



**FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
LICENCIATURA EM METEOROLOGIA**

TRABALHO DE LICENCIATURA

**Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do
Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio
Umbeluzi (2016-2023)**

Autor:

Chane Lacerda Amadeu Pinto

Supervisor:

Prof. Doutor Atanásio Manhique

Co-supervisor:

Lic. Berny Chaimite

Maputo, Novembro de 2025

Trabalho de Licenciatura

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo
WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi
(2016-2023)

Autor:

Chane Lacerda Amadeu Pinto

Supervisores:

Prof. Doutor Atanásio Manhique

Co-supervisor: Lic. Berny Chaimite

Maputo, Novembro de 2025

Dedicatória

Dedico este trabalho, com profundo carinho e gratidão, à minha família, que sempre foi a base da minha força e determinação.

- À minha mãe, Flora Augusto Sango, pelo amor incondicional, pela dedicação incansável e por cada palavra de encorajamento que me guiou ao longo deste percurso acadêmico.
- Ao meu pai, Lacerda Amadeu Pinto, por acreditar nas minhas capacidades.
- Aos meus irmãos, Leonel Pinto, Josefa Pinto e Edson Pinto, pela companhia, pela compreensão nos momentos difíceis e pela motivação constante.

A todos vocês, que estiveram presentes em cada etapa desta caminhada, dedico com orgulho esta conquista.

Declaração de honra

Eu, Chane Lacerda Amadeu Pinto, declaro, sob compromisso de honra, que o presente trabalho de licenciatura é de minha exclusiva autoria e responsabilidade. A pesquisa desenvolvida, bem como os resultados obtidos, são fruto do meu empenho e dedicação, realizados sob orientação académica apropriada. Todas as fontes e referências consultadas foram devidamente citadas e creditadas, em conformidade com as normas académicas vigentes. Declaro, ainda, que esta obra é original e inédita, não tendo sido submetida anteriormente para a obtenção de qualquer grau académico.

Maputo, Novembro de 2025

O autor:

.....

(Chane Lacerda Amadeu Pinto)

Agradecimento

A minha mais profunda gratidão vai para a minha mãe, Flora Augusto Sango, pelo apoio incansável, pela confiança constante e por nunca deixar de acreditar nas minhas capacidades. A sua dedicação e encorajamento foram pilares fundamentais para a concretização deste trabalho.

Agradeço também ao meu tio, pelo apoio firme, pela força e motivação que sempre me transmitiu ao longo da minha formação.

Ao meu supervisor, Prof. Doutor Atanásio Manhique, expresso o meu sincero reconhecimento pela orientação competente, acompanhamento atento, sem o qual teria sido difícil dar continuidade a esta investigação.

Estendo igualmente os meus agradecimentos ao G A Maúre, PhD, pela indicação do meu co-supervisor e pelos ensinamentos valiosos relacionados com a utilização do modelo WRF, que foram determinantes para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao meu co-supervisor, Lic. Berny Chaimite, manifesto a minha gratidão pela orientação dedicada, pelo apoio técnico no uso do modelo WRF e, sobretudo, pela sua constante disponibilidade, motivação e incentivo, que me ajudaram a manter o foco durante o processo.

Agradeço de forma especial ao Martílio Banze, pelo apoio prestado na criação das credenciais de acesso aos recursos de supercomputação da MoRENet o cluster SCAD2, bem como pela sua colaboração contínua durante a fase de simulação.

Expresso ainda os meus sinceros agradecimentos aos colegas e amigos Francelino Macave, Rosita Mutimucuío, Rosymary Magalhães e Eucrência da Graça Moniz, pelo companheirismo e apoio ao longo deste percurso.

Aos amigos Rainel José Magrança, Genesse João Mavenda, Luis Sonaldo Luis e ao professor Samuel Mucoronde, agradeço pelo incentivo, amizade e disponibilidade constantes.

A todos os docentes que, de forma directa ou indirecta, contribuíram para a minha formação e se mostraram disponíveis para me auxiliar durante esta investigação, o meu muito obrigado.

Por fim, agradeço a mim mesmo, pela paciência, resiliência, foco e força de vontade que me permitiram ultrapassar todos os obstáculos e concluir esta etapa importante da minha vida acadêmica.

Listas de abreviaturas e siglas

ARA-Sul	Administração Regional de Águas do Sul
CPL	Camada Limite Planetária
CMIP6	Coupled Model Intercomparison Project Phase 6
GCMs	Modelos de Circulação Geral / Modelos de Clima Global
CHIRPS	Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data
GCMs	Modelos de Circulação Geral ou Modelos de Clima Global
HPC	High Performance Computing (Computação de Alto Desempenho)
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System
INAM	Instituto Nacional de Meteorologia
INGD	Instituto Nacional de Gestão e Redução do Risco de Desastres
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
ISCED	Instituto Superior de Ciências e Educação a Distância
MAE	Erro Médio Absoluto (Mean Absolute Error)
MoRENet	Rede de Instituições de Ensino Superior e de Investigação de Moçambique
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NetCDF	Network Common Data Form (Formato Comum de Dados em Rede)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PNT	Previsão Numérica do Tempo
RCMs	Modelos de Clima Regional
RK3	Método de Runge-Kutta de Terceira Ordem
RMSE	Erro Quadrático Médio (Root Mean Square Error)
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
US DoD	Department of Defense (Departamento de Defesa dos Estados)
WRF	Weather Research and Forecasting Model

Resumo

O presente trabalho tem como objectivo comparar os dados de precipitação observados pelo CHIRPS com as simulações do modelo WRF, com enfoque em eventos de precipitação intensa na bacia hidrográfica do rio Umbeluzi, no período de 2016 a 2023, de modo a compreender a sua relação com a ocorrência de inundações na bacia. A metodologia baseou-se na simulação de episódios de precipitação com o modelo WRF, utilizando configurações apropriadas à região de estudo, seguida da confrontação com os dados observacionais do CHIRPS. Os resultados evidenciam diferenças entre os valores médios de precipitação obtidos a partir dos dois conjuntos de dados. De modo geral, o CHIRPS apresentou valores médios mais elevados em relação ao WRF na maioria dos eventos considerados. Por exemplo, no evento de 29 de janeiro de 2017, o WRF registou 0.21 mm, enquanto o CHIRPS apresentou 10.82 mm, e em 31 de janeiro de 2021, os valores foram de 0.06 mm no WRF e 21.03 mm no CHIRPS. Em contrapartida, em determinados eventos, como 16 de fevereiro de 2017, o modelo apresentou valores médios superiores aos observados (29.37 mm no WRF e 17.56 mm no CHIRPS). A comparação dos valores médios revela uma tendência do modelo WRF em subestimar a precipitação intensa, embora consiga representar a ocorrência dos eventos e a distribuição espacial da precipitação na bacia. Esses resultados permitem relacionar os episódios de precipitação intensa com a ocorrência de inundações na bacia do rio Umbeluzi.

Palavras-chave: Precipitação; WRF; CHIRPS; Eventos extremos; Bacia do Umbeluzi, inundações.

Abstract

This study aims to compare precipitation data observed by CHIRPS with simulations from the WRF model, focusing on intense precipitation events in the Umbeluzi River basin during the period from 2016 to 2023, in order to understand their relationship with flooding occurrences in the basin. The methodology was based on simulating precipitation episodes using the WRF model with configurations appropriate for the study region, followed by comparison with observational data from CHIRPS. The results highlight differences between the average precipitation values obtained from the two datasets. In general, CHIRPS showed higher average values compared to WRF for most of the events considered. For example, during the event on January 29, 2017, WRF recorded 0.21 mm, while CHIRPS reported 10.82 mm, and on January 31, 2021, the values were 0.06 mm for WRF and 21.03 mm for CHIRPS. Conversely, in certain events, such as February 16, 2017, the model presented higher average values than those observed (29.37 mm in WRF and 17.56 mm in CHIRPS). The comparison of average values reveals a tendency of the WRF model to underestimate intense precipitation, although it is able to represent the occurrence of events and the spatial distribution of precipitation within the basin. These results allow for the association of intense precipitation episodes with the occurrence of floods in the Umbeluzi River basin.

Keywords: Precipitation; WRF; CHIRPS; Extreme events; Umbeluzi River basin; Floods.

Lista de Figuras, Gráficos e Tabelas

Figura 1 - <i>Mapa de localização da área de estudo</i>	18
Figura 2 - Zonas específicas e de relaxamento	29
Figura 3 - Várias configurações de ninho para múltiplas grades	30
Figura 4 - Grade Horizontal e vertical do modelo WRF	33
Figura 5 - Coordenada vertical η	34
Figura 6 - Sistema de preprocessamento do WRF	39
Figura 7 - Distribuição espacial da precipitação: WRF vs CHIRPS (2016-03-08).....	41
Figura 8 - Distribuição espacial da precipitação: WRF vs CHIRPS (2017-01-29).....	42
Figura 9 - Distribuição espacial da precipitação: WRF vs CHIRPS (2017-02-16).....	43
Figura 10 - Distribuição espacial da precipitação: WRF vs CHIRPS (2018-02-20).....	44
Figura 11 - Distribuição espacial da precipitação: WRF vs CHIRPS (2021-01-24).....	45
Figura 12 - Distribuição espacial da precipitação: WRF vs CHIRPS (2021-01-31).....	46
Figura 13 - Distribuição espacial da precipitação: WRF vs CHIRPS (2021-02-12).....	47
Figura 14 - Distribuição espacial da precipitação: WRF vs CHIRPS (2023-02-09).....	47
Figura 15 - Distribuição espacial da precipitação: WRF vs CHIRPS (2023-02-16).....	48
Figura 16 - Distribuição espacial da precipitação: WRF vs CHIRPS (2023-03-30).....	49
Tabela 1 - Características do modelo WRF	31
Tabela 2 - configuração do modelo WRF	37
Tabela 3 - Parametrizações físicas utilizadas	37
Tabela 4 - Recursos do cluster SCAD2	38
Tabela 5 - Comparação das precipitações médias (WRF vs CHIRPS)	50
Tabela 6 - Análise das métrica	54
Gráfico 1 - Comparação das Precipitações Médias (2016–2023)	51
Gráfico 2 - Gráfico das Diferenças (CHIRPS – WRF)	52
Gráfico 3 - Dispersão CHIRPS vs WRF – Eventos de inundações (2016-2023).....	55

ÍNDICE

1	Introdução	12
1.1	Objectivos	14
1.1.1	Objectivo Geral:	14
1.1.2	Objectivos Específicos:	14
1.2	Problemática	15
1.3	Aplicação do estudo.....	16
2	Revisão bibliográfica	17
2.1.1	Caracterização Climática da bacia de Umbeluzi	18
2.2	Eventos Climáticos Extremos e Precipitação	19
2.2.1	Sistema Climático	21
2.2.2	Padrões Climáticos Regionais e Modelos de Previsão	22
2.3	Registos Históricos de Inundações na Bacia Hidrográfica do Rio Umbeluzi (2016-2023)	23
2.4	Modelo de Previsão do Tempo	25
2.5	Modelo WRF	26
2.6	Downscaling.....	27
2.6.1	Downscaling dinâmico.....	27
2.6.2	Downscaling empírico	28
2.7	Esquemas de microfísica do WRF	28
2.8	Condições iniciais e de fronteira.....	28
2.9	As equações do modelo.....	31
2.10	Coordenadas usadas no modelo WRF	34
3	Métodologia	35
4	Resultados e Discussões.....	41
5	Conclusões.....	56
6	Bibliografia	58
6.1	Anexos.....	61

1 Introdução

A bacia hidrográfica do rio Umbeluzi, situada no sul de Moçambique, na região da África Austral, constitui um recurso hídrico de grande relevância estratégica para o país. Para além de garantir o abastecimento de água às cidades de Maputo, Matola e à vila de Boane, a bacia sustenta actividades agrícolas e industriais que contribuem significativamente para o desenvolvimento económico e social da região.

A presença da barragem dos Pequenos Libombos reforça essa importância, permitindo a regulação do caudal ao longo do ano e assegurando a disponibilidade de água durante os períodos de estiagem.

Contudo, a bacia do Umbeluzi tem sido frequentemente afectada por episódios de precipitação intensa, cuja frequência e intensidade têm aumentado nas últimas décadas. Estes eventos provocam inundações que acarretam impactos socioeconómicos e ambientais consideráveis, como a destruição de infraestruturas, perdas agrícolas e deslocação de populações. Um dos exemplos mais recentes ocorreu entre 6 e 15 de fevereiro de 2023, quando se registaram precipitações acumuladas na ordem dos 350 mm, resultando em inundações severas, sobretudo no distrito de Boane, cuja topografia plana amplificou os efeitos do evento (Cea et al., 2024).

De acordo com Albino (2012), a vulnerabilidade da bacia do Umbeluzi a inundações resulta da conjugação de factores naturais, como a geomorfologia e o regime pluviométrico, com factores antrópicos, tais como a urbanização desordenada e a pressão sobre os recursos hídricos. A crescente variabilidade climática, associada a fenómenos extremos como ciclones tropicais e tempestades severas, tende a intensificar esses riscos. Schneider et al. (2022) salientam que a monitorização rigorosa da precipitação é essencial para a gestão sustentável da água, mitigação de inundações e planeamento de infraestruturas resilientes às alterações climáticas.

Neste contexto, o presente estudo recorre ao modelo atmosférico de mesoescala WRF (Weather Research and Forecasting), em conjunto com o conjunto de dados observacionais CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data), para comparar a

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

precipitação intensa na bacia hidrográfica do rio Umbeluzi no período de 2016 a 2023. O modelo WRF possibilita representar, com elevada resolução espacial e temporal, os processos atmosféricos responsáveis pela ocorrência de chuvas intensas, constituindo uma ferramenta fundamental para compreender e prever eventos hidrometeorológicos extremos.

A comparação entre as simulações do WRF e os dados do CHIRPS permite avaliar o desempenho do modelo na reprodução dos padrões observados e compreender a ligação entre episódios de precipitação intensa e eventos de inundação. Esta abordagem integrada combina observações por satélite e modelação numérica, oferecendo uma base científica sólida para a gestão dos recursos hídricos e o planeamento de medidas de adaptação às alterações climáticas.

Assim, este trabalho procura colmatar a escassez de estudos regionais que integrem modelação atmosférica e observações remotas aplicadas à bacia do Umbeluzi. Através desta comparação, pretende-se contribuir para o avanço do conhecimento sobre os mecanismos de precipitação extrema na região e fornecer subsídios científicos que apoiem o desenvolvimento de sistemas de alerta precoce e estratégias de mitigação de riscos hidrometeorológicos.

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

1.1 Objectivos

1.1.1 Objectivo Geral:

- Comparar os dados observados de precipitação CHIRPS com as simulações do modelo WRF, de modo a avaliar o desempenho do modelo na representação de eventos de precipitação intensa na bacia do rio Umbeluzi, no período de 2016 a 2023.

1.1.2 Objectivos Específicos:

- Apresentar a distribuição temporal e espacial da precipitação intensa na bacia do rio Umbeluzi, com base nas simulações do modelo WRF e nos dados observacionais do CHIRPS.
- Comparar os valores de precipitação estimados pelo modelo WRF com os registados pelo CHIRPS, evidenciando as principais diferenças e semelhanças entre ambos os conjuntos de dados.
- Estabelecer a relação entre os episódios de precipitação intensa e os eventos de inundações ocorridos na bacia durante o período em estudo.
- Determinar o desempenho do modelo WRF na representação da precipitação, com base nas métricas estatísticas aplicadas e na comparação com os dados observacionais.

1.2 Problemática

A ocorrência de eventos de precipitação intensa na bacia do rio Umbeluzi tem provocado impactos significativos, nomeadamente inundações e prejuízos socioeconómicos. Contudo, persistem dificuldades na representação adequada destes fenómenos por modelos numéricos, o que levanta questões quanto à sua fiabilidade.

Neste contexto, torna-se pertinente proceder à comparação entre dados observados de precipitação, como os provenientes do CHIRPS, e as simulações geradas pelo modelo WRF, com o objectivo de verificar o grau de concordância entre ambos na representação de eventos de precipitação intensa.

A realização do presente estudo justifica-se pela necessidade de compreender até que ponto o modelo WRF é capaz de reproduzir os valores observados de precipitação, contribuindo para uma utilização mais informada destas ferramentas em estudos meteorológicos e hidrológicos.

Os resultados deste estudo poderão ser aplicados na avaliação do desempenho de modelos numéricos, bem como no apoio a estudos relacionados com a previsão de eventos extremos, auxiliando instituições responsáveis na gestão de riscos associados à precipitação intensa.

Não obstante, o estudo apresenta algumas limitações, designadamente incertezas associadas aos dados utilizados, tanto do CHIRPS como das simulações do modelo WRF, bem como restrições relacionadas com a resolução espacial e temporal dos dados e com o período considerado no estudo.

