vez que se trata de uma energia renovável (Andrade & Mattei, 2013; Krell & De Castro e Souza, 2020). A hidroeletricidade seguirá consolidada no parque gerador brasileiro, no entanto a diversificação da matriz em virtude da combinação da geração solar e eólica contribuirá para reduzir a vulnerabilidade às secas e a intermitência destas fontes associada às condições meteorológicas locais (Goncalves et al., 2020; Luiz et al., 2018). É notável a expansão da geração solar tanto através de grandes centrais geradoras fotovoltaicas, de capacidade superior a 1 MW, quanto através da geração

distribuída, onde consumidores são habilitados a gerar sua própria energia e conectá-la à rede elétrica (Gonçalves & Costa, 2018). Atualmente a atratividade das fontes renováveis aumentou a competitividade das fontes eólica e solar, sendo a comercialização destes consórcios com preço em torno de 173 R\$/MWh nos leilões do governo para 2022 (BRASIL, 2022).

O uso da energia eólica tem crescido exponencialmente nas últimas décadas, tornando-se uma tecnologia bem estabelecida na área de energias renováveis. A região nordeste do Brasil gera a maior parte da energia eólica do país, respondendo por 84% da produção eólica nacional (Souza, 2022). De acordo com o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro o território brasileiro disponibiliza velocidades médias anuais superiores a 7m/s para as alturas de 50m, 70m e 100m, com destaque ao nordeste brasileiro pela predominância dos ventos em baixos níveis. Devido o crescente avanço tecnológico, os atuais aerogeradores são favorecidos com instalação acima de 100m, acarretando no melhor aproveitamento energético em função das condições de relevo e rugosidade aerodinâmica.

O litoral do Nordeste brasileiro é favorecido com a intensidade e persistência dos ventos alísios, que resulta em boas condições para a exploração da energia cinética dos ventos. Da mesma forma que as condições oceânicas influenciam o tempo e clima no Nordeste, também a configuração da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) no Pacífico equatorial apresenta relação com alterações na circulação atmosférica sobre o Nordeste (Alexander & Scott, 2002). A forte influência da circulação geral faz-se pronunciada tendo em vista que eventos intensos de El Niño e La Niña atuam no sentido de intensificar e enfraquecer, respectivamente, os ventos sobre essa região (Oliveira & Costa, 2011). A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e o regime de ventos alísios associados à circulação da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) são os fenômenos mais importantes no comportamento da circulação do vento em superfície (Carpenedo & Ambrizzi, 2020; ELETROBRÁS, 2008). No Verão, os ventos têm persistência de leste/sudeste, influenciados pela Zona de Convergência Intertropical, enquanto no Outono e Inverno há a migração para sudeste e sul, associado a maior proximidade da ASAS à costa do Nordeste e à incursão de frentes frias e massas polares induzindo a circulação de sul (Ide E Ester & Ito, 2000). A direção predominante do vento no Nordeste do Brasil é de Leste, com flutuações para Sudeste e Nordeste. As intensidades máximas dos ventos ocorrem entre junho e dezembro, e as mínimas entre março e maio. Para o litoral, os ventos alísios favorecem a penetração da brisa marítima no continente durante os períodos de máxima (Silva et al., 2002).

Além dos aspectos favoráveis quanto a predominância do vento nas regiões costeiras do Brasil, as linhas de transmissão têm destaque pela proximidade dos centros urbanos e, adjunto as malhas viárias, viabiliza a integração da rede elétrica com redução de custos de instalação e manutenção das mesmas (Pinto et al., 2017).

Em geral, os métodos adotados para determinação das áreas promissoras, fazem uso de padrões do vento como intensidade e predominância para realizar estimativas do potencial eólico de uma dada região de interesse e, aliado a isso, considerar as características do terreno (topografia, obstáculos e rugosidade) (Oliveira, 2013). Contudo, a escassez de medições em estações meteorológicas, tanto no que se refere a distribuição espacial quanto temporal, inviabiliza estimativas confiáveis do vento em virtude variabilidade interanual. Tal carência pode ser contornada com uso de reanálises meteorológicas obtidas por várias fontes de dados com elevada abrangência temporal, porém com baixa resolução espacial. No sentido de melhorar a representatividade espacial e temporal dos dados que possibilitem melhorar a representatividade dos mapas eólicos (estimativa do potencial), surge como alternativa o uso da modelagem numérica atmosférica, a qual proporciona realizar simulações nas escalas global, meso e micro. Ela é uma excelente ferramenta computacional para o setor energético, pois promove obtenção de estimativas dos padrões do ventos em alta resolução e séries temporais longas ou curtas a depender da demanda, sendo estes fatores determinantes na avaliação de áreas promissoras para investimento e desenvolvimento de unidades geradoras (Martins et al., 2008). Em geral, o prognóstico do vento propicia benefícios nas diversas esferas econômicas da sociedade (Ramos et al., 2013).

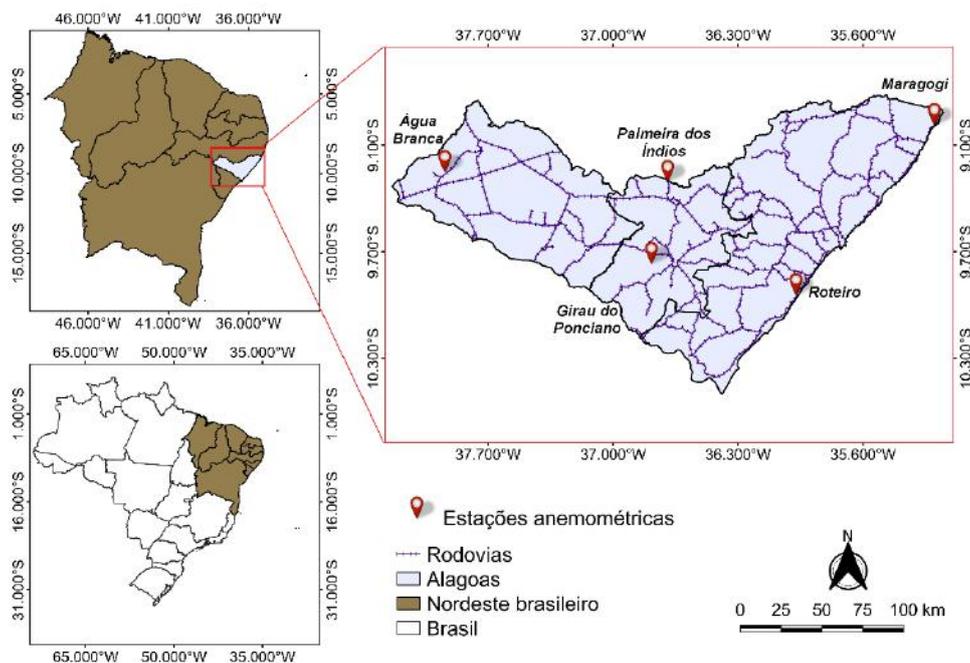
Desse modo, a presente pesquisa visa mapear o potencial eólico do Estado de Alagoas através do uso de modelos numéricos atmosféricos para obter o melhor detalhamento possível das áreas promissoras destinadas a exploração da força do vento para geração de energia eólica.

