



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS  
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DO MODELO WRF NA PREVISÃO  
DE EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO: O caso de  
Petrópolis-RJ registrado em 15 de fevereiro de 2022.**

**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO**

**Iara Stéfani Carneiro da Silva**

**Itajubá, MG, Brasil**

**2023**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DO MODELO WRF NA PREVISÃO  
DE EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO: O caso de  
Petrópolis-RJ registrado em 15 de fevereiro de 2022**

**por**

**Iara Stéfani Carneiro da Silva**

Monografia apresentada à comissão examinadora Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas da Universidade Federal Itajubá (UNIFEI, MG), como requisito parcial para obtenção do grau de

**Bacharel em Ciências Atmosféricas.**

**Orientador: Vanessa Silveira Barreto Carvalho**

**Itajubá, MG, Brasil  
2023**

**Universidade Federal de Itajubá  
Instituto de Recursos Naturais  
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Monografia

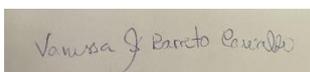
**ANÁLISE DO DESEMPENHO DO MODELO WRF NA PREVISÃO DE  
EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO: O CASO DE PETRÓPOLIS – RJ  
REGISTRADO EM 15 DE FEVEREIRO DE 2022.**

elaborada por

**Iara Stefani Carneiro da Silva**

Como requisito parcial para a obtenção do grau de  
**Bacharel em Ciências Atmosféricas**

**Comissão Examinadora:**



---

**Vanessa Silveira Barreto Carvalho, Dr<sup>a</sup>. (UNIFEI)**  
(Presidente/Orientadora)



---

**Michelle Simões Reboita, Dr<sup>a</sup>. (UNIFEI)**



---

**Bruno de Campos, Msc. (UNIFEI)**

Itajubá, 03 de julho de 2023.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado saúde e forças para superar todos os obstáculos que enfrentei durante a graduação e principalmente por me permitir recuperar da COVID após adquirir uma pneumonia. Poder finalizar o curso após uma pandemia é uma grande dádiva de Deus.

Agradeço também a minha mãe Maria Aguiñês Carneiro, que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos da minha vida, obrigada por todo o apoio, paciência e compreensão.

Aos meus colegas de curso que permitiram que essa caminhada fosse mais alegre.

A minha orientadora Dr<sup>a</sup>. Vanessa Silveira pelo suporte no tempo que lhe coube, pelas correções e todo apoio na execução desse estudo.

A todo o corpo docente, que contribuíram para meu aprendizado e conhecimento durante o curso, em especial ao professor Dr. Marcelo Corrêa que fez toda a diferença durante as suas excelentes aulas de estatística, sendo elas, parte decisiva na minha permanência no curso, e ao professor Dr. Roger pelo apoio nos momentos de dificuldades.

E a todos àqueles que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigada!

Dedico esse trabalho primeiramente à Deus que me deu saúde e forças para superar todos os momentos difíceis que me deparei ao longo do curso, sem Ele eu não chegaria até aqui. A minha mãe Maria Aguinês por acreditar em mim e por todo incentivo prestado durante a graduação. Mãe, seu apoio foi essencial na minha caminhada. E a todos os amigos que me incentivaram a ser uma pessoa melhor e a não desistir dos meus sonhos.

(dedicatória)

Forte é quem, depois de tanto perder, reergue-se e segue lutando.

Ayrton Senna.

## RESUMO

Monografia de Graduação  
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Itajubá, MG, Brasil

### **ANÁLISE DO DESEMPENHO DO MODELO WRF NA PREVISÃO DE EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO: O caso de Petrópolis-RJ registrado em 15 de fevereiro de 2022.**

AUTOR(A): Iara Stéfani Carneiro da Silva  
ORIENTADOR(A): Vanessa Silveira Barreto Carvalho  
Local e Data da Defesa: Itajubá, 03 de julho de 2023.

Os desastres naturais são resultados de fenômenos adversos que causam grandes impactos na sociedade, sendo responsáveis por inúmeros prejuízos econômicos e sociais que incluem a perda de vidas humanas em todo o mundo. No Brasil, um exemplo de desastre natural, ocasionado por um evento extremo de precipitação, ocorreu na cidade de Petrópolis, no estado do Rio de Janeiro, no dia 15 de fevereiro de 2022, quando mais de 200 pessoas morreram e aproximadamente 950 ficaram desalojadas por conta do grande volume de chuvas registrado na região. Petrópolis é um município situado em uma região serrana com encostas muito íngremes e rios entre elas. Vale ressaltar também que a ocupação irregular do solo, principalmente, em áreas de encostas foi um dos fatores responsáveis pelos grandes impactos gerados por este evento. Nesse contexto, a previsão de tempo, realizada com antecedência e acurácia, pode auxiliar a minimizar os impactos causados por eventos dessa natureza fornecendo subsídios para órgãos de controle como a defesa civil e para a própria população. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é analisar o desempenho do modelo *Weather Research and Forecasting* - WRF em simular a precipitação ocorrida no dia 15 de fevereiro de 2022 no município de Petrópolis. O período da simulação abrange um dia antes, até um dia depois do ocorrido. Foram consideradas três grades aninhadas com 16, 4 e 1 km de resolução espacial horizontal. Para a análise do desempenho do modelo foram utilizados dados de precipitação registrados na região e dados provenientes da reanálise ERA5. Foi possível detectar grandes similaridades nos padrões atmosféricos ao realizar a comparação entre os dados de reanálise ERA5 e os dados simulados pelo modelo. No geral, o modelo representou bem a chuva no que se refere a categorização estipulada, exceto para a estação CIEP Brizolão 137 onde foi registrado chuva forte e o modelo não simulou chuva e para as estações Quitandinha, Rua Araruama e Rua Amazonas, em que foi observada chuva muito forte e o modelo simulou chuva moderada, nenhuma chuva e moderada, respectivamente. Apesar da dificuldade do modelo simular os volumes exatos de precipitação, ressalta-se que os resultados dos índices termodinâmicos como a CAPE, o índice K e o Total Totals (TT) previstos pelo modelo revelaram grande potencial para a previsão de precipitação extrema. Logo, o modelo WRF apresentou um desempenho bom na previsibilidade de padrões atmosféricos e indicadores associados à ocorrência de precipitação extrema, podendo ser utilizado para auxiliar os órgãos de controle na emissão de alertas em desastres dessa natureza.

Palavras-chave: Modelo WRF. Desastres naturais. Precipitação. Petrópolis-RJ.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Transbordamento de rios e área de deslizamento de terra em Petrópolis - RJ.....	4
<b>Figura 2.</b> Localização das estações meteorológicas do município de Petrópolis - RJ.....	7
<b>Figura 3.</b> Localização da área de estudo .....	8
<b>Figura 4.</b> . Cartas Sinóticas do CPTEC/INPE do dia 14/02/2022 às 0000Z a)250 hPa, b) 500 hPa, c) 850 hPa e d)1000 hPa e às 12 Z e)250 hPa, f) 500 hPa, g) 850 hPa e h)1000 hPa.....	13
<b>Figura 5.</b> Figura 5. Cartas Sinóticas do CPTEC/INPE dos dias 15/02/2022 às 00Z, i) 250hPa, j) 500hPa, k) 850hPa l) 1000hPa, e às 12Z m)250hPa, n) 500hPa, o) 850hPa e p)1000hPa .....	14
<b>Figura 6.</b> Cartas Sinóticas do CPTEC/INPE do dia 16/02/2022 às 00Z q) 250 hPa r) 500 hPa, s) 850 hPa t) 1000 hPa, e às 12Z u)250 hPa, v) 500 hPa, w) 850 hPa e x) 1000 hPa .....	15
<b>Figura 7.</b> Imagens de Radar da Rede de meteorologia do comando da aeronáutica no dia 14/02/2023, dia anterior ao desastre, nos horários da chuva mais forte, em Petrópolis, a) às 2000Z, b) às 2030Z, c) às 2100Z, d) às 2130Z.....	16
<b>Figura 8.</b> Imagens de Radar da Rede de meteorologia do comando da aeronáutica no dia 15/02/22, dia do desastre, nos horários da chuva mais forte, em Petrópolis. e) às 2000Z, f) às 2030Z, g) às 2100Z e h) às 2130Z .....	16
<b>Figura 9.</b> Precipitação(mm) acumulada do dia 15/02/2022 de 20 estações meteorológicas do município de Petrópolis – RJ .....	17
<b>Figura 10.</b> Acumulado horário de precipitação(mm) das estações do município de Petrópolis - RJ dia 15/02/2022 .....	18
<b>Figura 11.</b> Pressão ao nível médio do mar em linhas verdes, espessura da camada (diferença entre a altura geopotencial em 500 e 1000 hPa) linhas tracejadas vermelhas e magnitude dos ventos (acima de 30 m/s) em 200 hpa. O ponto vermelho representa a localização do município de Petrópolis-RJ e as imagens correspondem ao dia 15/02/2022 a) às 0000 Z a partir dos dados do ERA5, b) às 0000 Z a partir dos dados do WRF, c) às 0600 Z a partir dos dados do ERA5, d) às 0600 Z a partir dos dados do WRF e) às 1200 Z a partir dos dados do ERA5, f) às 1200 Z a partir dos dados do WRF, g) às 1800 Z a partir dos dados do ERA5, h) às 1800 Z a partir dos dados do WRF; e dia 16/02/2022 i) às 0000 Z a partir dos dados do ERA5, j) às 0000 Z a partir dos dados do WRF, k) às 0600 Z a partir dos dados do ERA5, l) às 0600 Z a partir dos dados do WRF.....	20
<b>Figura 12.</b> Umidade e vento em 850 hPa. O ponto vermelho representa a localização do município de Petrópolis-RJ e as imagens correspondem ao dia 15/02/2022 a) às 00Z a partir dos dados do ERA5, b) às 00Z a partir dos dados do WRF, c) às 0600 Z a partir dos dados do ERA5, d) às 0600 Z a partir dos dados do WRF e) às 1200 Z a partir dos dados do ERA5, f) às 1200 Z a partir dos dados do WRF, g) às 1800 Z a partir dos dados do ERA5, h) às 1800 Z a partir dos dados do WRF; e dia 16/02/2022 i) às 0000 Z a partir dos dados do ERA5, j) às	

0000 Z a partir dos dados do WRF, k) às 0600 Z a partir dos dados do ERA 5, l) às 0600 Z a partir dos dados do WRF.....21

**Figura 13.** Altura geopotencial e divergência dos ventos em 200hPa. O ponto vermelho representa a localização do município de Petrópolis-RJ e as imagens correspondem ao dia 15/02/2022 a) às 0000 Z a partir dos dados do ERA5, b) às 0000 Z a partir dos dados do WRF, c) às 0600 Z a partir dos dados do ERA5, d) às 0600 Z a partir dos dados do WRF e) às 1200 Z a partir dos dados do ERA5, f) às 1200 Z a partir dos dados do WRF, g) às 1800 Z a partir dos dados do ERA5, h) às 1800 Z a partir dos dados do WRF; e dia 16/02/2022 i) às 0000 Z a partir dos dados do ERA5, j) às 0000 Z a partir dos dados do WRF, k) às 0600 Z a partir dos dados do ERA5, l) às 0600 Z a partir dos dados do WRF.....22

**Figura 14.** Precipitação (mm) acumulada simulada pelo modelo WRF no dia 15/02/2022, o ponto vermelho nas figuras a) e b) representa o município de Petrópolis-RJ.....34

**Figura 15.** Acumulado horário de precipitação (mm) simulado pelo modelo WRF nos pontos de latitude e longitude das estações utilizada no presente estudo.....23

**Figura 16.** Índice termdinâmico CAPE(J/Kg) em sombreado, índice termodinâmico Total Totals em linhas tracejadas vermelhas e índice termodinâmico K em linhas sólidas verde do modelo WRF do dia 14/02/2022, a) às 0000 Z, b) às 0600 Z, c) às 1200 Z, d) às 1800 Z, dia 15/02/2022 e) às 0000 Z, f) às 0600 Z g) às 1200 Z , h) às 1800 Z e dia 16/02/2022, i) às 0000 Z, j) às 0600 Z, k) às 1200 Z, l) às 1800 Z.....25

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Coordenadas geográficas das estações meteorológicas em Petrópolis – RJ.....	7
<b>Tabela 2.</b> Configuração das simulações com o modelo WRF.....	8
<b>Tabela 3.</b> Fórmula de cálculo dos índices termodinâmicos utilizados neste estudo .....	10
<b>Tabela 4.</b> Potencial de tempestades em função do valor de CAPE .....	10
<b>Tabela 5.</b> Potencial de tempestade e precipitação em função do valor de K .....	11
<b>Tabela 6.</b> Potencial de atividade convectiva em função dos valores de TT .....	11
<b>Tabela 7.</b> Categoria da precipitação acumulada no dia 15/02/2022 nas estações meteorológicas do município de Petrópolis e precipitação acumulada simulada pelo modelo.....	24
<b>Tabela 8.</b> Valores dos índices termodinâmicos CAPE (J/Kg), K(°C) e TT simulados pelo modelo a cada 3 horas, nos dias 14, 15 e 16/02/2022 .....	26

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ASAS – Anti Ciclone Subtropical do Atlântico Sul

AWC – Aviation Weather Center

CAPE – Energia Potencial Convectiva Disponível

CEMADEM – Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais

CEPTEC- Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

CNM – Confederação Nacional dos Municípios

CRED – Center for Research n the Epidemiology of disaster

CT-Cross Totals

Cwb – Clima Subtropical de altitude

dBz – Decibéis de Z

ECMWF – Centro Europeu de Previsão Meteorológica a médio prazo

EM-DAT – Emergency Events Database

ERA 5 – Quinta geração de reanálise atmosférica do clima Global

g – Aceleração da gravidade

GFS – Global Forecast System

GRIB – Gridded Binary

GRADS – Grid Analysis and Display System

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

JPN – Jato Polar Norte

JPS – Jato Polar Sul

JST – Jato Subtropical

K – Índice termodinâmico K

NCAR – Centro Nacional de Pesquisa Atmosférica

Pnmm – Pressão ao nível médio do mar

REDEMET – Rede de Meteorologia do comando da Aeronáutica

RH – Umidade Relativa

RJ – Rio de Janeiro

T – Temperatura

Td – Temperatura do ponto de orvalho

TT – Total Totals

UTC – Tempo universal coordenado

VT- Vertical Totals

WRF - Weather Research and Forecasting Model

Z – Zulu

ZCAS – Zona de convergência do atlântico sul

## Sumário

<b>RESUMO</b> .....	<b>I</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>II</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>IV</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS</b> .....	<b>V</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS</b> .....	<b>5</b>
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>5</b>
3.1. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	5
3.2. BASE DE DADOS .....	6
3.3. CONFIGURAÇÃO DO MODELO WRF .....	8
3.4. ANÁLISES REALIZADAS .....	9
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>12</b>
4.1. CARACTERIZAÇÃO DO EVENTO.....	12
4.2. AVALIAÇÃO DA PREVISIBILIDADE DO MODELO .....	19
4.3 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ATMOSFÉRICO .....	25
<b>5. CONCLUSÃO</b> .....	<b>26</b>
<b>6. REFERÊNCIAS</b> .....	<b>27</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>39</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Os desastres naturais são resultados de fenômenos adversos como chuva muito forte, ausência de precipitação por longos períodos, ventos fortes (entre 28 a 33 nós na escala de Beaufort - MARINHA DO BRASIL, 2020), terremotos, tsunamis, entre outros e, quando intensos, têm potencial para causar grandes impactos na sociedade, uma vez que podem promover a impermeabilização e compactação do solo, além do assoreamento dos rios (KOBIAAMA et al., 2006). É importante ressaltar que os desastres naturais estão relacionados não somente com fatores de tempo e clima, mas também com fatores sociais (ÁVILA et al., 2017) como o adensamento de construções, desmatamentos, queimadas e a poluição do ar (KOBIAAMA et al., 2006). Dados da estratégia internacional de redução de desastres revelam que 96% da população sujeita a eventos desta natureza encontram-se em países em desenvolvimento onde a renda per capita é menor que aproximadamente US\$ 7.508,16 por ano (FREITAS, 2012; BANCO MUNDIAL, 2022). Vale destacar que para que os eventos extremos sejam considerados desastres naturais é necessário que ao menos um dos critérios descritos pelo *Emergency Events Database* (EM-DAT) desenvolvido pelo *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters* (CRED) sejam satisfeitos: (a) dez pessoas ou mais tenham falecido em decorrência do fenômeno, (b) cem pessoas ou mais tenham sido atingidas e (c) haja declaração de estado de emergência e/ou pedido de assistência internacional (MARCELINO, 2006).

Eventos extremos de precipitação responsáveis por desastres naturais associados a inundações e deslizamentos de terra, por exemplo, são registrados em diversas regiões no Brasil e no mundo (TORRES et al., 2009). No Brasil, alguns desses eventos registrados nas últimas décadas foram denominados como “eventos do século” devido a grande quantidade de pessoas atingidas (NOBRE; MARENGO; 2017). Em janeiro de 2022, no Espírito Santo, por exemplo, 789 pessoas foram desalojadas e 159 ficaram desabrigadas devido à ocorrência de fortes chuvas. No estado de Santa Catarina, no mês de maio do mesmo ano, 27 cidades encontravam-se em situações de emergência com 3 vítimas fatais e 44 mil pessoas afetadas pelo ciclone Yakecan. No nordeste do Brasil, entre os meses de maio a julho de 2022, fortes chuvas causaram alagamentos e deslizamentos de terra afetando aproximadamente 53.434 pessoas (LESNAU, 2022).

Ressalta-se que fatores como os movimentos de massas de ar e vendavais, a variabilidade latitudinal e relevo, a maritimidade e continentalidade, além dos sistemas atmosféricos, influenciam a variabilidade temporal e espacial de variáveis atmosféricas como temperatura, precipitação e vento (NUNES et al., 2009, ABDN, 2013; REBOITA, 2017). De acordo com Nunes (2015), o aumento dos centros urbanos aliados à vulnerabilidade da população determina a direção da expansão territorial, que na maioria das vezes ocorre em

áreas de riscos como florestas, encostas e mananciais. Essa vulnerabilidade da população, em conjunto com as mudanças climáticas, também influencia na quantidade de desastres naturais que vem aumentando em várias regiões do mundo (CARVALHO; DAMACENA, 2012; JACOBI; SULAIMAN, 2016; MARENGO et al., 2016; WDR, 2020).

