



## Capacidade do Modelo WRF em Representar o Clima de Vitória-ES: Implicações para Estudos de Dispersão de Poluentes

Gabriel Wilson Lorena Florencio <sup>1</sup>  
Flávio Luiz Santos Soares <sup>2</sup>  
Geraldo André Rosseto Barreto <sup>3</sup>

### Resumo

A escassez de estações meteorológicas no Brasil compromete a coleta de dados climáticos precisos, essenciais para diversas áreas. Para contornar essa limitação, modelos meteorológicos, como o *Weather Research and Forecasting Model* (WRF), são amplamente utilizados para simular condições atmosféricas em regiões com dados observacionais escassos. Diante desses aspectos, o objetivo desse trabalho foi analisar o desempenho do modelo WRF em representar o clima do município de Vitória-ES, visando explorar o potencial de aplicação desses dados em estudos de dispersão de poluentes atmosféricos. Foram comparados dados observados em estações meteorológicas com as simulações do WRF, utilizando três grades aninhadas com resoluções de 27 km, 9 km e 3 km. A validação foi conduzida com métricas como raiz do quadrado médio do erro (RQME), índice BIAS, correlação ( $r$ ), índice de concordância de Wilmott ( $d$ ) e índice de desempenho (índice- $c$ ). Os resultados mostraram que o WRF teve um desempenho muito bom na simulação da temperatura do ar e da pressão atmosférica. No entanto, o desempenho estatístico foi insatisfatório para a precipitação, umidade relativa, e especialmente para a velocidade e direção dos ventos, cujas correlações foram fracas. Apesar disso, o modelo capturou adequadamente os padrões sazonais e representou bem as condições observadas em Vitória, indicando que, embora ajustes sejam necessários para algumas variáveis, o WRF é uma ferramenta promissora para representar as condições climáticas locais e apoiar estudos ambientais.

**Palavras-chave:** Modelagem meteorológica; WRF; Validação; Dispersão de poluentes

<sup>1</sup> Profissional: Msc. em Meio Ambiente e Recursos Hídricos: Physis Engenharia Ambiental – Departamento de Projetos e Estudos Ambientais, gabrielflorencio1797@gmail.com.

<sup>2</sup> Profissional: Eng. Ambiental: Physis Engenharia Ambiental – Departamento de Projetos e Estudos Ambientais, flavio.soares@physisambiental.com.br.

<sup>3</sup> Profissional: Msc. em Engenharia Ambiental: Physis Engenharia Ambiental – Departamento de Projetos e Estudos Ambientais, geraldo.barreto@physisambiental.com.br.



## INTRODUÇÃO

A escassez de dados meteorológicos medidos diretamente no território brasileiro é uma realidade que impacta diversas áreas de estudo e aplicações práticas, decorrente especialmente da má distribuição de estações meteorológicas no país. Estudos recentes destacam que essa limitação geográfica e a falta de cobertura contínua comprometem a precisão na análise de dados meteorológicos, fundamentais para a tomada de decisões em setores como agricultura, energia, defesa civil, estudos ambientais, etc (Xavier et al., 2016).

Nesse contexto, os modelos meteorológicos surgem como ferramentas essenciais para preencher essas lacunas, oferecendo simulações detalhadas que ajudam a simular e prever o comportamento atmosférico em regiões carentes de dados observacionais (Gavidia-Calderón et al., 2024). Esses modelos não só auxiliam na previsão do tempo, mas também desempenham um papel crucial em estudos de dispersão de poluentes, nos quais a dinâmica dos ventos e outros parâmetros meteorológicos influenciam diretamente a concentração e o transporte de substâncias poluentes na atmosfera (Gavidia-Calderón et al., 2024).