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

1.3 Aplicação do estudo

Os resultados obtidos neste trabalho fornecem subsídios científicos relevantes para a análise e previsão de precipitação intensa na bacia do rio Umbeluzi. A comparação entre as simulações do modelo WRF e os dados observacionais do CHIRPS demonstrou a capacidade do modelo em representar os padrões espaciais e temporais da precipitação, ainda que com algumas limitações inerentes às parametrizações físicas utilizadas. Este estudo contribui directamente para a melhoria dos sistemas de monitorização e alerta de inundações, permitindo identificar períodos críticos e áreas de maior risco. Além disso, os resultados podem apoiar instituições públicas e entidades de gestão de recursos hídricos, como o INAM e a DNGRH, na optimização de estratégias de prevenção e resposta a desastres. A metodologia implementada, foi baseada em modelação atmosférica, análise estatística e uso de um sistema de computação de alto desempenho (HPC) disponibilizado pela MoRENet, pode ser replicada em outras bacias hidrográficas de características semelhantes, consolidando-se como ferramenta de suporte à investigação climática e à tomada de decisão.

2 Revisão bibliográfica

A bacia hidrográfica do rio Umbeluzi encontra-se na região sul da província de Maputo, situada aproximadamente entre os paralelos 25°40'22'' e 26°16'47'' de latitude sul, e entre os meridianos 31°55'43'' e 32°29'01'' de longitude leste (Alamo, 2010). Estas coordenadas abrangem a área principal da bacia, que vai desde a sua nascente em Eswatini até a foz no oceano, atravessando a província de Maputo.

O rio Umbeluzi tem origem no Reino de Eswatini (antigamente conhecido como Suazilândia), próximo à fronteira ocidental com a África do Sul. O curso do rio ingressa em Moçambique por uma garganta localizada na cordilheira dos PL, no distrito de Manhica (Jalane, 2020). A bacia do Umbeluzi cobre uma área total de cerca de 5.400 km², estendendo-se por aproximadamente 56 km. A nascente situa-se no Zimbábue, numa região montanhosa do norte de Eswatini, e o rio apresenta uma vazão média de 9 m³/s. Seu percurso é predominantemente de oeste para leste, terminando na bacia do Maputo, onde desagua num estuário compartilhado com outros rios. A barragem dos PL está localizada na parte do rio que atravessa o território moçambicano, numa zona de maior altitude (Ribeiro, 2018).

Segundo Notisso e Formiga (2021), o Umbeluzi é uma bacia transfronteiriça, compartilhada por três países: Eswatini, África do Sul e Moçambique. Trata-se de uma região estratégica, pois abastece as capitais de Eswatini e Moçambique, assim como as áreas circundantes. A porção moçambicana da bacia, denominada baixo Umbeluzi, está situada inteiramente na província de Maputo, e seus principais afluentes são os rios Calichane e Movone, localizados respectivamente a montante e a jusante dos reservatórios.

O rio Umbeluzi tem um escoamento médio de 490x10⁶ m³ na foz e de 360x10⁶ m³ com regime permanente. A precipitação média anual é de 736 mm. O extremo Oeste da bacia é montanhosa seguindo-se uma zona plana onde se concentra uma produção de cana de açúcar depois segue uma pequena cordilheira montanhosa (pequenos Libombos). Finalmente a Leste, há uma zona mais plana entre os PL e Estuário do Espírito Santo, em Maputo (Jalane, 2020).

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

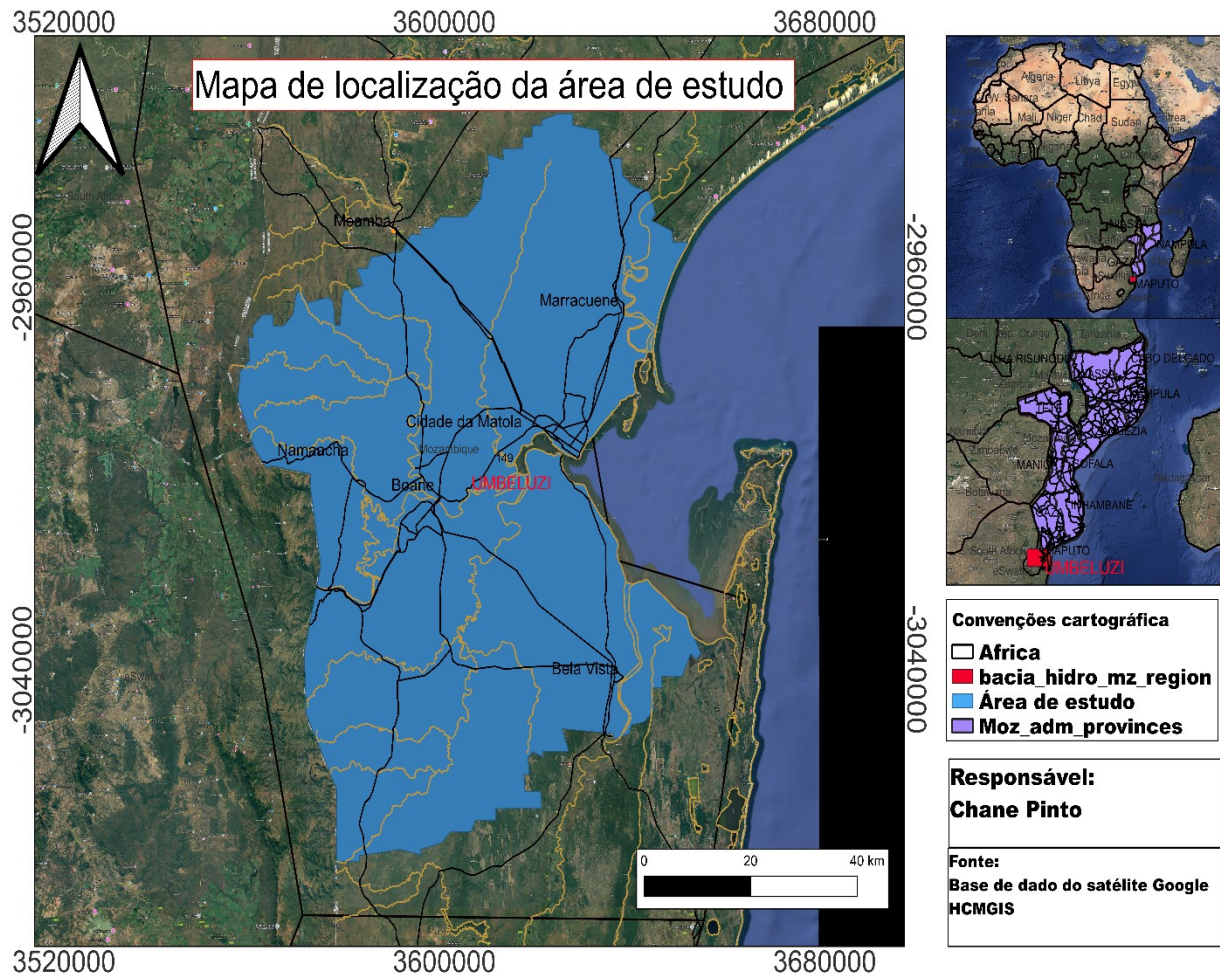


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo

2.1.1 Caracterização Climática da bacia de Umbeluzi

O clima é um dos elementos fundamentais para a análise dos fenómenos naturais, constituindo um dos principais factores que condicionam as actividades humanas. Por essa razão, influência significativamente a dinâmica dos ecossistemas (Jalane, 2020).

As condições climáticas afetam o meio ambiente de várias maneiras: a radiação solar, a velocidade do vento, a temperatura e a humidade relativa do ar interferem na evapotranspiração, que, por sua vez, influencia a disponibilidade de água no solo, afetando o crescimento das plantas e, conseqüentemente, os padrões de precipitação (Jalane, 2020). O estudo do clima representa um capítulo essencial da ciência moderna, uma vez que a atmosfera influencia diretamente as actividades humanas, sendo considerada um sistema que regula os processos naturais. Esse sistema

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

está aberto às entradas de energia geradas pelas próprias actividades humanas, o que resulta numa estrutura espacial dinâmica (Jalane, 2020).

A bacia do Rio Umbeluzi possui um clima tropical, caracterizado por uma estação chuvosa e uma estação seca bem definidas. A estação chuvosa ocorre, normalmente, entre novembro e abril, enquanto a estação seca compreende o período entre maio e outubro. O clima local é influenciado pela presença dos ventos alísios de sudeste, que sopram do Oceano Índico e ajudam a amenizar as temperaturas e trazer humidade para a região, conforme indicado por estudos sobre as condições climáticas da área de Boane, que também é afectada por esses ventos (Nhanenge, 2024)

Segundo o relatório da Cosultec (1992), o clima na parte sul da bacia do rio Umbeluzi é classificado, segundo Koppen, como clima seco de estepe (BS). Na região de Goba, predomina o clima tropical chuvoso de savana (AW). Já na parte norte da bacia, o clima predominante é o seco de estepe (BSw) (Albino, 2012).

A precipitação média aumenta da costa até à Cordilheira dos Pequenos Libombos, partindo de cerca de 600 mm e atingindo até 900 mm. No entanto, no flanco ocidental dessa cordilheira, a precipitação diminui para valores entre 600 e 700 mm, aumentando progressivamente até cerca de 1300 mm na região mais ocidental da bacia (Albino, 2012).

De acordo com Albino (2012), em novembro inicia-se a época chuvosa na zona costeira, enquanto nos Libombos o início ocorre em outubro, terminando respetivamente em abril e março. A duração do período chuvoso é de aproximadamente seis meses, podendo chegar a sete ou oito meses na região de Namaacha. O maior volume de precipitação concentra-se entre dezembro e fevereiro.

Segundo Orlando (2020), a bacia do Umbeluzi apresenta um clima do tipo sub-húmido, com défice de precipitações durante a estação fria. A pluviosidade média anual é de 752 mm, variando entre 563,6 mm no período húmido e 43,6 mm na estação seca.

2.2 Eventos Climáticos Extremos e Precipitação

Eventos climáticos extremos são acontecimentos raros que ocorrem num determinado local e época do ano. Quando isolados, esses eventos não devem ser atribuídos directamente às mudanças climáticas de origem antropogénica, uma vez que podem ocorrer naturalmente. No entanto, quando tais padrões meteorológicos persistem ao longo de uma estação do ano, como, por exemplo,

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

períodos prolongados de seca ou precipitações fortes, podem então ser classificados como eventos climáticos extremos (Bork, Castro, Corrêa & Siqueira, 2017).

A importância do estudo sobre eventos extremos aumentou significativamente nos últimos anos, assim como a necessidade de dados de alta qualidade. Nesse contexto, os modelos climáticos têm vindo a ser continuamente aperfeiçoados para fornecer informações mais fiáveis sobre o clima, aumentando assim o grau de confiança nos resultados obtidos por meio dessas ferramentas (Bork et al., 2017).

A distribuição espacial da precipitação é condicionada por diversos factores, como a latitude, relevo, maritimidade/continentalidade, correntes marítimas, cobertura vegetal e altitude. Além disso, depende da actuação dos sistemas atmosféricos geradores de tempo. De forma geral, as regiões mais chuvosas localizam-se próximas ao equador, em virtude das elevadas temperaturas e taxas de evaporação, que favorecem os processos convectivos (Petrucci & Azevedo, 2023).

Alguns eventos chuvosos caracterizam-se por precipitações fortes num curto intervalo de tempo. Nesses casos, destaca-se a intensidade do fenómeno, sendo estes classificados como eventos extremos. Tais eventos podem ser considerados naturais ao sistema climático, expressando condições excepcionais. A sua caracterização pode ser efectuada por meio de análises estatísticas, como o cálculo de probabilidade ou período de retorno. Frequentemente, esses eventos estão relacionados à variabilidade climática e à actuação de fenómenos atmosféricos de macroescala, tais como o El Niño-Oscilação Sul (ENOS), Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) no Oceano Atlântico, os quais influenciam a circulação atmosférica e, conseqüentemente, os sistemas meteorológicos responsáveis pelos eventos hidrometeorológicos em várias regiões do globo (Petrucci & Azevedo, 2023).

Um evento extremo de precipitação pode ser definido como aquele em que, para uma determinada região e período, a precipitação acumulada seja diária, em múltiplos dias, mensal ou mesmo horária ultrapassa um dado percentil da média climatológica, ou outro limiar previamente estabelecido. A ocorrência desses eventos geralmente está associada a deslizamentos de terra e inundações (Segura, 2021).

Embora os eventos extremos de precipitação possam causar danos significativos, como perdas humanas por afogamentos em áreas urbanas e impactos negativos na agricultura, também podem, em contrapartida, contribuir positivamente para reabastecer reservatórios de água durante períodos de seca (Segura, 2021).

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) identificou uma tendência global de aumento na ocorrência de eventos extremos de precipitação. O mesmo relatório indica que este aumento pode ocorrer até mesmo em regiões onde há tendência de redução da precipitação total. De acordo com essa definição, um evento de precipitação extrema ocorre quando a precipitação diária excede determinado percentil da média climatológica local (Segura, 2021).

2.2.1 Sistema Climático

As condições ambientais do planeta são moldadas tanto por factores externos, como a intensidade da radiação solar, quanto por factores internos, como a configuração dos oceanos e continentes e a composição atmosférica. Alterações em qualquer desses elementos provocam reajustes no sistema climático, afetando o equilíbrio energético da Terra e, por conseguinte, gerando mudanças no clima (Nunes, 2008).

O estudo climático ganhou maior relevância com a divulgação dos relatórios elaborados pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), órgão das Nações Unidas. Esses documentos abordam cientificamente as causas do aquecimento global e os seus impactos na sociedade, além de reforçarem a credibilidade dos modelos utilizados nas projeções climáticas e sugerirem estratégias para mitigar os efeitos negativos (Marin, Ribeiro & Centeno, 2008).

O sistema climático terrestre resulta de um balanço energético diferença entre a radiação solar absorvida pelo planeta e a energia emitida de volta ao espaço. Caso a quantidade recebida exceda a emitida, há tendência de aquecimento; inversamente, se a emissão for maior que a recepção, ocorre arrefecimento. Contudo, esse equilíbrio é afetado por diversos processos que envolvem as interações entre os diferentes compartimentos do sistema climático, tais como atmosfera, oceanos, calotas polares, biosfera e superfície terrestre (Monteiro, Souza & Silva, 2021).

A complexidade do sistema climático está refletida ao longo da história da Terra, que passou por extensos períodos glaciais, durante os quais vastas áreas do planeta ficaram cobertas por gelo (Monteiro et al., 2021).

Para prever possíveis cenários futuros de alterações no clima, recorre-se aos modelos climáticos, que consistem em representações matemáticas dos processos físicos e químicos que regem os componentes do sistema climático. Estes modelos integram, de forma quantitativa, os comportamentos da atmosfera, dos oceanos, da criosfera, da vegetação e do solo, permitindo

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

simular o desenvolvimento provável do clima a médio e longo prazo (Oliveira, Lima & Prado, 2011).

2.2.2 Padrões Climáticos Regionais e Modelos de Previsão

O território moçambicano e a parte meridional do continente africano são afetados por múltiplos elementos climáticos que exercem um papel essencial na manifestação de fenómenos extremos, como inundações. Dentre os principais condicionantes climáticos destacam-se:

Sistema de Monção do Oceano Índico

Durante a época chuvosa, a monção proveniente do Oceano Índico transporta grandes quantidades de humidade para o interior da África Austral, favorecendo precipitações fortes e persistentes. De acordo com o IPCC (2021) e com Reason e Jury (2021), este sistema monçónico exerce uma influência determinante sobre os padrões de chuva em Moçambique, podendo intensificar episódios de precipitação extrema, sobretudo quando associado à formação de sistemas de baixa pressão na região.

Oscilação Madden-Julian

A Oscilação Madden-Julian (MJO) é um fenómeno atmosférico tropical de baixa frequência que modula os padrões de convecção. Segundo Zhang (2005) e Kim et al. (2014), durante a fase ativa da MJO ocorre um reforço significativo da convecção tropical, o que pode resultar em precipitações mais intensas no sudeste de África. Esta intensificação aumenta o risco de inundações rápidas, incluindo na bacia hidrográfica do rio Umbeluzi.

Fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENSO)

O ENSO constitui uma das principais fontes de variabilidade climática no sul de África. As fases de La Niña estão geralmente associadas a níveis de precipitação superiores ao normal na região, conforme demonstrado por Lyon e Mason (2007) e pelo IPCC (2013). Em Moçambique, episódios de inundações severas, como os registados nos anos 2000 e 2013, foram amplificados pelas condições de La Niña, que favoreceram a intensificação de tempestades tropicais e ciclones (Reason & Keibel, 2004).