De acordo com o Atlas de mortalidade e perdas econômicas por tempo, clima e extremos de precipitação (UN, 2021), entre 1970 a 2019, mais de 11 mil desastres naturais, com mais de 2 milhões de mortes e US\$ 3,64 trilhões em danos, foram relacionados a eventos climáticos. Estudos apontam também que a periodicidade e a duração dos eventos extremos de precipitação também vêm aumentando, principalmente, em decorrência das mudanças climáticas (MARENGO et al., 2011; FU et al., 2013; SONG et al., 2015). De acordo com o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas - IPCC (2022), as projeções baseadas em cenários e informações de curto prazo indicam, além do aumento da intensidade e duração de eventos extremos até o final do século XXI, a alteração do ciclo anual de precipitação com maior amplitude entre os valores registrados nas estações úmida e seca.

Um dos motivos de preocupação em relação às projeções de intensificação da ocorrência de eventos extremos de precipitação em cenários futuros, deve-se ao fato de que o grau de saturação do solo depende do acumulado de chuvas, sendo eles diretamente proporcionais, e, portanto, quanto maior o acumulado de chuvas, mesmo que essas chuvas sejam de fraca intensidade, mas que se mantêm por várias horas, são suficientes para causar deslizamentos de terra (DE SOUSA et al, 2016). Para a avaliação da relação entre a ocorrência de precipitação e os deslizamentos de terra, um estudo realizado por Wieczorek (1987) na região norte de Portugal mostra que, o período entre o início da precipitação e a ocorrência do deslizamento pode variar de dias a meses dependendo das condições locais, entretanto, muitos deslizamentos de terra são iniciados por intervalos de tempestades de alta intensidade de 72 horas ou menos. Chelboard (2000) analisou dados de precipitação relacionado a um deslizamento de terra histórico em Seattle no Estados Unidos, e identificou os limiares de precipitação que favorecem os deslizamentos de terra, constatando que a precipitação acumulada em 15 dias, influencia a quantidade necessária de chuva dos próximos três dias para ocorrência de deslizamentos de terra. O autor destaca ainda que dados de temperatura do ar em conjunto com limiares de precipitação podem ser usados para detectar condições propícias aos deslizamentos de terra. Vale ressaltar que o método não pode ser utilizado para prever o deslizamento, entretanto é útil para identificar momentos em que o deslizamento de terra induzido pela precipitação, são propícios a ocorrer. Contudo, devido à complexidade de tais eventos, falsos sinais de alerta podem ocorrer.

O aumento de intensidade na continuidade da chuva durante um longo período de tempo até esta cessar, (b) anomalias na distribuição dessas e (c) um grande acumulado de chuva convectivas, podem ser relacionados com a ocorrência do desastre, sendo justificados

pela coesão e pelo ângulo de atrito (TATIZANA et al., 1987 a, b; MOLINA, 2015). Sendo assim, é possível identificar padrões na atmosfera a fim de desenvolver métodos preditivos para a atenuação e redução dos efeitos destrutivos dos desastres naturais (ALCANTARA, 2002). Vale destacar que, além da análise meteorológica, torna-se necessário também uma análise pedológica e vegetativa da região atingida por desastre, pois o desmatamento também tem um grande papel na determinação de ocorrências de desastres, já que esses são responsáveis pelo aumento do escoamento e do nível dos cursos d'água (SILVA, 2015).

Segundo Almeida e Pascoalino (2014), o Brasil é um dos países com maior número de ocorrência de desastres naturais, sendo o 13<sup>a</sup> colocado em 2008 entre os países mais afetados por eventos extremos relacionados a processos atmosféricos, tendo como resultados, principalmente, deslizamentos, inundações, tempestades e secas. Além disso, de acordo com o Atlas Brasileiro de desastres naturais (2013), no Brasil ocorreram 38.996 desastres naturais entre 1991 a 2012, sendo que na região sudeste, 31% são em decorrência de estiagem e secas, 30% enxurradas e 20% inundações. Estudos mostram ainda que desastres naturais quando sucedidos de fenômenos naturais aliados a vulnerabilidade social da população devido a ocupação irregular do solo são caracterizados como um problema público (ALCANTARA, 2002; NUNES, 2015; FREITAS, 2022). Na estação chuvosa de 2021/2022, por exemplo, grandes desastres naturais atingiram, principalmente, as regiões nordeste e sudeste do Brasil. De acordo com a Confederação Nacional dos Municípios (CNM, 2022), 25% de um total de 1756 mortes nos últimos dez anos causadas em decorrência das chuvas, ocorreram em 2022 com 457 registros até o dia 31 de maio de 2022.

A região serrana do estado do Rio de Janeiro, por exemplo, há décadas, tem registrado chuvas fortes associadas com deslizamentos e inundações, responsáveis por perdas humanas e prejuízos econômicos significativos. Fortes chuvas registradas nessa área, em 2011, causaram mais de 900 mortes e deixaram mais de 45.000 desabrigados e desalojados em toda a região (SÁ; IBRAHIM, 2021). Em Petrópolis, em 24 horas foram registrados 154,4 mm com 71 óbitos associados; em Teresópolis, o valor acumulado de precipitação chegou a 161,1 mm em 24h com 388 óbitos; e em Nova Friburgo, foram registrados 133 mm em 24h e um total de 429 óbitos (CARMO, 2014, EXAME, 2022, LAURIANO et al., 2011). Devido ao grande número de vítimas fatais, o desastre é identificado como o maior desastre já ocorrido no Brasil até hoje. Em 2013, nessa mesma região, fortes chuvas causaram 33 óbitos e deixaram muitos desabrigados (OTTERO, 2018). No dia 15 de fevereiro de 2022, foco deste estudo, fortes chuvas no Município de Petrópolis provocaram grandes deslizamentos de terra, ocasionando mais de 200 mortes e aproximadamente 950 desalojados (G1, 2022). Em menos de 6 horas, foram registrados 260 mm de chuva, valor superior ao esperado para o mês todo (PETRÓPOLIS, 2022). Os prejuízos econômicos associados ao evento são estimados em R\$ 665 milhões (Poder360, 2022). A Figura 1 traz imagens que revelam o impacto do

deslizamento de terra e transbordamento dos rios causados pelas chuvas extremas neste dia. Ressalta-se que as características socioambientais da região, que possui terreno complexo, rios e subsolo rochosos com pouca camada de terra devido à grande extração de madeira nativa para fins industriais, somados à ocupação desordenada da população, principalmente em áreas de encosta, tornou a região um local propício a deslizamentos e enchentes, sendo Petrópolis uma das 251 cidades mais vulneráveis a deslizamentos no país (FREITAS, 2012).



Figura 1. Transbordamento de rios e área de deslizamento de terra em Petrópolis-RJ. Fonte: Diário do Nordeste (2022); Estado de Minas (2022).

Logo, torna-se necessário uma análise crítica dos cenários de risco e das condições de vulnerabilidade, em conjunto com uma avaliação das projeções de intensificação de ocorrência de eventos extremos de precipitação e, em especial, da melhoria dos sistemas de previsão de tempo especialmente em áreas afetadas por grande recorrência de desastres naturais. Ressalta-se que prever o tempo com antecedência e precisão, pode contribuir para as ações de prevenção, mitigação, preparação, resposta e recuperação previstas em lei, como forma de redução dos desastres naturais e impactos ambientais, sociais e econômicos, decorrentes de eventos dessa natureza (BRASIL, 2012).

Devido ao avanço computacional e a variedade de aplicações, a modelagem numérica tornou-se uma ferramenta extremamente importante no campo da meteorologia (MEDINA, 2017). O modelo Weather Research Forecast – WRF é um sistema de modelagem numérica da atmosfera que descreve processos complexos com diversas opções físicas como: microfísica, parametrização cúmulos, fluxos turbulentos na camada limite planetária, modelo de superfície terrestre e radiação. (Skamarock et al., 2008). As variáveis meteorológicas são simuladas resolvendo equações diferenciais mediante métodos numéricos computacionais, realizando aproximações por um conjunto de dados finitos representados em pontos de grade (DIAZ, 2018; JACOBSON, 2005). Vale destacar que, para os processos nos quais o modelo não possui informações diretas, como por exemplo gotículas de nuvens, é realizada a parametrização, representando um processo de sub-grade, relacionando por exemplo, as gotículas de nuvens à umidade relativa dentro de uma mesma grade (DIAZ, 2018). Portanto,

a modelagem atmosférica é uma excelente ferramenta para identificar fenômenos atmosféricos em diferentes escalas.

## **2. OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS**

O objetivo geral desse estudo é analisar, através do uso do modelo de previsão numérica do tempo Weather Research and Forecasting – WRF, a previsibilidade e os padrões atmosféricos associados à precipitação extrema ocorrida no dia 15 de fevereiro de 2022 no município de Petrópolis-RJ.

São objetivos específicos do projeto:

- Analisar a utilização de indicadores termodinâmicos para a previsão de eventos extremos;
- Comparar os resultados obtidos com o modelo WRF com dados registrados em pluviômetros.

## **3. MATERIAL E MÉTODOS**

### **3.1. Descrição da área de estudo**

O município de Petrópolis está localizado na região Serrana do estado do Rio de Janeiro, em 22,505° S e 43,178° W, e possui uma área de aproximadamente 791.144 km<sup>2</sup> onde vivem 278.881 habitantes (IBGE, 2022). Na região tem-se a predominância de formação montanhosa e escarpadas com alto declive, além de fraturas e falhas causadas devido a movimentos de placas tectônicas (GUERRA; et al., 2007). Situada sobre a Serra do Mar e Serra dos Órgãos (GUERRA; et al., 2007), o clima de Petrópolis é classificado por Koppen - Geiger como Cwb, ou seja, o município apresenta um clima temperado, com duas estações bem definidas (inverno seco e verão chuvoso).

Devido a sua localização, o município torna-se vulnerável a entrada de massas que consequentemente são responsáveis por grandes tempestades, como a que aconteceu em 2011, quando a Zona de Convergência do Atlântico Sul - ZCAS estabeleceu uma extensa faixa de nebulosidade sobre a região sudeste, resultando em uma grande quantidade de umidade que favoreceu a precipitação na região e contribuiu para que ocorresse o desastre natural associado (Cavalcanti Filho et al., 2011). Além disso, Silva (2021) indica uma precipitação média de 2000 a 3000 mm por ano, Araujo *et al.*, (2018) aponta a pluviosidade média acima de 2000 mm por ano em Petrópolis-RJ, sendo o relevo, um dos principais fatores responsáveis pela distribuição espacial das chuvas (AYOADE, 1996; TAVARES, 2020).

O IBGE (2010) concluiu que 95,06% da população reside na zona urbana do município. De acordo com Guerra et al., (2007), o processo de industrialização resultou no agravamento dos riscos de desastres naturais, uma vez que a população se concentrou em locais próximos às indústrias, ocupando locais impróprios, como, por exemplo, áreas de encostas. Carmo (2014) apontou também que áreas com alta densidade demográfica e ocupação desordenada acabam intensificando os impactos dos fenômenos extremos da atmosfera no município.

### 3.2. Base de dados

Todos os dados utilizados foram obtidos para o período de 12 a 18 de fevereiro de 2022. Para a caracterização do evento, foram utilizadas cartas sinóticas do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC a partir de <http://img0.cptec.inpe.br/~rgptimg/Produtos-Pagina/Carta-Sinotica/Analise/Superficie/?C=M;O=A> dos horários das 0000 e 1200 UTC. Quando disponíveis, imagens do radar do Pico do Couto foram obtidas a partir de <https://www.redemet.aer.mil.br/>. O radar é de responsabilidade do comando da Aeronáutica e situa-se a 1745 m de altitude, apresentando as seguintes características: pulsado, Doppler, com banda S, comprimento de onda de 10cm, com uma resolução espacial de 100 a 400 pixels (cada pixel com 1x1 km<sup>2</sup>) (ALMEIDA; FRANÇA, 2002).

Para a caracterização do evento e comparação com os resultados espaciais obtidos a partir do modelo WRF, foram utilizados também dados da reanálise ERA5 produzida e disponibilizada pelo *European Centre for Medium-range Weather Forecasting - ECMWF*. Os dados do ERA5 utilizam técnicas de assimilação de dados, onde a cada 12h, uma previsão anterior é combinada com novas observações disponíveis, de maneira a produzir uma melhor estimativa do estado real da atmosfera (Hersbach et al., 2018). Esses dados são disponibilizados em pontos de grade de latitude e longitude regular, com resolução horizontal de 0,25° x 0, 25°. Foram considerados dados das variáveis: temperatura do ar, umidade, componente meridional (v) e componente zonal (u) do vento para os níveis de 200 hPa, 500 hPa, 850 hPa e 1000 hPa, além da pressão ao nível médio do mar. Todos os dados foram obtidos para os horários de 0000, 0600, 1200 e 1800 UTC a partir da plataforma: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home> .

Para a geração das condições iniciais e de fronteira requeridas para as simulações com o modelo WRF foram utilizados dados do Global Forecast System - GFS do *National Center for Atmospheric Research - NCAR*, com resolução horizontal de 0,25° a cada 6 horas. O *download* dos dados GFS foi feito através da plataforma: [https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get\\_source.html](https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get_source.html), no formato GRIB2 para os horários de 0000, 0600, 1200 e 1800 UTC.

Para a avaliação dos resultados obtidos com o modelo e também para complementação da caracterização do evento, foram utilizados dados de precipitação registrados por 20 pluviômetros em operação no município de Petrópolis. A lista destes pluviômetros e sua distribuição espacial são apresentados na Tabela 1 e na Figura 2, respectivamente. Vale ressaltar que, a topografia interfere na distribuição espacial da chuva no município, sendo que, quando há atuação de sistemas frontais e massa polar atlântica, os maiores valores de precipitação são registrados nas estações a barlavento da serra do Mar (TAVARES, 2020).

Tabela 1. Coordenadas geográficas das estações meteorológicas em Petrópolis-RJ.

Cód.	Estações	Latitude	Longitude	Altitude (m)
E1	Araras	-22,427	-43,249	936
E2	Bingen	-22,5122	-43,2095	801
E3	CIEP Brizolão 281	-22,258	-43,076	1.648
E4	CIEP Brizolão 137	-22,454	-43,143	1.118
E5	Dr. Thouzet – Geo	-22,5283	-43,2029	915
E6	Estrada da Cachoeira	-22,353	-43,095	894
E7	Estrada do Cantagalo	-22,374	-43,046	894
E8	Estrada Petrópolis / Teresópolis	-22,428	-43,058	870
E9	Itaipava	-22,388	-43,132	870
E10	Itaipava 2	-22,369	-43,112	870
E11	Morin	-22,527	-43,161	648
E12	Mosela	-22,481	-43,219	648
E13	Pedro do Rio	-22,335	-43,134	694
E14	Quitandinha – Geo	-22,5249	-43,2239	694
E15	Rua Amazonas / Quitandinha	-22,529	-43,223	694
E16	Rua Araruama / Quitandinha	-22,52	-43,22	694
E17	São Sebastião - Geo	-22,5369	-43,1932	694
E18	Vale do Cuiabá	-22,402	-43,047	694
E19	Vila Constância	-22,401	-43,097	694
E20	Vila Rica	-22,349	-43,132	694

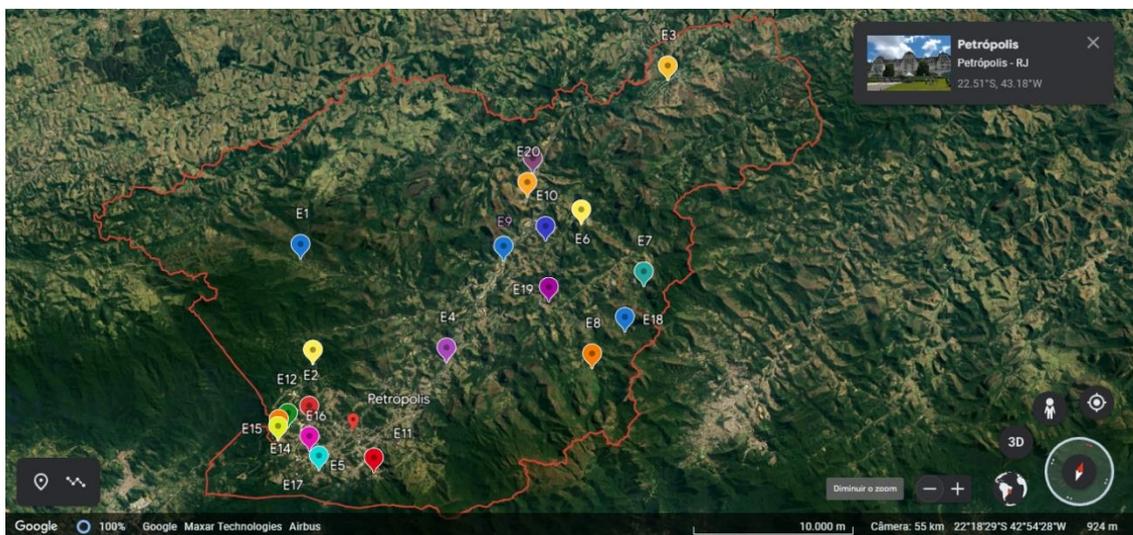


Figura 2. Localização das estações meteorológicas do município de Petrópolis - RJ.

### 3.3. Configuração do modelo WRF

A simulação com o modelo WRF versão 4.4 foi realizada para o período entre 13 e 17 de fevereiro de 2022 com três grades com resolução espacial horizontal de 16, 4 e 1 km, respectivamente, sendo a grade 2 e 3 aninhadas e centradas na coordenada 22,511° S e 43,177° W. Para eliminar os erros de *spin-up*, as primeiras 24 horas dos resultados foram descartadas. A configuração do domínio com as parametrizações físicas utilizadas para a simulação com o modelo WRF podem ser observadas na Figura 3 e na Tabela 02, respectivamente.