## 2. Metodologia

### 2.1 Área de Estudo

A abordagem do estudo ocorreu no Estado de Alagoas, caracterizado pelo clima quente e úmido, fator crucial para criação de ventos fortes (Silva et al., 2015). Outro fator importante é o regime de ventos, cujo a predominância das direções Leste e Sudeste está relacionada à influência dos ventos alísios predominante ao longo do ano, assim como, a sobreposição de alta pressão do Atlântico (Costa & Lyra, 2012; ELETROBRÁS, 2008). Dessa forma, os municípios foram selecionados em cada mesorregião – sertão (Água Branca), agreste (Girau do Ponciano e Palmeira dos Índios) e litoral (Maragogi e Roteiro) – com o intuito de investigar o recurso eólico em todo território alagoano a partir de resultados de modelagem comparados com dados observados em torres anemométricas.

**Figura 1** - Localização das estações anemométricas da ELETROBRÁS em Alagoas.



Fonte: Autoria própria.

### 2.2 Configuração do modelo WRF

As simulações numéricas, em mesoescala, foram realizadas a partir do modelo atmosférico Weather Research Forecast (WRF) desenvolvido no National Center for Atmospheric Research (Skamarock et al., 2005, 2008), versão 4.1.2, tendo como dados de entrada reanálise climática global “*ECMWF Reanalysis v5*” (ERA5 – <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5>) com resolução espacial de 30 km e temporal de 3 horas. As simulações foram realizadas para períodos de 24 horas (para cada dia) entre o período de 01/01/2007 – 31/12/2015, para um

domínio com resolução de 5km em grade com 81 x 81 pontos de modo a cobrir toda a área em estudo. Foram adotados 38 níveis verticais para o perfil atmosférico.

As variáveis velocidade e direção do vento foram extraídas para o nível de 10m de altura, e depois extrapolada para os níveis de 30m e 50m utilizando a lei da potência. As estimativas fornecidas pelo WRF foram validadas com dados anemométricos observados para os mesmos níveis indicados. No tocante a direção do vento, os dados foram extraídos diretamente das saídas do modelo WRF para o nível de 10m de altura e assumido que não ocorrem mudanças significativas entre as alturas de 10 à 100m (Silva Junior et al., 2010).

### 2.3 Validação estatística do modelo WRF

Os dados utilizados para validação das simulações e estimativas dos padrões do vento, integram também base de dados na elaboração do Atlas Eólico do Estado de Alagoas através do convênio entre Centrais Elétricas Brasileiras (ELETROBRÁS), Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) e Universidade Federal de Alagoas (UFAL). Foram selecionadas as medições realizadas entre o período de 01/01/2008 – 31/12/2008 em razão da maior consistência dos dados anemométricos disponíveis (Tabela 1), para os níveis de altura 30m e 50m. Os parâmetros estatísticos utilizados para dimensionar a precisão das simulações e estimativas foram os seguintes: média ( $\bar{X}$ ), desvio padrão ( $s$ ), coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ), Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) e Viés (BIAS) – semelhante ao utilizado por Ramos (2013).

**Tabela 1** - Consistência de dados disponíveis na base de dados anemométricos da ELETROBRÁS.

	Água Branca	Girau do Ponciano	Maragogi	Palmeira dos Índios	Roteiro
<b>2008</b>	100,00%	99,95%	99,95%	79,12%	99,94%

Fonte: Autoria própria.

Vale ressaltar que o desvio padrão ( $\sigma$ ) de uma amostra, é a métrica estatística de dispersão e indica a uniformidade do conjunto. Dessa forma, baixo desvio padrão indica que os dados estão próximos da média ou do valor esperado. Enquanto alto desvio padrão, indica que os dados estão espalhados por uma ampla gama de valores. Sendo definido por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(u_i - \bar{u})^2}{(n - 1)}} \quad (eq. 1)$$

Já o coeficiente de correlação Pearson ( $r$ ), é um parâmetro estatístico que expressa o quão fortemente estão relacionadas as amostras exemplos X e Y. Para fins descritivos, Devore (2009) relaciona como forte  $r \geq 0,8$ , moderada se  $0,5 < r < 0,8$ , e fraca se  $r \leq 0,5$ . O coeficiente de correlação Pearson é definido por:

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum(x_i - \bar{x})^2)(\sum(y_i - \bar{y})^2)}} \quad (eq. 2)$$

A Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) tem o objetivo de expressar a precisão dos resultados numéricos, quando comparado aos dados observados, com a vantagem ao apresentar valores do erro nas mesmas dimensões da variável abordada. Valores próximos a zero, indicam um desempenho melhor do modelo dado que as estimativas estarão próximas dos valores observados em campo. O RMSE é definido por:

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \quad (eq. 3)$$

Por fim, o VIÉS (BIAS em inglês), é a medida simples da diferença entre os dados previsto e observado, indica a tendência apresentada pelo modelo em superestimar ou subestimar a variável em questão. Esta tendência, também chamada de erro sistemático, e é definida como:

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i) \quad (eq. 4)$$

#### 2.4 Diminuição da resolução da saída do modelo WRF

A partir dos resultados gerados com as simulações realizadas com o modelo atmosférico WRF para o estado de Alagoas (domínio mais refinado d02), foram realizados os ajustes de declividade baseado em Solano et al. (2021) sendo determinado a partir dos dados de topografia SRTM (“Shuttle Radar Topography Mission”) com resolução espacial de 30m, ver equação 5. Já as inclusões dos parâmetros de estabilidade atmosférica foram realizados como proposto Foken (2006), Hedegaard & Larsen (1983) e Sathe & Bierbooms (2007) baseado na Teoria da Similaridade de Monin-Obukhov, ver equação 6. A metodologia adotada possibilita a atualização do mapa eólico alagoano, que aprimorando a resolução espacial da saída do modelo WRF para 250m, e incorporando ao mapa o efeito da rugosidade.

Ajuste declividade, (eq.5)

$$\nabla h(x,y) = \sqrt{\left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial y}\right)^2}$$

$$w_{adj} = \begin{cases} \frac{3}{4} w_{avg}, & \nabla h \leq 0.3 \\ w_{avg}, & 0.3 \leq \nabla h \leq 1 \end{cases}$$

Onde:  $\nabla h$  - Fator de inclinação,  $h$  - altura topografia,  $w_{adj}$  - Vento ajustado,  $w_{avg}$  - Vento Médio na grade.

Ajuste estabilidade, (eq.6):

Perfil Logarítmico do vento, (eq.6.1)

$$u = \frac{u^*}{k} \left[ \ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right) - \varphi\left(\frac{Z}{L}\right) \right]$$

Onde:  $u$  - Velocidade do vento no nível considerado,  $u^*$  - Velocidade de Fricção,  $Z$  - nível considerado,  $Z_0$  - Comprimento de Rugosidade,  $L$  - Comprimento de Monin-Obukhov,  $k$  - Constante de Von-Kármán (igual a 0,4).