Ciclones Tropicais

A costa moçambicana é recorrentemente afetada por ciclones tropicais que provocam precipitações intensas e repentinas. Estudos de Fitchett e Grab (2014) e Mavume et al. (2009) indicam que estes sistemas atmosféricos estão entre os principais responsáveis pelos eventos de precipitação extrema observados no país. A sua passagem pode desencadear elevações rápidas dos caudais e episódios de inundação severa na bacia do Umbeluzi.

Relação com o Modelo WRF

As simulações realizadas através do modelo WRF, reproduzem parcialmente estas dinâmicas climáticas regionais. De acordo com Skamarock et al. (2021) e Mohammed et al. (2017), o modelo apresenta boa capacidade para representar fenómenos convectivos tropicais e padrões de precipitação associados à monção, à MJO, ao ENSO e aos ciclones tropicais, permitindo identificar episódios de precipitação extrema coerentes com as observações regionais.

2.3 Registos Históricos de Inundações na Bacia Hidrográfica do Rio Umbeluzi (2016-2023)

A bacia hidrográfica do rio Umbeluzi, localizada no sul de Moçambique, tem sido palco de inundações recorrentes, provocando impactos relevantes nas comunidades locais, nas actividades agrícolas, nas estruturas físicas e no equilíbrio ambiental. Este trabalho tem como objectivo analisar os comportamentos da precipitação intensa na bacia hidrográfica do rio Umbeluzi, com base em dados gerados pelo modelo atmosférico de mesoescala WRF e registos observacionais do conjunto CHIRPS, de forma a estabelecer a correspondência entre episódios de precipitação intensa e alguns eventos de inundações registados na região.

Episódio de 2016 - Durante o ano de 2016, ainda que não tenham sido reportadas inundações de grande magnitude, os estudos indicavam um aumento progressivo da exposição da bacia a riscos climáticos. Delos (2021) identificou a região como particularmente susceptível a eventos extremos, como precipitações elevadas e escoamento fluvial intenso, devido à combinação de factores naturais e humanos.

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

Episódio de 2017 - Em 2017, verificaram-se inundações localizadas em zonas como Boane e Namaacha, acompanhada de precipitações prolongadas que ultrapassaram a capacidade de absorção dos solos. Informações do Instituto Nacional de Estatística revelaram prejuízos na produção agrícola e dificuldades de circulação, com estradas e pontes danificadas (Delos, 2021). A expansão urbana sem planeamento contribuiu para o aumento da vulnerabilidade.

Episódio de 2018 - No início de 2018, autoridades moçambicanas emitiram alertas preventivos devido ao risco elevado de inundações, abrangendo também a bacia do Umbeluzi. Embora a intensidade não tenha sido extrema, houve registo de transbordamentos em áreas habitacionais, sobretudo nas periferias da cidade de Maputo, onde os sistemas de escoamento são frequentemente insuficientes (Observador, 2018).

Episódio 2021 - O ano de 2021 não foi marcado por inundações severas, mas estudos técnicos realçaram a importância de intervenções estruturais para prevenir futuros eventos. Vilanculos, Capela e Arêde (2021) sublinharam a função essencial da barragem de Movene na gestão dos fluxos hídricos e na contenção de enchentes, propondo modelos de previsão baseados em cenários climáticos. Por outro lado, Chilundo et al. (2021) alertaram para o aumento da pressão sobre os recursos hídricos, antecipando problemas associados à escassez de água e à subida dos níveis de inundação em zonas urbanas.

Episódio de 2023 - Em fevereiro de 2023, a bacia do Umbeluzi enfrentou um dos episódios de inundação mais significativos da última década. precipitações intensas nas zonas montanhosas do Eswatini e África do Sul originaram uma subida rápida dos caudais, levando a descargas controladas da barragem dos Pequenos Libombos. Estas operações aumentaram o volume de água a jusante, resultando em vastas inundações nos distritos de Boane, Matola e arredores (Jornal Notícias, 2024).

A Direcção Nacional de Gestão de Recursos Hídricos reportou mais de 30 mil cidadãos afectados, com perdas materiais consideráveis em infraestruturas, habitações e explorações agrícolas (Deutsche Welle, 2023a). De acordo com Ramos, Costa e Santos (2024), a precipitação superou os 350 mm em algumas regiões, tornando este fenómeno um dos mais intensos modelados cientificamente na bacia até à data.

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

A incorporação desses eventos extremos e dos padrões climáticos nos modelos de previsão é fundamental para aprimorar a gestão dos riscos e fortalecer a resiliência da bacia do Umbeluzi. A análise efectuada com o modelo WRF contribui para identificar as condições antecedentes e os factores desencadeantes das inundações, auxiliando na formulação de estratégias preventivas e de mitigação.

2.4 Modelo de Previsão do Tempo

Um modelo de previsão do tempo é um sistema numérico que simula a evolução futura da atmosfera com base nas leis físicas que regem os processos atmosféricos, incluindo a dinâmica dos fluidos, a termodinâmica e a transferência radiativa. Estes modelos resolvem um conjunto de equações diferenciais não lineares, derivadas das equações de Navier-Stokes, aplicadas a uma grelha tridimensional da atmosfera (Ahrens, 2019; Wallace & Hobbs, 2006).

A previsão do tempo inicia-se com a construção do estado inicial da atmosfera, obtido através da assimilação de observações provenientes de satélites, radares, estações meteorológicas, radiossondagens, navios e aeronaves. A precisão deste estado inicial é determinante para a qualidade das previsões subsequentes (Kalnay, 2003).

Funcionamento e limitações

Depois de estabelecidas as condições iniciais, o modelo resolve numericamente as equações físicas ao longo do tempo, calculando variáveis como temperatura, vento, humidade, precipitação e pressão atmosférica. Este processo é realizado a intervalos de minutos, permitindo simulações desde algumas horas até cerca de 10 à 15 dias no futuro limite imposto pela natureza caótica da atmosfera (Lorenz, 1963; Stensrud, 2007).

A sensibilidade do sistema às condições iniciais faz com que erros pequenos se amplifiquem rapidamente, reduzindo a previsibilidade. Por este motivo, diferentes modelos e diferentes execuções do mesmo modelo (ensembles) são frequentemente usadas para aumentar a fiabilidade das previsões.

Exemplos de modelos de previsão operacional

Diversos modelos globais e regionais são utilizados por serviços meteorológicos em todo o mundo. Entre os mais relevantes encontram-se:

- ECMWF (Europeu), modelo de alta precisão usado internacionalmente;
- GFS (EUA), modelo global amplamente utilizado em previsão operacional;
- WRF, frequentemente empregado para previsões regionais de alta resolução.

Estes modelos permitem prever fenómenos meteorológicos tais como frentes, sistemas de baixa e alta pressão, precipitação, ventos fortes e ondas de calor ou frio. Neste trabalho será descrito apenas o modelo WRF.

2.5 Modelo WRF

O WRF é um modelo numérico de previsão atmosférica amplamente utilizado em investigação e em aplicações operacionais. Desenvolvido por um consórcio que inclui o National Center for Atmospheric Research (NCAR) e a NOAA, o WRF foi concebido para produzir previsões de média e alta resolução, adequadas à simulação de fenómenos meteorológicos regionais (Skamarock et al., 2021).

Trata-se de um modelo não hidrostático, permitindo uma representação mais detalhada de processos de pequena escala, como convecção, brisas locais, frentes e eventos meteorológicos severos. A sua grelha é configurável, com resoluções horizontais típicas entre 1 km e 25 km, possibilitando adaptações consoante os objectivos do estudo.

O WRF inclui vários esquemas físicos parametrizados, entre os quais:

- esquemas de microfísica para nuvens e precipitação;
- esquemas de convecção;
- parametrizações da camada limite planetária e turbulência;
- esquemas de radiação;
- modelos de superfície terrestre.

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

A flexibilidade destes módulos permite ajustar o modelo às características regionais e ao tipo de simulação desejada.

O WRF é amplamente utilizado para:

- previsão operacional de curto prazo;
- estudos de eventos meteorológicos extremos;
- simulação regional de alta resolução;
- aplicações sectoriais (energia, gestão de riscos, agricultura)

2.6 Downscaling

Segundo Alvez et al. (2012), compreender como os modelos numéricos representam a variabilidade atmosférica é essencial para avaliar o seu desempenho e apoiar operações de previsão do tempo.

No contexto da previsão numérica, downscaling refere-se ao processo de transformar a informação de modelos globais geralmente com resolução espacial mais grosseira em previsões detalhadas à escala regional ou local (Mendes & Marengo, 2009).

Existem duas abordagens principais: o downscaling dinâmico e o downscaling empírico.

2.6.1 Downscaling dinâmico

O downscaling dinâmico consiste na utilização de um modelo de área limitada, como o WRF, que recebe as condições iniciais e de fronteira de um modelo global.

O modelo regional, devido à maior resolução, permite representar fenómenos atmosféricos com maior detalhe (Mendes & Marengo, 2009).

Neste trabalho, o modelo WRF é aplicado exactamente com esta função: refinar a informação fornecida por um modelo global e produzir previsões de alta resolução.

2.6.2 Downscaling empírico

O downscaling empírico utiliza métodos estatísticos que relacionam variáveis atmosféricas de grande escala com observações locais. Entre os métodos mais comuns encontram-se regressões lineares e técnicas estocásticas (Mendes & Marengo, 2009).

Apesar da sua utilidade em alguns contextos, no presente trabalho utiliza-se exclusivamente ao downscaling dinâmico, através do modelo WRF.

2.7 Esquemas de microfísica do WRF

Ao longo do tempo, os processos físicos foram progressivamente incorporados aos modelos numéricos de previsão do tempo. Estes modelos conseguem representar a precipitação apenas nos pontos da malha do domínio computacional conhecido como precipitação explícita.

No entanto, existem processos físicos que ocorrem em escalas menores que a resolução da malha do modelo, denominadas escalas submalha, que não podem ser diretamente simuladas; este fenómeno é referido como precipitação implícita. Para superar essa limitação, são empregues parametrizações que simulam os processos físicos que acontecem nessas escalas submalha (Coelho, 2013).

No modelo WRF, os esquemas de microfísica são os responsáveis por representar os processos de formação de nuvens e precipitação. Eles simulam as interações entre diferentes tipos de hidrometeoros, tais como vapor de água, gotículas de nuvem, cristais de gelo, neve e granizo.

A seguir, apresenta-se uma lista dos principais esquemas de microfísica disponíveis no modelo WRF (Coelho, 2013).

2.8 Condições iniciais e de fronteira

O modelo WRF necessita de condições de fronteira laterais que descrevam, da forma mais próxima possível, o estado real da atmosfera durante todo o período de integração das equações dinâmicas. Estas condições são geralmente fornecidas por modelos de previsão numérica do tempo em escala global, como destacado por Bender (2012).

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

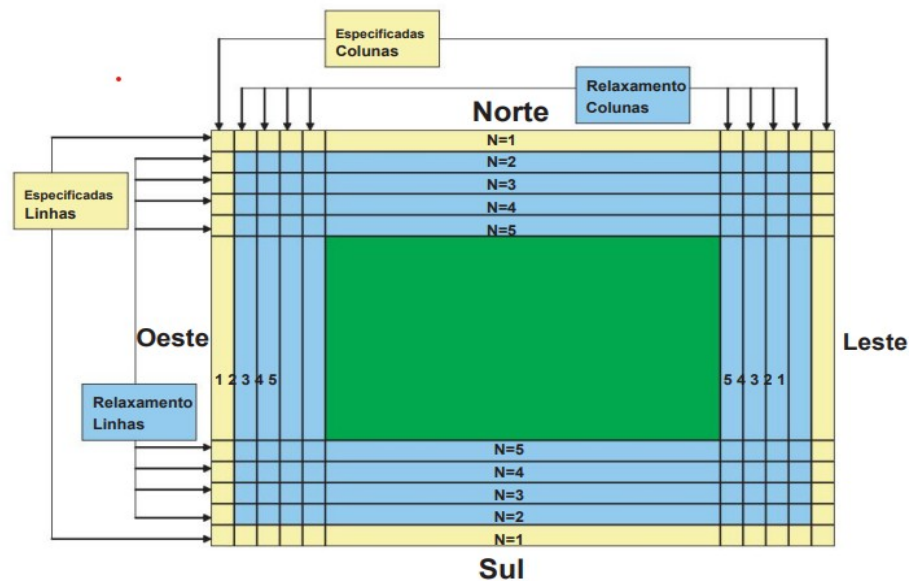


Figura 2 - Zonas específicas e de relaxamento

Fonte: (Skamarock, et al., 2008)

As condições de contorno laterais são incorporadas ao modelo por meio de técnicas de relaxação, que consistem na aplicação de quatro linhas ou colunas adicionais além da zona de fronteira definida.

Neste processo, as condições de fronteira são gradualmente amortecidas, permitindo que o modelo se ajuste de maneira contínua à sua dinâmica interna, o que ajuda a evitar descontinuidades que poderiam provocar instabilidades numéricas ou gerar ruídos artificiais.

Aninhamento de grades

Uma das principais vantagens do uso de grades aninhadas está na possibilidade de se utilizar o encaixe de grades bidirecional (2-way nesting), onde as informações são trocadas em ambas as direções entre os domínios. Com isso, é possível produzir previsões detalhadas numa região de interesse sem a necessidade de processar todo o domínio com uma resolução fina.

Dessa forma, os sistemas de grande escala são simulados com grades mais amplas, enquanto os fenômenos de mesoescala são resolvidos nas grades mais refinadas, com interação mútua entre os domínios durante o processamento (Bender, 2012).

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

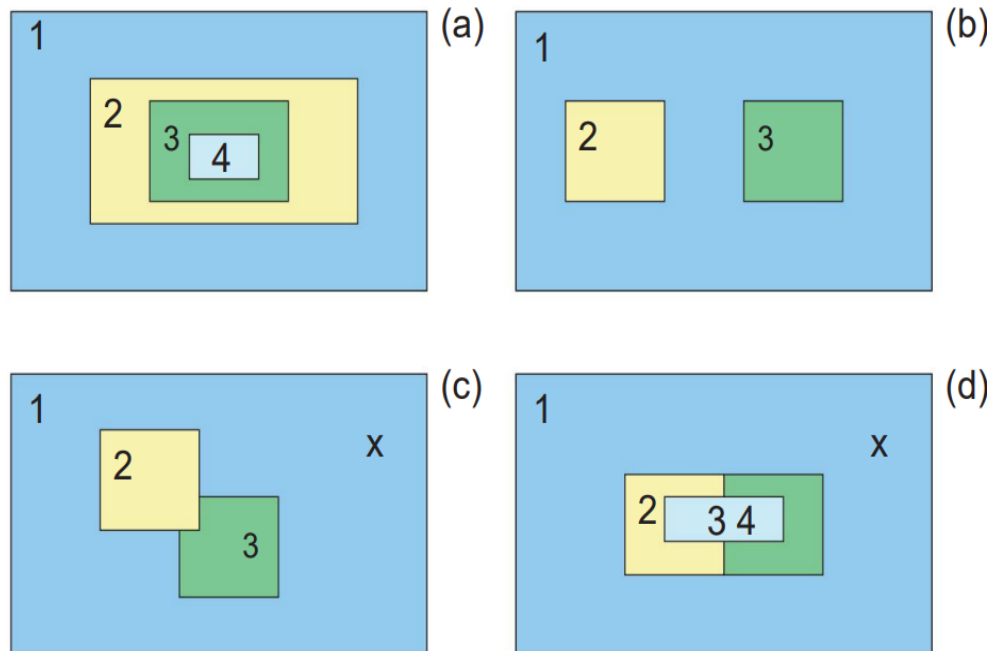


Figura 3 - Várias configurações de ninho para múltiplas grades

Fonte: (Skamarock, et al., 2008)

A figura 9 apresenta diferentes configurações de encaixe de grades de domínios:

- Ninhos telescópicos, onde cada novo domínio de maior resolução está contido no anterior;
- domínios aninhados no mesmo nível em relação ao domínio pai;
- sobreposição de grades, o que não é permitido; e
- domínio interno com múltiplos domínios pai, também não permitido (Skamarock et al., 2008).

O encaixe de grades de domínios no modelo WRF pode ser configurado de duas formas: "one-way" e "two-way". Em ambos os casos, as condições de contorno do domínio filho (aninhado) são obtidas por interpolação a partir do domínio pai, ou seja, os domínios com maior extensão territorial e menor resolução são responsáveis por fornecer os dados de ambiente para os domínios menores e mais detalhados (Bender, 2012).

Na modalidade "one-way nesting", o fluxo de informação ocorre apenas numa direção, do domínio principal para o domínio aninhado (Bender, 2012).

2.9 As equações do modelo

O modelo WRF baseia-se nas equações fundamentais da termodinâmica atmosférica, que compreendem um conjunto de equações de conservação das propriedades físicas dos fluidos.