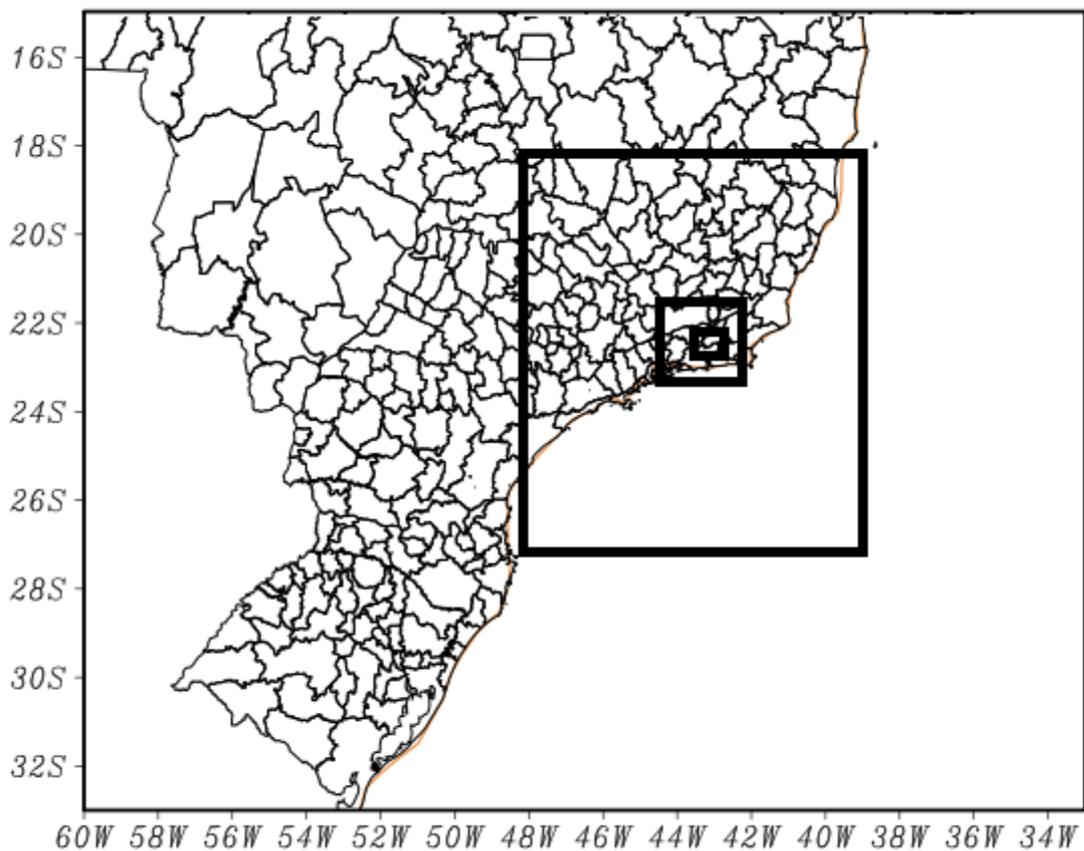


Figura 3. Localização da área de estudo. O quadro na figura representa as grades 1, 2 e 3.

Tabela 2. Configuração das simulações com o modelo WRF.

Parâmetros	Grade 1	Grade 2	Grade3
Número de pontos em x	61	65	73
Número de pontos em y	61	65	73
Resolução dos dados geográficos	30s	30s	30s
Resolução na direção x	16 km	4km	1km
Resolução na direção y	16 km	4km	1km
Projeção utilizada	mercator		

<b>Latitude central</b>	-22.511
<b>Longitude central</b>	-43.177
<b>Microfísica</b>	WSM3 (HONG et al.,2004)
<b>Cúmulos</b>	Grell-Freitas (d01, d02, d03) (GRELL E FREITAS,2014)
<b>Camada limite planetária</b>	Yonsei University Scheme - YSU, (HONG et al., 2006)
<b>Superfície</b>	Eta Similarity (Janjic, 2002) e Noah-MP Land Surface Model (Yang et al., 2011)
<b>Onda curta</b>	Dudhia Shortwave Scheme (DUDHIA,1989)
<b>Onda longa</b>	Rapid Radiative Transfer Model - RRTM (MLAWER at al.,1997)

### 3.4. Análises realizadas

A caracterização do evento foi realizada a partir da análise das cartas sinóticas do período e imagens de radar, além da avaliação dos dados de precipitação registrados durante o evento. Dessa forma, os padrões de grande escala e aspectos relacionados à distribuição temporal e espacial da precipitação registrados durante o evento foram analisados.

Para a avaliação dos resultados obtidos com o modelo, primeiramente, a representatividade dos padrões atmosféricos de grande escala foi analisada a partir da elaboração de mapas, por meio do software GRADS, considerando: (1) intensidade dos ventos acima de 30m/s, pressão ao nível médio do mar e espessura da camada em 200 hPa; (2) fluxo de umidade e vento em 850hPa; e (3) altura geopotencial e divergência dos ventos em 200hPa. Para essas análises foram considerados os resultados obtidos para a grade 1 e para comparação dos padrões simulados, figuras análogas foram geradas a partir dos dados do ERA5.

A análise da avaliação do potencial da atmosfera para a formação de tempestades severas foi realizada a partir do uso dos seguintes índices termodinâmicos: (a) Energia Potencial Disponível para Convecção (CAPE); (b) índice K; e (c) Total Totals (TT). Para essa avaliação foram considerados os dados da grade 3, grade com maior resolução espacial de dados (1 km). Destaca-se que o cálculo destes índices é realizado conforme exposto na Tabela 3. Além disso, foi necessário o cálculo da Td para utilizar nos cálculos da Tabela 3, utilizando a equação  $Td = T - \left(\frac{100-RH}{5}\right)$ , onde RH é a umidade relativa em %, e T é a temperatura do ar em °C, proposto por Lawrence (2005).

Tabela 3. Fórmula de cálculo dos índices termodinâmicos utilizados neste estudo.

Índices	Fórmula	Referência
CAPE	$CAPE = g \int_{NCL}^{NE} \frac{T_{vp} - T_{vd}}{T_{vd}} dz$	Bluestein (1993)
K	$K = (T_{850} - T_{500}) + Td_{850} - (T_{700} + Td_{700})$	George (1960)
TOTAL TOTALS	$TT = T_{850} + Td_{850} - 2(T_{500})$	Nascimento (2005)

O NCL é o nível de convecção por levantamento, ou seja, é o nível de pressão na qual parcela de ar torna-se saturada quando elevada adiabaticamente, NE é o nível de equilíbrio, isto é, a altura em que a temperatura da parcela de ar ascendente é igual a temperatura do ambiente em que a envolve (NASCIMENTO, 2017),  $T_{vp}$  é a temperatura virtual da parcela,  $T_{vd}$  é a temperatura potencial equivalente saturada do ambiente,  $g$  é o valor da aceleração da gravidade. Quando a diferença entre a temperatura potencial equivalente da parcela e a temperatura potencial equivalente saturada do ambiente for positiva, a CAPE existe, ou seja, quando a parcela de ar está mais quente que o ambiente a situação é condicionalmente instável e quando a parcela está mais fria que o ambiente a situação é estável, sendo necessário que a parcela receba energia para que se desloque para baixo ou para cima (MOTA; NOBRE., 2006). Portanto, a CAPE é a anergia cinética máxima por unidade de massa de ar, favorecida pela ascensão adiabática de ar úmido da camada limite (SANTOS et al., 2014). Vale ressaltar que, a CAPE é utilizada para avaliar a possibilidade de a atmosfera desenvolver processos convectivos em função do aquecimento da superfície (LOBATO, 2019). Os valores de CAPE que identificam as condições de estabilidade ou instabilidade da atmosfera, estão apresentados na Tabela 4, conforme apresentado por Bluestein (1993).

Tabela 4. Potencial de tempestades em função do valor de CAPE.

CAPE ( $J Kg^{-1}$ )	Probabilidade de tempestade
$1000 < CAPE < 2500$	Alto Potencial
$2500 < CAPE < 4000$	Tempestade acentuada
$CAPE > 4000$	Instabilidade Extrema

Fonte: Bluestein (1993).

O índice K também é utilizado para identificar convecção, ou seja, o potencial de desenvolvimentos de tempestades e de precipitação, tendendo a identificar tempestades em ambientes úmidos; contudo, não é útil para determinar a intensidade dessa precipitação (LOBATO, 2019). Seu cálculo considera distribuição vertical da umidade e temperatura em

500, 700 e 850 hPa.  $T$  e  $T_d$  são valores de temperatura ambiente e temperatura do ponto de orvalho para os níveis de pressão indicados na Tabela 3. Portanto, o índice K considera o *lapse rate* em níveis médios, a umidade em 850 hPa e o nível de secura atmosférica em 700 hPa (NASCIMENTO, 2017). George (1960) propôs valores de K em função da probabilidade de ocorrência de tempestades conforme Tabela 5.

Tabela 5. Potencial de tempestade e precipitação em função do valor de K.

<b>Índice K (°C)</b>	<b>Probabilidade de tempestade</b>
K < 20	Improvável
20 < K < 25	Tempestade isolada
25 < K < 30	Tempestade muito dispersa
30 < K < 35	Tempestade dispersa
35 < K < 40	Tempestade intensa

Fonte: George (1960).

Por último, o índice Total Totals (TT). Este índice é a soma do índice Vertical Totals (VT) e Cross Totals (CT). O Vertical Totals é dado pelo *lapse rate* em níveis de 500 e 850 hPa e o Cross Totals é a diferença entre o conteúdo de umidade em 850 hPa e a temperatura em 500 hPa. O Total Totals é utilizado na identificação de tempo severo (DIAS,2008). Por utilizar somente dois níveis da atmosfera (500 e 850hPa), este índice torna-se limitado, pois não considera camadas de inversão, umidade e camadas secas entre os níveis e o cisalhamento do vento. Henry (1987) destaca a importância de uma análise conjunta do TT e outros índices termodinâmicos como CAPE e K, já que este não considera umidade em baixos níveis, podendo resultar a um TT alto caso o *lapse rate* seja alto. Nascimento (2005) propôs valores para o TT a fim de identificar atividades convectivas, conforme Tabela 6.

Tabela 6. Potencial de atividade convectiva em função dos valores de TT.

<b>Índice TT</b>	<b>Probabilidade de tempestade</b>
TT < 44	Fraco potencial
44 < TT < 50	Moderadas
50 < TT < 55	Fortes
TT > 55	Muito fortes

Fonte: Nascimento (2005).

Complementando a avaliação dos resultados obtidos com o modelo WRF, foram realizadas comparações entre os dados de precipitação registrados por pluviômetros no município e os dados de precipitação simulados pelo modelo. Para isso, inicialmente, a

precipitação acumulada durante as 24 horas do dia do evento (15/02/2022) foi calculada para todas as estações e o mesmo procedimento foi realizado para os dados de precipitação obtidos a partir do modelo. Ressalta-se que os dados do modelo foram extraídos para o ponto de grade mais próximo das estações.

Como a comparação direta dos dados obtidos com o modelo e dos pluviômetros tem limitações, foram utilizados intervalos de valores de precipitação para a categorização destas. As categorias de chuvas e seus respectivos intervalos foram definidas como: 0 – sem chuva; entre 0,1 e 10 mm – chuva fraca; maior que 10 mm e menor ou igual a 30 mm – chuva moderada; maior que 30 mm e menor ou igual a 50 mm – chuva forte; e maior que 50 mm – chuva muito forte. Logo, os dados obtidos com o modelo e com os pluviômetros foram categorizados e então comparados.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1. Caracterização do evento**

O evento extremo de precipitação ocorrido em 15 de fevereiro de 2022 no município de Petrópolis causou grande comoção no Brasil devido à dimensão dos impactos causados na sociedade, uma vez que mais de 200 pessoas morreram e mais de 900 ficaram desalojadas em decorrência dos deslizamentos de terra ocorridos na região (G1,2022). De acordo com o Jornal G1(2023), pelo menos 80 casas foram atingidas no morro da Oficina, local do epicentro do desastre, o centro da cidade ficou inundado e os corpos apareceram depois que o nível dos rios baixou. Nesse contexto, para entender melhor as condições atmosféricas de grande escala associadas ao grande volume de precipitação registrados durante esse evento, as cartas sinóticas disponibilizadas para o período entre o dia 14 e 16 de fevereiro de 2022 foram analisadas (Figura 4).

A partir das cartas em altos níveis, é possível observar (a) o jato subtropical (JST) passando ao sul, mais especificamente sobre o Rio Grande do Sul (linha tracejada vermelha), (b) no extremo sul verifica-se o jato polar norte (JPN - linha laranja) e (c) mais ao sul o jato polar sul (JPS - linha branca) (Figuras 4 a, e e, 5 i, e m, 6 q e u). Ao analisar a carta de superfície (Figura 4 d, h, e 5 l e p) é possível notar um sistema frontal atuando no litoral do sudeste. Esse sistema causa instabilidade atmosférica, justificando os altos volumes de precipitação registrados nas estações pluviométricas em Petrópolis-RJ.

No dia 14 de fevereiro às 00Z, é possível observar uma baixa pressão sobre o oceano Atlântico em 850 hPa e um cavado (Figura 4c) associado a frente fria próximo ao litoral de Santa Catarina (Figura 4d). A frente se desloca para o litoral do Paraná às 12Z (Figura 4h) chegando até o litoral de São Paulo no dia 15 de fevereiro às 00Z (Figura 5 l ). Parte dos sistemas atuantes em altos níveis também é observado em médios níveis. Na região onde há

presença do cavado, os ventos fazem uma ondulação no sentido horário no Hemisfério Sul. Quando há o deslocamento desse sistema há uma convergência de massas e uma maior concentração de calor e umidade e com isso há o aumento da nebulosidade gerando grandes linhas de instabilidade na região, pois o ar em ascensão expande, esfria e promove a condensação do vapor d'água em gotículas líquidas.

O escoamento com grande intensidade apresentado ao Sul do país, está associado ao sistema frontal que avança para o oceano atlântico em superfície. No dia 16 de fevereiro de 2022, a frente fria já está totalmente deslocada para o oceano atlântico.

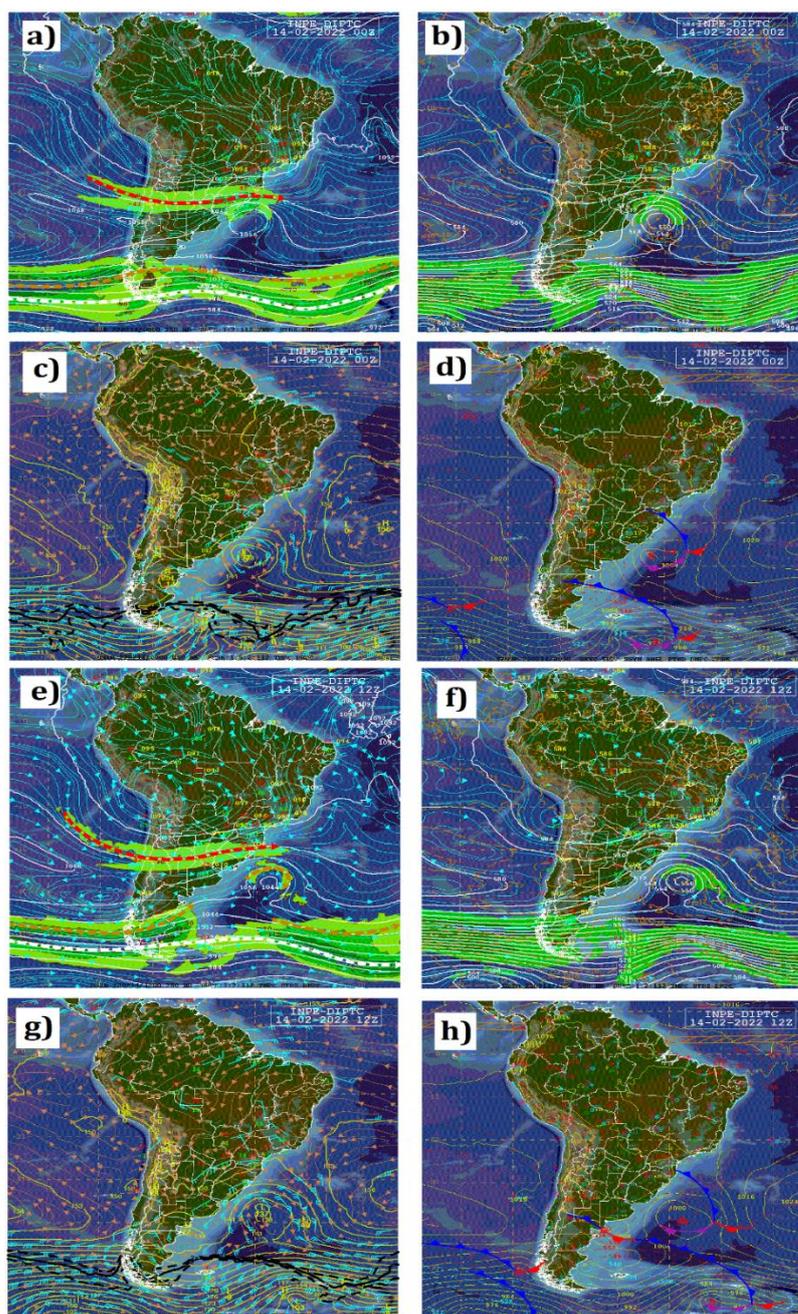


Figura 4. Cartas Sinóticas do CPTEC/INPE do dia 14/02/2022 às 0000Z a) 250 hPa, b) 500 hPa, c) 850 hPa e d) 1000 hPa e às 12 Z e) 250 hPa, f) 500 hPa, g) 850 hPa e h) 1000 hPa.