Para estudos de dispersão de poluentes atmosféricos, os órgãos ambientais estaduais no Brasil seguem as recomendações da *U.S. Environmental Protection Agency* (EPA), que preconizam alguns critérios, como a utilização de uma série temporal recente com pelo menos três anos de duração, além da obrigatoriedade dessa série conter quatro trimestres consecutivos com pelo menos 90% de dados medidos válidos (FEAM, 2023; EPA, 2024). A integração entre dados modelados e observacionais é, portanto, uma peça chave para superar as limitações impostas pela distribuição irregular e pela qualidade dos dados medidos em estações meteorológicas no Brasil, permitindo avanços significativos na compreensão e gestão dos impactos ambientais (Mollmann et al, 2015).

Entre os modelos meteorológicos utilizados para estudos do gênero, destaca-se o *Weather Research and Forecasting Model* (WRF), como um dos mais empregados, sendo este, um modelo criado para simular a circulação atmosférica em mesoescala e escala regional (Skamarock et al., 2019). No entanto, a validação dos dados simulados pelo WRF é de fundamental importância para assegurar que estes representem fielmente as condições de uma determinada localidade.

Diante desses aspectos, o objetivo desse trabalho foi analisar o desempenho do modelo WRF



em representar o clima do município de Vitória-ES, visando explorar o potencial de aplicação desses dados em estudos de dispersão de poluentes atmosféricos.

## METODOLOGIA

Foram coletados dados meteorológicos observados de superfície obtidos através de uma estação meteorológica automática operada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), denominada A612 - Estação Vitória (20° 16' 15" S 40° 18' 21" O, 9 m de altitude), localizada no município de Vitória - ES. O período considerado foi de 2020-2023.

Para caracterização da climatologia de uma determinada localidade, é necessário que se tenha um período mínimo de 30 anos de registro para garantir uma representação robusta e abrangente das condições climáticas de uma determinada região. No entanto, a estação A612 está operante apenas desde 2006, o que totaliza um período de 18 anos de medição. Diante desse contexto, foram coletados dados adicionais provenientes da estação meteorológica convencional pertencente ao INMET, conhecida como Estação 83648, localizada no município de Vitória - ES, que está a aproximadamente 5,10 Km da estação A612 (20° 16' 15" S 40° 18' 21" O, 36,2 m de altitude). O período considerado para os dados da climatologia foi de 1990-2022.

Para as simulações, utilizou-se no presente estudo dados do modelo meteorológico WRF. Os dados utilizados no estudo foram fornecidos pela *Lakes Environmental*, empresa com vasta experiência na área de modelagem e sediada no Canadá.

O WRF foi executado com três grades aninhadas (Figura 1). A grade 1 foi definida com resolução horizontal de 27 km, a grade 2 com resolução de 9 km e a grade 3 com uma resolução final de 3 km (Ponto central: longitude: 20° 18' 36.16" S -40° 18' 47.92" O). Como condições de iniciais e de fronteira para as simulações com o modelo WRF, utilizaram-se dados da análise do *Global Forecast System do National* (GFS-NCEP), que possuem resolução espacial de 0,5° e frequência temporal de 6 horas (00, 06, 12, 18Z). As variáveis simuladas foram: temperatura média do ar (°C), umidade relativa do ar (%), pressão atmosférica (mBar), precipitação (mm), velocidade do vento (ms<sup>-1</sup>) e direção do vento (°).



Figura 01: Grades alinhadas utilizadas pela *Lakes Environmental* para extração dos dados simulados pelo WRF (3 km, 9 km e 27 km, com resolução de 0,5°).

Para avaliar a qualidade das simulações realizadas pelo modelo WRF, foi conduzida uma validação estatística dos dados simulados. Essa validação consistiu na comparação dos dados simulados com os dados observados na estação A612 durante o período de 2020 a 2023.