Função de Estabilidade, (eq.6.2):

$$\varphi_m\left(\frac{Z}{L}\right) = (1 - 15 \frac{Z}{L})^{-1/4}, \quad -2 < \frac{Z}{L} < 0.$$

$$\varphi_m\left(\frac{Z}{L}\right) = 1 + 4.7 \frac{Z}{L}, \quad 0 < \frac{Z}{L} < 1.$$

Sendo ainda, (eq.6.3):

$$\text{Para } \frac{Z}{L} < 0, \quad \varphi\left(\frac{Z}{L}\right) = 2 \ln\left(\frac{1+\varphi_m^{-1}}{2}\right) + \ln\left(\frac{1+\varphi_m^{-2}}{2}\right) - 2 \tan^{-1}(\varphi_m^{-1}) + \frac{\pi}{2}$$

$$\text{Para } \frac{Z}{L} > 0, \quad \varphi\left(\frac{Z}{L}\right) = -4,8 \frac{Z}{L}$$

Os dados de uso do solo (tipo de cobertura do solo) utilizados para determinar os parâmetros de rugosidade  $Z_0$  (Dorval et al., 2017; Ramos, 2012; Troen & Lundtang Petersen, 1989) foram obtidos com base no projeto MapBiomas (<http://mapbiomas.org>). Os mapas demonstram os principais tipos de cobertura do solo para o período entre 1985 e 2017 dos principais biomas brasileiros com resolução espacial de 30m produzidos com base em imagens de satélite do Landsat usando um tratamento randômico para interferência de nuvens utilizadas pelo “Google Earth Engine”. O esquema de classificação apresenta 20 categorias definidas para todo o Brasil (Mas et al., 2019).

## 2.5 Configuração do modelo WAsP

O modelo WAsP (Wind Atlas Analysis And Application Program), desenvolvido pelo laboratório dinamarquês Riso, permite a avaliação do potencial eólico de forma pontual e a caracterização espacial da área em virtude de um ponto de medição instalado ou fictício (Fadigas, 2011). Mediante a inclusão das variáveis de velocidade e direção do vento, os modelos utilizados no WAsP, são capazes de corrigir para cada ponto do terreno o perfil vertical do vento quando sujeito a efeitos de sombreamento derivados da presença de obstáculos na região em estudo, e também variações impostas pelo terreno e rugosidade. Recomenda-se este modelo adequado para o estudo de locais com características de terreno homogêneas. Sendo as limitações identificadas em terrenos complexos cujo comportamento do vento é considerado afastado da realidade.

As simulações em microescala foram realizadas no modelo WAsP, versão 10, adotando resolução espacial de 250m, e tendo como entrada as simulações realizadas pelo modelo WRF com resolução espacial de 5km (domínio 02), ou seja, com abordagem na resolução temporal de 24 horas corridas entre o período de 01/01/2007 – 31/12/2015 das variáveis meteorológicas de velocidade e direção do vento. Dessa vez, a velocidade extrapolada através do perfil logarítmico do vento ao nível de 100m para melhor aproveitamento eólico. Para representação da topografia, o uso do Modelo Digital de Elevação SRTM foi fundamental para extração das curvas de nível com equidistância de 30m. Enquanto a determinação da rugosidade ocorreu a partir das imagens do projeto “*Global Land Cover Copernicus*” (<https://lcviewer.vito.be/2019>) na qual possibilitou configurar o tipo de uso do solo.

## 3. Resultados e Discussão

A eficiência das simulações realizadas por modelos atmosféricos, utilizado para estimar a velocidade e direção do vento, são frequentemente validadas usando ferramentas estatísticas para comprovar sua precisão em comparação aos dados observados (Jatobá et al., 2017; Ramos, 2012; Ramos et al., 2013). Neste sentido, ao avaliar o comportamento entre as simulações do WRF e os dados observados em distintos pontos de medição (Tabelas 2 e 3), foi possível evidenciar a habilidade do modelo WRF para representação do padrão do vento no estado de Alagoas, a partir dos parâmetros: coeficiente de correlação classificada como moderada (entre 0,51 e 0,66), REQM entre 1,94 a 3,68 m/s no nível de 30m, e 2,11 a 3,82 m/s ao nível de 50m e, que em termos médios das cidades na comparação velocidade do vento e REQM, as análises apontam para 39% e 38% de erro para os níveis de 30m e 50m respectivamente. Já o BIAS entre as cidades avaliadas variam entre -1,86 a 1,76 m/s no nível de 30m, e -1,89 a 1,73 m/s no nível de 50m e, em média ocorre superestimativas das simulações, como pode ser visto através do BIAS médio por cidade de 0,24m/s para 30m e 0,11m/s para 50m. Em geral, a validação das simulações pontuais nas alturas distintas abordadas apontam que não há impacto significativo das previsões do vento em detrimento do afastamento do solo, como também, a aplicação de redução espacial da grade.

**Tabela 2** - Valores anuais da velocidade média do vento observada e simulada (WRF\_5km), com os respectivos desvios padrão observado e simulado (WRF\_5km), correlação de Pearson (r), BIAS e RMSE nos níveis de 30 e 50m de altura.

Altura	Cidades	$\bar{X}_{OBS}$ (m/s)	$\bar{X}_{WRF}$ (m/s)	$\sigma_{OBS}$ (m/s)	$\sigma_{WRF}$ (m/s)	r	BIAS (m/s)	REQM (m/s)
30 m	Água Branca	6,78	6,43	2,25	2,15	0,51	-0,40	2,26
	Maragogi	5,44	6,16	1,96	2,16	0,56	0,68	2,10
	Palmeira dos Índios	6,11	6,64	2,48	2,47	0,64	1,76	3,71
	Girau do Ponciano	7,24	6,66	2,36	2,10	0,63	-0,63	2,11
	Roteiro	5,28	5,51	1,79	2,12	0,56	0,10	2,04
50m	Água Branca	7,26	7,17	2,39	2,42	0,52	-0,15	2,42
	Maragogi	5,84	6,37	2,13	2,25	0,57	0,47	2,14
	Palmeira dos Índios	7,03	7,35	2,62	2,80	0,65	1,73	4,06
	Girau do Ponciano	7,66	8,14	2,38	2,50	0,64	0,41	2,21
	Roteiro	5,71	5,93	1,91	2,26	0,57	0,09	2,17

Fonte: Autoria própria.

**Tabela 3** - Valores anuais da velocidade média do vento observada e simulada (WRF\_250m), com os respectivos desvios padrão observado e simulado (WRF\_250m), correlação de Pearson (r), BIAS e RMSE nos níveis de 30 e 50m de altura.

Altura	Cidades	$\bar{X}_{OBS}$ (m/s)	$\bar{X}_{WRF}$ (m/s)	$\sigma_{OBS}$ (m/s)	$\sigma_{WRF}$ (m/s)	r	BIAS (m/s)	REQM (m/s)
30 m	Água Branca	6,78	6,81	2,25	1,95	0,56	-0,03	2,05
	Maragogi	5,44	6,47	1,96	2,15	0,58	0,97	2,19
	Palmeira dos Índios	6,11	6,63	2,48	1,95	0,64	1,74	3,68
	Girau do Ponciano	7,24	5,42	2,36	2,03	0,66	-1,86	2,66
	Roteiro	5,28	5,72	1,79	2,07	0,55	0,39	1,94
50m	Água Branca	7,26	7,18	2,39	1,82	0,56	-0,14	2,11
	Maragogi	5,84	6,80	2,13	1,94	0,60	0,90	2,11
	Palmeira dos Índios	7,03	6,95	2,62	1,78	0,63	1,33	3,82
	Girau do Ponciano	7,66	5,82	2,38	1,95	0,61	-1,89	2,74
	Roteiro	5,71	6,11	1,91	1,93	0,56	0,35	1,89

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 4 apresenta levantamento de estudos que utilizaram modelos numéricos de previsão do tempo (ETA, RAMS e WRF) com abordagem na investigação do prognóstico do vento para as diversas regiões do Brasil. Gonçalves (2011) ao simular regiões do nordeste brasileiro pelo modelo ETA, encontrou RMSE entre 2,30 a 4,63 m/s e correlação 0,22 a 0,58, com tendência de subestimação ou superestimação do modelo em virtude dos valores de BIAS oscilando entre -3,47 a 3,64 m/s. Maria et al. (2008) a partir do emprego do modelo RAMS, com diferentes resoluções espaciais, revelou que a diminuição da grade (maior detalhamento) proporciona resultados aproximados as medições locais. Lima et al. (2015) buscou avaliar o comportamento do modelo RAMS mediante em períodos distintos: 2005 (Ano Neutro) e 2008 (La Niña). Os autores concluem que a eficácia do modelo mitiga a falta de anemômetros instalados na região, assim como, os resultados satisfatórios demonstram que o regime de ventos fortalece o desenvolvimento e implementação de usinas eólicas.