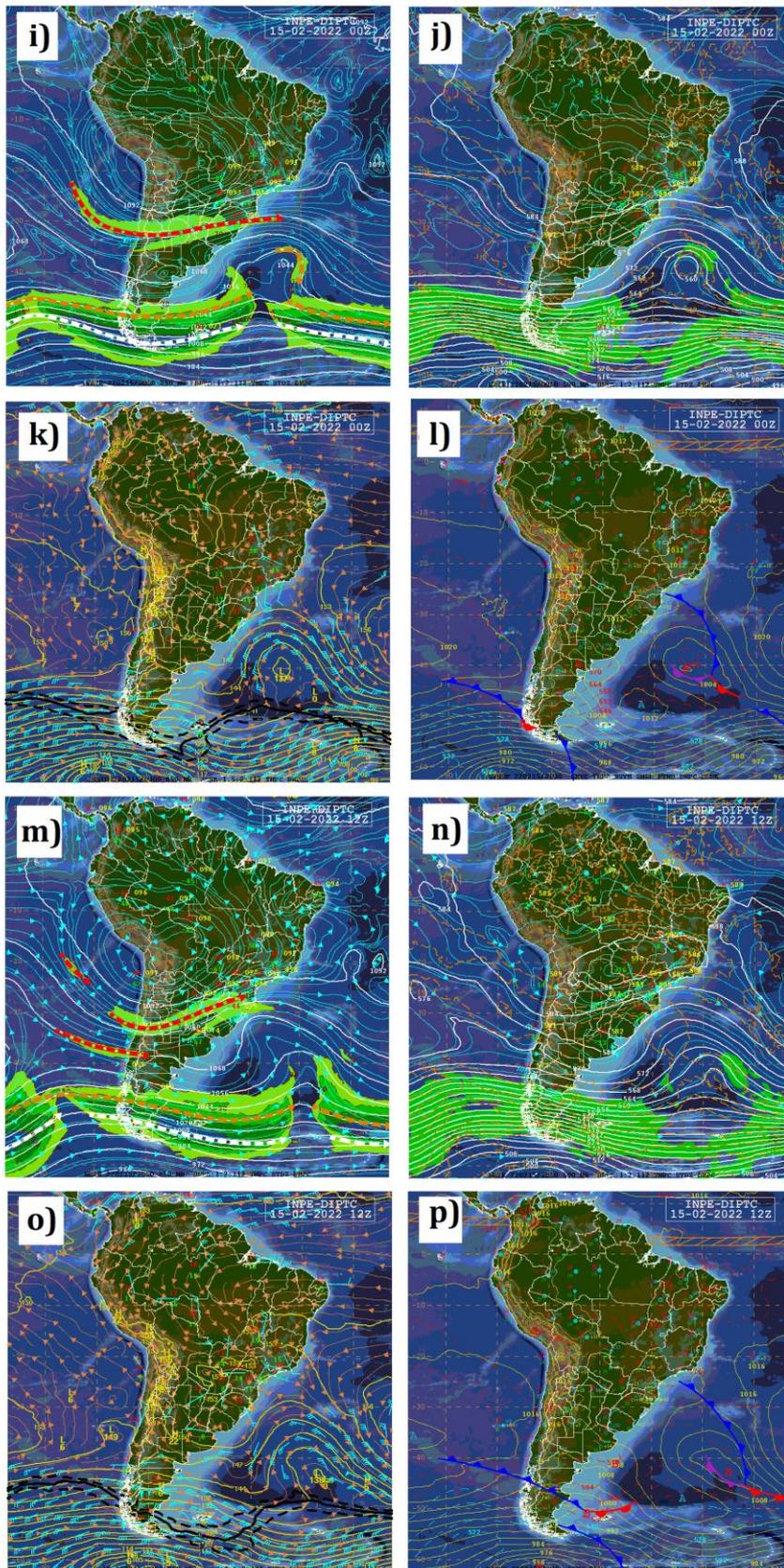


Figura 5. Cartas Sinóticas do CPTEC/INPE dos dias 15/02/2022 às 00z, i) 250hPa, j) 500hPa, k) 850hPa l) 1000hPa, e às 12Z m)250hPa, n) 500hPa, o) 850hPa e p)1000hPa;

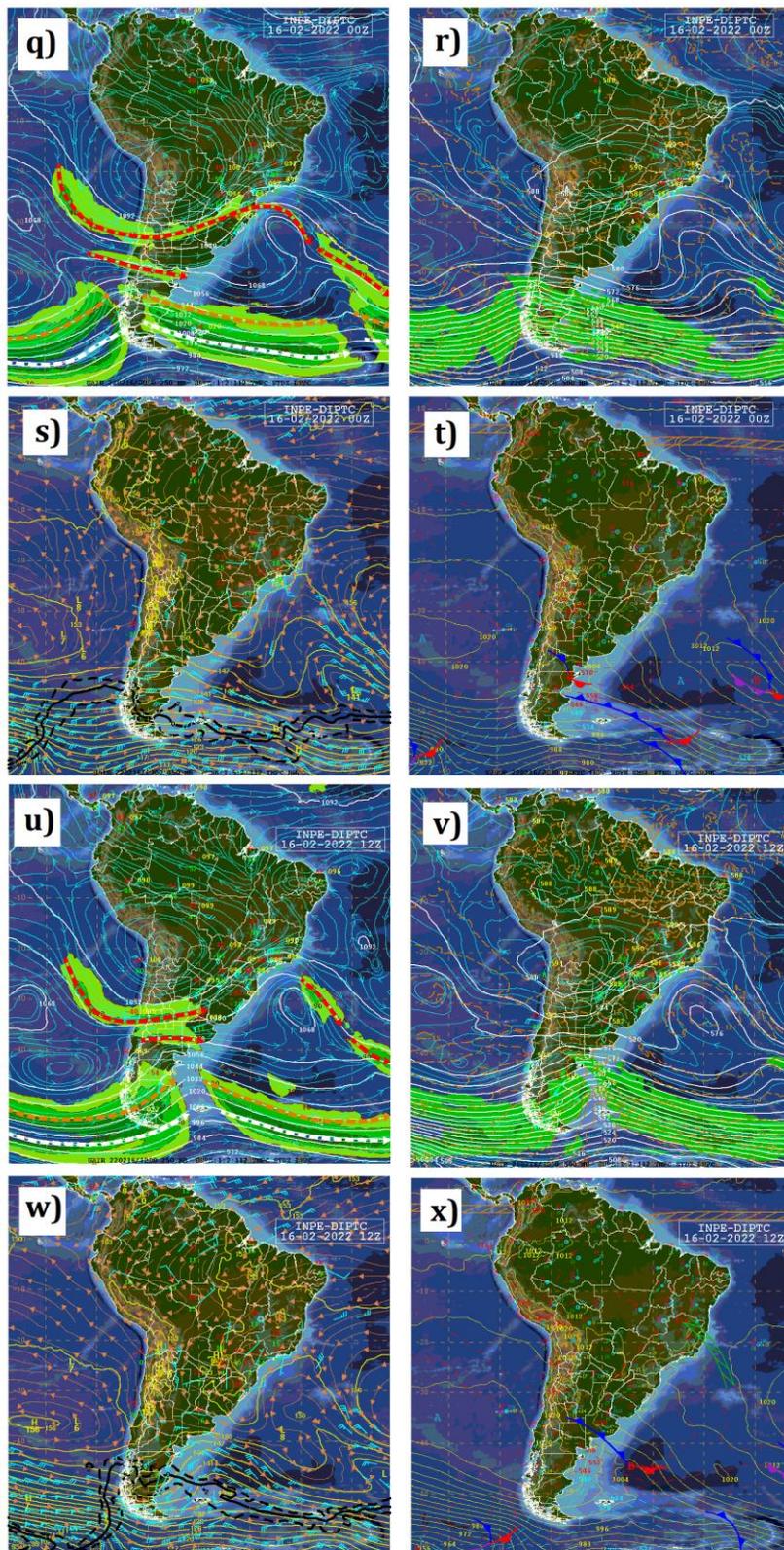


Figura 6. Cartas Sinóticas do CPTEC/INPE do dia 16/02/2022 às 00Z q) 250 hPa r) 500 hPa, s) 850 hPa t) 1000 hPa, e às 12Z u)250 hPa, v) 500 hPa, w) 850 hPa e x) 1000 hPa.

No que se refere a chuva verificada, as imagens do Radar Pico do Couto disponibilizadas pela REDEMET revelam altos valores de refletividade entre 20 a 50 dBZ na

região serrana, indicando uma chuva de fraca a forte (com uma refletividade entre 20 e 63 dbz que corresponde a chuvas entre 1 e 100 mm/h) registradas entre 20 e 21 horas no dia 14 e 15 de fevereiro de 2022 (Figura 6). No dia 14/02/2022 às 20 horas (Figura 6a), fortes chuvas (com uma refletividade entre 45 a 63 dbz correspondendo a chuvas entre 25 a 110 mm/h) foram registradas a oeste e ao sul de Petrópolis, já às 21 horas (Figura 6c) são registradas chuvas fortes a sul e a leste do município, porém atingindo também grande parte da região serrana. Já no dia 15/02/2022, a chuva ficou concentrada sobre o município de Petrópolis que apresentou uma refletividade acima de 45 dBz (maior que 25mm/h) principalmente às 20 horas (Figura 7e), corroborando com os dados obtidos pelo CEMADEN que revelam um maior volume de chuvas às 20 horas no município de Petrópolis. Esse horário, quando um grande volume de precipitação foi registrado, está associado às chuvas convectivas além dos sistemas meteorológicos atuantes na região conforme a análise das cartas sinóticas apresentada.

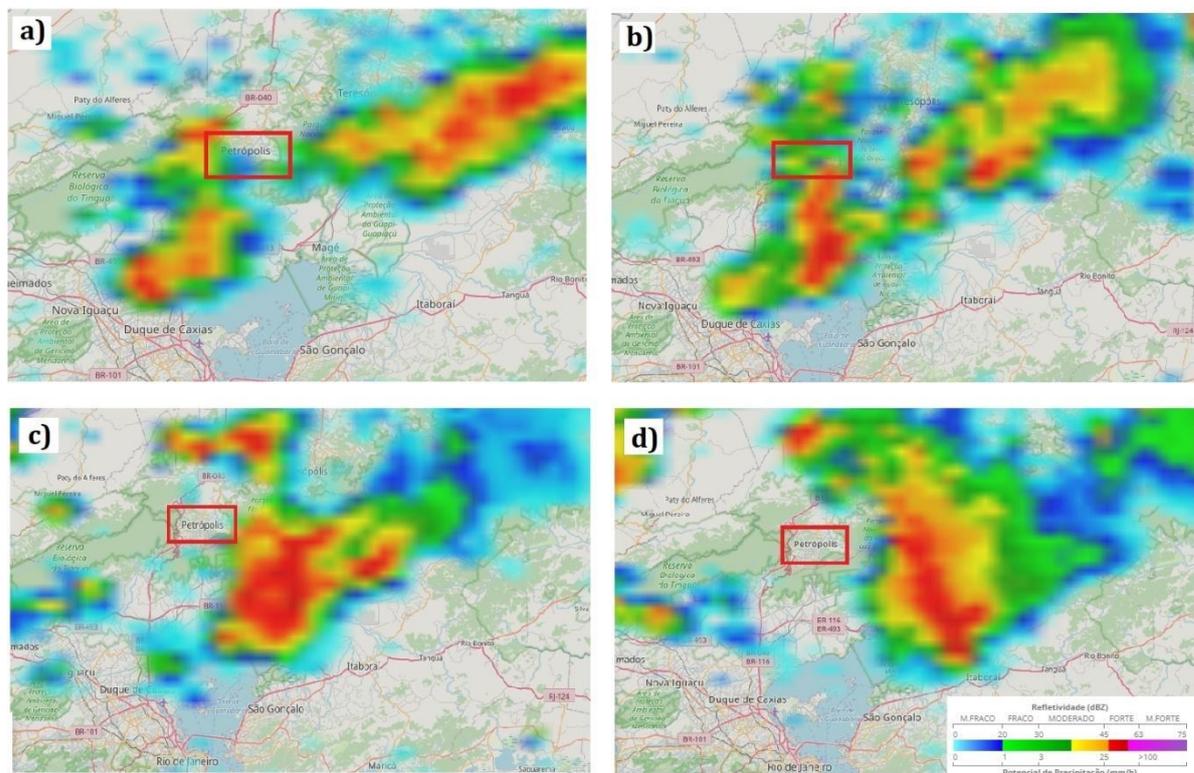


Figura 7. Imagens de Radar da Rede de meteorologia do comando da aeronáutica no dia 14/02/2023, dia anterior ao desastre, nos horários da chuva mais forte, em Petrópolis, a) às 20 Z, b) às 2030 Z, c) às 21 Z, d) às 2130Z.

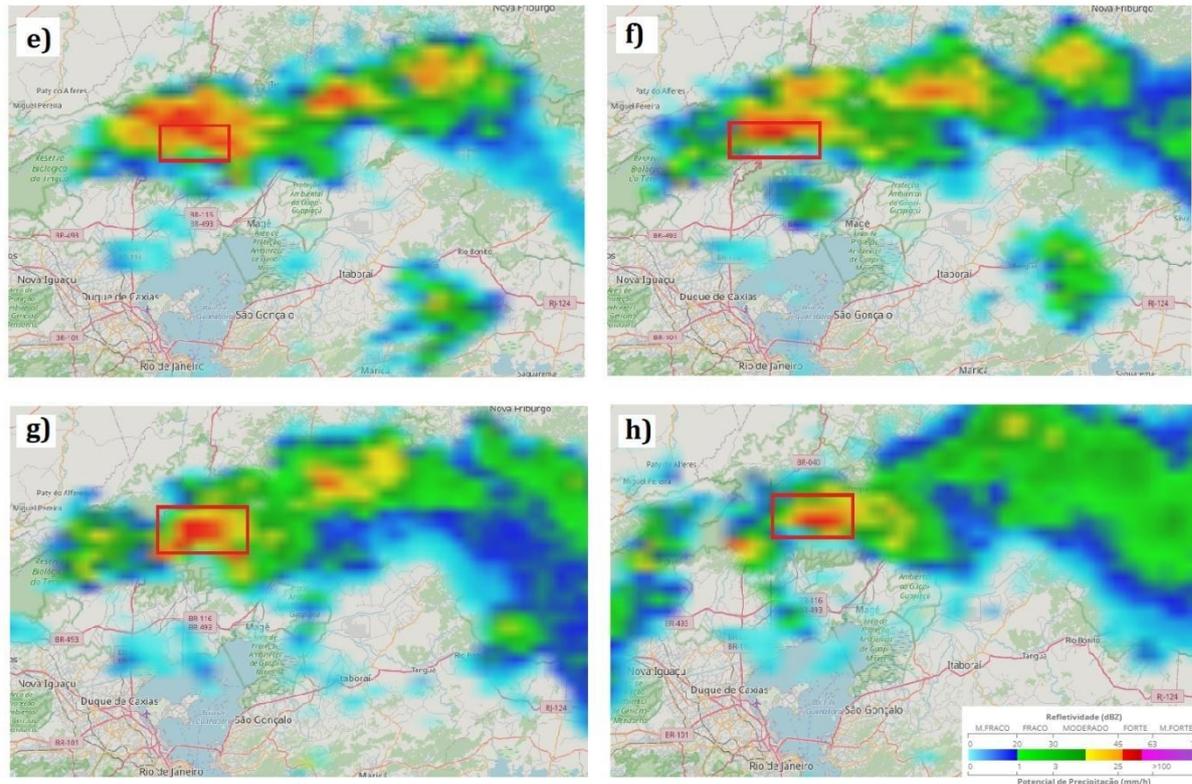


Figura 8. Imagens de Radar da Rede de meteorologia do comando da aeronáutica no dia 15/02/22, dia do desastre, nos horários da chuva mais forte, em Petrópolis. e) às 20 Z, f) às 2030Z, g) às 21 Z e h) às 2130 Z.

No dia 15 de fevereiro de 2022, dia do desastre natural, o pluviômetro de São Sebastião foi o que registrou o maior valor acumulado de chuva, 260 mm, conforme apresentado na Figura 6. Esse valor é superior à média climatológica para o mês de fevereiro de 229,28 mm (Enner, 2022). Além disso, durante o evento, o maior acumulado horário de precipitação no município ocorreu entre às 16 e 18 horas (Figura 10). Ressalta-se que o aquecimento da atmosfera associado ao ciclo solar favorece um maior desenvolvimento de nuvens convectivas a medida que o aquecimento ocorre, principalmente no final da tarde/começo da noite devido a liberação de calor latente (Correia, 2013). Esse aquecimento terrestre durante o dia produz camadas de ar com diferentes densidades, o ar que está na superfície é mais quente e mais denso, com isso ele tende a ascender na atmosfera, formando nuvens que causam intensa precipitação no final do dia. Além disso, o município de Petrópolis, por ser uma região composta por montanhas, também registra precipitação associada a topografia, resultantes da ascensão mecânica de correntes de ar úmidas horizontais sobre barreiras naturais (MELO JÚNIOR, 2006). Foi possível observar também que, as estações Bingen, Dr.Thouzet, Quitandinha, Rua Araruama, Rua Amazonas e São Sebastião foram aquelas que apresentaram o maior acumulado de chuvas (acima de 50mm) no dia do evento. Estas estações ficam localizadas na área central do município, local este com alta densidade demográfica e com a presença de muitas construções em encostas onde deslizamentos tem

um alto potencial de prejuízos econômicos e danos à vida humana, o que inclui a perda de vidas, como ocorrido no dia do evento em questão. Vale ressaltar também que, a área central pertence ao conjunto de montanhas da Serra dos Órgão e Serra do Mar. Além disso, o estudo de Tavares (2020), indica que, quando há a atuação de sistemas frontais e massa polar atlântica, os maiores valores de precipitação são registrados nas estações a barlavento da Serra do Mar.