As estatísticas utilizadas para analisar o desempenho do modelo foram: raiz do quadrado médio do erro (RQME), índice BIAS, correlação ( $r$ ), índice de concordância de Wilmott ( $d$ ) e índice de desempenho (índice- $c$ ) (Equações 1 a 5). Essas métricas são amplamente reconhecidas e empregadas em estudos que buscam avaliar a qualidade e a precisão das simulações realizadas por modelos meteorológicos.

$$RQME = \left[ \sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2 / n \right]^{0,5} \quad \text{Eq. 1}$$

$$BIAS = \left( \sum_{i=1}^n E_i - \sum_{i=1}^n O_i \right) / \sum_{i=1}^n O_i \quad \text{Eq. 2}$$



## EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) * (E_i - \bar{E})}{\left\{ \left[ \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right] \left[ \sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2 \right] \right\}} \quad \text{Eq. 3}$$

$$d = 1 - \left\{ \left[ \sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2 \right] / \left[ \sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{O}| * |O_i - \bar{O}|)^2 \right] \right\} \quad \text{Eq. 4}$$

$$\text{índice - c} = \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) * (E_i - \bar{E}) / \{ [\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2] [\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2] \} * d \quad \text{Eq. 5}$$

Em que:

$E_i$  – simulação do modelo para cada variável;

$O_i$  – variável observada;

$\bar{E}_i$  – média dos valores de cada variável simulada pelo modelo;

$\bar{O}_i$  – média dos valores observados;

$n$  – números de dados.

O critério para a interpretação do índice-c é: > 0,85: excelente; 0,76 a 0,85: muito bom; 0,66 a 0,75: bom; 0,61 a 0,65: moderado; 0,51 a 0,60: fraco; 0,41 a 0,50: muito fraco; e ≤ 0,40: péssimo (Camargo e Sentelhas, 1997).

As diretrizes da EPA não estabelecem critérios quantitativos específicos para avaliar a representatividade dos dados meteorológicos coletados em uma determinada região. Portanto, cabe ao especialista a responsabilidade de avaliar a representatividade desses dados. Nesse contexto, além da análise estatística, foi conduzida uma análise comparativa do comportamento mensal dos dados simulados para os anos de 2020, 2021, 2022 e 2023 com os dados observados da estação A612 e também com a climatologia local (Estação 83648, 1990-2022) a fim de verificar se os dados simulados representam bem as características da região de estudo.

Essa análise comparativa mensal permite uma avaliação não apenas a concordância entre os dados simulados e observados em um determinado momento, mas também a identificação de padrões sazonais. Isso é crucial para entender como o modelo responde às variações sazonais e ambientais e para validar sua capacidade de reproduzir com fidelidade as condições climáticas locais.



## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1, encontram-se detalhadas as estatísticas calculadas para cada uma das variáveis de interesse.

Tabela 01: Estatísticas calculadas para análise do desempenho do modelo WRF.

Variável	RQME	BIAS	r	d	Índice-c
Temperatura	1,230	0,000	0,862	0,924	0,797
Pressão	3,554	-0,003	0,918	0,840	0,771
Precipitação	13,290	0,956	0,567	0,666	0,378
Umidade relativa	7,370	-0,004	0,523	0,683	0,357
Velocidade do vento	2,375	1,192	0,337	0,402	0,135
Direção do vento	41,999	-0,054	0,363	0,577	0,209

Os resultados obtidos a partir da simulação realizada com o modelo WRF indicam um desempenho muito bom na reprodução da temperatura média do ar ( $c=0,797$ ). Além disso, a correlação entre os dados simulados e observados ( $r = 0,862$ ) revela uma forte associação linear, evidenciando a habilidade do WRF em capturar as variações da temperatura ao longo do período analisado, resultados semelhantes foram observados por Moraes et al. (2014).

O índice-c indicou um desempenho muito bom ( $c=0,771$ ) do modelo nas simulações dos dados de pressão atmosférica, além de ter sido observada uma forte correlação entre os dados observados e simulados ( $r=0,918$ ).