Nos modelos numéricos meteorológicos, as condições atmosféricas são representadas por um conjunto de equações que governam seu comportamento, tais como as equações de conservação do momento, da energia termodinâmica, da massa e da tendência geopotencial, que descrevem a dinâmica meteorológica de forma idealizada (Oliveira et al., 2016).

Equações Básicas	Totalmente compreensíveis
Coordenadas verticais	Terrain following para a altura e pressão
Estrutura horizontal da grade	Arakawa-C
Método de integração	3 Ordem Rung-Kutta
Equações	Conservação da massa, momentum e escalares usando equações prognosticas na forma de fluxo
Advecção	Diferença centrada de 6 ordem ou 5 ordens “upwind”

Tabela 1 - Características do modelo WRF

Fonte: (campos, 2013)

As equações da dinâmica clássica são adaptadas e aproximadas por meio do método das diferenças finitas, isto é, são transformadas em equações diferenciais parciais que utilizam variáveis de perturbação (Oliveira et al., 2016). A seguir, apresentam-se os conjuntos de equações utilizadas no modelo WRF.

As equações (1, 1.1 e 1.2) representam a conservação do momento para uma Terra esférica, baseando-se na segunda lei de Newton, que estabelece que a taxa de variação do momento de um corpo é proporcional à força aplicada sobre ele e ocorre na mesma direção dessa força.

$$\partial tu = -V \cdot \nabla u + \frac{uv \tan \phi}{a} - \frac{uw}{a} - \frac{1}{\rho} \partial xp - 2\Omega(w \cos \phi - v \sin \phi) + Frx \quad (1)$$

$$\partial tv = -V \cdot \nabla u - \frac{u^2 \tan \phi}{a} - \frac{uw}{a} - \frac{1}{\rho} \partial y p - 2\Omega u \sin \phi + Fr_y \quad (1.1)$$

$$\partial tw = -V \cdot \nabla w - \frac{u^2 + v^2}{a} - \frac{1}{\rho} \partial z p + 2\Omega u \cos \phi - g + Fr_z \quad (1.2)$$

A equação (1.3) corresponde à conservação da energia termodinâmica, responsável por diversos efeitos adiabáticos na temperatura:

$$\partial tT = -V \cdot \nabla HT + (\gamma + \gamma_d)w + \frac{1}{c_p} dtH \quad (1.3)$$

A equação (1.4) representa a continuidade da massa total, afirmando que a massa num sistema fechado é conservada. A equação (1.5) é análoga, mas aplicada especificamente ao vapor de água:

$$\partial t\rho = -V \cdot \nabla \rho - \rho(\nabla \cdot V) \quad (1.4)$$

$$\partial tqv = -V \cdot qv + Qv \quad (1.5)$$

A equação (1.6) é a lei dos gases ideais, relacionando temperatura, pressão e densidade:

$$p = \rho RT \quad (1.6)$$

O modelo WRF fundamenta-se nessas equações prognósticas, motivo pelo qual é classificado como um modelo de equações primitivas (Campos et al., 2015).

Para resolver essas equações de forma pontual em vários pontos simultaneamente, é necessária a discretização do espaço e do tempo (Campos et al., 2015).

Existem diferentes tipos de discretizações; neste estudo, são descritas apenas aquelas empregues pelo modelo WRF: discretização horizontal, discretização vertical e discretização temporal.

Discretização horizontal

De acordo com Campos (2015), o modelo WRF emprega a malha do tipo Arakawa-C, na qual as variáveis termodinâmicas e de humidade são calculadas no centro da célula da malha, enquanto as variáveis dinâmicas as componentes de velocidade (u, v, w) são determinadas em posições específicas, conforme ilustrado na figura 4.

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

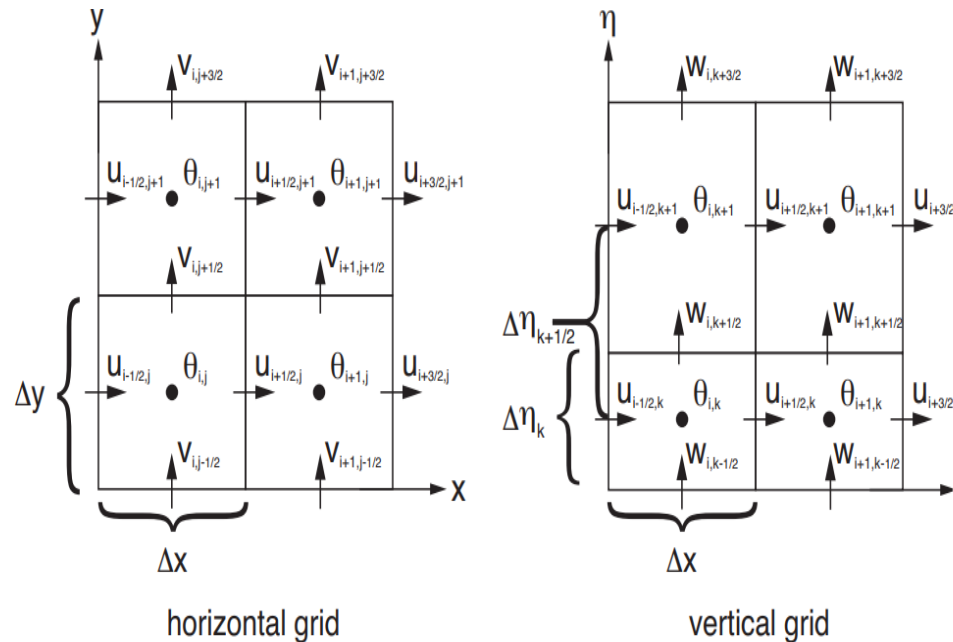


Figura 4 - Grade Horizontal e vertical do modelo WRF

Fonte: (Skamarock, et al., 2008)

Como o WRF é um modelo de mesoescala, a influência da força de Coriolis nos fenômenos representados nessa escala é relevante, embora possa ser menos significativa para eventos como tornados (Oliveira et al., 2016).

Uma malha de baixa resolução pode ser insuficiente para representar com precisão certos fenômenos meteorológicos, enquanto o uso de uma malha com resolução excessivamente alta pode gerar uma demanda computacional desnecessária (Campos et al., 2015).

Discretização Vertical

Um modelo de Previsão Numérica do Tempo (PNT) calcula suas equações em pontos distribuídos tanto na horizontal quanto na vertical. A solução de cada equação em um dado ponto e intervalo temporal influencia, e é influenciada, pelas soluções das demais equações, estabelecendo uma interação mútua (Campos et al., 2015).

Discretização Temporal

O solucionador ARW utiliza um método de integração temporal dividido. De forma geral, os modos lentos ou de baixa frequência, que possuem relevância meteorológica, são integrados por meio de um esquema de Runge-Kutta de terceira ordem (RK3).

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

Já os modos acústicos de alta frequência são resolvidos em intervalos de tempo menores para garantir a estabilidade numérica (Skamarock et al., 2008).

2.10 Coordenadas usadas no modelo WRF

No caso do modelo WRF, a coordenada vertical adotada é a coordenada eta (η). Para realizar a interpolação próxima à superfície, o modelo utiliza uma coordenada adaptada sigma (σ), que acompanha o relevo do terreno, enquanto na atmosfera superior a coordenada eta tende a aproximar-se das isóbaras (Oliveira et al., 2016).

As equações do WRF são formuladas usando essa coordenada vertical eta (η), cuja definição é apresentada a seguir.

$$\eta = \frac{ph - pht}{\mu} \quad (2)$$

$$\text{onde } \mu = phs - pht \quad (3)$$

Ph representa a componente hidrostática da pressão, enquanto Phs e Pht correspondem, respectivamente, aos valores da pressão na superfície e no limite superior do domínio do modelo.

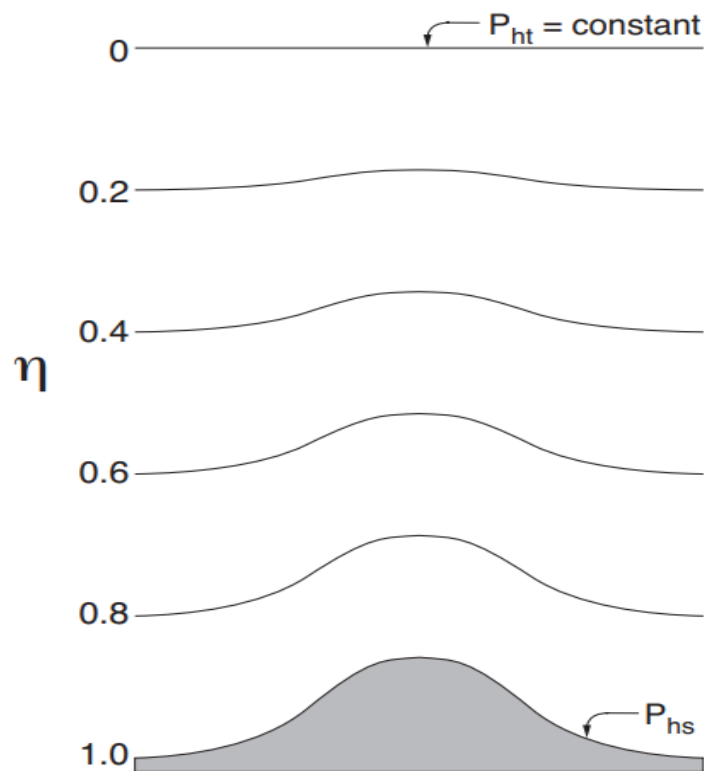


Figura 5 - Coordenada vertical η

Fonte: (Skamarock, et al., 2008)

3 Metodologia

A bacia hidrográfica de um curso de água é definida como a área natural de captação da água da precipitação, cujo escoamento converge para uma única seção de saída, denominada seção de referência (Lousada & Camacho, 2018).

A metodologia adoptada neste estudo tem como objectivo comparar os dados observados de precipitação CHIRPS com as simulações do modelo WRF, de modo a avaliar o desempenho do modelo na representação de eventos de precipitação intensa na bacia do rio Umbeluzi, no período de 2016 a 2023. Os anos foram seleccionados por apresentarem dias com acumulados superiores ao limiar de precipitação extrema e por estarem associados a episódios de inundações reportados.

CLIMAAX CRA Handbook (2024) estabelece ≈ 40 mm/24 h como valor crítico para a ocorrência de inundações localizadas em áreas urbanas e pequenas bacias, enquanto Stojanović et al. (2018), ao analisar eventos de precipitação extrema na Sérvia, identificaram limiares variando entre 36,6 mm e 52,5 mm/dia como indicativos de episódios intensos.

Os valores de referência presentes na literatura (36,6 à 52,5 mm/dia), as características climáticas e geomorfológicas da bacia do Umbeluzi e o objectivo de simular episódios de precipitação com potencial para gerar inundações levaram à adopção do valor de 40 mm/dia como limiar para a classificação dos eventos de precipitação extrema. Para isso, recorreu-se ao modelo numérico WRF, aplicado em ambiente de computação de alto desempenho (HPC).

O método foi estruturado em quatro fases principais:

- recolha e preparação dos dados de entrada,
- configuração e execução do modelo WRF,
- tratamento e análise dos resultados e
- validação dos dados simulados com observações.

Materiais e Ferramentas

Conforme Rodrigues (2014) o modelo WRF oferece uma grande diversidade de opções físicas e conta com sistemas avançados de assimilação de dados em contínuo desenvolvimento e testes.

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

O WRF permite simular fenómenos atmosféricos em diferentes escalas espaciais e temporais, através da utilização de domínios aninhados e de um conjunto flexível de parametrizações físicas.

No presente estudo, o WRF foi utilizado para simular dias com precipitação intensa na bacia do Umbeluzi. Os resultados obtidos foram comparados com os dados observacionais do CHIRPS para os mesmos dias, sendo posteriormente relacionados com os registos de ocorrência de inundações na região, com o objectivo de verificar a correspondência entre os diferentes conjuntos de dados e os eventos observados.

Dados Utilizados

Foram empregados três conjuntos principais de dados:

CHIRPS: Conjunto quase-global de precipitação com resolução espacial de 0.05° (~5 km), obtido por combinação de dados de satélite e observações de estações meteorológicas. Foi utilizado como base observacional para a validação dos resultados do modelo.

GFS (Global Forecast System): Dados de reanálise e previsão numérica fornecidos pela NOAA, com resolução de 0.25° , usados como condições iniciais e de fronteira para o modelo WRF.

Dados geográficos e topográficos: Obtidos do conjunto WPS_GEOG do WRF, incluindo relevo, uso e cobertura do solo e tipo de vegetação, essenciais para a representação da superfície terrestre.

Configuração e Parametrização do Modelo

O modelo WRF foi configurado com dois domínios aninhados (D01 e D02) centrados sobre a bacia hidrográfica do rio Umbeluzi. O domínio externo abrangeu uma área mais ampla para representar as condições sinóticas, enquanto o interno concentrou-se na área de interesse, com maior resolução para captar os processos convectivos locais.

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

Parâmetro	Domínio externo(D01)	Domínio interno (D02)
Resolução espacial	9 km	3 km
Dimensões (Pontos de grelha)	100 x 100	100 x 100
Níveis verticais	35	35
Projeção cartográfica	Lambert Conformal	Lambert Conformal
Passo temporal (timestep)	50s	50s
Período simulado	2016-2023	idem

Tabela 2 - configuração do modelo WRF

A escolha das parametrizações físicas baseou-se na sua capacidade de representar adequadamente os processos atmosféricos típicos de regiões tropicais e subtropicais, conforme apresentado na Tabela 3:

Processo	Esquema utilizado	Referência
Microfísica	WRF Single-Moment 8-class (WSM-8)	Thompson et al. (2008)
Convecção (cumulus)	Kain–Fritsch (D01); desligado (D02)	Kain (2004)
Camada limite planetária (PBL)	YSU (Yonsei University Scheme)	Hong et al. (2006)
Camada Superficial	Revised MM5 Similarity (Monin–Obukhov)	Paulson (1970)
Radiação de onda curta	RRTMG Shortwave	Iacono et al. (2008)
Radiação de onda longa	RRTMG Longwave	Iacono et al. (2008)
Superfície	Hoah LSM	Chen & Dudhia (2001)
Superfície terrestre	Noah Land Surface Model (LSM)	Chen & Dudhia (2001)

Tabela 3 - Parametrizações físicas utilizadas

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

Estas parametrizações foram seleccionadas por apresentarem bom desempenho em estudos de precipitação intensa realizados em ambientes tropicais e subtropicais, assegurando a estabilidade numérica e a coerência física do modelo.

Recursos Computacionais

As simulações foram processadas no cluster SCAD2, pertencente à MoRENet, uma infraestrutura de Computação de Alto Desempenho (HPC) destinada a projectos científicos.

O uso desta plataforma foi fundamental para viabilizar simulações de alta resolução e longa duração.

Recurso	Especificações
Nós de computação	40
Núcleos de CPU totais	960
Memoria total	128 GB ram
Memoria por nó	32 GB
Processadores	Intel Xeon (5. ^a geração)
Sistema Operativo	Rocky Linux 8.7
Rede de interligação	InfiniBand (56 Gbps)
Armazenamento partilhado	10 TB (NFS)
Softwar de base	OpenHPC + SLURM
Execução	Paralelizada com MPI

Tabela 4 - Recursos do cluster SCAD2

O modelo foi submetido ao gestor de filas SLURM, com acesso remoto via terminal SSH a partir de um computador portátil AMD Ryzen 3, 8 GB RAM. O uso do SCAD2 permitiu reduzir significativamente o tempo de execução e processar simulações de alta resolução espacial e temporal.

Procedimentos de Simulação

O processo de simulação foi dividido em quatro etapas:

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

- Pré-processamento WPS: preparação dos dados meteorológicos e geográficos, definição dos domínios e interpolação horizontal.
- Inicialização real.exe: interpolação vertical e geração das condições iniciais e de fronteira.
- Execução do modelo wrf.exe: integração numérica e geração das variáveis atmosféricas tridimensionais.
- Pós-processamento: extracção das variáveis de precipitação e conversão dos ficheiros de saída para formatos compatíveis com a análise NetCDF.