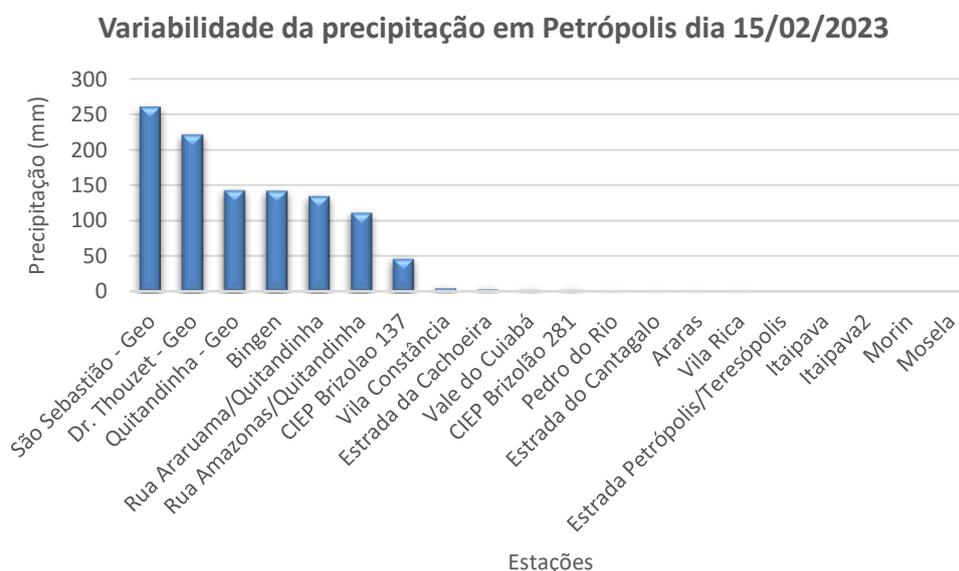


Figura 9. Precipitação(mm) acumulada do dia 15/02/2022 de 20 estações meteorológicas do município de Petrópolis – RJ.

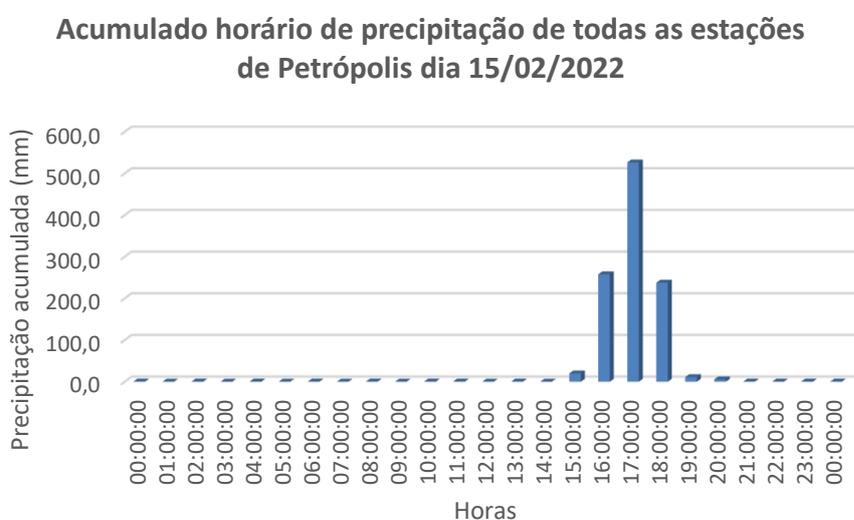


Figura 10. Acumulado horário de precipitação(mm) das estações do município de Petrópolis - RJ no dia 15/02/2022.

## 4.2. Avaliação da Previsibilidade do modelo

Durante o período estudado foi possível identificar nos dias 15 e 16 de fevereiro padrões sinóticos na atmosfera, através dos dados da ERA5 e dos resultados obtidos com o WRF que reforçam os resultados apresentados nas cartas sinóticas do CPTEC/INPE. É possível observar uma baixa pressão próximo ao litoral do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, formando um ciclone que é caracterizado pelo fechamento das isóbaras (Figura não apresentada). O ciclone, é um sistema responsável pela formação de nuvens, precipitação e ventos fortes (SUGAHARA, 2000). A costa sudeste do Brasil é um local favorável à ocorrência de ciclones intensos em baixos níveis devido a influência de cavados em altos e médios níveis além de sistemas frontais em superfície (Seluchi et al., 2001; Reboita, 2008; Reboita, 2009). Além disso, é possível observar um cavado no extremo sul sobre o oceano atlântico, sendo um sistema responsável pela divergência de ar em altos níveis, contribuindo para convergência em baixos níveis ocasionando instabilidade no local, confirmando as informações apresentadas nas Figuras 4.

Os ventos não ultrapassaram 30 m/s sobre o município de Petrópolis-RJ, entretanto, os resultados do WRF indicam um aumento na intensidade desses ventos (2 m/s a cada 6 horas) entre o dia 15 e dia 16, sendo que no dia 15 de fevereiro às 0000 Z os ventos registraram uma intensidade de 6 a 8 m/s (FIGURA 11b), já no dia 16 de fevereiro às 1200 UTC os ventos registraram uma intensidade acima de 18 m/s (FIGURA 11g), ou seja, durante a ocorrência do evento, foram registrados ventos fortes podendo causar quebra de galhos de árvores, dificuldades em andar contra o vento, e no dia após a ocorrência do evento foram registrados ventanias fortes, que causam danos em árvores e em pequenas construções de acordo com a escala modificada de Beaufort (Anexo 1).

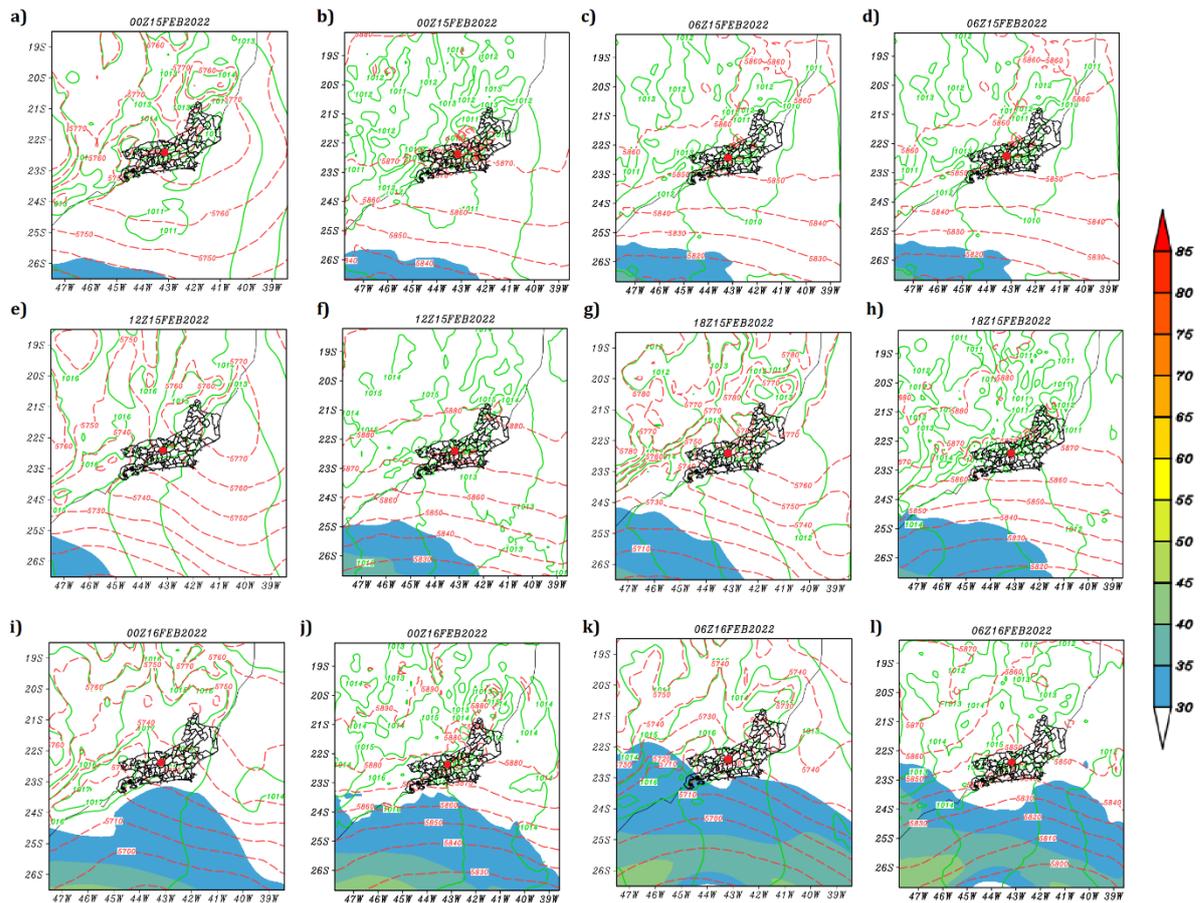


Figura 11. Pressão ao nível médio do mar em linhas verdes, espessura da camada (diferença entre a altura geopotencial em 500 e 1000 hPa) linhas tracejadas vermelhas e magnitude dos ventos (acima de 30 m/s) em 200 hpa. O ponto vermelho representa a localização do município de Petrópolis-RJ e as imagens correspondem ao dia 15/02/2022 a) às 0000 Z a partir dos dados do ERA5, b) às 0000 Z a partir dos dados do WRF, c) às 0600 Z a partir dos dados do ERA5, d) às 0600 Z a partir dos dados do WRF e) às 1200 Z a partir dos dados do ERA5, f) às 1200 Z a partir dos dados do WRF, g) às 1800 Z a partir dos dados do ERA5, h) às 1800 Z a partir dos dados do WRF; e dia 16/02/2022 i) às 0000 Z a partir dos dados do ERA5, j) às 0000 Z a partir dos dados do WRF, k) às 0600 Z a partir dos dados do ERA5, l) às 0600 Z a partir dos dados do WRF.

A umidade do ar, expressa a quantidade de vapor d'água presente na atmosfera decorrentes da evaporação e da evapotranspiração. As regiões de convergência dos ventos e de transporte de umidade em 850 hPa podem ser observadas na figura 12. A partir desta, verifica-se que há um corredor de umidade desde a Amazônia até o oceano atlântico, sendo que os maiores valores de umidade se concentram sobre o continente, entretanto parte da umidade está presente também sobre o oceano atlântico. De acordo com Silva et al. (2019), a Amazônia e o Oceano Atlântico Sul são as principais fontes de umidade sobre a região sudeste do Brasil, além disso, o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) se encontra mais a leste da região sudeste, na estação chuvosa. Esse deslocamento do ASAS contribui para condições úmidas e ventos fracos (Reboita *et al.*, 2010; Reboita *et al.*, 2019). Além disso, a formação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) durante o verão ocorre devido ao transporte vertical do ar por consequência do intenso aquecimento da superfície (KOUSKY,

1988; CARVALHO et al., 2004; SILVA et al., 2019), sendo responsável por contínuas chuvas que duram dias, podendo causar extremos de precipitação e conseqüentemente desastres naturais com deslizamentos de terra e inundações (SELUCHI e CHOU, 2009; REBOITA et al., 2017; SILVA et al., 2019). Entretanto, no caso estudado, a ZCAS se estabeleceu sobre o norte de Minas Gerais um dia após o evento conforme apresentado na carta sinótica do INPE/CPTEC (Figura 5 x) e, portanto, não teve relação com o desastre.

A simulação realizada com o modelo WRF para analisar o fluxo de umidade e convergência dos ventos corroboram as cartas sinóticas apresentadas na seção anterior.

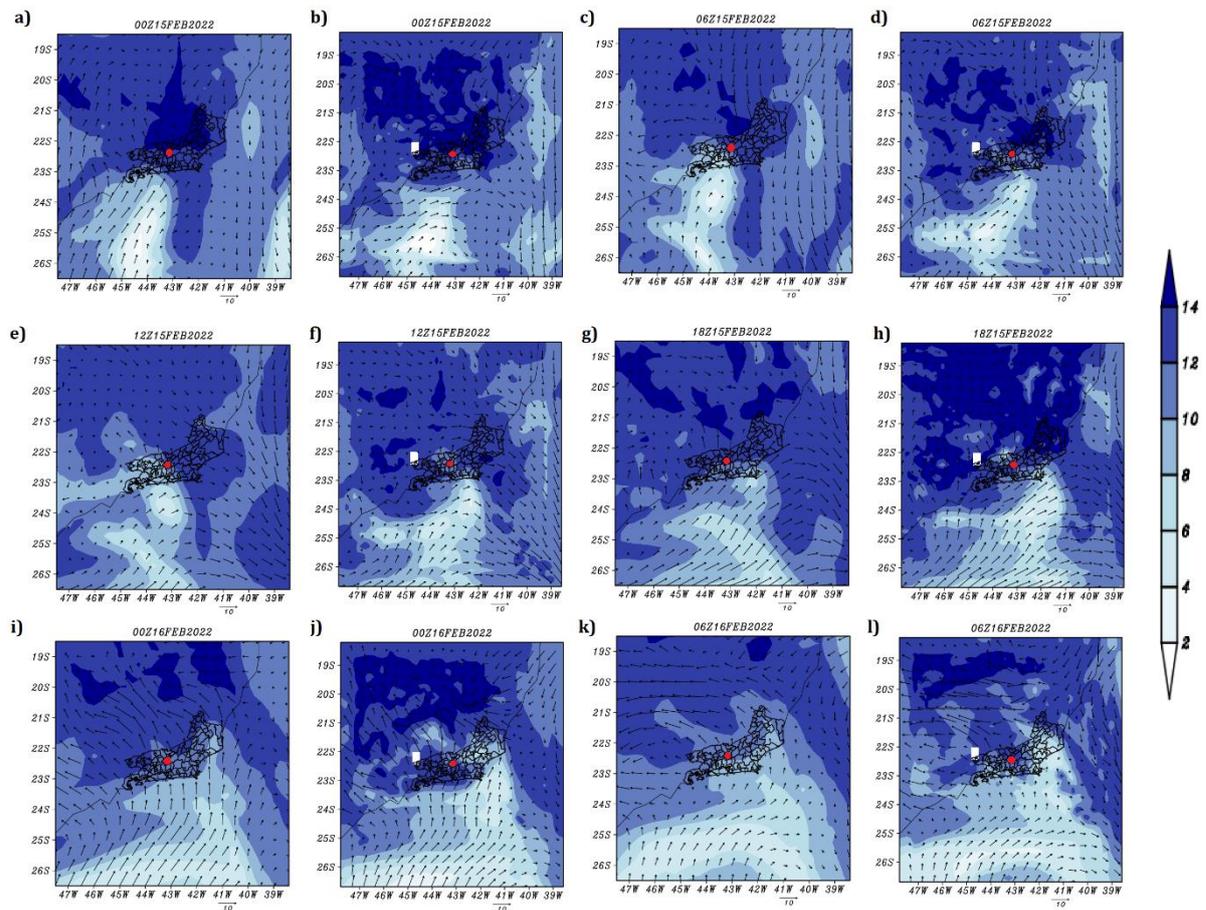


Figura 12. Umidade e vento em 850 hPa. O ponto vermelho representa a localização do município de Petrópolis-RJ e as imagens correspondem ao dia 15/02/2022 a) às 00Z a partir dos dados do ERA5, b) às 00Z a partir dos dados do WRF, c) às 0600 Z a partir dos dados do ERA5, d) às 0600 Z a partir dos dados do WRF e) às 1200 Z a partir dos dados do ERA5, f) às 1200 Z a partir dos dados do WRF, g) às 1800 Z a partir dos dados do ERA5, h) às 1800 Z a partir dos dados do WRF; e dia 16/02/2022 i) às 0000 Z a partir dos dados do ERA5, j) às 0000 Z a partir dos dados do WRF, k) às 0600 Z a partir dos dados do ERA5, l) às 0600 Z a partir dos dados do WRF.

Os maiores valores de divergência dos ventos em 200 hPa são verificados nos resultados obtidos com o modelo WRF em regiões sobre o estado de Minas Gerais (Figura 13 j e 13 l). Também é observada uma grande divergência dos ventos próxima a região da baixa pressão formada sobre o oceano atlântico. Portanto, o desenvolvimento da frente sobre o oceano (Figura 4) contribuiu para o levantamento de ar, corroborando com as Figuras 13 j

e 13 I, que indicam movimentos ascendentes de ar. Contudo, sobre a região de estudo do caso (Petrópolis-RJ), os resultados não indicam divergência dos ventos.