A análise estatística dos dados de precipitação e umidade relativa revelou um desempenho considerado insatisfatório do modelo WRF, com correlação moderada em relação aos dados observacionais da estação A612. A superestimativa da precipitação observada nas simulações pode ser parcialmente atribuída à escassez de dados observacionais para validação, uma vez que a precipitação é uma variável acumulativa. A falta de dados de alta qualidade e em quantidade suficiente pode comprometer a capacidade dos modelos de ajustar adequadamente suas previsões,



## EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

levando a discrepâncias nas simulações (Macedo et al., 2014). Além disso, a complexidade dos processos dinâmicos e termodinâmicos que afetam a precipitação, como convecção e interação entre superfície e atmosfera, torna a parametrização desses processos um desafio significativo. Estudos como o de Liu et al. (2022) mostraram que a precisão das simulações de precipitação pode ser limitada pela capacidade do modelo de capturar esses processos complexos e suas interações.

Por fim, o desempenho do modelo WRF nas simulações das variáveis direção e velocidade do vento foi péssimo de acordo com o valor do índice-c, apresentando uma correlação fraca com os dados observados. Um fator crucial que pode ter influenciado o desempenho estatístico insatisfatório do modelo é a forma como os dados de direção do vento são segmentados (de 360 para 0°).

Com exceção das variáveis temperatura do ar e pressão, o modelo não apresentou um bom desempenho estatístico com relação aos dados da estação A612. No entanto, ao analisar os dados em uma escala mensal, percebe-se que o modelo foi capaz de representar com precisão a climatologia local, bem como os dados observados na estação A612 para o período de 2020 a 2023(Figura 1).

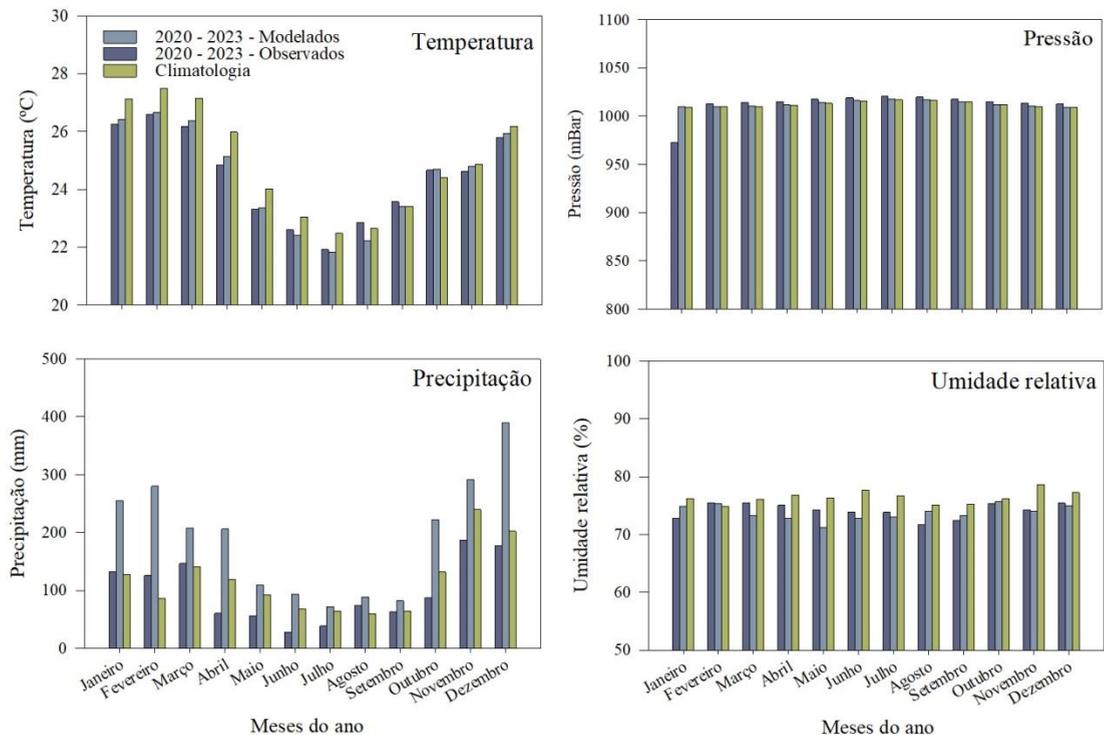


Figura 02: Comparação entre dados observados (Estação A612, 2020-2023), simulados (WRF, 2020-2023) e climatologia local (Estação 83648, 1990-2022).



## EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

Para a temperatura, o ciclo anual foi bem representado, refletindo as características sazonais típicas do sudeste brasileiro. Observa-se que os maiores valores de temperatura foram registrados e simulados no primeiro trimestre, com destaque para o mês de fevereiro. Por outro lado, o mês de julho apresenta os menores valores de temperatura, tanto nas observações quanto nas simulações, o que está em consonância com os padrões climáticos identificados em estudos anteriores, como o realizado por Correa (2011).

Para a pressão atmosférica, tanto os dados observados nas estações A612 quanto os dados simulados pelo modelo WRF estão próximos da climatologia local e seguem a variação anual esperada para a variável. Essa consistência nas simulações da pressão atmosférica corrobora com estudos recentes como de Bai et al. (2022).

Na região de estudo, é uma tendência climatológica observada que os maiores acumulados de precipitação ocorram nos meses de novembro e dezembro, enquanto os menores acumulados são registrados em junho e julho. Embora haja uma superestimativa por parte do modelo, as simulações foram capazes de capturar com precisão esse padrão sazonal característico. O padrão de superestimativa observado para os acumulados de precipitação em Vitória sugere que, enquanto o modelo WRF é eficaz na captura dos padrões sazonais, ajustes nas parametrizações podem ser necessários para melhorar a precisão dos acumulados simulados, assim como evidenciado por Faria (2019). Os dados de umidade relativa seguem o mesmo padrão observado para a precipitação.

A representação gráfica da rosa dos ventos em escala mensal é disponibilizada na Figura 3. Embora possam existir diferenças nas magnitudes específicas da velocidade do vento entre as simulações do modelo e os dados observados, é importante ressaltar que a direção e o padrão geral dos ventos foram adequadamente capturados pelas simulações. Isso sugere que o modelo foi capaz de reproduzir os principais padrões de circulação atmosférica na região de estudo, mesmo que haja algumas discrepâncias em termos de magnitude.



## EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

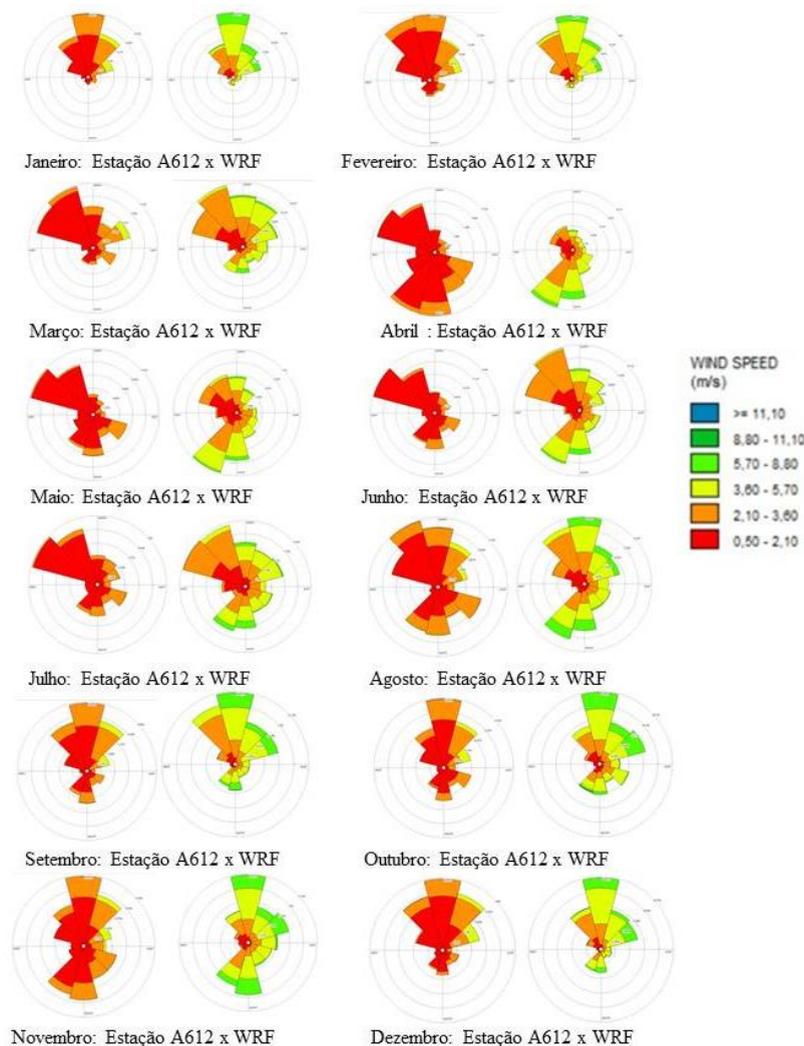


Figura 03: Rosa dos ventos para cada mês dos anos 2020, 2021, 2022 e 2023 considerando os dados observados e simulados.

De modo geral, a direção do vento na região de Vitória (ES) abrange todos os quadrantes, uma característica influenciada não apenas pela localização geográfica do município, com montanhas a oeste e o oceano a leste, mas também pela interação complexa de vários sistemas atmosféricos que atuam na região.

Dentre os sistemas atuantes na região, destaca-se que a passagem de frentes frias pode causar



## EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

mudanças abruptas na direção e na intensidade do vento, enquanto as linhas de instabilidade podem provocar condições de tempo severo e ventos fortes. O anticiclone subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) também exercem influência significativa nos padrões de vento na região, podendo provocar mudanças sazonais nas direções predominantes dos ventos. A complexa interação entre fatores geográficos locais e sistemas meteorológicos resulta em uma distribuição variada da direção do vento na região de Vitória.

Uma característica notável é a transição observada no mês de fevereiro, marcando uma mudança na direção predominante do vento de norte para noroeste, a qual se mantém até o mês de julho, padrão identificado tanto nos dados observados quanto modelados. Essa transição sazonal é um fenômeno relevante na dinâmica atmosférica da região e também foi descrita por Ramos et al. (2021). Observa-se uma predominância de ventos provenientes do quadrante sul, sobretudo durante os meses de inverno, o que intimamente relacionada à influência de sistemas frontais que frequentemente alcançam essa região durante essa estação do ano. Além disso, a presença mais pronunciada do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), estando mais próxima do continente, também contribui para esse padrão de vento.

Juntamente com os fatores locais, como a influência das brisas marítima e de vale, a predominância dos ventos provenientes do norte, especialmente durante o período chuvoso, está associada ao deslocamento da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) em direção ao oceano. Esse sistema e sua influência sobre os ventos na região tem sido amplamente discutido e documentado por diversos pesquisadores, incluindo Assis (2010), Carvalho (2019) e Reboita et al. (2015).

Embora tenham sido identificadas algumas discrepâncias em relação aos valores absolutos, bem como um mal desempenho estatístico na simulação de algumas variáveis, as simulações realizadas pelo modelo WRF para todas as variáveis foram consideradas representativas para a região de estudo. Essa conclusão é fundamentada na consistência dos dados simulados com as observações locais e a climatologia regional, bem como na compreensão dos processos atmosféricos que influenciam a região em questão.