**Tabela 4** - Estudos que utilizaram os modelos atmosféricos para prognóstico da velocidade do vento no cenário brasileiro levando em consideração correlação de Pearson (r), BIAS e RMSE.

	Grade	Modelo	Região	r	BIAS (m/s)	REQM (m/s)
Maria et al. (2008)	5 km	RAMS	Ceará	0,42 e 0,81	-3,07 e -2,22	3,37 e 3,22
	1 km			0,54 e 0,79	-1,62 e -2,20	2,03 e 2,98
Gonçalves (2011)	5 km	ETA	ALAGOAS, PARAÍBA E PERNAMBUCO	0,22 a 0,58	-3,47 a 3,64	2,30 a 4,63
Ramos (2012)	5 km	WRF	ALAGOAS	-	-0,60 a 2,30	2,36 a 3,84
Ramos et al. (2013)	5 km	WRF	ALAGOAS	-	-0,60 a 2,32	2,36 a 3,84
Oliveira (2013)	4 km	WRF	PARAÍBA	0,73 a 0,83	-0,43 a 2,29	0,86 a 2,34
Lima et al. (2015)	2 km	RAMS	CEARÁ	0,58 e 0,90	-1,80 a -1,01	-
Campos et al. (2016)	3 km	WRF	MINAS GERAIS, RIO DE JANEIRO E SÃO PAULO	0,31 a 0,52	-1,89 a 0,49	2,18 a 3,83
Perini de Souza et al. (2022)	3 km	WRF	BAHIA	0,18 a 0,68	0,06 a 2,76	1,10 a 3,03

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 4 apresenta levantamento de estudos que utilizaram modelos numéricos de previsão do tempo (ETA, RAMS e WRF) com abordagem na investigação do prognóstico do vento para as diversas regiões do Brasil. Gonçalves (2011) ao simular regiões do nordeste brasileiro pelo modelo ETA, encontrou RMSE entre 2,30 a 4,63 m/s e correlação 0,22 a 0,58, com tendência de subestimação ou superestimação do modelo em virtude dos valores de BIAS oscilando entre -3,47 a 3,64 m/s. Maria et al. (2008) a partir do emprego do modelo RAMS, com diferentes resoluções espaciais, revelou que a diminuição da grade (maior detalhamento) proporciona resultados aproximados as medições locais. Lima et al. (2015) buscou avaliar o comportamento do modelo RAMS mediante em períodos distintos: 2005 (Ano Neutro) e 2008 (La Niña). Os autores concluem que a eficácia do modelo mitiga a falta de anemômetros instalados na região, assim como, os resultados satisfatórios demonstram que o regime de ventos fortalece o desenvolvimento e implementação de usinas eólicas.

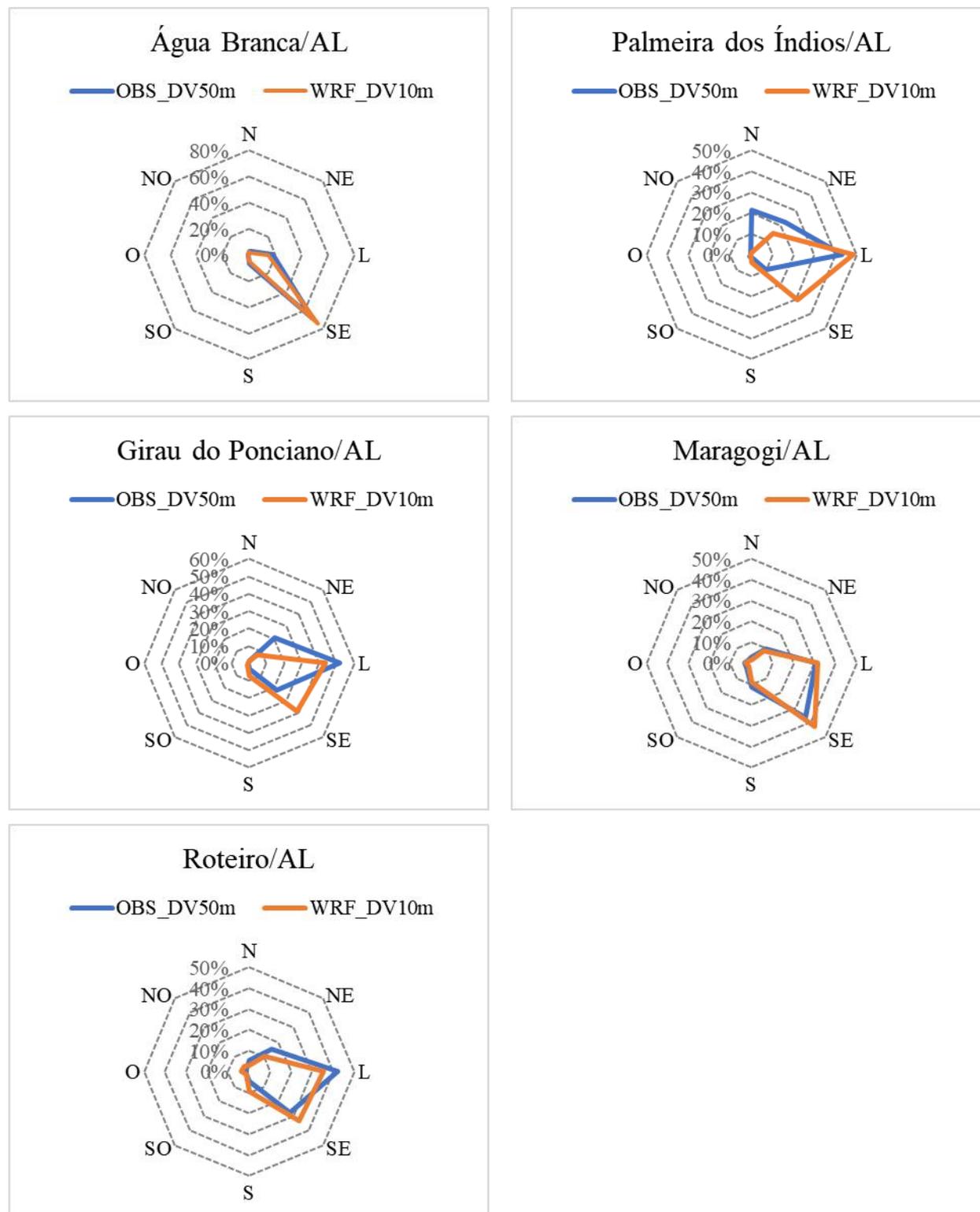
Nos estudos de Ramos (2012) e Ramos et al. (2013), o modelo WRF mostrou-se uma ferramenta computacional eficiente e capaz de realizar o levantamento eólico para o Estado de Alagoas. Ressaltando para o aprimoramento na previsão na quadra chuvosa e nas regiões próximo ao litoral. Nas simulações de Oliveira (2013) também foram identificados melhores resultados ao adentrar o continente, ou seja, nas mesorregiões agreste e sertão. Com destaque para melhor representação da velocidade média dos ciclos nas alturas próximo a 100m. Perini de Souza et al. (2022) sinaliza que o melhor comportamento da velocidade do vento em maiores altitudes ocorre devido à distorção na integração topográfica (orografia e costa), variações acentuadas nas características aerodinâmicas, e heterogeneidades no uso e tipo de terreno. Por fim, Campos et al. (2016) aponta a habilidade do modelo WRF na representação da circulação de vale e montanha nas regiões do Vale do Paraíba e Serra da Mantiqueira.