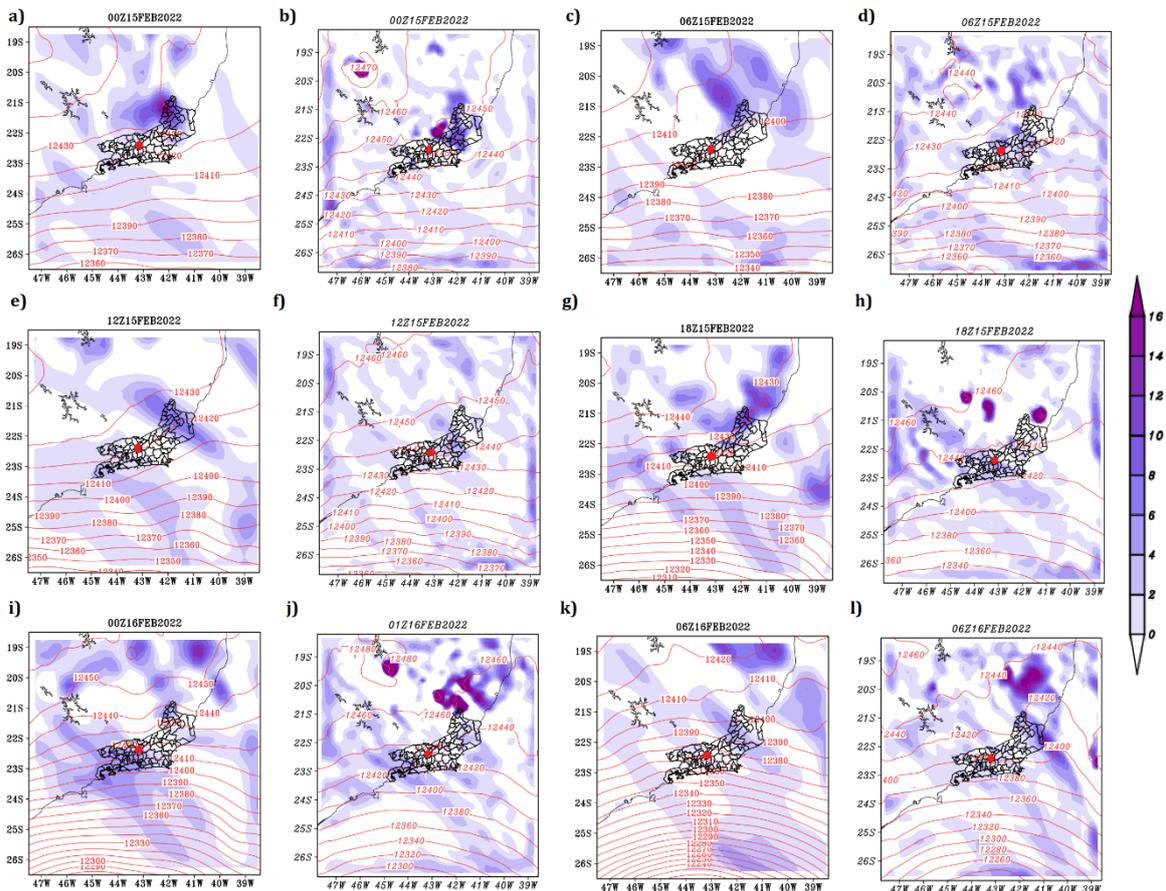


Figura 13. Altura geopotencial e divergência dos ventos em 200 hPa. O ponto vermelho representa a localização do município de Petrópolis-RJ e as imagens correspondem ao dia 15/02/2022 a) às 0000 Z a partir dos dados do ERA5, b) às 0000 Z a partir dos dados do WRF, c) às 0600 Z a partir dos dados do ERA5, d) às 0600 Z a partir dos dados do WRF e) às 1200 Z a partir dos dados do ERA5, f) às 1200 Z a partir dos dados do WRF, g) às 1800 Z a partir dos dados do ERA5, h) às 1800 Z a partir dos dados do WRF; e dia 16/02/2022 i) às 0000 Z a partir dos dados do ERA5, j) às 0000 Z a partir dos dados do WRF, k) às 0600 Z a partir dos dados do ERA5, l) às 0600 Z a partir dos dados do WRF.

Ao avaliarmos a precipitação acumulada pelo modelo no dia do evento, foi possível notar que, em geral, o modelo simulou a ocorrência chuva em todo o município (Figura 14). Maiores valores simulados de precipitação se concentraram ao sul do município, corroborando os resultados obtidos pelas estações meteorológicas. Contudo, apesar do modelo representar bem a localização dos maiores valores acumulado de precipitação, é possível notar que o mesmo subestima os valores de precipitação observados. A subestimativa da chuva pelo modelo WRF também foi observada por Campos, 2022 para a região da Bacia do Paraíba do Sul. Ressalta-se também, de acordo com Souza (2019), que o modelo WRF apresenta erro sistemático na simulação de precipitação dependendo da região, da escala, da estação do ano e da representatividade das observações, sendo que, quanto menor a escala analisada, melhor a representação da distribuição espacial da chuva.

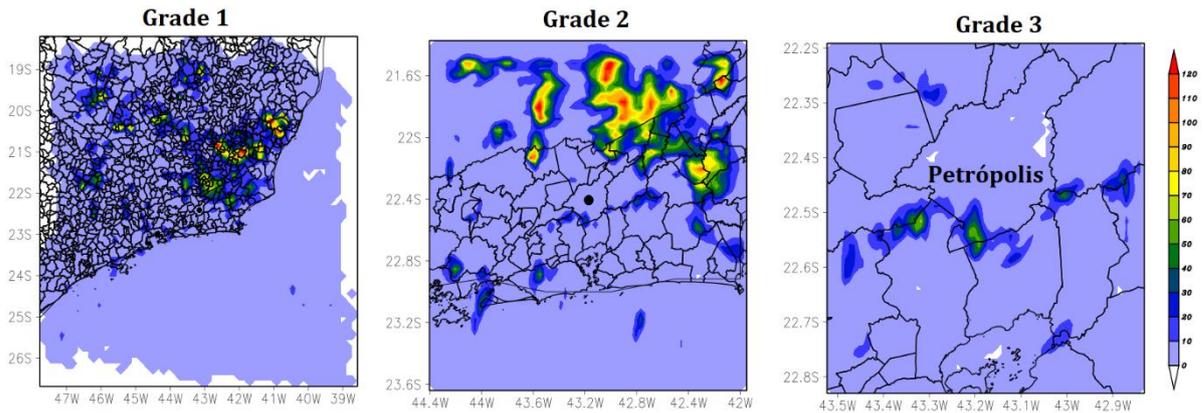


Figura 14. Precipitação (mm) acumulada simulada pelo modelo WRF no dia 15/02/2022, o ponto preto nas figuras a) e b) representa o município de Petrópolis-RJ.

Ao analisarmos os horários em que o modelo simulou a maior quantidade de chuvas em comparação com o horário da chuva observada pelos pluviômetros, foi possível notar que há uma similaridade, uma vez que os maiores valores observados pelos pluviômetros foram entre 16 e 18 horas (Figura 10), e o modelo simulou os maiores valores entre 14 e 18 horas (Figura 15). Vale reforçar que, apesar da similaridade nos horários o modelo não conseguiu simular com exatidão os valores de precipitação, conforme explicado anteriormente.

**Acumulado horário de precipitação simulado pelo modelo no município de Petrópolis-RJ dia 15/02/2022**

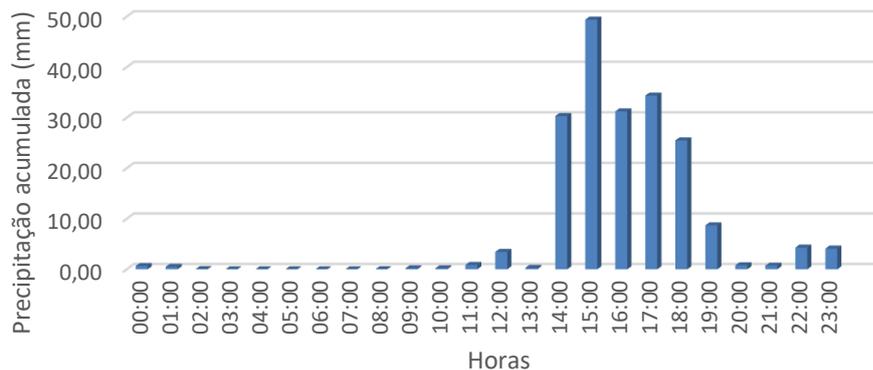


Figura 15. Acumulado horário de precipitação (mm) simulado pelo modelo WRF nos pontos de latitude e longitude das estações utilizada no presente estudo.

Ao comparar os dados observados e os dados simulados a partir da grade 3 nos pontos de latitudes e longitudes próximos a localização das estações a partir das categorias estabelecidas (Tabela 7), foi possível notar, em geral, uma boa representação por parte do modelo. A precipitação simulada pelo modelo na localização mais próxima às 20 estações, foi possível observar que, em seis dessas (Dr. Thouzet- Geo, estrada da cachoeira, estrada Petrópolis / Teresópolis, Itaipava, Itaipava 2 e Vila Constância), o modelo simulou com acurácia no que se refere a categorização. Em outras seis, o modelo não simulou chuva e foi

observada chuva fraca, e em duas estações foi simulada chuva fraca e não houve chuva. Nas estações Bingen e São Sebastião, o modelo simulou chuva forte e foi observado uma chuva muito forte, portanto apesar de não representar exatidão na categoria, representou uma precisão, visto que o intervalo entre a chuva forte e muito forte é pequeno. Apenas para as estações CIEP Brizolão 137 e Rua Amazonas o modelo não simulou chuva, porém foi observada chuva muito forte e nas estações Quitandinha e Rua Araruama, o modelo simulou chuva moderada e foi observada chuva muito forte (Tabela 7). Sendo assim, nessas últimas quatro estações citadas, o modelo não representou a chuva com exatidão e precisão. Portanto, no geral, apesar de alguns erros, o modelo conseguiu simular bem a chuva no que se refere a categorização, visto que das vinte estações, apenas 4 delas obteve categoria com grandes diferenças.

Tabela 7. Categoria da precipitação acumulada no dia 15/02/2022 nas estações meteorológicas do município de Petrópolis e da precipitação simulada pelo modelo.

<b>Estação</b>	<b>Chuva Observada</b>	<b>Chuva Simulada</b>
<b>Araras</b>	Fraca	Sem chuva
<b>Bingen</b>	Muito Forte	Forte
<b>CIEP Brizolão 281</b>	Fraca	Sem chuva
<b>CIEP Brizolão 137</b>	Forte	Sem chuva
<b>Dr. Thouzet – Geo</b>	Muito Forte	Muito forte
<b>Estrada da Cachoeira</b>	Fraca	Fraca
<b>Estrada do Cantagalo</b>	Fraca	Sem chuva
<b>Estrada Petrópolis / Teresópolis</b>	Sem chuva	Sem chuva
<b>Itaipava</b>	Sem chuva	Sem chuva
<b>Itaipava 2</b>	Sem chuva	Sem chuva
<b>Morin</b>	Sem chuva	Fraca
<b>Mosela</b>	Sem chuva	Fraca
<b>Pedro do Rio</b>	Fraca	Sem chuva
<b>Quitandinha – Geo</b>	Muito Forte	Moderada
<b>Rua Amazonas / Quitandinha</b>	Muito Forte	Sem chuva
<b>Rua Araruama / Quitandinha</b>	Muito Forte	Moderada
<b>São Sebastião - Geo</b>	Muito Forte	Forte

Vale do Cuiabá	Fraca	Sem chuva
Vila Constância	Fraca	Fraca
Vila Rica	Fraca	Sem chuva

### 4.3 Avaliação do Potencial Atmosférico

Com os resultados do WRF foi possível analisar o potencial convectivo da região a partir dos índices termodinâmicos. Entre os dias 14 e 15 de fevereiro, em geral, a CAPE apresentou valores acima de 4000 J/Kg, sendo que no dia 14 às 18Z alguns locais no município de Petrópolis o índice chegou a registrar valores acima de 2800 J/Kg (Figura 12 d) que, de acordo com a Tabela 4, indicam o potencial para tempestades na região. Às 00Z do dia 15, Petrópolis registrou um CAPE acima de 1600J/Kg (Figura 12e), indicando, conforme a Tabela 4, alta probabilidade de ocorrência de tempestade. O índice TT registrou valores de até 45 entre às 00Z do dia 14 até às 12Z do dia 16 quando obteve um valor de 48 sendo considerado uma probabilidade de tempestade moderada. Às 18Z do mesmo dia o índice registrou valores de 51 em algumas regiões do município indicando probabilidade de tempestade fortes. Além disso, o índice K no dia 14 registrou probabilidade de tempestades isoladas a muito dispersas (Figuras 16 a) a d)) e Tabela 4. No dia 15 e no dia 16, o índice K indicou probabilidade de tempestades dispersas, conforme Tabela 4.

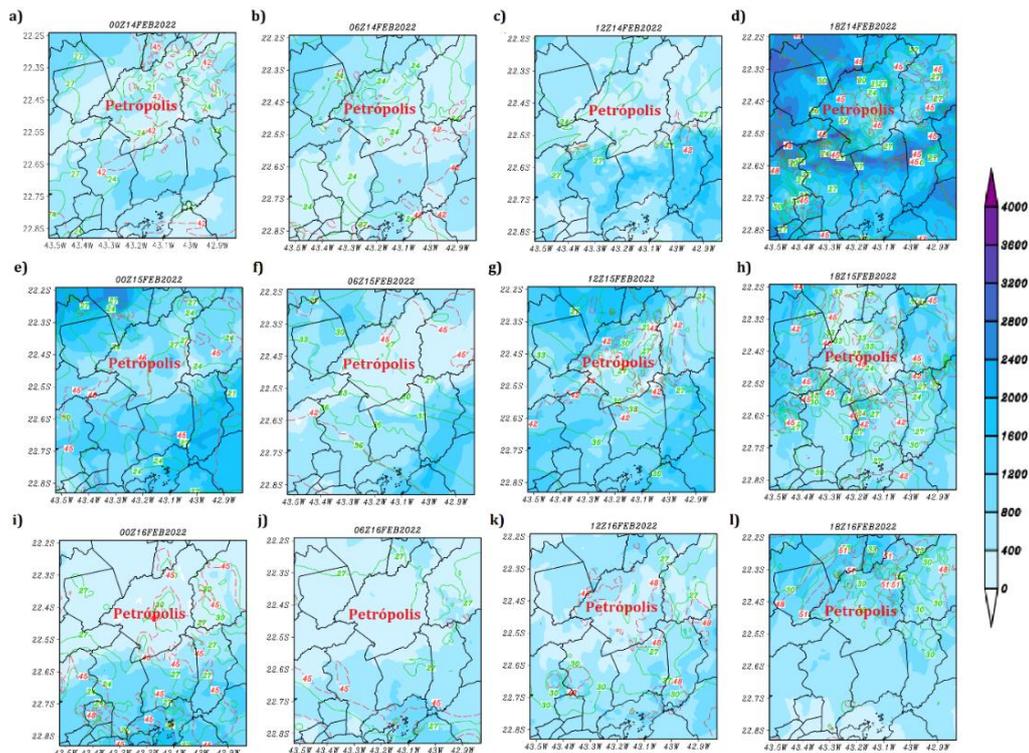


Figura 16. Índice termdinâmico CAPE(J/Kg) em sombreado, índice termodinâmico Total Totals em linhas tracejadas vermelhas e índice termodinâmico K em linhas sólidas verde do modelo WRF do dia

14/02/2022, a) às 00Z, b) às 06Z, c) às 12Z, d) às 18Z, dia 15/02/2022 e) às 00Z, f) às 06Z, g) às 12Z, h) às 18Z e dia 16/02/2022, i) às 00Z, j) às 06Z, k) às 12Z, l) às 18Z

No dia 14/02/2022 os maiores valores de CAPE simulados aconteceram entre 15 e 21Z, chegando a apresentar 2000 a 4000J/Kg, correspondendo a probabilidade de tempestade acentuada, e os maiores valores do índice K e TT foram simulados às 21Z onde apresentaram valores de 30 e 48, correspondendo a tempestade dispersas e moderadas respectivamente conforme os limiares apresentados. No dia 15/02/2022, os maiores valores de CAPE foram 4000 J/Kg simulados entre às 12 e 15Z, e o índice K e TT foram 33 e 45 respectivamente, simulados às 15Z. No dia 16/02/2022, dia após a ocorrência do evento, os índices apresentaram valores sucinto, onde o maior valor simulado de CAPE foi 2000 J/Kg simulados entre às 15 e 18Z, e os maiores valores de K e TT foram 33 e 51 simulados às 21Z. Portanto durante o período estudado pode-se observar através dos índices simulados, valores correspondentes a grande probabilidade de tempestades na região.

Tabela 8. Valores dos índices termodinâmicos CAPE (J/Kg), K(°C) e TT simulados pelo modelo a cada 3 horas, nos dias 14, 15 e 16/02/2022.

		Horas (Zulu)							
		0	3	6	9	12	15	18	21
14/02/2022	CAPE	1200	1200	1200	1200	1600	2000	4000	4000
	K	24	24	24	27	24	27	30	30
	TT	42	45	42	42	42	42	45	48
15/02/2022	CAPE	2000	2000	1600	1600	4000	4000	2000	800
	K	27	27	27	30	30	33	33	30
	TT	45	45	45	42	42	45	45	45
16/02/2022	CAPE	400	800	800	400	800	2000	2000	1200
	K	30	27	27	30	27	30	30	33
	TT	45	45			48	48	51	51

## 5. CONCLUSÃO

O município de Petrópolis apresenta como uma de suas principais características a topografia acidentada e a ocupação desordenada, o que torna a cidade suscetível a deslizamentos de terra como o ocorrido em 15 de fevereiro de 2022, quando 235 pessoas morreram e mais de 950 ficaram desabrigadas. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi analisar através do modelo numérico de previsão de tempo WRF a previsibilidade e os padrões atmosféricos associados a precipitação extrema ocorrida no dia 15 de fevereiro de 2022 no município de Petrópolis-RJ, além de analisar a utilização de indicadores termodinâmicos para a previsão de eventos extremos e comparar os resultados obtidos

através dos dados do modelo WRF com os dados registrados em pluviômetros, com a intenção de analisar o desempenho do modelo.

Sendo assim, através do estudo do modelo WRF foi possível identificar padrões atmosféricos associados a precipitação extrema ocorrida em Petrópolis no dia 15/02/2022. De forma geral, o modelo WRF em comparação com reanálise do ERA 5 e com as cartas sinóticas disponibilizadas pela INPE/CPTEC apresentou grande coerência no posicionamento dos sistemas sinóticos. Além disso, os resultados dos índices termodinâmicos revelam grande potencial para tempestade na região durante o período estudado, visto que esses, apresentam condições favoráveis a extremos de precipitação.

No que se refere a comparação do WRF com os dados observados não foi possível obter um resultado preciso, visto que o modelo simulou no máximo 50,25 mm acumulados no dia do evento para a grade 3 (1km), porém houve estações que chegaram a registrar até 260mm. Sendo assim, é possível concluir que o modelo WRF é satisfatório para simular sistemas de escala sinótica e mesoescala, entretanto o tem dificuldade de representar com exatidão a chuva observada. No que se refere a comparação dos horários observados e simulados o modelo alcançou resultados satisfatórios.

Para trabalhos futuros, recomenda-se e pretende-se testar diferentes parametrizações físicas, buscando uma melhor representação das condições atmosféricas, principalmente no que se refere a quantidade de chuvas da região de estudo.

## 6. REFERÊNCIAS

ARAUJO, L. M. N. D.; VÁSQUES, P. I. L.; FERNANDES, N.F.; FILHO, O. C. R. Variabilidade da precipitação na bacia do rio Piabanha. In **Anais...** III Simpósio de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul, Juiz de Fora, MG, ago. 2018.

ALCANTARA, A. I. Geomorphology, natural hazard, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. **Geomorphology**, v.47, n.2-4, p.107-124, 2002.