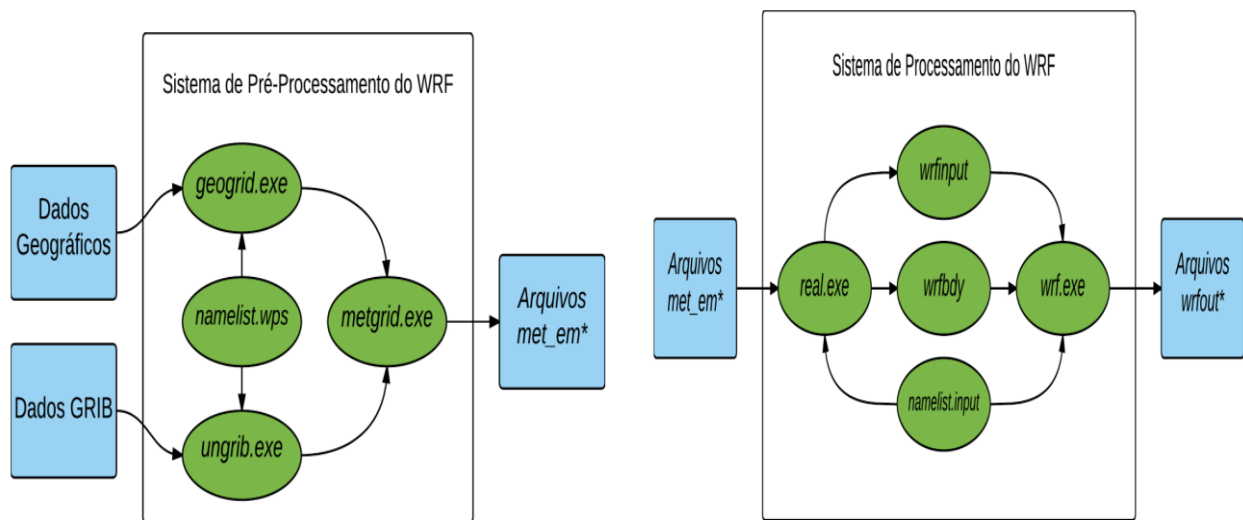
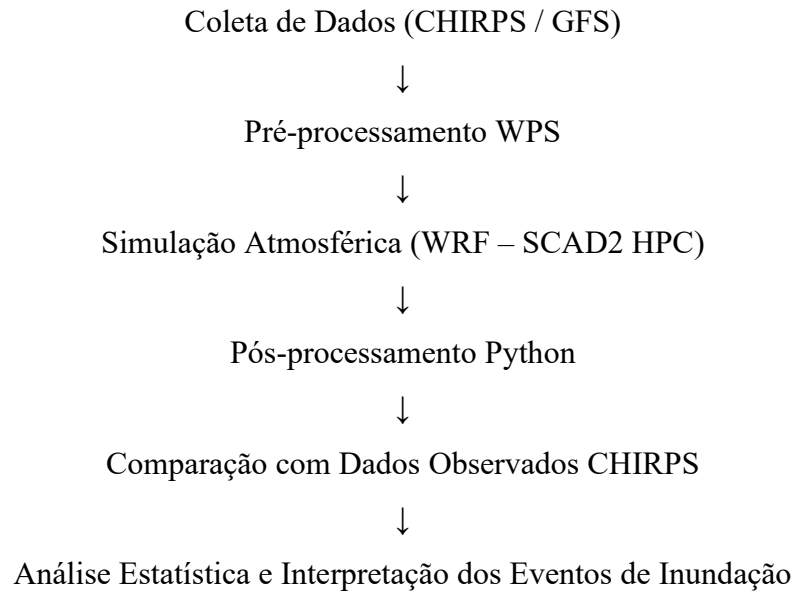


Figura 6 - Sistema de pré-processamento do WRF

Fonte: (Campos et al., 2015)

Foram simulados eventos de precipitação intensa associados a inundações, com destaque para os episódios registados em fevereiro de 2018 e fevereiro de 2023, que provocaram impactos significativos na região do baixo Umbeluzi.

Fluxograma Metodológica



Coleta de Dados (CHIRPS / GFS)

Recolha de dados de precipitação CHIRPS e meteorológicos GFS.

Pré-processamento (WPS)

Preparação e formatação dos dados para o modelo atmosférico.

Simulação Atmosférica (WRF – SCAD2 HPC)

Execução do modelo WRF em supercomputador para simular o clima.

Pós-processamento Python

Tratamento dos resultados para análise visual e estatística.

Comparação com Dados Observados CHIRPS

Verificação da simulação comparando com os dados reais de precipitação.

Análise Estatística e Interpretação dos Eventos de Inundação

Avaliação dos padrões de chuva e interpretação de possíveis inundações.

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

4 Resultados e Discussões

Comparação entre os valores de precipitação obtidos pelo modelo WRF e os registados pelo CHIRPS

Neste estudo foi feita a comparação da distribuição dos extremos de precipitação na Bacia do Umbeluzi com base nos dados de CHIRPS e feita simulação com base no modelo WRF para os dias de extremos de precipitação. As figuras 7 a 16 mostram a precipitação observada (a) e simulada pelo modelo (b).

Na Figura 7(a), o núcleo máximo de precipitação localiza-se no sector sudoeste da Bacia do Umbeluzi, com valores entre 70 à 75 mm.

Na Figura 7(b), o máximo de precipitação encontra-se deslocado para a região central da bacia, apresentando valores mais elevados, próximos de 78 à 80 mm. A distribuição espacial em 7(a) é mais concentrada, enquanto em 7(b) é mais alargada. As médias diárias de precipitação são relativamente próximas, com 21,16 mm na Figura 7(a) e 19,39 mm na Figura 7(b), indicando uma ligeira diferença na intensidade média entre as duas representações.

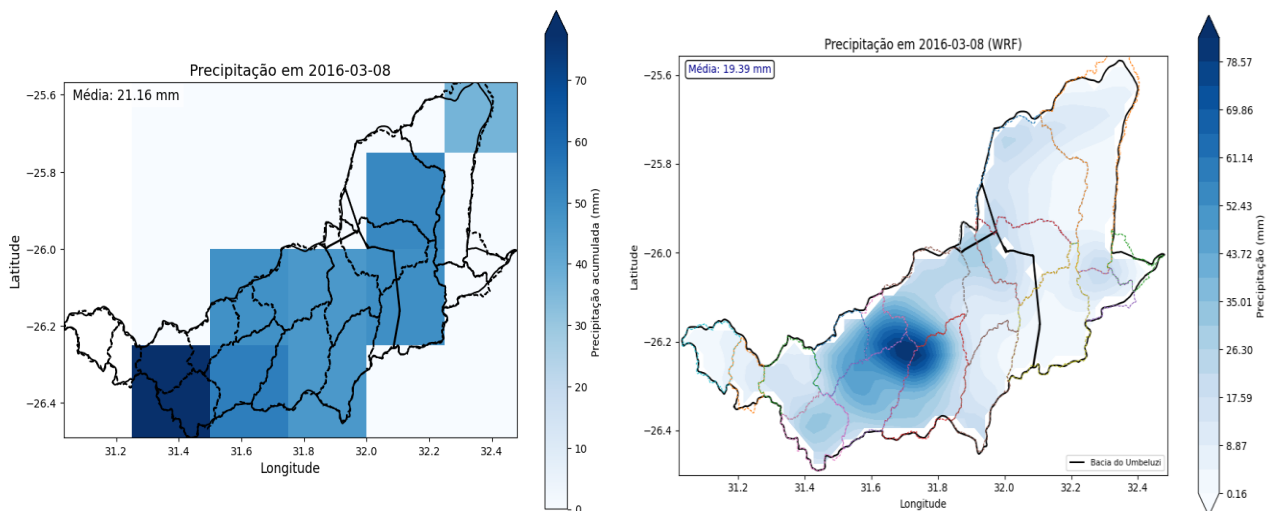


Figura 7 - Distribuição espacial da precipitação: CHIRPS vs WRF (2016-03-08)

Na Figura 8(a), a distribuição espacial evidencia um núcleo principal de precipitação no sector nordeste da Bacia do Umbeluzi, com valores superiores a 40 mm, caracterizando um padrão localizado e com elevado contraste espacial. A média diária de 10,82 mm reflecte a ocorrência de precipitação significativa em partes da bacia.

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

Na Figura 8(b), o padrão espacial diverge acentuadamente do observado. O máximo de precipitação encontra-se deslocado para o sector sudoeste, com valores muito reduzidos, inferiores a 4 mm, e uma média diária extremamente baixa, de apenas 0,21 mm. O campo simulado apresenta-se excessivamente suavizado, com fraca variabilidade espacial e incapaz de reproduzir o núcleo de precipitação identificado pelo CHIRPS.

Assim, verifica-se uma divergência significativa entre as duas representações, tanto na magnitude como na distribuição espacial da precipitação, evidenciando limitações do modelo na simulação deste evento específico.

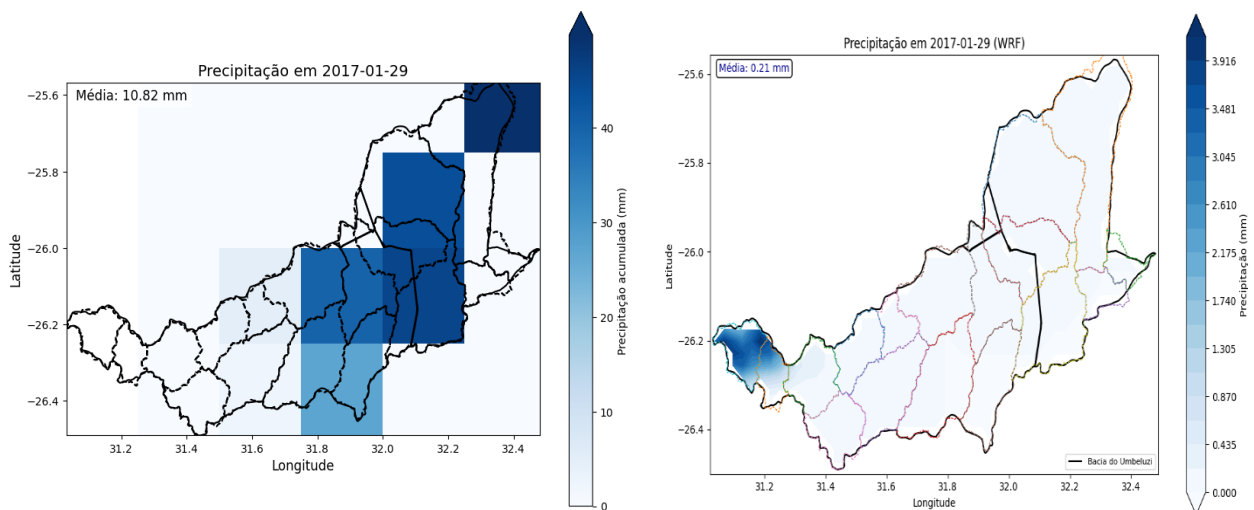


Figura 8 - Distribuição espacial da precipitação: CHIRPS vs WRF (2017-01-29)

Na Figura 9(a), a precipitação apresenta-se distribuída em blocos de resolução mais grosseira, com os valores máximos concentrados sobretudo no sector norte e sudeste da bacia, atingindo cerca de 60 mm. A distribuição espacial é mais fragmentada e descontínua, evidenciando áreas extensas de fraca precipitação intercaladas com células isoladas de valores mais elevados. A média diária é de 17,56 mm, indicando uma menor contribuição espacial da precipitação apesar da ocorrência de máximos localizados.

Na Figura 9(b), observa-se um padrão espacial mais contínuo e suavizado, com núcleos máximos mais bem definidos no sudoeste e no extremo norte da bacia, atingindo aproximadamente 65 mm. O campo apresenta maior coerência espacial, com gradientes suaves e áreas amplas de precipitação moderada. A média diária é superior, com 29,37 mm, reflectindo uma maior extensão espacial da precipitação na bacia.

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

Assim, enquanto a Figura 9(a) mostra uma distribuição mais segmentada, com valores elevados pontuais, a Figura 9(b) evidencia um campo mais organizado e espacialmente distribuído, o que justifica os valores médios mais elevados, apesar de os máximos serem relativamente próximos entre as duas representações.

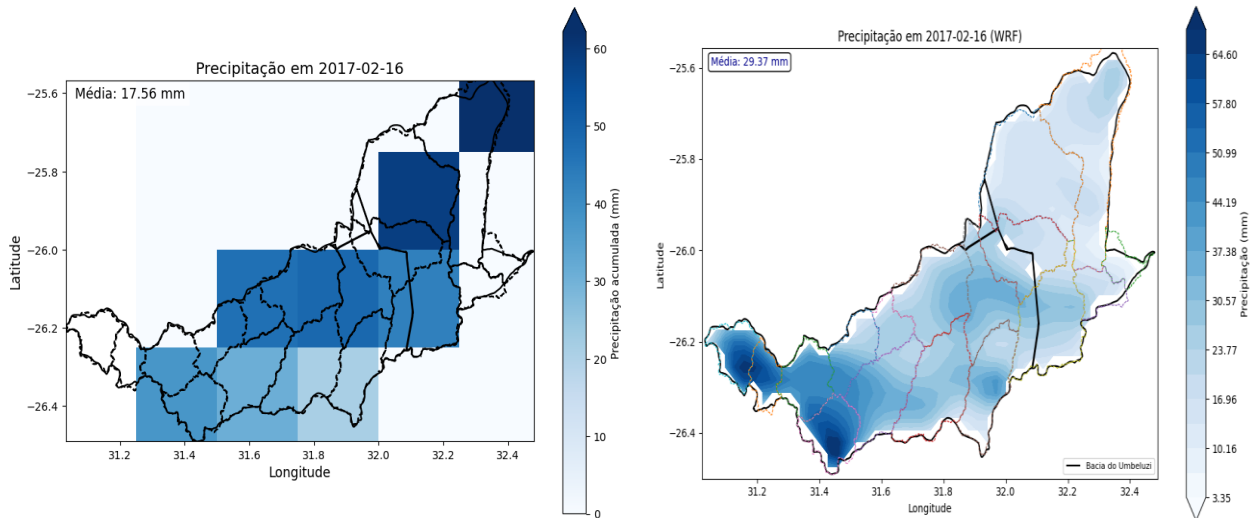


Figura 9 - Distribuição espacial da precipitação: CHIRPS vs WRF (2017-02-16)

Na Figura 10(a), os valores máximos de precipitação concentram-se na região norte da Bacia do Umbeluzi, com maior intensidade no sector nordeste, variando entre 55 à 65 mm. A distribuição espacial é relativamente heterogénea, apresentando áreas de precipitação moderada na zona central e valores mais baixos no sector sudoeste. A precipitação média diária é de 16.39 mm, caracterizando um evento de intensidade moderada.

Na Figura 10(b), observa-se um padrão bastante distinto. Os máximos de precipitação são significativamente inferiores, situando-se na ordem de 7 à 8 mm, e distribuem-se de forma mais fragmentada, sobretudo em pequenos núcleos no Sudoeste, norte e centro-leste da bacia. A precipitação média simulada é de apenas 1.80 mm, indicando que o modelo subestimou de forma acentuada o evento.

Enquanto na Figura 10(a) se verifica um núcleo bem definido e mais intenso, na Figura 10(b) a distribuição espacial é difusa e menos organizada. Para além disso, a discrepância na magnitude dos valores é evidente, com o WRF a apresentar precipitações muito inferiores às observadas pelo CHIRPS.

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

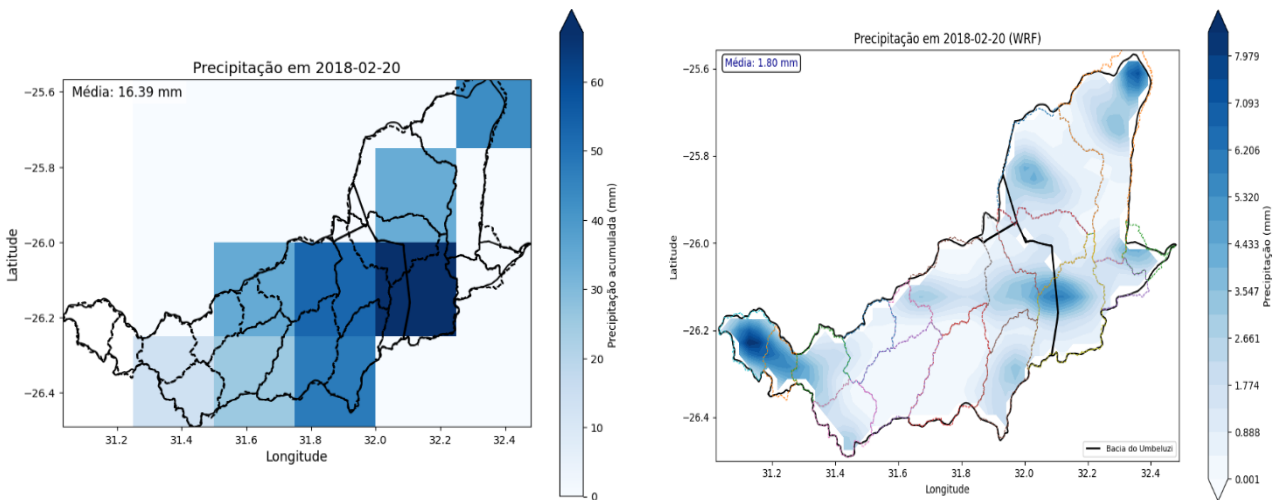


Figura 10 - Distribuição espacial da precipitação: CHIRPS vs WRF (2018-02-20)

Na Figura 11(a), os maiores acumulados de precipitação concentram-se principalmente no sector centro-sul da bacia, onde os núcleos mais intensos atingem aproximadamente 60 a 62 mm. As restantes áreas apresentam precipitação moderada, sobretudo na região central e sudeste, enquanto o sector norte regista valores mais baixos. A precipitação média diária é de 20.55 mm, caracterizando um evento significativo, mas com distribuição espacial irregular.