Os resultados da validação estatística (Tabelas 2 e 3), quando comparados à literatura (Tabela 4), foram considerados de satisfatórios a bons. Foi possível notar que as correlações corresponderam às expectativas e os valores extremos de BIAS e RMSE obtiveram limites inferiores dos valores da literatura, o que mostra a eficácia do modelo e das configurações adotadas. Entretanto, as particularidades de cada estudo devem ser consideradas, uma vez que há fatores que influenciam os resultados,

como por exemplo, o intervalo das séries anemométricas, a resolução temporal e espacial, parametrizações físicas inseridas e avaliação das métricas estatísticas empregadas.

Em termos de distribuição de frequência da direção do vento (Figura 2), verifica-se a pouca diferença na comparação realizada entre os dados observados e simulados, para as cidades de Água Branca, Maragogi e Roteiro. Demonstrando que nestas localidades as simulações estão representando o padrão do vento no quesito direção predominante do vento e em ambas as bases de dados geraram direções variando entre Leste a Sudeste ( $90 - 135^\circ$ ). Estes padrões da direção do vento no estado de Alagoas também foram obtidos por Costa (2012) e Silva (2013). Já para as demais cidades, Palmeira dos Índios e Girau do Ponciano, notou-se uma suave diferença entre as bases de dados, contudo em termos de vento predominante (maior frequência das direções do vento), ambas mostram ventos da direção Leste. A justificativa para a pequena diferença apontada na figura 2, deve-se principalmente ao efeito topografia conferir aos pontos de medição características locais para direção, fato este não representados pelo modelo devido baixa resolução (5km). Assim, sugere-se a melhoria da resolução também para direção do vento simulada.

**Figura 2** - Distribuição de frequência anual da Direção do vento simulada (WRF\_DV10m) no nível de 10 metros e observada (OBS\_50m) no nível de 50 metros para as cidades de Água Branca, Maragogi, Palmeira dos Índios, Girau do Ponciano e Roteiro.

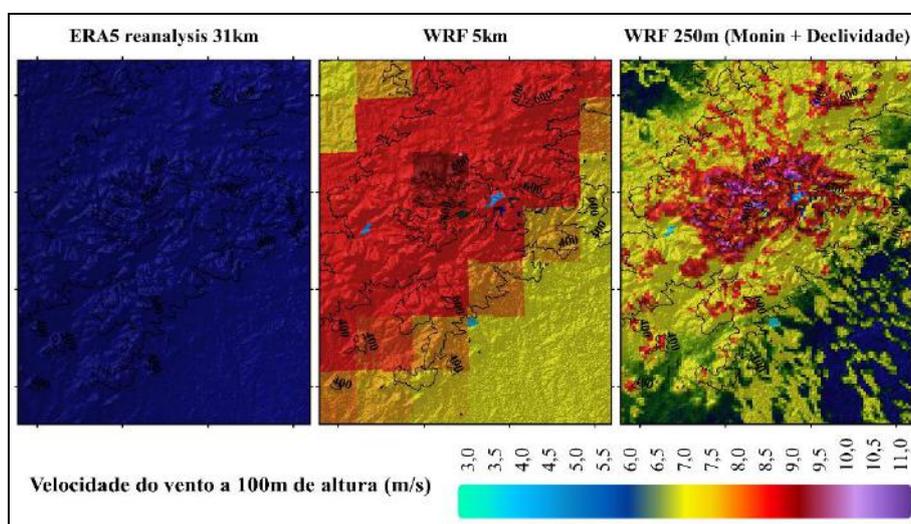


Fonte: Autoria própria.

A Figura 3 visa avaliação da intensidade do vento quanto ao aumento da resolução superficial dos dados, passando

deste simulações com modelos globais (neste caso o “*ERA5 reanalysis*”, *resolução de 31km*), simulações com o modelo atmosférico de mesoescala WRF (*resolução de 5km*), e por fim o refinamento das saídas do modelo WRF com aproximações de estabilidade atmosféricas e declividade do terreno (*resolução de 250m*). Fica evidente o ganho em detalhamento espacial nas simulações a partir do refinamento de grade em que o fruto do mapeamento eólico de maior resolução em um terreno complexo na porção noroeste do Estado de Alagoas. Sanz Rodrigo et al. (2017) destaca que existe uma forte ligação entre áreas de forçamentos topográficos e ventos mais intensos, sendo explicado principalmente pela tendência do perfil logaritmo do vento, ou simplesmente pela diminuição da influência da rugosidade superficial com a altura, fato este também melhor representado quando ocorre o aumento da resolução espacial do vento.

**Figura 3** - Velocidade do vento a 100 metros de altura para um terreno complexo a partir da reanálise ERA5, reduzida para resolução espacial de 5km pelo WRF e, por fim, empregando o ajuste de declividade e parâmetros de estabilidade atmosférica para resolução de 250m.

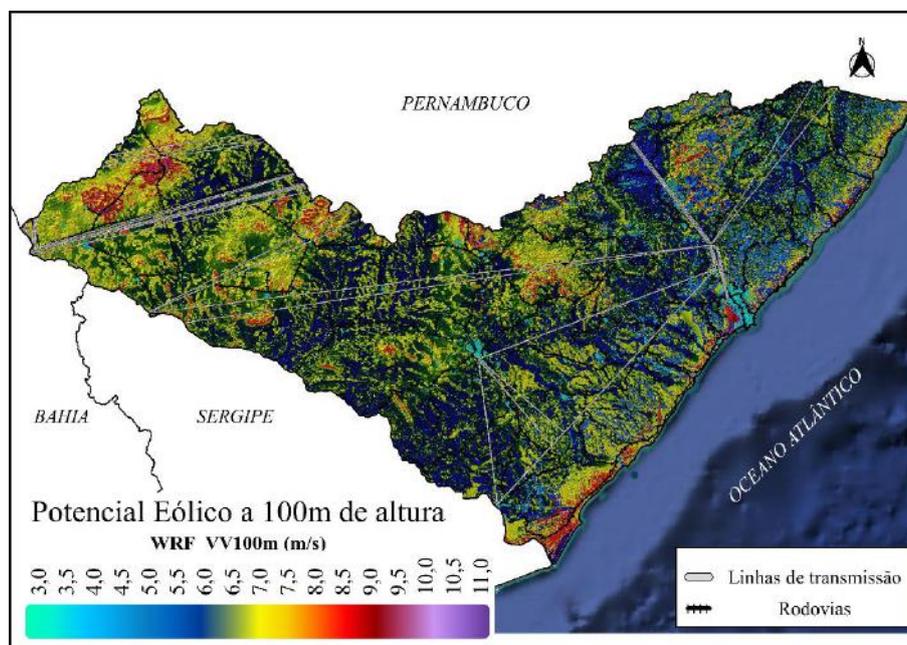


Fonte: Autoria própria.