ALMEIDA, L. Q. de; PASCOALINO, A. **Gestão de risco, desenvolvimento e (meio) ambiente no Brasil**. Um estudo de caso sobre os desastres naturais em Santa Catarina. 2014. Disponível em: < [https://www.ceped.ufsc.br/wp-content/uploads/2014/07/gestao\\_de\\_risco\\_desenvolvimento\\_e\\_meio\\_ambiente\\_no\\_brasil.pdf](https://www.ceped.ufsc.br/wp-content/uploads/2014/07/gestao_de_risco_desenvolvimento_e_meio_ambiente_no_brasil.pdf) > Acesso em: 17 de maio de 2022.

ALMEIDA, M. V. D.; FRANÇA, G. B. ESTIMATIVA DE PRECIPITAÇÃO VIA RADAR PARA A REGIÃO METROPOLITANA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, Foz do Iguaçu-PR 2002., **Anais.... Rio de Janeiro, 2002, p.2903-2917.** Disponível em: >[https://www.academia.edu/1561624/ESTIMATIVA\\_DE\\_PRECIPITA%C3%87%C3%83O\\_VIA\\_RADAR\\_PARA\\_A\\_REGI%C3%83O\\_METROPOLITANA\\_DA\\_CIDADE\\_DO\\_RIO\\_DE\\_JANEIRO](https://www.academia.edu/1561624/ESTIMATIVA_DE_PRECIPITA%C3%87%C3%83O_VIA_RADAR_PARA_A_REGI%C3%83O_METROPOLITANA_DA_CIDADE_DO_RIO_DE_JANEIRO) > Acesso em: 10 de Fevereiro de 2023

AVILA, M. R. R.; MATTEDI, M. A.; SILVA, M. S. D. Serviço Social e desastres: campo para o conhecimento e a atuação profissional. **Serviço Social & Sociedade**, São Paulo, n. 129, p. 343-365, ago. 2017. FapUNIFESP (SciELO).Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/0101-6628.112>. Disponível em:< <https://www.scielo.br/j/sssoc/a/jdPxJLQ3dMQwZf9NXwym4Cz/?lang=pt> > Acesso em: 16 de maio de 2022.

AYOADE, J. O. **Introdução à Climatologia para os trópicos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Editora Bertrand Brasil S.A, 1996. 332 p. Maria Juraci Jani Dos Santos.

BANCO MUNDIAL. **World Bank national accounts data, and OECD National Accounts data files.2022**. Disponível em:< [https://data.worldbank.org/indicator/NE.GDI.TOTL.KN?locations=BR&most recent year des c=false&view=map&year=2012](https://data.worldbank.org/indicator/NE.GDI.TOTL.KN?locations=BR&most%20recent%20year%20des%20c=false&view=map&year=2012) >. Acesso em: 05 de julho de 2023.

BRASIL, Decreto N. 6.759/09, de 02 de maio de 2022. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC; autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres; altera as Leis nos 12.340, de 1o de dezembro de 2010, 10.257, de 10 de julho de 2001, 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.239, de 4 de outubro de 1991, e 9.394, de 20 de dezembro de 1996; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Poder Legislativo, Brasília, DF, 11 de abril. 2012. Seção 1, p.1. Disponível em < <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?jornal=1&pagina=1&data=11/04/2012>>. Acesso em: 20 de janeiro de 2023.

BLUESTEIN, H. B. Observations and Theory of Weather Systems. Vol. II. **Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes**. Oxford University Press, New York, EUA, 1993. 594 p.

CAMPOS, B. D.; CARVALHO V. S. B.; MATTOS, E. V. Sensibilidade de parametrizações de convecção cúmulus e microfísica de nuvens em eventos extremos de precipitação na bacia do Rio Paraíba do Sul.2022. 89f. Dissertação (Pós graduação em Meio Ambiente e recursos hídricos) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG.2022. Disponível em: < <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/3513>> Acesso em: 06 de Maio de 2023.

CAMPOS, B.; REBOITA, M.; CARVALHO, V. Circulações Locais Induzidas pela Topografia no Vale do Paraíba e na Serra da Mantiqueira: um estudo de caso para o período entre os dias 16 e 22 de agosto de 2010. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 3, p. 753-765, 2016.

CARMO, R. L.; ANAZAWA, T. M. Mortalidade por desastres no Brasil: o que mostram os dados. **Revista Brasileira de Ciência e Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v.19, n. 9, p.3669-3681, 2014.Doi: <https://doi.org/10.1590/1413-81232014199.07432014>. Disponível em: < <https://www.scielo.br/j/csc/a/rkDmbW6G7GtNdrS9jvD8x9C/abstract/?lang=pt>> Acesso em: 10 de Abril de 2023.

CARVALHO, D. W. D.; DAMACENA, F. D. L. A intensificação dos desastres naturais, as mudanças climáticas e o papel do Direito Ambiental. **Revista de Informação legislativa**, Brasília, 2012. v. 49, p. 83-97, 2012. Disponível em: < [https://www.researchgate.net/profile/Fernanda-Damacena/publication/341878207\\_A\\_intensificacao\\_dos\\_desastres\\_naturais\\_as\\_mudancas\\_climaticas\\_e\\_o\\_papel\\_do\\_Direito\\_Ambiental/links/5ed7a7a592851c9c5e74e322/A-intensificacao-dos-desastres-naturais-as-mudancas-climaticas-e-o-papel-do-Direito-Ambiental.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Fernanda-Damacena/publication/341878207_A_intensificacao_dos_desastres_naturais_as_mudancas_climaticas_e_o_papel_do_Direito_Ambiental/links/5ed7a7a592851c9c5e74e322/A-intensificacao-dos-desastres-naturais-as-mudancas-climaticas-e-o-papel-do-Direito-Ambiental.pdf) > Acesso em: 08 de Maio de 2022.

CARVALHO, L. M. V; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic convergence zone: Intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **Journal of Climate**, v. 17, p. 88–108, 2004. Disponível em: < <https://repositorio.usp.br/item/001436237> > Acesso em 22 de fevereiro de 2023.

CEMADEM – Centro Nacional de Monitoramento e alertas de desastres naturais. **Mapa interativo da rede observacional para monitoramento de risco de desastres naturais do cemaden**. Disponível em: < [Acesso em: 05 de Abril de 2022.](#)

CEMTEC – Centro de monitoramento do tempo e do clima de Mato Grosso do Sul. **Escala modificada de Beaufort- intensidade do vento**. Disponível em: < <http://www.cemtec.ms.gov.br/wp-content/uploads/2019/02/ESCALA-MODIFICADA-DE-BEAUFORT-INTENSIDADE-DO-VENTO-2.pdf> > Acesso em: 22 de maio de 2023.

CHLEBOARD, A. F. **Preliminary method for anticipating the occurrence of precipitation-induced landslides in Seattle, Washington**. EUA . U.S. Department of the Interior , U.S. Geological Survey p.469. 2000. Doi: <https://doi.org/10.3133/ofr00469>. Disponível em: < <http://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr00469> > Acesso em: 20 de maio 2022.

CNN, Espanhol. Os desastres naturais que impactaram o mundo recentemente, CNN Brasil, 18 de julh de 2021. Disponível em:< <https://www.cnnbrasil.com.br/tecnologia/os-desastres-naturais-que-impactaram-o-mundo-recentemente/> > Acesso em 15 de abril de 2023.

CPTEC/INPE – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. **Produtos cartas sinóticas**. Disponível em: < <http://img0.cptec.inpe.br/~rgptimg/Produtos-Pagina/Carta-Sinotica/Analise/Superficie/?C=M;O=A> > Acesso em 03 de Abril de 2022.

CORREIA, F. R. S. **Zonas de Convergência Subtropical na América do Sul: Características da circulação e fluxos de umidade**. 2013. Monografia (Bacharel em Meteorologia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro,RJ, 2013.

COSTA, M. S. Vórtice Ciclônico Em Altos Níveis Associado À Corrente De Jato No Nordeste Brasileiro Nos Anos De 1998-2007. 2010. 113 F. **Dissertação (Mestrado Em Meteorologia)** – Universidade Federal De Alagoas, Maceió - Al. 2010.

DA SILVA, T. M.; CAMELLO, T. C. F.; DE ALMEIDA, J. R. Impactos ambientais hidrológicos ocasionados pelo desflorestamento metropolitano: Petrópolis, RJ. **Revista Sustinere**, v. 3, n. 1, p. 53-64, jul. 2015. ISSN 2359-0424. doi:<https://doi.org/10.12957/sustinere.2015.17327>. Disponível em: < <https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/sustinere/article/view/17327> >. Acesso em: 03 jun. 2022.

DE SOUSA, F D. A. S.; VIEIRA, V. R. D. SILVA, V. DE P. R; MELO, V. D. S. ;GUEDES, W. D. S. G. Estimativas dos riscos de chuvas extremas nas capitais do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 02, p. 430-439, 2016.

DERECZYNSKI, C. SILVA, W. L.; MARENGO, J. A. Detection and projections of climate change. In:Rio de Janeiro, Brazil. (2013), v.2. 9p.

DIÁRIO DO NORDESTE, **Chuvas em Petrópolis volta a deixar mortos e desaparecidos**. 21 de Março de 2022 Disponível em: < <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/ultima-hora/pais/chuva-em-petropolis-volta-a-deixar-mortos-e-desaparecidos-1.3206810> > Acesso em: 10 de maio de 2022.

DIAS, V. S. **Análise dos índices de instabilidade para previsão de formações convectivas severas para a região do aeródromo do Galeão, Aeroporto Tom Jobim**. 2008. 47 f. Monografia (Especialização em Meteorologia Aeronáutica do ICEA). Instituto de controle do espaço aéreo, São José dos Campos, SP, 2008.

DIAZ, L. R. Avaliação do uso do modelo WRF (Weather Research and forecasting) na geração de perfis verticais visando à correção atmosférica no infravermelho termal. 2018. 112 f. Monografia (graduação em engenharia ambiental), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018. Disponível em:< <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/194918> > Acesso em: 04 de Julho de 2023.

DOS SANTOS, S. R. Q.; CUNHA, A. P. M.D. A.; RIBEIRO-NETO, G. G. Avaliação de dados de precipitação para o monitoramento do padrão espaço-temporal da seca no nordeste do Brasil. **Revista brasileira de climatologia**, (2019). Doi: < <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v25i0.62018> >

DUDHIA, J. 1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 46, p. 3077–3107.

ESTADO DE MINAS, **Chega a 104 o número de mortos na tragédia em Petrópolis**. 17 de Fevereiro de 2022. Disponível em: < [https://www.em.com.br/app/noticia/nacional/2022/02/17/interna\\_nacional.1345570/cheega-a-104-o-numero-de-mortos-na-tragedia-em-petropolis.shtml](https://www.em.com.br/app/noticia/nacional/2022/02/17/interna_nacional.1345570/cheega-a-104-o-numero-de-mortos-na-tragedia-em-petropolis.shtml) > Acesso em: 18 de maio de 2022.

EXAME, Em 2011, **chuvas na região serrana do Rio deixaram 918 mortos**. Brasil, 16 de fevereiro de 2022. Disponível em: < <https://exame.com/brasil/em-2011-chuvas-na-regiao-serrana-do-rio-deixaram-918-mortos/> > Acesso em 15 de maio de 2022.

FREITAS, A. A. D.; ODA, P. S. S.; TEIXEIRA, D. L. S.; SILVA, P. do N.; MATTOS, E. V.; BASTOS, I. R. P.; NERY, T. D.; METODIEV, D.; SANTOS, A. P. P. dos; GONÇALVES, W. A. **Meteorological conditions and social impacts associated with natural disaster landslides in the Baixada Santista region**, Março de 2020. *Urban Climate*, v. 42, p. 101110, março. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101110>. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2212095522000281> > Acesso em: 31 de maio. 2022

FREITAS, C. M. D.; CARVALHO, M. L. D.; XIMENES, E. F.; ARRAES, E. F.; GOMES, J. O. Vulnerabilidade socioambiental, redução de riscos de desastres e construção da resiliência: lições do terremoto no haiti e das chuvas fortes na região serrana, Brasil. **Ciência & Saúde Coletiva**, [S.L.], v. 17, n. 6, p. 1577-1586, jun. 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-81232012000600021>. Disponível em: < <https://www.scielo.br/j/csc/a/3YPnvszHvbSWHmJWLbPDWMM/?lang=pt> > Acesso em: 15 de Agosto de 2022.

FU, G.; YU, J.; YU, X.; OUYANG, R.; ZHANG, Y.; WANG, P.; LIU, W. MIN, L. Temporal variation of extreme rainfall events in China, 1961-2009. **Journal of Hydrology**, Vol 487, p. 48-59. 2013. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.02.021> Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169413001339> > Acesso em: 25 de Maio de 2022.

G1, **Tragédia em Petrópolis chega a 233 mortos; há quatro desaparecidos**. 03 de Março de 2022. Disponível em: < <https://g1.globo.com/rj/regiao-serrana/noticia/2022/03/04/tragedia-em-petropolis-chega-a-233-mortos-ha-quatro-desaparecidos.ghtml> > Acesso em: 10 de Agosto de 2022.

G1, **Em 2022, mesmo depois da maior tragédia climática da história, Petrópolis gastou apenas 15% do valor autorizado em habitação**. 14 de Fevereiro de 2023. Disponível em: < <https://g1.globo.com/rj/rio-de-janeiro/noticia/2023/02/14/em-2022-mesmo-depois-da-maior-tragedia-climatica-da-historia-petropolis-gastou-apenas-15percent-do-valor-autorizado-em-habitacao.ghtml> > Acesso em 02 de Maio de 2023.

G1, **Tragédia climática que deixou 235 mortos em Petrópolis completa 1 ano**. 15 de Fevereiro de 2023. Disponível em: < <https://g1.globo.com/rj/regiao-serrana/noticia/2023/02/15/tragedia-climatica-que-deixou-235-mortos-em-petropolis-completa-1-ano.ghtml> > Acesso em 05 de Maio de 2023.

GEORGE, J. J. **Weather Forecasting for Aeronautics**, Academic Press, 1960. 673 p.

GONÇALVES, L. F. H.; GUERRA, A. J. T. Movimentos de massa na cidade de Petrópolis (Rio de Janeiro). **Impactos ambientais urbanos no Brasil. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil**. 2001, p.189-252. Disponível em: < [https://dgp.museunacional.ufrj.br/geoquater/monografias/Luiz\\_Lima\\_2006\\_Susceptibilidade\\_a\\_Ocorrencia\\_de\\_Deslizamentos\\_associada\\_ao\\_Uso\\_das\\_Encostas\\_na\\_Comunidade\\_Vila\\_Uniao\\_Monografia\\_Geoquater\\_MN\\_UFRJ.pdf](https://dgp.museunacional.ufrj.br/geoquater/monografias/Luiz_Lima_2006_Susceptibilidade_a_Ocorrencia_de_Deslizamentos_associada_ao_Uso_das_Encostas_na_Comunidade_Vila_Uniao_Monografia_Geoquater_MN_UFRJ.pdf) > Acesso em: 25 de Julho de 2022.

Grell, G. A.; Freitas, S. R. 2014. **A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling**, Atmospheric Chemistry and Physics, 14, p. 5233–5250, 2014. DOI:10.5194/acp-14-5233

GUERRA, A. J. T.; GONÇALVES, L. F. H.; LOPES, P. B. M. Evolução histórico-geográfica da ocupação desordenada e movimentos de massa no município de Petrópolis, nas últimas décadas. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 8, n. 1, 2007. < Disponível em: < <https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/84> > Acesso em 24 de julho de 2022.

HENRY, W. **The Skew-T, Log P Diagram**. National Weather Service Training Center, EUA, 68 pp.1987.

HERSBACH, H. BELL, B. BERRISFORD, P. BIAVATI, G. HORÁNYI, A. MUÑOZ SABATER, J. NICOLAS, J. PEUBEY, C. RADU, R. ROZUM, I. SCHEPERS, D. SIMMONS, A. SOCI, C. DEE, D. THÉPAUT, JN. (2018). **Dados horários ERA5 em níveis únicos de 1959 até o presente**. Serviço Copernicus para as Alterações Climáticas (C3S) Armazenamento de Dados Climáticos (CDS). DOI:10.24381/cds.adbb2d47. Disponível em: < <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=form> > Acessado em: 15 de janeiro de 2023.

HONG, S. Y.; DUDHIA, J.; CHEN, S. H. 2004. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterizaion of clouds and precipitation. **Monthly Weather Review**, v.132,n. 1, p. 103–120, 2004.

HONG, S. Y.; NOH, Y.; DUDHIA, J. 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. **Monthly Weather Review**, v. 134, p. 2318–2341.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **População no último censo [2022]**. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/petropolis/panorama> >

JACOBSON, M. Z. **Fundamentals of Atmospheric Modeling**. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

JACOBI, P. R.; SULAIMAN, S. N. Governança ambiental urbana em face das mudanças climáticas. **Revista USP**, n. 109, p. 133-142, 2016. Disponível em: < <https://www.revistas.usp.br/revusp/article/view/123149> >. Acesso em: 02 jun. 2022.

JANJIC, Z. I. 2002: **Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso model**. NCEP Office Note No. 437, 61 pp.  
KÖPPEN, W.; GEIGER, R. *Klimate der Erde*. Gotha: Verlag Justus Perthes. Wall-map 150cmx200cm, 1928.

KOUSKY, V. E. Pentad outgoing longwave radiation climatology for the South American sector. **Revista Brasileira de Meteorologia**, n. 3, p. 217-231, 1988.

KOBIAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D. A.; MARCELINO, I. P. V. DE. O.; MARCELINO, E. V.; GONÇALVES, E. F.; BRAZETTI, L. L. P.; GOERL, R. F.; MOLLERI, G. S. F.; RUDORFF, F. DE M. **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos**. 1ª ed. Curitiba-PR. Organic Trading, 2006. 124p.

LAURIANO, C.; FREIRE, A.; LETA, T. Chuva espalha destruição na Região Serrana do Rio de Janeiro. **O Globo**, Rio de Janeiro, 12 de janeiro de 2011. Disponível em: < <https://g1.globo.com/rio-de-janeiro/noticia/2011/01/chuva-espalha-destruicao-na-regiao-serrana-do-rio-de-janeiro.html> > Acesso em: 30 de maio de 2022.