Portanto, as simulações realizadas pelo modelo WRF fornecem uma base sólida não apenas para estudos de dispersão atmosférica na região de Vitória, mas também para uma ampla gama de



## EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

aplicações em estudos meteorológicos e ambientais. Para trabalhos futuros, recomenda-se a implementação de diferentes parametrizações físicas e resoluções espaciais no WRF, visando aprimorar ainda mais a precisão das simulações. A combinação de novas técnicas de assimilação de dados, como o uso de dados de satélites e a integração com outros modelos regionais e globais, também pode melhorar as estimativas e previsões.

## CONCLUSÕES

As simulações do modelo WRF em Vitória mostraram boa precisão na previsão de temperatura e pressão atmosférica e foram capazes de representar bem as variações sazonais de todas as variáveis analisadas, incluindo precipitação e vento, apesar de algumas limitações. Os dados são úteis para estudos de dispersão de poluentes e outras aplicações ambientais.

## AGRADECIMENTOS



## REFERÊNCIAS

ASSIS, J. O sistema clima urbano do município de Belo Horizonte na perspectiva tempo-espacial. 2010. **Tese de doutorado**, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

BAI, R.; SUN, J.; YU, E. Performance of the weather research and forecasting model in simulating climate over northern Asia. **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 16, p. 10285–10307, 2022.

CAMARGO, A.P. de; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, n.1, p.89-97, 1997.



## EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

CORREA, W.S.C. **Comportamento dos elementos climáticos, temperatura e precipitação, no Município de Vitória (ES) no período de 1978 a 2007**. Monografia (Bacharelado em Geografia). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2011.

FEAM – FUNDAÇÃO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE. Termo de referência para elaboração de um estudo de dispersão atmosférica. 2023. Disponível em: <<https://bit.ly/4412Jig>>. Acesso em: 10 ago. 2024;

GAVIDIA-CALDERÓN, M.; SCHUCH, D.; VARA-VELA, A.; INOUE, R.; FREITAS, E. D.; ALBUQUERQUE, T. T. A.; ZHANG, Y.; ANDRADE, M. F.; BELL, M. L. Air quality modeling in the metropolitan area of São Paulo, Brazil: a review. **Atmospheric Environment**, v. 319, p. 120301, 2024.

LIU, Z.; YANG, Q.; SHAO, J.; WANG, G.; LIU, H.; TANG, X.; XUE, Y.; BAI, L. Improving daily precipitation estimation in the data-scarce area by merging rain gauge and TRMM data with a transfer learning framework. **Journal of Hydrology**, v. 613, p. 128455, 2022.

MACEDO, L.R.; ALVES, R.C.M.; BASSO, J.L.M.; YAMASAKI, Y. Análise do desempenho do modelo WRF com alta resolução espacial na previsão de precipitação acumulada. **Ciência e Natura**, v. 36, n. 2, 2014.

MOLLMANN JÚNIOR, R. A.; SILVA JUNIOR, R. S.; COELHO, S. M. S. C.; MEDINA, B. L. Estudo da dispersão de monóxido de carbono emitido por queimadas na Amazônia Legal em 19 agosto de 2010 baseado em: Simulações do modelo WRF-Chem e sensoriamento remoto. **Ciência e Natura**, v. 37, p. 144–152, 2015.

RAMOS, H. E. dos A.; SILVA, B. F. P.; PANTOJA, P. H. B. Análise da direção e da velocidade do vento em Vitória-ES: um estudo preliminar. *Revista Científica Foz*, 2021.

REBOITA, M. S., et al. Aspectos climáticos do estado de minas gerais. **Revista Brasileira de climatologia**, v. 17, p.1-21, 2015

SKAMAROCK, W. C. et al. A description of the Advanced Research WRF Model Version 4. **UCAR/NCAR**, 2019.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. AP-42: Compilation of Air Emission Factors. 2024. Disponível em <<https://bit.ly/3X99oUA>>. Acesso em: 10 ago. 2024;

XAVIER, A.C.; KING, C.W.; SCANLON, B.R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 6, p. 2644-2659, 2016.