No tocante as simulações e estimativas da velocidade do vento, as indicações realizadas através dos mapas eólicos são cruciais para definir as áreas promissoras para exploração da força do vento no sentido de viabilizar a implantação de parques eólicos, pois a potência elétrica fornecida pelos aerogeradores é proporcional à terceira potência da velocidade do vento (Martins et al., 2008). Tendo em vista que atualmente no Estado de Alagoas, apenas 7 estações meteorológicas do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) estão em operação e disponibilizam dados de vento que auxiliam na realização de estudo do potencial eólico (estações automáticas - EMA e convencionais - EMC). Mesmo em poucos números servem de parâmetro para calibração e ajuste para o modelos atmosféricos, o que possibilita a diminuição das incertezas na estimativa da produção anual de energia (EPE, 2018). Mesmo considerando a inviabilidade financeira e logística da implantação de novas estações meteorológicas de monitoramento distribuídas estrategicamente de modo propiciar a elaboração do mapa eólico de Alagoas com dados observados, faz-se necessário a utilização de simulações com modelos atmosféricos. Portanto, considerando a eficiência das simulações apresentadas nas tabelas 2 e 3, a respeito da precisão na estimativa da velocidade do vento e, considerando a instalação dos aerogeradores modernos entre os níveis de 80 a 150 metros, pois à medida que se afasta da superfície terrestre o potencial eólico é fortemente pronunciado em detrimento da redução da rugosidade aerodinâmica. Com a extrapolação vertical da velocidade do vento à 100 metros notam-se na Figura 4 que as maiores intensidades do vento ocorrem

em áreas com altitudes elevadas (exemplos: Água Branca, Mata Grande, Palmeira do Índios, entre outros) e área litorâneas como no caso de Piaçabuçu, Feliz Deserto, Coruripe, entre outras.

**Figura 4** - Mapeamento Eólico do Estado de Alagoas, com resolução horizontal de 250m e nível vertical de 100m, utilizando o modelo WRF com refinamento da estabilidade atmosférica e declividade topográfico no período 2007-2015.



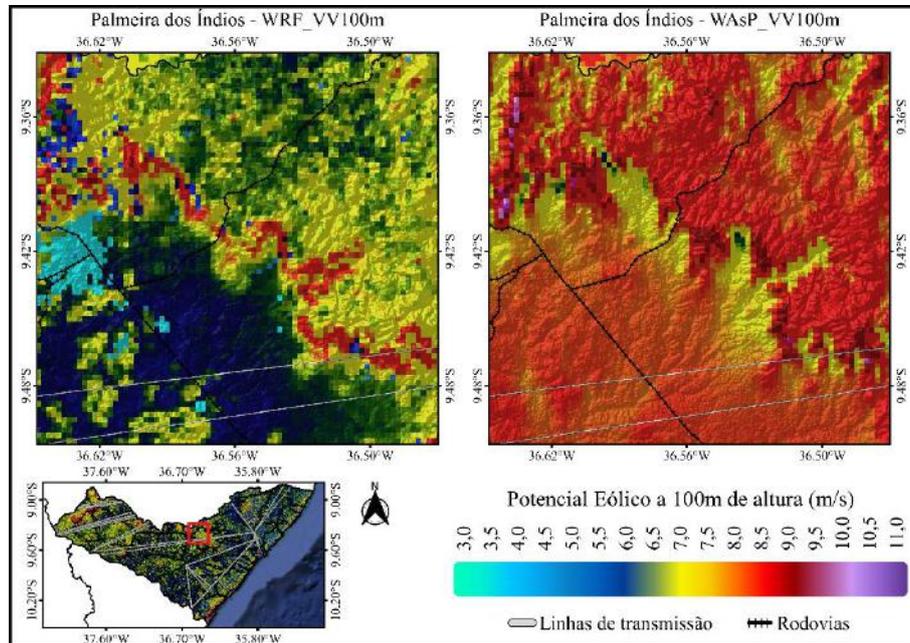
Fonte: Autoria própria.

Além de áreas promissoras com ventos constantes e superiores a 7m/s (ELETROBRÁS, 2008), é indicado uma boa logística para escoamento da produção de energia (linhas de transmissões e subestações da rede elétrica de energia já disponíveis) para instalação de Parques Eólicos (Figura 4). Por exemplo, as cidades de Água Branca e Mata Grande, reúnem este diferencial de logística, pois além de estar relativamente próximos de hidroelétrica de Xingó, as áreas promissoras em termos de intensidade do vento, estariam próximas a rodovias e das linhas de transmissões. A hipótese levantada para explicar maiores intensidades do vento no Estado de Alagoas, além de atribuir as regiões de altitudes elevadas, pode-se citar a canalização do vento nas proximidades do Rio São Francisco, como também a influência dos ventos alísios especialmente nas regiões litorâneas. Vale destacar ainda a questão das regiões litorâneas como Piaçabuçu/AL, Feliz Deserto/AL e Coruripe/AL, que de acordo com a classificação de cobertura do solo de areia baseado nos dados obtidos junto ao projeto MapBiomias (<https://mapbiomas.org/>), que neste caso seria favorável para ocorrência de ventos mais intensos, pois a menor rugosidade superficial resiste menos ao escoamento do vento. Em termos de comprimento de rugosidade variável considerada pelos modelos atmosféricos para estimar a intensidade do vento, que variam entre 0 – 1 de acordo com o tipo de superfície, comparativamente o parâmetro de rugosidade da areia  $z_0=0,01$ , água  $z_0=0,0001$  e urbano  $z_0=0,8$ , entre outros tipos.

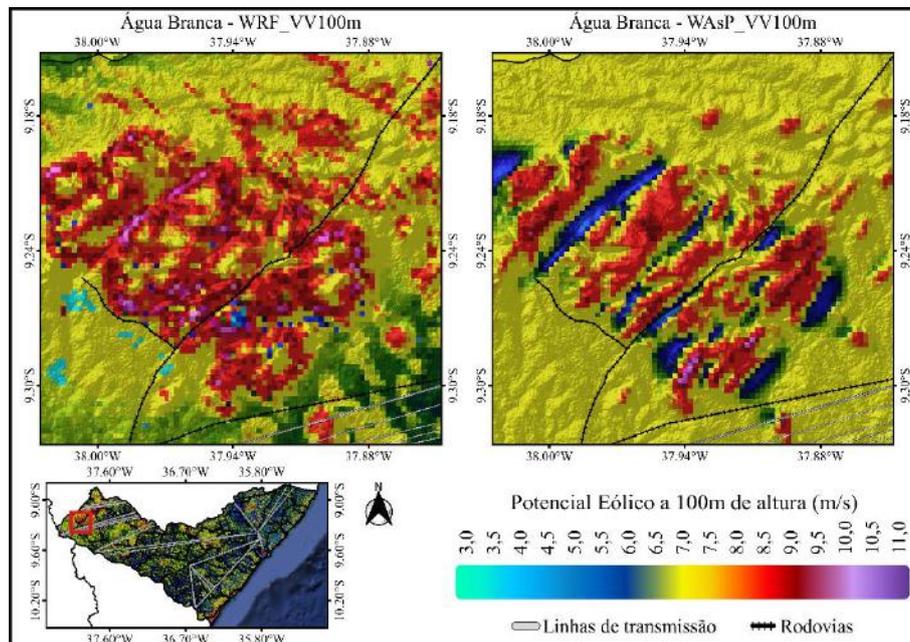
A título de comparação, a figura 5 apresenta o resultado da intensidade do vento divulgado no Atlas Eólico de 2008 elaborado pela Eletrobrás (2008). Quando comparado com a figura 4, fica evidente que as áreas urbanas – destacado no círculo vermelho – agora estão sendo representadas na atualização do mapa eólico proposto ( $z_0$  de áreas urbanas 0,8), e também em áreas com áreas de floresta densas, como no destaque em círculo verde inserido na figura 5. Quanto a intensidade do vento, ambas as figuras são indicam área similares como promissoras para exploração da força do vento para geração de energia