LESNAU, A. Veja os principais desastres causados pelas chuvas em 2022 no Brasil, **Metrópoles**, 04 de junho de 2022. Disponível em:< <https://www.metropoles.com/brasil/veja-os-principais-desastres-causados-por-chuvas-em-2022-no-brasil>> Acesso em: 15 de abril de 2023.

LOBATO, R. R. DA C. **Avaliação do índice termodinâmico Gálvez-Davison na previsibilidade pluviométrica na cidade de Belém-PA**. 2019. 60 f. Monografia (Bacharel em Meteorologia) – Universidade Federal do Pará, Belém, PA, 2019. Disponível em: < <https://www.bdm.ufpa.br:8443/handle/prefix/3096> > Acesso em: < 25 de Março de 2023.

MARCELINO, E. V.; NUNES, L. H.; KOBIYAMA, M. BANCO DE DADOS DE DESASTRES NATURAIS: ANÁLISE DE DADOS GLOBAIS E REGIONAIS / Natural disaster databases: global and regional analysis. **Caminhos de Geografia**, v. 7, n. 19, 2006. Disponível em: < <https://seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/15495> >. Acesso em: 08 Ago. 2022.

MARENCO, J. A.; TOMASELLA, J.; ALVES, L. M; SOARES, W. R.; RODRIGUES, D. A. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. 2011. **Geophysical Research Letters** v.38. Ed.12. Doi: 10.1029/2011GL047436. Disponível em: < <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2011GL047436> > Acesso em:14 de maio de 2022.

MARENCO, J. A.; SCARANO, F. R.; KLEIN, A. F.; SOUZA, C. R. G.; CHOU, S. C. Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas. **Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC)**, p. 184, 2016.

MARINHA DO BRASIL - Centro de Hidrologia da Marinha - **Escala Beaufort**. [2020]. Disponível em: < <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-smm-referencias/referencia> > Acesso em: 15 de maio de 2022.

MEDINA, J. F. Avaliação das parametrizações físicas do modelo WRF para a camada limite atmosférica para a região metropolitana da Grande Vitória. 2017. 150 f. **Dissertação** (mestrado em engenharia ambiental). Universidade do Espírito Santo, Vitória, 2017. Disponível em: < <https://repositorio.ufes.br/handle/10/9447> >. Acesso em: 22 de Maio de 2023.

MLAWER, E. J.; TAUBMAN, S. J.; BROWN, P. D.; IACONO, M. J.; Clough, S.A. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. **Journal of Geophysical Research**, p. 16663–16682.

MOLINA, E. A. N.; CARDOSO, A. O.; NOGUEIRA, F R. Relação Precipitação-Deslizamento no Município de São Bernardo do Campo - SP **Revista Ciência e Natura**, vol. 37, n. 1, 2015, p. 46-54 Universidade Federal de Santa Maria Santa Maria, Brasil. Disponível em: <<https://www.redalyc.org/pdf/4675/467547641009.pdf>> Acesso em: 02 jun. 2022.

MOTA, M. A. S.; NOBRE, C. A. Relação da variabilidade da energia potencial convectiva disponível (CAPE) com a precipitação e a alta da Bolívia durante a campanha Wet-AMC/LBA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3b, p. 344-355, 2006.  
NASCIMENTO, E. L. Previsão de tempestades severas utilizando e parâmetros convectivos e modelos de mesoescala: uma estratégia operacional adotável no Brasil? **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, p. 121-140, 2005.

NASCIMENTO, J. A. P. **Classificação climatológica relacionando a variabilidade de índices de instabilidade da energia potencial convectiva disponível (CAPE), índice K (K) e precipitação na região de Santarém - Pa.** 2017. 63 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Naturais da Amazônia) - Programa de Pós-graduação em Recursos Naturais da Amazônia, Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém, 2017. Disponível em:< <https://repositorio.ufopa.edu.br/jspui/handle/123456789/290> >. Acesso em 24 de abril de 2023.

NOBRE, C. A.; MARENGO, J. A. **Mudanças climáticas em rede: um olhar interdisciplinar.** 1ª ed. Bauru-SP, 2017. 612 p.

NUNES, L. H.; KOGA-VICENTE, A.; CANDIDO, D. H. **Clima da região sudeste do Brasil.** In: CAVALCANTI, N. J. et al. (Org.). Tempo e clima no Brasil. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

NUNES, L. H. **Urbanização e desastres naturais**, abrangência América do Sul. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 28 p. Ed 1. Disponível em: < <http://ofitexto.arquivos.s3.amazonaws.com/Urbanizacao-e-desastres-naturais-DEG.pdf>> Acesso em: 12 de maio de 2022.

OTTERO, C. R. CHARGEL, L. T. HORA, M. DE A. G. M. Análise de frequência dos dados pluviométricos observados em 2011 e 2013 na região serrana, Estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**. 2018, 33. p.131-139. Doi: <https://doi.org/10.1590/0102-7786331007>. Disponível em:< <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/LjvGBPxGBBkhtH6WGHvFiCc/?lang=pt> > Acesso em: 17 de maio de 2022.

PETRÓPOLIS. Decreto nº 088 de 02 de maio de 2022. Dispões sobre crédito extraordinário e alteração do quadro de detalhamento de despesa - QDD. **Diário Oficial**, Poder executivo

municipal, Petrópolis , Rio de Janeiro, 02 de maio de 2022. Disponível em:< <https://www.petropolis.rj.gov.br/pmp/index.php/servicos-na-web/informacoes/diario-oficial/viewcategory/280-maio.html> > Acesso em: 20 de janeiro de 2023.

Poder360, **Petrópolis deve ter prejuízo de R\$ 665 milhões com chuvas**, 21 de fevereiro de 2022. Disponível em:< <https://www.poder360.com.br/brasil/petropolis-deve-ter-prejuizo-de-r-665-milhoes-com-chuvas/>> Acesso em 10 de Agosto de 2022.

PIELKE, R. A. S. R., 2002. Mesoscale meteorological modelling. Ed 2ª. **International Geophysics Series**. Academic Press 78, p. 676.

REBOITA, M. S. **Ciclones Extratropicais sobre o Atlântico Sul: Simulação Climática e Experimentos de Sensibilidade** Tese de Doutorado em Meteorologia, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas IAGUSP, p. 359, 2008.

REBOITA, M. S., IWABE, C. M. N., ROCHA, R. P. D., & AMBRIZZI, T.(2009). Análise de um ciclone semi-estacionário na costa sul do Brasil associado a bloqueio atmosférico. **Revista Brasileira De Meteorologia.**, p. 407 - 422. 2009

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, p. 185-204, 2010.

REBOITA, M. S.; CAMPOS, B.; SANTOS, T.; A.; CARVALHO, V. S. B. Análise sinótica e numérica de um VCAN no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, p. 41-59, 2017.

REBOITA, M. S.; MARIETO, D. M. G.; SOUZA, A.; BARBOSA, M. Caracterização atmosférica quando da ocorrência de eventos extremos de chuva na região sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 21, 2017. Disponível em: < <https://200.129.209.78/index.php/rbclima/article/view/13986>> Acesso em: 20 de agosto de 2022.

REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T.; SILVA, B. A.; PINHEIRO, R. F.; ROCHA, R. P. The South Atlantic subtropical anticyclone: Present and future climate. **Frontiers in Earth Sciences**, v. 7, n. 8, p. 1-15, 2019.

REDEMETS – Rede de meteorologia do comando da aeronáutica. **REDEMETS-Radares**. Disponível em:< <https://www.redemet.aer.mil.br/> > Acesso em 02 de Maio de 2022.

SANTOS, J. S. D.; MOTA, M. A. S. D.; ROCHA, E. J. P. D. Classificação climatológica da energia potencial disponível para a convecção na cidade de Belém-PA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [S.L.], v. 29, n. , p. 60-72, dez. 2014. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778620130040>.

SÁ, H. D. L.; IBRAHIM, Y. S. Desastres e oficinas para preparo dos profissionais da saúde em Petrópolis - Rio Janeiro. **Rev. C&Trópico**, v. 45, n. 2, p. 187-208, 2021 em: < <https://fundaj.emnuvens.com.br/CIC/article/view/2035/1648>> Acesso em: 08 Agosto de 2022.

SELUCHI, M. E.; CALBETE, N. O.; ROZANTE J. R. Análisis de Un Desarrollo Ciclónico en la Costa Oriental de América Del Sur. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 16, n. 1, p. 51-65, 2001.

SELUCHI, M. E.; CHOU, S. C. Synoptic patterns associated with landslide events in the Serra do Mar, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, 98, p. 67-77, 2009. Doi:< <https://doi.org/10.1007/s00704-008-0101-x>>

SILVA, J. P. R.; REBOITA, M S.; ESCOBAR, G. C J. Caracterização da Zona de Convergência do Atlântico Sul em campos atmosféricos recentes. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, 2019.

SILVA, S. V. C. D.. **Análise Bayesiana da precipitação máxima de Petrópolis-RJ**. 2021. 44f Dissertação (Pós graduação em estatística aplicada e biometria) – Universidade federal de Alfenas, Alfenas, MG, 2021. Disponível em: < <http://bdtd.unifal-mg.edu.br:8080/bitstream/tede/1926/5/Disserta%c3%a7%c3%a3o%20de%20Sandra%20Val%c3%a9ria%20Coelho%20da%20Silva.pdf>> Acesso em: 20 de Agosto de 2022.

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. NCAR Technical Note 475 2008. Disponível em: < [http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw\\_v3.pdf](http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf) > Acesso em: 15 de Janeiro, 2023.

SOUSA, J. M. de; CANDIDO, L.; SILVA, J. T. D.; ANDREOLI, R. V; KAYANO, M. T.; MANZI, A. O.; SOUZA, R. A. F. d.; SOUZA, E. B. de; VIEIRA, S. d. O. Avaliação da Habilidade do Modelo WRF em Representar a Precipitação na Amazônia Usando Diferentes Escalas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [S.L.], v. 34, n. 2, p. 255-273, jun. 2019. FapUNIFESP. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863340029>.

SONG, X.; SONG, S.; SUN, W.; MU, X.; WANG, S.; LI, J.; LI, Y. Recent changes in extreme precipitation and drought over the Songhua River Basin, China, during 1960-2013. **Journal Atmospheric Research**. 2015. p.137-152. V.157. ISSN: 0169-8095. Doi: 10.1016/j.atmosres.2015.01.022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809515000393>> Acesso em: 12 de maio de 2022.

SUGAHARA, S. Variação anual da frequência de ciclones no Atlântico Sul. In: **XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, II Encontro Brasileiro de Integração Oceano-Atmosfera**, Rio de Janeiro.2000. p. 2607-2611.

S2iD, -Sistema Integrado de informações sobre desastres. Atlas brasileiro de desastres naturais,2013. Disponível em:<<https://s2id.mi.gov.br/paginas/atlas/>> Acesso em: 20 de novembro de 2022.

TATIZANA, C., OGURA, A.T., CERRI, L.E. DA S., ROCHA, M.C.M. 1987a.b Análise da correlação entre chuvas e escorregamentos aplicados às encostas da Serra do Mar, Cubatão. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 5, 1987, São Paulo. **Anais...**, São Paulo: ABGE. v.2, p.225-236. Disponível em: < <http://www.sinageo.org.br/2012/trabalhos/1/1-549-657.html> > Acesso em 10 de Novembro de 2022.

TAVARES, C. D. M. G.; FERREIRA, C. DE C. M. A relação entre a orografia e os eventos extremos de precipitação para o município de Petropolis-RJ. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 26, 2020. Disponível em: < <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/71123> >. Acesso em: 02 de Janeiro de 2023.

TORRES, R. R.; MARENGO, J. A.; VALVERDE, M. C. Projeções de Extremos Climáticos nas Regiões Metropolitanas de São Paulo e Rio de Janeiro para o Final do Século XXI. **III Simpósio Internacional de Climatologia. Canela, Brasil**, 2009. Disponível em: < [http://mtc-m16d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2009/11.03.12.34/doc/paper\\_simposio\\_roger.pdf](http://mtc-m16d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2009/11.03.12.34/doc/paper_simposio_roger.pdf) > Acesso em: 18 de agosto de 2022.

UN - Nações Unidas Brasil. Desastre naturais foram responsáveis por 45% de todas as mortes nos últimos 50 anos, mostra OMM, [2021]. Disponível em: < <https://brasil.un.org/pt-br/142679-desastres-naturais-foram-respons%C3%A1veis-por-45-de-todas-mortes-nos-%C3%BAltimos-50-anos-mostra-omm#:~:text=Intitulado%20%22Atlas%20de%20Mortalidade%20e,de%20todas%20as%20perdas%20econ%C3%B4micas.> > Acesso em: 25 de junho de 2022.

UVO, C. R. B.; NOBRE, C. A. Zona de convergência intertropical (ZCIT) e a precipitação no Norte do Nordeste do Brasil. Boletim de Monitoramento e Análise Climática, v.4, p. 34-40, 1989.

VAGHETTI, N. N. DINIZ, G. B. DA SILVA, J B. CLIMATOLOGIA DA UMIDADE RELATIVA MÉDIA MENSAL EM REGIÕES HOMOGÊNEAS DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. **Revista Multidisciplinar**. Vol. 2 n. 9 Pelotas 2019. Disponível em: < <https://revista.scientificsociety.net/wp-content/uploads/2019/10/Art000036.pdf> > Acesso em: 27 de Agosto de 2022.

VALENCIO, N. Desastres: Tecnicismo e sofrimento social. *Ciência & Saúde*. Coletiva: 19(9). 2014. Doi:10.1590/1413-81232014199.06792014. Disponível em: < <https://www.scielo.br/j/csc/a/mgDC4L9wdshN9rJ3GLV3PVv/?lang=pt> > Acesso em: 15 de maio de 2022.

WDR - World Disasters Report 2020: (2020 ed.). International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies.

WIECZORESK, G. F. 1987, **Effect of rainfall and duration on debris flows in central Santa Cruz Mountains, California**. in, Costa J.E., and Wieczorek, G.F., eds. Debris

flows/avalanches: Processes, recognition, and mitigation: Geological Society of America Reviews in Engineering Geology, Volume VII, p. 93-104. Disponível em: <  
[https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=iK71FB-MeJQC&oi=fnd&pg=PA93&dq=Wieczorek,+Gerald,+F.,+1987,+Effect+of+rainfall+and+durati+on+on+debris+flows+in+central+Santa+Cruz+Mountains,+California:+in,+Costa+J.E.,+and+Wieczorek,+G.F.,+eds.+Debris+flows/avalanches:+Processes,+recognition,+and+mitigation:+Geological+Society+of+Ameri&ots=NJJju8f09F&sig=tHKvJuZAHlhaC-eH6\\_Al2y57Jzs#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=iK71FB-MeJQC&oi=fnd&pg=PA93&dq=Wieczorek,+Gerald,+F.,+1987,+Effect+of+rainfall+and+durati+on+on+debris+flows+in+central+Santa+Cruz+Mountains,+California:+in,+Costa+J.E.,+and+Wieczorek,+G.F.,+eds.+Debris+flows/avalanches:+Processes,+recognition,+and+mitigation:+Geological+Society+of+Ameri&ots=NJJju8f09F&sig=tHKvJuZAHlhaC-eH6_Al2y57Jzs#v=onepage&q&f=false)> Acesso em; 15 Agosto de 2022.

WILLMOTT, C. J., 1981. **On the validation models.** Physical Geography 2, 184-194.

WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric science.** San Diego, CA: Academic Press, 1995. 467 p.50, 113

YANG, Z. L., G.-Y. NIU, K. E. MITCHELL, F. CHEN, M. B. Ek, M. BARLAGE, L. LONGUEVERGNE, K. MANNING, D. NIYOGI, M. TEWARI, AND y. XIA, 2011: The community Noah land surface model with multiparametrization options (NOAH-mp): 2. Evaluation over global river basins. J. Geophys. Res., 116, D12110.

## ANEXOS

Escala modificada de Beaufort.

<b>Nº da escala</b>	<b>Nomeclatura</b>	<b>Velocidade do vento (km/h)</b>	<b>Caracterização</b>
0	Vento calmo ou calmaria	Menos de 1,8	Nada se move. A fumaça sobe verticalmente
1	Bafagem, aragem leve, vento quase calmo	1,8 a 6,0	O sentido do vento é indicado pela fumaça, mas não pelo catavento
2	Brisa leve ou aragem	7,0 a 11,0	Sente-se o vento na face. As folhas das árvores são agitadas levemente. Os cataventos são acionados.
3	Vento fresco ou leve	12,0 a 19,0	As bandeiras leves desfraldam. As folhas das árvores e os arbustos movimentam-se continuamente.
4	Vento moderado	20,0 a 30,0	Levanta poeira e papéis. Movimenta pequenos galhos de árvores.
5	Vento regular	31,0 a 40,0	Cristas nos rios e lagos. Faz oscilar os arbustos.
6	Vento muito fresco ou meio forte.	41,0 a 51,0	Faz zunir os fios telegráficos. Movimenta os galhos maiores das árvores. Dificulta o uso de guarda chuvas
7	Vento forte	52,0 a 61,0	Movimenta o tronco das árvores. Dificulta caminhar contra o vento
8	Vento muito forte ou ventania	62,0 a 74,0	Quebra galhos de árvores., impossibilita andar contra o vento.
9	Vento duro ou ventania fortíssima.	75,0 a 87,0	Produz pequenos danos nas habitações. Arranca telhas e derruba chaminés de barros.
10	Vento muito duro, vendaval ou tempestade.	88,0 a 102,0	Derruba árvores. Produz danos consideráveis em habitações mal construídas. Destelha muitas edificações.
11	Vento tempestuoso, vendaval muito forte, ciclone extratropical	103,0 a 119,0	Arranca árvores. Provoca grande destruição. Derruba a fiação.
12	Furacão, tufão ou ciclone tropical.	Acima de 120,0	Efeitos devastadores. Provoca grandes danos e prejuízos.

Fonte: CEMTEC (2023).