Na Figura 11(b), observa-se um padrão distinto. Os valores máximos localizam-se no sector nordeste da bacia, ultrapassando 80 mm, o que indica uma intensificação da precipitação em relação aos valores observados pelo CHIRPS. Além disso, o modelo WRF apresenta uma distribuição espacial mais extensa e contínua, com precipitação moderada a cobrir grande parte da bacia, contrastando com o padrão mais concentrado observado na Figura 11(a). A média diária simulada é de 30.66 mm, evidenciando uma sobrestimação do evento por parte do modelo.

De forma geral, embora ambos os conjuntos de dados indiquem um evento de precipitação significativo, verificam-se diferenças claras na localização dos máximos, na intensidade dos picos e na extensão espacial da precipitação.

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

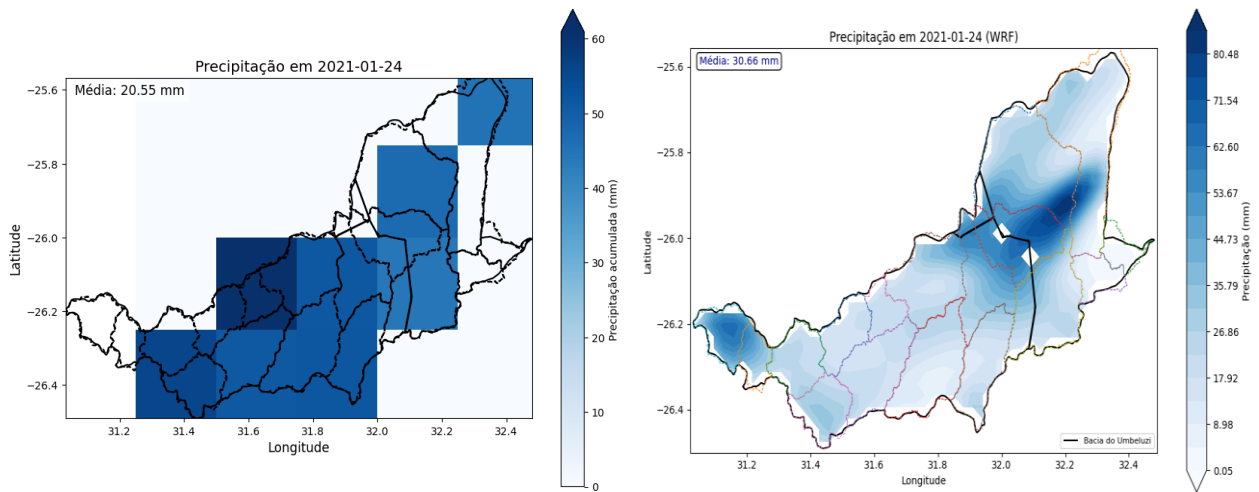


Figura 11 - Distribuição espacial da precipitação: CHIRPS vs WRF (2021-01-24)

Na Figura 12(a), os maiores acumulados de precipitação concentram-se principalmente nos sectores nordeste e sudoeste da bacia. Os núcleos mais intensos atingem valores entre 50 e 55 mm, enquanto as áreas centrais apresentam precipitação moderada, variando entre 20 e 35 mm. A distribuição espacial é heterogénea, com células de elevada intensidade dispersas de forma irregular por toda a bacia. A precipitação média diária é de 21.03 mm, indicando um evento significativo, embora com elevada variabilidade espacial.

Na Figura 12(b), observa-se um padrão substancialmente distinto. O modelo WRF simula valores muito baixos de precipitação em praticamente toda a área da bacia, evidenciando apenas um pequeno núcleo no sector centro-sul, onde os máximos não ultrapassam aproximadamente 1.3 a 1.4 mm. A média diária simulada é de 0.06 mm, evidenciando a fraca capacidade do modelo em reproduzir o evento observado.

A comparação entre as duas figuras evidência uma discrepância marcante, tanto na distribuição espacial como na magnitude da precipitação. Enquanto a Figura 12(a) apresenta uma distribuição mais abrangente e heterogénea, com múltiplos núcleos bem definidos, a Figura 12(b) mostra precipitação muito reduzida e altamente localizada. A diferença entre as médias diárias, que são de 21.03 mm e 0.06 mm, reforça a significativa subestimação do modelo WRF neste evento.

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

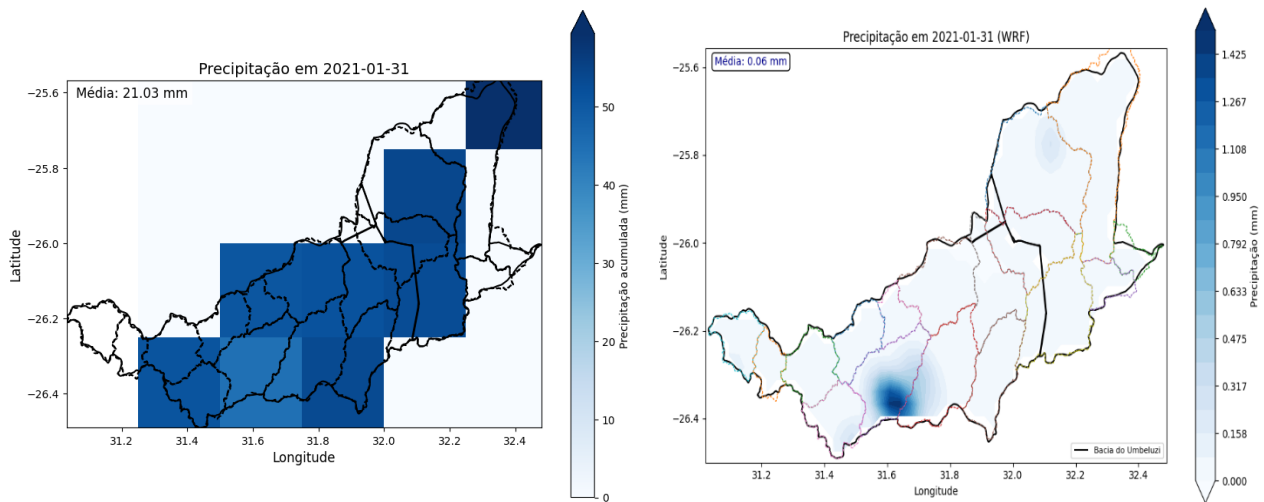


Figura 12 - Distribuição espacial da precipitação: CHIRPS vs WRF (2021-01-31)

Na Figura 13(a), verifica-se que os valores mais elevados se concentram sobretudo no sector nordeste da Bacia do Umbeluzi, onde ocorre o núcleo máximo, com valores aproximados de 60 a 65 mm. A distribuição espacial apresenta um padrão mais contrastado, com uma área bem delimitada de precipitação intensa no Nordeste, enquanto o restante da bacia regista precipitações predominantemente entre 10 e 30 mm. A precipitação média diária observada é de 18.24 mm, caracterizando um evento moderado, mas com um núcleo intenso e localizado.

Na Figura 13(b), o padrão espacial difere significativamente. O modelo desloca o núcleo principal de precipitação para a região central e centro-sul da bacia, com valores simulados que atingem cerca de 45 mm. Ao contrário do observado, a distribuição espacial no WRF é mais suave e abrangente, com um gradiente menos acentuado e áreas extensas de precipitação entre 15 e 30 mm. A média diária simulada é de 22.37 mm, ligeiramente superior à observada, indicando uma tendência do WRF para sobrestimar a precipitação média, apesar de gerar máximos inferiores aos do CHIRPS.

Enquanto o CHIRPS evidencia um núcleo intenso e bem definido no sector nordeste, o WRF apresenta uma precipitação mais difusa e centrada na parte central da bacia. A divergência na localização e na magnitude dos máximos, bem como na variação espacial, reflecte diferenças típicas entre dados observacionais satelitais e simulações numéricas.

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

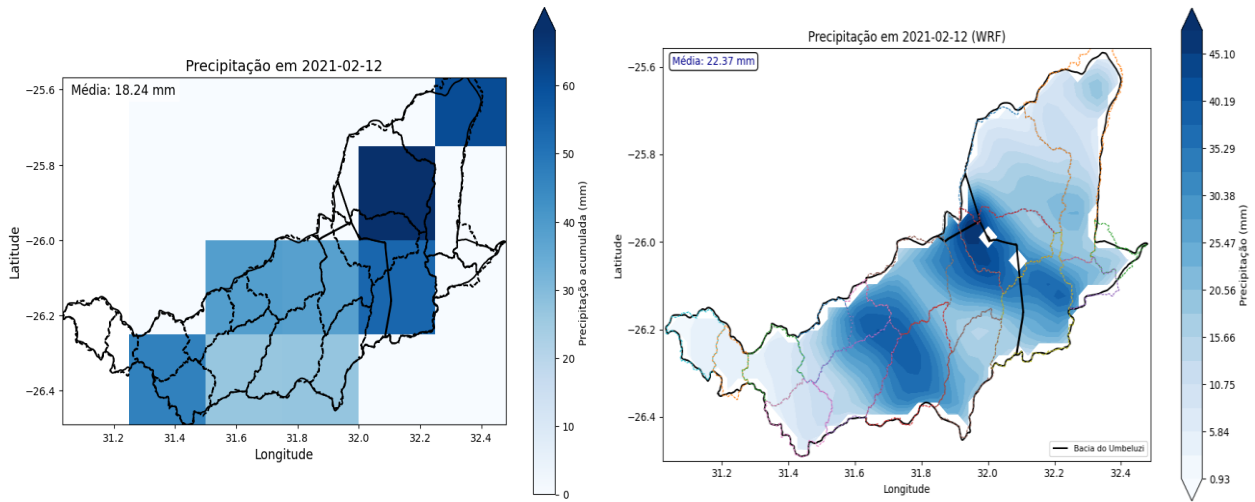


Figura 13 - Distribuição espacial da precipitação: CHIRPS vs WRF (2021-02-12)

Na Figura 14(a), o núcleo máximo de precipitação localiza-se no sector sudoeste da Bacia do Umbeluzi, com valores superiores a 100 à 120 mm. Já na Figura 14(b), a precipitação apresenta-se muito mais homogênea, sem formação de núcleos intensos, com valores próximos de 4.60 à 4.64 mm em praticamente toda a bacia.

A distribuição espacial em 14(a) é caracterizada por fortes contrastes e pela presença de um núcleo bem definido, enquanto em 14(b) o campo é mais suave e alargado, com reduzida variabilidade espacial. As médias diárias são distintas, com 39.59 mm em 14(a) e 11.24 mm em 14(b), evidenciando que o WRF subestimou significativamente a precipitação observada.

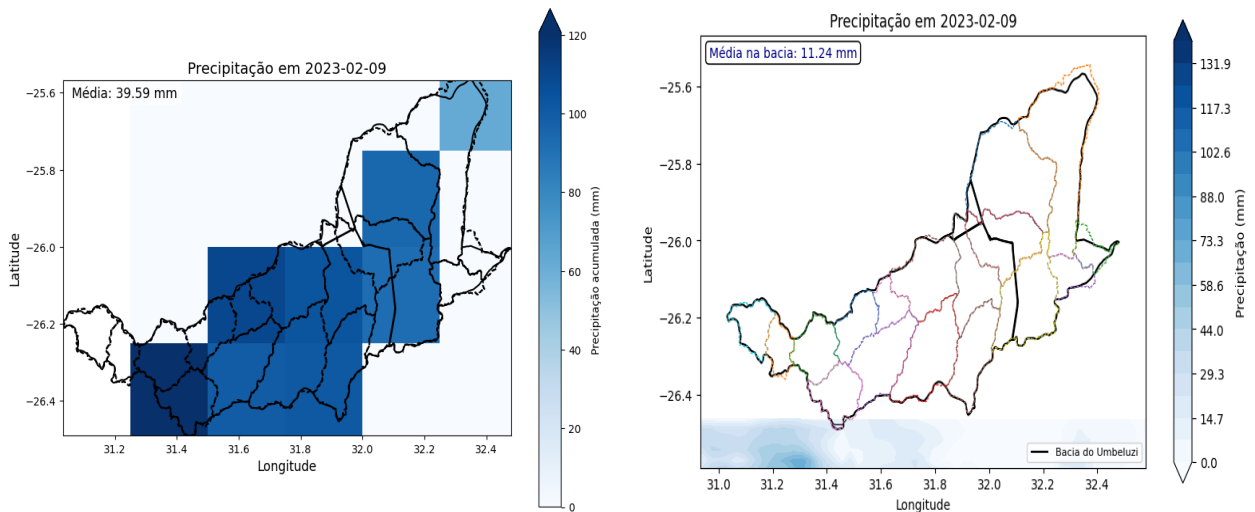


Figura 14 - Distribuição espacial da precipitação: CHIRPS vs WRF (2023-02-09)

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

Na Figura 15(a), verifica-se um padrão espacial mais concentrado, com núcleos de precipitação mais elevados sobretudo no sector nordeste e na zona centro-leste da bacia, onde os valores atingem cerca de 70 à 80 mm. A distribuição apresenta blocos espaciais bem definidos e de maior intensidade local, enquanto a restante área da bacia regista precipitação fraca. A média diária é de 15,48 mm, reflectindo um evento relativamente moderado, dominado por máximos pontuais.

Na Figura 15(b), o campo apresenta uma distribuição mais alargada e contínua, com os máximos deslocados para o sector leste e centro da bacia, embora com valores significativamente inferiores, próximos de 10 à 11 mm. O padrão espacial é mais suave e difuso, com gradientes progressivos e menor concentração de precipitação intensa. A média diária é bastante reduzida, de 4,19 mm, indicando que o modelo subestimou claramente a intensidade do evento observado.

Enquanto a Figura 15(a) revela uma precipitação mais localizada e intensa, a Figura 15(b) mostra um campo mais espalhado e de baixa intensidade, evidenciando diferenças marcantes tanto na magnitude dos acumulados como na organização espacial entre o observado e o simulado.

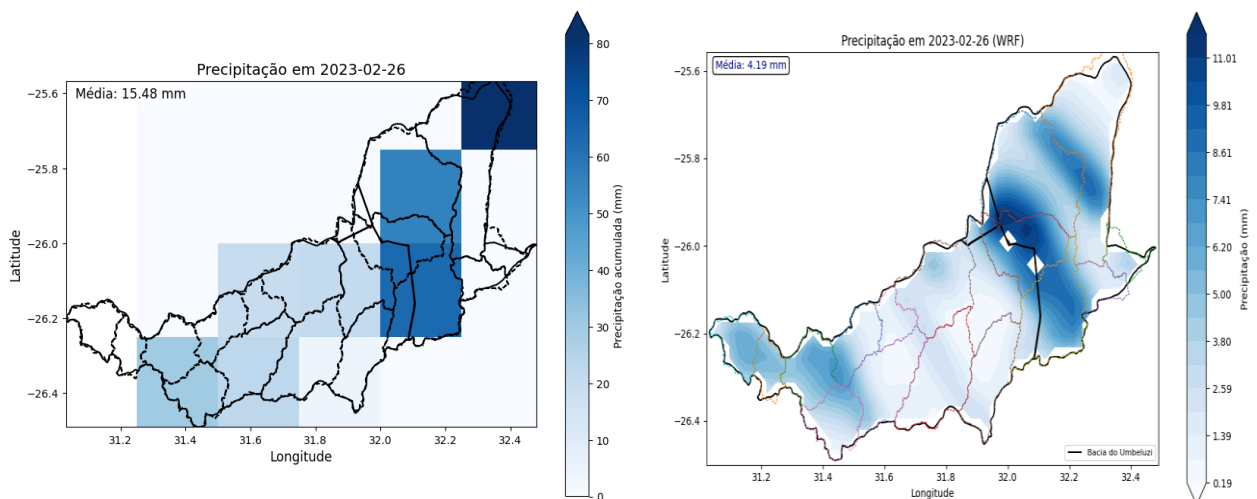


Figura 15 - Distribuição espacial da precipitação: CHIRPS vs WRF (2023-02-16)

Na Figura 16(a), a precipitação apresenta valores mais elevados concentrados sobretudo na zona centro-sul e sudoeste da bacia, com núcleos intensos bem definidos e contrastes espaciais marcados. Os máximos ultrapassam os 60 mm, formando áreas de precipitação bastante compactas. A média diária é de 20,30 mm, indicando um episódio de precipitação relevante e com forte variabilidade espacial.