**Figura 6** - Simulação do micrositing utilizando o WRF para a velocidade do vento a 100m no período 2007-2015 para (a) Palmeira dos Índios/AL no agreste alagoano e (b) Água Branca/AL no sertão alagoano.



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria.

Por fim, a comparação dos resultados obtidos com simulações utilizando o modelo WAsP, tendo como dados meteorológicos de entrada as simulações com o modelo WRF com resolução espacial de 5km, bem como, os parâmetros de topografia e rugosidade descritos na metodologia. Os valores simulados do modelo WAsP são superiores quando comparados as simulações realizadas com o modelo WRF, que subestima alguns casos em até 6 m/s a velocidade do vento. Contudo, fica evidente com o auxílio da figura 6, que em ambas as localidades avaliadas (figuras 6a e 6b), que os métodos propostos de

ajustamento da saída do modelo WRF (declividade e estabilidade) tem representação similar ao modelo especializado em micrositing WASP, como também, picos de velocidade do vento devido especialmente ao efeito da topografia e canalização do vento. O escoamento horizontal da atmosfera fica bem representada pelos modelos mesmo em situações extrema, como no caso de terrenos complexos e no caso de análises de micrositing (aumento da resolução). Fica claro ainda, que o uso do modelo WRF ajustado traz ganho quanto a inclusão do tipo de uso do solo, redução da velocidade do vento devido a presença de áreas urbanas, e ainda maior representatividade de áreas acidentadas (centro da figura 6b), devido a diminuição de escala meso (5km) para micro (250m). Vale destacar, a impossibilidade de realizar mapeamento de grandes áreas utilizando o modelo WASP, na versão utilizada neste estudo.

#### 4. Conclusão

As simulações diárias realizadas com o modelo atmosférico WRF, durante 8 anos demonstraram a existência de potencial eólico para o estado de Alagoas para o nível de 100m de altura, especialmente em regiões serranas e áreas com menor rugosidade superficial. Destaque ainda para influência da canalização do vento nas proximidades do Rio São Francisco, assim como, a influência em regiões litorâneas tem destaque para os ventos alísios.

As validações estatísticas demonstraram que o modelo foi capaz de representar o comportamento do vento no tocante a velocidade e direção. O refinamento das simulações se mostrou fundamental para melhor visualização das áreas promissoras e possíveis tomadas de decisões no sentido de indicar áreas para instalação de parques eólicos, e consequentemente identificar locais para aerogeradores e direção predominante do vento, desta forma possibilitando o maior melhor aproveitamento das turbinas eólicas no caso de instalações futuras.

Por fim, a comparação dos resultados espaciais com as simulações do modelo WASP validam o método downscaling pelo modelo WRF. No entanto, há limitações no método downscaling proposto para avaliação de recursos eólicos em áreas de orografia complexa, enquanto o modelo WASP em virtude da sinalização do efeito esteira derivado do relevo local, indicou maior precisão das análises numéricas em terrenos complexos. Para tal dificuldade nas comparações das simulações devido existência de fenômenos extremamente locais, que são limitados para calcular na resolução espacial adotada, sugere-se otimização através de processos turbulentos, como emprego de Large Eddy Simulation (LES).

Para futuros trabalhos, recomenda-se reduzir a resolução de grade de modo que os erros da estimativa se mantenham aceitáveis citados com base na literatura e considerar o efeito da direção do vento para calcular o potencial eólico ao contrário do uso apenas da velocidade média do vento. Bem como, avaliar a produção da energia eólica fazendo uso dos parâmetros de efeito esteira, coeficiente de potência e simulação da inclusão de turbinas eólicas.

#### Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da FAPEAL – Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Alagoas e CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

#### Referências

- Alexander, M., & Scott, J. (2002). The influence of ENSO on air-sea interaction in the Atlantic. *Geophysical Research Letters*, 29(14), 46-1-46-4. <https://doi.org/10.1029/2001GL014347>
- Andrade, L. C., & Mattei, L. (2013). *a ( in ) Sustentabilidade Da Matriz*. 19, 9–36.
- BRASIL. (2022). Realizado Leilão de Energia Nova A-5 com R\$ 6,6 bilhões negociados em contratos de venda. <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2022/10/realizado-leilao-de-energia-nova-a-5-com-r-6-6-bilhoes-negociados-em-contratos-de-venda>