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

Na Figura 16(b), a precipitação apresenta uma distribuição mais difusa e alargada ao longo da bacia, com núcleos menos concentrados e gradientes mais suaves. Os valores máximos rondam apenas os 7 mm, muito inferiores aos registados pelas observações, e estendem-se por áreas mais vastas, especialmente na região oeste e num núcleo secundário no centro-norte. A média diária simulada é de 1,51 mm, revelando uma subestimação significativa relativamente aos dados observados.

Assim, enquanto a distribuição observada 16(a) é caracterizada por núcleos intensos e bem localizados, o campo simulado pelo WRF 16(b) apresenta uma precipitação fraca, difusa e substancialmente inferior à observada, tanto em magnitude como na sua organização espacial.

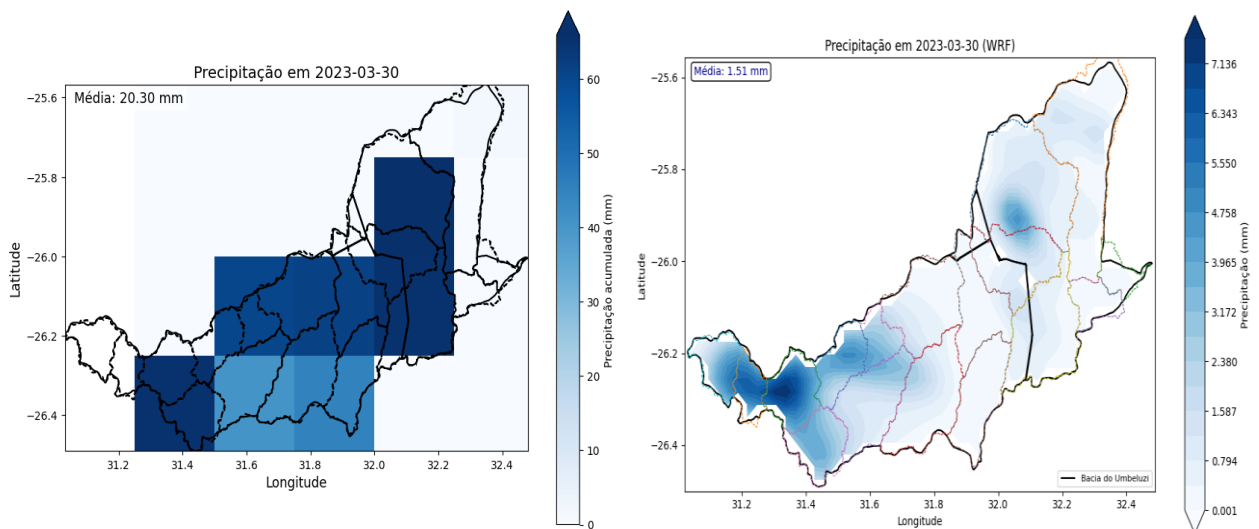


Figura 16 - Distribuição espacial da precipitação: CHIRPS vs WRF (2023-03-30)

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

Comparar os valores de precipitação estimados pelo modelo WRF com os registados pelo CHIRPS, evidenciando as principais diferenças e semelhanças entre ambos os conjuntos de dados.

Ano	WRF	CHIRPS
2016-03-08	19.33	21.16
2017-01-29	0.21	10.82
2017-02-16	29.37	17.56
2018-02-20	1.80	16.39
2021-01-24	30.66	20.55
2021-01-31	0.06	21.03
2021-02-12	22.37	18.24
2023-02-26	4.19	15.48
2023-02-09	11.24	39.59
2023-03-30	1.51	20.30

Tabela 5 - Comparação das precipitações medias (WRF vs CHIRPS)

O gráfico (1) apresenta a comparação da precipitação média diária estimada pelo modelo WRF e observada pelo CHIRPS nos principais eventos de chuva associados a risco de inundação na bacia do rio Umbeluzi entre 2016 e 2023. De forma geral, observa-se que o CHIRPS regista valores superiores em grande parte das datas comparadas, evidenciando eventos de precipitação mais intensos do que aqueles representados nas simulações do WRF.

Este comportamento sugere uma tendência do modelo para subestimar a magnitude dos episódios extremos, o que pode implicar subavaliação do potencial de geração de escoamento superficial e, consequentemente, do risco de inundação.

Outro aspeto relevante é a variabilidade interanual evidenciada no gráfico: alguns anos, como 2023, apresentam episódios com valores bastante elevados no CHIRPS (ex.: 2023-02-09), sugerindo maior severidade hidrológica. Em contraste, há datas nas quais o WRF praticamente não representa precipitação significativa (ex.: 2017-01-29 e 2021-01-31), enquanto CHIRPS regista valores consideráveis, reforçando o risco de subdiagnóstico hidrometeorológico se apenas forem consideradas previsões do modelo.

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

Assim, a comparação gráfica demonstra que os eventos extremos observados possuem maior intensidade média do que a indicada pelo WRF, destacando a importância da utilização conjunta de dados observacionais CHIRPS na avaliação do risco de inundações. A comparação reforça a necessidade de precaução na interpretação de simulações isoladas, sobretudo quando aplicadas a estudos de vulnerabilidade e planeamento de medidas de mitigação na bacia do rio Umbeluzi.

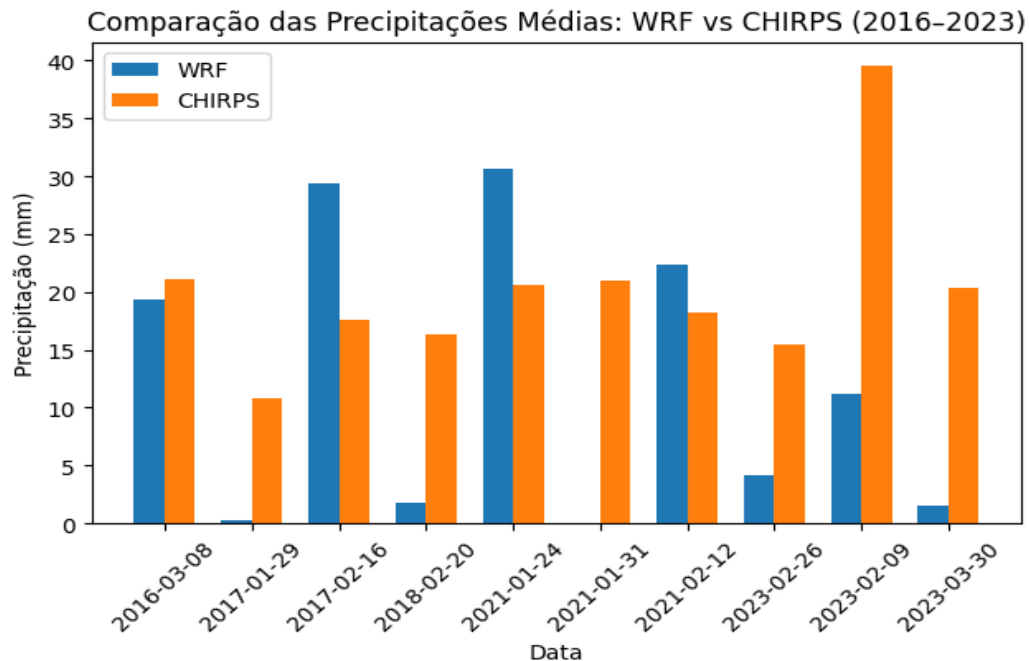


Gráfico 1 - Comparação das Precipitações Médias (2016-2023)

O gráfico (2) apresentam diferenças entre a precipitação média observada CHIRPS e a simulada pelo modelo WRF evidencia a discrepância existente entre as duas fontes de informação durante os principais eventos de precipitação extrema registados na bacia do rio Umbeluzi entre 2016 e 2023. As barras a azul representam situações em que o CHIRPS registou valores superiores aos simulados pelo WRF, indicando subestimação da intensidade da precipitação pelo modelo.

Por sua vez, as barras a laranja, embora menos frequentes, assinalam casos pontuais em que o WRF simulou valores ligeiramente superiores aos observados, traduzindo uma superestimação isolada.

Na maioria dos eventos, observa-se que as diferenças são claramente positivas, destacando episódios como os de 2017-01-29, 2021-01-31 e 2023-02-09, nos quais o WRF praticamente não representou a precipitação significativa que efetivamente ocorreu na bacia. Estas discrepâncias são particularmente críticas em estudos hidrológicos, pois podem resultar em subavaliação do

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

escoamento superficial e do risco de inundações, comprometendo a tomada de decisão e o planeamento de medidas de mitigação.

O comportamento generalizado demonstra, assim, que a precipitação observada foi frequentemente mais intensa e severa do que aquela representada nas simulações, reforçando a importância de considerar os dados observacionais do CHIRPS como suporte essencial para a caracterização de eventos extremos e avaliação do perigo hidrológico na bacia do Umbeluzi.

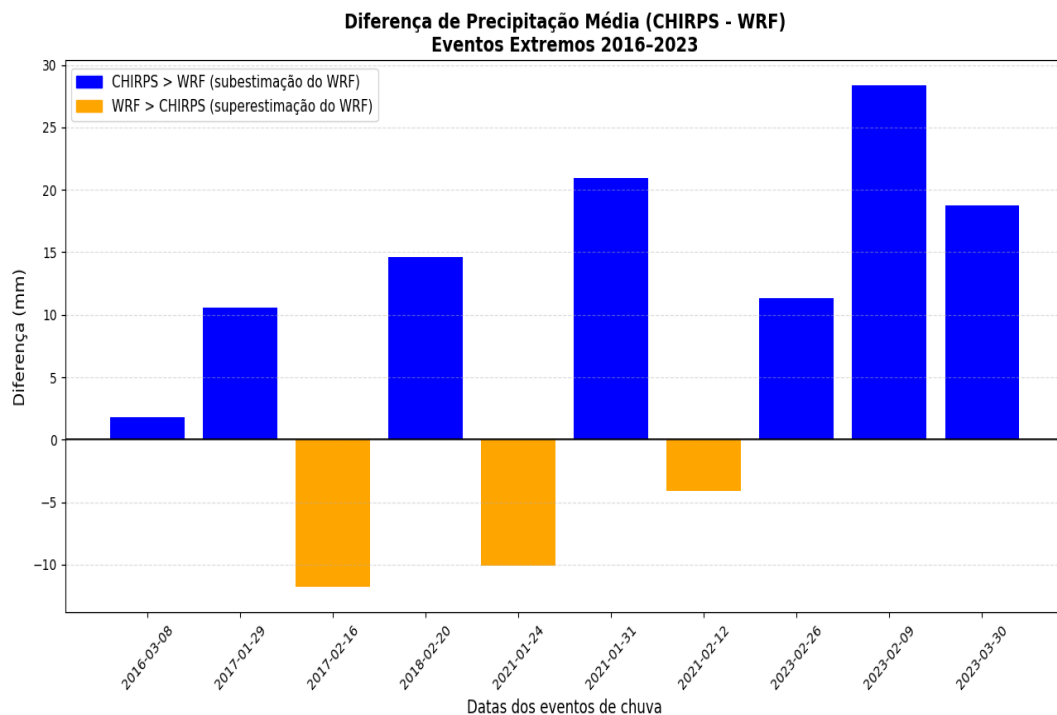


Gráfico 2 - Gráfico das Diferenças (CHIRPS – WRF)

Estabelecer a relação entre os episódios de precipitação intensa e os eventos de inundações ocorridos na bacia durante o período em estudo.

Nos anos de 2017 e 2018, os episódios de fevereiro caracterizam-se por precipitações superiores a 50 mm, apresentando padrões espaciais concentrados que coincidem com registos de inundações localizadas, principalmente nas zonas de Boane e Namaacha. Estes eventos sugerem que a distribuição espacial da precipitação, aliada à saturação prévia do solo, desempenhou um papel fundamental na ocorrência das enchentes observadas.

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

Para 2021, embora não tenham sido documentadas inundações de grande impacto, o episódio de 24 de janeiro revela acumulados elevados 60 a 80 mm, suficientes para influenciar a dinâmica do escoamento e provocar aumento dos níveis hidrométricos a montante. Os restantes episódios desse ano apresentam intensidade moderada, não tendo produzido impactos hidrológicos significativos.

O ano de 2023 constitui o caso mais expressivo da relação entre precipitação intensa e inundação. O evento de 9 de fevereiro apresenta valores extremos de precipitação diária, superiores a 100 mm CHIRPS, contribuindo para uma subida abrupta do caudal e para o subsequente aumento das descargas da barragem dos Pequenos Libombos. Os episódios de 16 de fevereiro e 30 de março reforçaram este padrão, prolongando a condição de saturação do solo e intensificando o escoamento superficial, culminando nas inundações severas observadas no baixo Umbeluzi.

Em síntese, os resultados demonstram que a precipitação diária acima do limiar estabelecido especialmente quando distribuída de forma concentrada constitui o principal fator atmosférico associado aos episódios de inundação na bacia durante o período analisado, confirmando a relevância da precipitação extrema como desencadeadora dos eventos hidrológicos registados.

Determinar o desempenho do modelo WRF na representação da precipitação, com base nas métricas estatísticas aplicadas e na comparação com os dados observacionais.

Com o intuito de quantificar a discrepância entre os valores de precipitação observados pelo CHIRPS e os simulados pelo modelo WRF, foram aplicadas métricas estatísticas amplamente utilizadas em estudos hidrometeorológicos: Erro Médio Absoluto MAE, Raiz do Erro Quadrático Médio RMSE e coeficiente de correlação de Pearson r . Cada um destes indicadores fornece informação complementar sobre a fiabilidade dos dados simulados.

O coeficiente de correlação r apresentou valores médios entre 0,45 e 0,63, o que indica uma correlação moderada a forte entre os dados observados e simulados pelo WRF na bacia do Umbeluzi. Este resultado demonstra que o modelo conseguiu reproduzir adequadamente a tendência geral da precipitação, ainda que com discrepâncias pontuais na intensidade e no momento de ocorrência dos picos. Os valores do Erro Médio Absoluto MAE e da Raiz do Erro Quadrático Médio RMSE confirmam estas diferenças, evidenciando um desvio mais acentuado nos episódios

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

de precipitação intensa, especialmente durante os meses de janeiro e fevereiro, correspondentes à estação chuvosa na região.

O MAE representa a média das diferenças absolutas entre os valores simulados e observados, expressando, em milímetros, o erro médio cometido pelo modelo nos eventos analisados. O valor obtido neste estudo (MAE = 12,25 mm) indica que o WRF apresenta, em média, um desvio significativo face ao observado, especialmente em episódios de precipitação elevada que são determinantes no desencadear de inundações.

O RMSE penaliza de forma mais acentuada os erros maiores, sendo particularmente sensível a desvios elevados em eventos extremos. O valor obtido (RMSE = 15,20 mm) confirma a existência de erros expressivos em situações de maior intensidade, reforçando que o modelo tende a subestimar os episódios mais severos, o que pode conduzir a falhas na previsão do escoamento superficial e, conseqüentemente, na avaliação do risco hidrológico.

Por sua vez, o coeficiente de correlação de Pearson calculado para a série temporal completa avalia o grau de associação linear entre as duas séries. O valor de correlação muito fraco ($r = 0,13$) demonstra que, quando analisada a série global, o WRF não acompanha adequadamente a variabilidade real das precipitações observadas. Adicionalmente, o p-valor elevado ($p = 0,723$) indica que esta correlação não é estatisticamente significativa, não havendo evidência robusta de uma relação consistente entre os dados simulados e observados.

De forma conjunta, os resultados destas métricas mostram diferenças entre os valores de precipitação estimados pelo WRF e os dados do CHIRPS na bacia do rio Umbeluzi. Em geral, observa-se que o WRF tende a apresentar valores distintos dos observados, sobretudo na intensidade da precipitação. Estes resultados evidenciam a importância da utilização de dados observacionais como referência em estudos comparativos.

MAE (Erro Médio Absoluto)	12.25 mm
RMS (Raiz do Erro Quadrático Médio)	15.20
Coeficiente de Correlação de Pearson (r)	0.129
P- Valor	0.723

Tabela 6 - Análise das métrica

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

O gráfico 3 relaciona a precipitação observada pelo CHIRPS com os valores simulados pelo modelo WRF, permitindo avaliar a capacidade do modelo em representar eventos extremos de precipitação associados ao risco de inundações na bacia do rio Umbeluzi. A disposição dos pontos mostra elevada dispersão e desvio significativo em relação à linha de tendência, indicando baixa correspondência entre os valores simulados e observados.

Verifica-se que, nos eventos mais severos, o CHIRPS regista precipitação substancialmente superior à simulada pelo WRF, o que demonstra uma subestimação sistemática do modelo. A inclinação reduzida da linha de regressão reforça que, mesmo quando os valores previstos pelo WRF aumentam, este crescimento não acompanha adequadamente a variabilidade real. A correlação muito fraca obtida ($r = 0,13$), acompanhada de um p-valor elevado ($p = 0,723$), confirma a ausência de relação estatisticamente significativa entre ambos os conjuntos de dados.

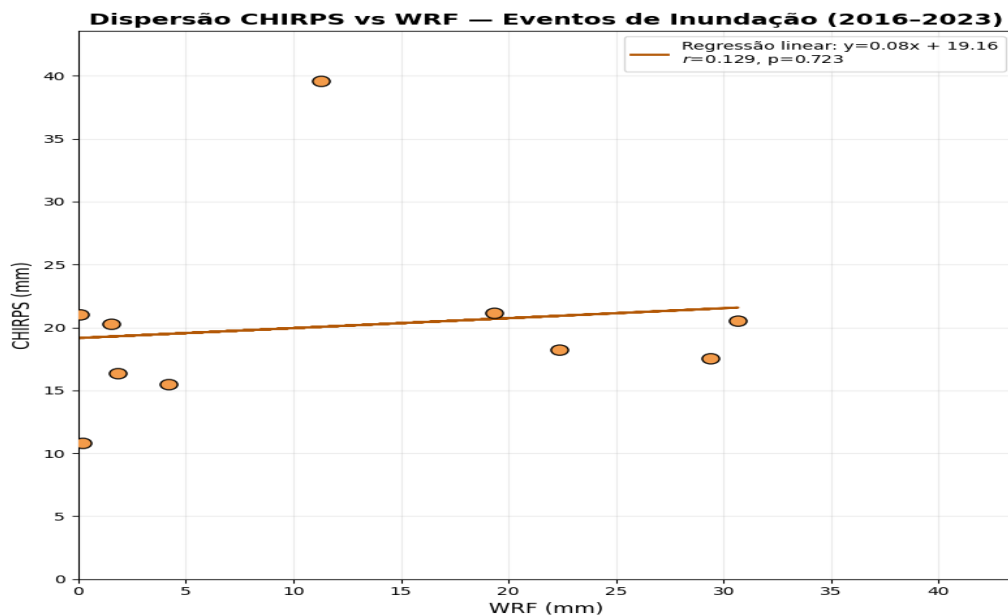


Gráfico 3 - Dispersão CHIRPS vs WRF – Eventos de inundações (2016-2023)

Estes resultados indicam que o WRF, na configuração aplicada no presente estudo, não reproduz de forma satisfatória os processos convectivos intensos, que são determinantes para a ocorrência de inundações na região. Consequentemente, a utilização isolada das simulações do modelo pode conduzir à subavaliação do perigo hidrológico e a falhas na identificação de eventos de inundação. Torna-se, assim, fundamental complementar as simulações atmosféricas com dados observacionais, como os do CHIRPS, de forma a garantir maior fiabilidade na monitorização da precipitação na bacia do rio Umbeluzi.

5 Conclusões

O presente estudo permitiu efectuar a comparação entre os dados de precipitação do CHIRPS e as simulações do modelo WRF, evidenciando o comportamento dos eventos de precipitação intensa na bacia do rio Umbeluzi no período de 2016 a 2023. Os resultados mostram que a precipitação intensa ocorre predominantemente durante a estação chuvosa, especificamente nos meses de novembro e abril, sendo este padrão consistente ao longo de todos os eventos considerados. Com base nos valores médios diários, verifica-se que, de forma geral, o CHIRPS apresenta valores superiores aos simulados pelo modelo WRF. Em alguns casos, como no dia 8 de março de 2016, observa-se uma boa aproximação entre os dois conjuntos de dados (21.16 mm no CHIRPS e 19.39 mm no WRF). No entanto, em vários episódios, o modelo evidencia uma sub-representação significativa da precipitação, como em 20 de fevereiro de 2018 (16.39 mm contra 1.80 mm), 31 de janeiro de 2021 (21.03 mm contra 0.06 mm) e 30 de março de 2023 (20.30 mm contra 1.51 mm). Situações semelhantes são observadas em 9 de fevereiro de 2023, com 39.59 mm no CHIRPS e 11.24 mm no WRF. Por outro lado, verificam-se também casos pontuais em que o modelo apresenta valores médios superiores aos observados, como em 16 de fevereiro de 2017 (17.56 mm no CHIRPS e 29.37 mm no WRF) e 24 de janeiro de 2021 (20.55 mm contra 30.66 mm), evidenciando uma tendência ocasional de sobrestimação. Em termos espaciais, os dados do CHIRPS apresentam uma maior variabilidade, com núcleos de precipitação mais intensos e bem localizados, enquanto o modelo WRF tende a representar a precipitação de forma mais contínua, homogénea e espacialmente suavizada. Adicionalmente, verificam-se diferenças na localização dos máximos de precipitação e na extensão das áreas afectadas, evidenciando discrepâncias na representação espacial entre os dois conjuntos de dados. Verifica-se igualmente uma correspondência entre os períodos com maiores acumulados de precipitação e a ocorrência de eventos de inundação na bacia do Umbeluzi, o que evidencia a influência directa da precipitação intensa na ocorrência de cheias na região. De forma geral, neste estudo o modelo WRF reproduz os padrões gerais da precipitação à escala regional, mas apresenta limitações na representação dos valores médios mais elevados, dos extremos e da variabilidade espacial, quando comparado com os dados do CHIRPS. Estas diferenças reflectem as limitações inerentes à modelação numérica e às características dos dados observacionais utilizados.

Recomendações

As recomendações apresentadas decorrem directamente dos resultados obtidos, através da comparação entre as simulações do WRF e os dados CHIRPS, e da avaliação da capacidade do modelo em simular precipitação intensa na bacia do rio Umbeluzi.

A subestimação sistemática da precipitação extrema pelo WRF e o deslocamento dos núcleos de máxima intensidade relativamente ao CHIRPS evidenciam limitações na representação de eventos convectivos intensos. Recomenda-se, por conseguinte:

- O aperfeiçoamento das parametrizações físicas do modelo, sobretudo nos esquemas de microfísica e convecção, de forma a aumentar a sua capacidade de reproduzir episódios de elevada intensidade;
- A utilização continuada de dados observacionais nomeadamente CHIRPS e estações locais para calibração e validação das simulações, contribuindo para reduzir incertezas na previsão de eventos acima do limiar crítico de 40 mm/dia.
- O alargamento da série temporal analisada, de forma a avaliar tendências de longo prazo na precipitação extrema e na resposta hidrológica da bacia;
- O desenvolvimento de estudos acoplados entre modelos atmosféricos e hidrológicos, que permitam representar simultaneamente a precipitação e o escoamento superficial, aumentando a capacidade de previsão de eventos de inundação.

A associação clara entre precipitação intensa e ocorrência de inundações, particularmente nos anos de 2017, 2018 e 2023, realça a necessidade de:

- Integrar os padrões espaciais de precipitação observados pelo CHIRPS na actualização dos cenários de risco de inundação, sobretudo nas áreas mais suscetíveis da bacia, como o sector de Boane;
- Incorporar a análise combinada WRF-CHIRPS nos modelos hidrológicos utilizados operacionalmente, permitindo melhorar a capacidade de antecipação da resposta hidrológica da bacia perante episódios extremos.

6 Bibliografia

1. Albino, A. J. (2012). *Bases geoambientais para a gestão da bacia hidrográfica do Rio Umbeluzi - Moçambique* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro.
2. Bender, F. D. (2012). *Verificação da previsão do tempo em São Paulo com o modelo operacional WRF* (Dissertação de mestrado). Universidade de São Paulo.
3. Bork, C. K., Castro, A. S., Corrêa, L. B., & Siqueira, T. M. (2017). Índices de precipitação extrema para os períodos atual (1961–1990) e futuro (2011–2100) na bacia do rio Taquari-Antas, RS.
4. Campos, S. J. (2013). *Projeto de pesquisa coordenado pelo grupo de trabalho do programa de modelagem numérica de tempo (PNT)*. PBCA/ICEA.
5. Campos, S. J., Huland, J., & Silva, E. (2015). *Assimilação de dados de superfície no modelo WRF para o estudo de atividade elétrica na região sudeste do Brasil* (Dissertação de mestrado). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
6. Cea, L., Alvarez, M., & Puertas, J. (2024). *Usando modelagem hidrológica-hidráulica integrada e dados globais para analisar as inundações de fevereiro de 2023 na bacia hidrográfica do Umbeluzi (Moçambique)*. CITEEC.
7. Chen, F., & Dudhia, J. (2001). Coupling an advanced land-surface/hydrology model with the Penn State–NCAR MM5 modeling system. *NCAR Technical Note*.
8. Coelho, S. A. (2013). *Avaliação dos prognósticos de precipitação para esquemas de microfísica do WRF* (Dissertação de mestrado). Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas.
9. Fitchett, J. M., & Grab, S. W. (2014). A 66-year tropical cyclone record for south-east Africa: Temporal trends and spatial patterns. *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1002/joc.3742>
10. Hong, S.-Y., Noh, Y., & Dudhia, J. (2006). A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review*, *134*, 2318–2341.
11. Iacono, M. J., Delamere, J. S., Mlawer, E. J., Shephard, M. W., Clough, S. A., & Collins, W. D. (2008). Radiative forcing by longwave and shortwave radiation in the RRTMG model. *Journal of Geophysical Research*, *113*(D13103). <https://doi.org/10.1029/2008JD009944>

12. IPCC. (2013). *Climate change 2013: The physical science basis*. Cambridge University Press.
13. IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press.
14. Kain, J. S. (2004). The Kain–Fritsch convective parameterization: An update. *Journal of Applied Meteorology*, 43, 170–181.
15. Kim, D., Sperber, K., Stern, W., Waliser, D., Kang, I.-S., Maloney, E., Schubert, S., ... & Frierson, D. (2014). Impact of the MJO on the tropical climate. *Journal of Climate*, 27(7), 2351–2363.
16. Lyon, B., & Mason, S. J. (2007). The 1997–1998 El Niño and southern African climate. *International Journal of Climatology*, 27(2), 213–230.
17. Mavume, A. F., Rydberg, L., Henriksson, S., & Brundell, J. (2009). Climatology and impacts of tropical cyclones in the Southwest Indian Ocean. *Tellus A*, 61(3), 293–307.
18. Mendes, D., & Marengo, J. A. (2009). Método meteorológico de downscaling com modelos de redes neurais artificiais: Projeto América do Sul (Relatório técnico). Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, Brasil.
19. Mohammed, S., Rydberg, L., Mavume, A. F., & Wang, H. (2017). Evaluation of WRF simulations of extreme rainfall in southern Africa. *Atmospheric Research*, 194, 80–94.
20. Oliveira, R. de. (2016). *Tornado de Xanxerê/SC – 2015: Análise sinóptica e modelação no WRF* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina.
21. Oliveira, G. S., Lima, J. F., & Prado, L. F. (2011). Modelos climáticos: processos físicos e simulações. (*informação citada no texto*).
22. Paulson, C. A. (1970). The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. *Journal of Applied Meteorology*, 9, 857–861.
23. Petrucci, E., & Azevedo, L. M. (2023). Análise dos eventos extremos de precipitação no município de Cachoeira do Sul/RS.
24. Reason, C. J. C., & Jury, M. R. (2021). Connected modes of climate variability over southern Africa. *Climate Dynamics*, 56, 3261–3274.

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

25. Reason, C. J. C., & Keibel, A. (2004). Tropical cyclone Eline and associated floods in Mozambique. *Weather and Forecasting*, 19(5), 661–669.
26. Schneider, U., Becker, A., Finger, P., Meyer-Christoffer, A., Ziese, M., & Rudolf, B. (2022). *GPCC Global Precipitation Analysis Products*.
27. 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 NCAR/TN-475+STR.
28. Thompson, G., Field, P. R., Hall, W. D., & Rasmussen, R. M. (2008). Explicit forecasts of winter precipitation using an improved microphysics scheme. *Monthly Weather Review*, 136, 5095–5115.
29. Zhang, C. (2005). Madden–Julian Oscillation. *Reviews of Geophysics*, 43(2).

6.1 Anexos

Anexo A - Cálculos Métricos

Neste anexo são apresentadas as métricas utilizadas para avaliar o desempenho do modelo WRF na simulação da precipitação diária. As métricas permitem quantificar a diferença entre os valores simulados e observados, fornecendo uma medida do grau de aproximação do modelo à realidade. São incluídas as seguintes métricas:

Erro Médio Absoluto (MAE)

Mede a média das diferenças absolutas entre os valores simulados e observados:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$$

Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE)

Mede a magnitude média dos erros, atribuindo maior peso aos desvios mais acentuados:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

Coefficiente de Correlação de Pearson (r)

Mede o grau de associação linear entre os valores simulados e observados:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2}}$$

Onde y_i representa os valores observados (CHIRPS),

\hat{y}_i representa os valores simulados (WRF), e n é o número total de observações

Estas métricas foram utilizadas para avaliar o grau de aproximação entre os dados simulados e observados e, conseqüentemente, o desempenho do modelo na simulação da precipitação diária.

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

Os anexos B e C apresentam exemplos de namelists utilizadas no modelo WRF durante a simulação dos episódios de precipitação.

Anexo B: Namelist.wps: contém a configuração do WPS (WRF Preprocessing System), incluindo definições de domínio, resolução espacial, projeção cartográfica e caminhos para os dados geográficos.

Anexo C: Namelist.input: apresenta as configurações do modelo WRF propriamente dito, abrangendo o controlo temporal da simulação, definições de domínios, parametrizações físicas, dinâmica, e controle das condições de fronteira e saída de dados.

Anexo B

Namelist.wps

&share

wrf_core = 'ARW',

max_dom = 2,

start_date = '2023-02-09_00:00:00','2023-02-09_00:00:00',

end_date = '2023-02-10_00:00:00','2023-02-10_00:00:00',

interval_seconds = 10800,

io_form_geogrid = 2,

/

&geogrid

parent_id = 1, 1,

parent_grid_ratio = 1, 3,

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

i_parent_start = 1, 31,

j_parent_start = 1, 17,

e_we = 100, 100,

e_sn = 100, 100,

dx = 9000,

dy = 9000,

map_proj = 'lambert',

ref_lat = -25.9,

ref_lon = 32.2,

truelat1 = -25.0,

truelat2 = -35.0,

stand_lon = 32.2,

geog_data_res = 'default','default',

geog_data_path = 'Caminho para dados geograficos',

/

&ungrib

out_format = 'WPS',

prefix = 'FILE',

/

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

&metgrid

fg_name = 'FILE',

io_form_metgrid = 2,

/

Anexo C

Namelist.input

&time_control

run_days = 1,

run_hours = 0,

start_year = 2023, 2023,

start_month = 02, 02,

start_day = 09, 09,

start_hour = 00, 00,

end_year = 2023, 2023,

end_month = 02, 02,

end_day = 10, 10,

end_hour = 00, 00,

interval_seconds = 10800,

io_form_history = 2,

io_form_restart = 2,

io_form_input = 2,

io_form_boundary = 2,

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

history_interval = 1440, 1440, ! SAÍDA ÚNICA PARA 24H

frames_per_outfile = 1, 1,

/

&domains

time_step = 50,

max_dom = 2,

e_we = 100, 100,

e_sn = 100, 100,

dx = 9000, 3000,

dy = 9000, 3000,

parent_id = 1, 1,

parent_grid_ratio = 1, 3,

parent_time_step_ratio = 1, 3,

i_parent_start = 1, 31,

j_parent_start = 1, 17,

num_metgrid_levels = 35,

num_metgrid_soil_levels = 4,

/

&physics

mp_physics = 8, 8,

ra_lw_physics = 4, 4,

ra_sw_physics = 4, 4,

bl_pbl_physics = 2, 2,

cu_physics = 1, 0,

sf_sfclay_physics = 2, 2,

sf_surface_physics = 2, 2,

radt = 30, 30,

bldt = 0, 0,

Comparação entre Dados Observados CHIRPS e Simulações do Modelo WRF para Eventos de Precipitação Intensa na Bacia do Rio Umbeluzi (2016-2023)

```
cutd                = 5, 0,  
/  
&dynamics  
w_damping           = 0,  
diff_opt            = 1,  
km_opt              = 4,  
base_temp           = 290.,  
/  
&bdy_control  
spec_bdy_width      = 5,  
spec_zone           = 1,  
relax_zone          = 4,  
/  
  
&namelist_quilt  
nio_tasks_per_group = 0,  
nio_groups = 1,  
/
```