- Campos, B. de, Reboita, M. S., Carvalho, V. S. B., & Dias, C. G. (2016). Circulações locais induzidas pela topografia no Vale do Paraíba e na Serra da Mantiqueira: um estudo de caso para o período de 16 e 22 de agosto de 2010. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 09, 753–765.
- Carpenedo, C. B., & Ambrizzi, T. (2020). South atlantic subtropical anticyclone associated with the southern annular mode and climate impacts in Brazil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 35(4), 605–613. <https://doi.org/10.1590/0102-77863540066>
- Costa, G. B., & Lyra, R. F. da F. (2012). Análise dos padrões de vento no Estado de Alagoas. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 27(1), 31–38. <https://doi.org/10.1590/s0102-77862012000100004>
- Devore, J. L. (2009). *Probabilidade e estatística para engenharia e ciências*.
- Dorval, J., Masson, C., & Gagnon, Y. (2017). On the Improvement of Wind Power Predictions Based on Terrain Characteristics and Measurements of the Annual Energy Production. *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*, 05(01), 1–20. <https://doi.org/10.4236/jfcmv.2017.51001>
- ELETROBRÁS. (2008). *Estado de Alagoas Atlas Eólico*.
- EPE. (2018). Participação De Empreendimentos Eólicos Nos Leilões De Energia No Brasil. *Evolução Dos Projetos Cadastrados e Suas Características Técnicas*, 1–48. [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-394/NT\\_EPE-DEE-NT-041\\_2018-r0.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-394/NT_EPE-DEE-NT-041_2018-r0.pdf)
- EPE. (2022). *Relatório Síntese 2022 Relatório*.
- Fadigas, Eliane A. Faria Amaral. (2011). Energia eólica.
- Foken, T. (2006). 50 Years of the Monin–Obukhov Similarity Theory. *Boundary-Layer Meteorology*, 119(3), 431–447. <https://doi.org/10.1007/s10546-006-9048-6>
- Gonçalves, A. R. (2011). *Refinamento estatístico das previsões de vento do modelo ETA aplicado ao setor eólico-elétrico do nordeste brasileiro*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE.
- Gonçalves, A. R., & Costa, R. S. (2018). CENÁRIOS DE EXPANSÃO DA GERAÇÃO SOLAR E EÓLICA. *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar*.
- Goncalves, A. R., Costa, R. S., Martins, F. R., & Pereira, E. B. (2020). *Estudo do perfil de complementariedade entre a geração eólica e solar no semiárido brasileiro*. 2(September), 9. [https://www.researchgate.net/publication/344382235\\_Estudo\\_do\\_perfil\\_de\\_complementariedade\\_entre\\_a\\_geracao\\_eolica\\_e\\_solar\\_no\\_semiarido\\_brasileiro](https://www.researchgate.net/publication/344382235_Estudo_do_perfil_de_complementariedade_entre_a_geracao_eolica_e_solar_no_semiarido_brasileiro)
- Hedegaard, K., & Larsen, S. (1983). Wind speed and direction changes due to terrain effects revealed by climatological data from two sites in Jutland. In *Riso National Laboratory* (Issue May).
- Ide E Ester, F. S., & Ito, R. K. (2000). *Análise da Variabilidade do Vento na Costa Leste da Região Nordeste do Brasil*. 127–130.
- Jatobá, B. R. G., Da Silva Junior, R. S., Lyra, R. F. D. F., Rocha Junior, R. L. da, & Costa Fernando, L. Y. (2017). Avaliação do Potencial Eólico para a cidade de Craibas-AL utilizando o modelo meteorológico WRF em alta resolução. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, 6(4), 24. <https://doi.org/10.5380/rber.v6i4.50866>
- Krell, A. J., & De Castro e Souza, C. B. (2020). A sustentabilidade da matriz energética brasileira: o marco regulatório das energias renováveis e o princípio do desenvolvimento sustentável. *Revista de Direito Econômico e Socioambiental*, 11(2), 157. <https://doi.org/10.7213/rev.dir.econ.soc.v11i2.26872>
- Lima, D. K. S., Leão, R. P. S., Santos, A. C. S. dos, Melo, F. D. C. de, Couto, V. M., Noronha, A. W. T. de, & Jr., D. S. O. (2015). Estimating the offshore wind resources of the State of Ceará in Brazil. *Renewable Energy*, 83(2015), 203–221. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.025>
- Luiz, E. W., Martins, F. R., Gonçalves, A. R., & Pereira, E. B. (2018). Analysis of intra-day solar irradiance variability in different Brazilian climate zones. *Solar Energy*, 167(December 2017), 210–219. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.04.005>
- Maria, P. H. S. de, Costa, A. A., & Sombra, S. S. (2008). Modelagem numérica em alta resolução para previsão de geração de energia eólica no Ceará. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 23(4), 477–489. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862008000400007>
- Martins, F. R., Guarnieri, R. A., & Pereira, E. B. (2008). O aproveitamento da energia eólica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 30(1), 1304.1-1304.13. <https://doi.org/10.1590/S1806-11172008000100005>
- Mas, J.-F., Nogueira de Vasconcelos, R., & Franca-Rocha, W. (2019). Analysis of High Temporal Resolution Land Use/Land Cover Trajectories. *Land*, 8(2), 30. <https://doi.org/10.3390/land8020030>
- Mondal, M. A. H., Rosegrant, M., Ringler, C., Pradesha, A., & Valmonte-Santos, R. (2018). The Philippines energy future and low-carbon development strategies. *Energy*, 147, 142–154. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.039>
- Oliveira, S. S. de. (2013). Análise do potencial eólico do Estado da Paraíba utilizando modelos de mesoescala [Universidade Federal de Campina Grande]. In *Tese (Doutorado em Meteorologia) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia*. <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/3849>
- Oliveira, J. L., & Costa, A. A. (2011). Estudo de variabilidade do vento em escala sazonal sobre o nordeste brasileiro utilizando o RAMS: os casos de 1973-1974 e 1982-1983. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 26(1), 53–66. <https://doi.org/10.1590/s0102-77862011000100006>
- Perini de Souza, N. B., Sperandio Nascimento, E. G., Bandeira Santos, A. A., & Moreira, D. M. (2022). Wind mapping using the mesoscale WRF model in a tropical region of Brazil. *Energy*, 240(April 2022), 122491. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122491>

- Pinto, L. I. C., Martins, F. R., & Pereira, E. B. (2017). O mercado brasileiro da energia eólica, impactos sociais e ambientais. *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2064>
- Ramos, D. N. da S. (2012). *Mapeamento Eólico do Estado de Alagoas utilizando ferramentas computacionais e dados observados* (Issue 9). Universidade Federal de Alagoas.
- Ramos, D. N. da S., Lyra, R. F. da F., & Silva Júnior, R. S. da. (2013). Previsão do vento utilizando o modelo atmosférico WRF para o estado de Alagoas. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 28(2), 163–172. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862013000200005>
- Santos, R. M. dos, Rodrigues, M. de S., & Carniello, M. F. (2021). Energia e sustentabilidade: panorama da matriz energética brasileira. *Revista Scientia*, 6(2525–4553). <https://revistas.uneb.br/index.php/scientia/article/view/9396>
- Sanz Rodrigo, J., Chávez Arroyo, R. A., Moriarty, P., Churchfield, M., Kosović, B., Réthoré, P. E., Hansen, K. S., Hahmann, A., Mirocha, J. D., & Rife, D. (2017). Mesoscale to microscale wind farm flow modeling and evaluation. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 6(2). <https://doi.org/10.1002/wene.214>
- Sathe, A., & Bierbooms, W. (2007). Influence of different wind profiles due to varying atmospheric stability on the fatigue life of wind turbines. *Journal of Physics: Conference Series*, 75(1), 012056. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/75/1/012056>
- Silva, B. B. da, Alves, J. J. A., Cavalcanti, E. P., & Dantas, R. T. (2002). Potencial eólico na direção predominante do vento no Nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 6, 431–439.
- Silva, L. C. da, Silva, A. R. M. da, Barbosa, A. dos S., Santos, D. K. A. dos, & Rocha, F. B. de A. (2015). Implantação de parques eólico no Brasil. *XXXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção*.
- Silva Junior, R. S. da, Lyra, R. F. da F., Silva, A. R., Marchi, A. C. de, Ramos, D. N. da S., & Rabelo, F. D. (2010). Análise da variação do potencial eólico utilizando o modelo WAsP. *Primeiro Seminário Nacional Sobre Engenharia Do Vento*.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X.-Y., Wang, W., & Powers, J. G. (2008). A Description of the Advanced Research WRF version 3. *National Center for Atmospheric Research*.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., & Powers, J. G. (2005). A Description of the Advanced Research WRF Version 2. *University Corporation for Atmospheric Research, June*.
- Solano, J. C., Montañó, T., Maldonado-Correa, J., Ordóñez, A., & Pesantez, M. (2021). Correlation between the wind speed and the elevation to evaluate the wind potential in the southern region of Ecuador. *Energy Reports*, 7, 259–268. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.06.044>
- Troen, I., & Lundtang Petersen, E. (1989). *European wind atlas - Errata*. [http://orbit.dtu.dk/en/publications/european-wind-atlas\(335e86f2-6d21-4191-8304-0b0a105089be\).html](http://orbit.dtu.dk/en/publications/european-wind-atlas(335e86f2-6d21-4191-8304-0b0a105089be).html)