



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICA E INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO
GEOGRÁFICA PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

RELATÓRIO DE ESTÁGIO DE MESTRADO

APLICAÇÃO DOS SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA PARA O MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCEPTÍVEIS À INUNDAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BÚZI

FILOCA ALEXANDRE FONDO BILA

Maputo
2024

UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICA E INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO
GEOGRÁFICA PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

RELATÓRIO DE ESTÁGIO DE MESTRADO

**APLICAÇÃO DOS SISTEMAS DE INFORMAÇÃO
GEOGRÁFICA PARA O MAPEAMENTO DE ÁREAS
SUSCEPTÍVEIS À INUNDAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA
DO RIO BÚZI**

FILOCA ALEXANDRE FONDO BILA

Relatório de estágio de mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Informação Geográfica da Universidade Eduardo Mondlane, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Sistemas de Informação Geográfica para o Desenvolvimento Sustentável.

Supervisora: Doutora Sheyla Rodrigues Cassy
Co-supervisor: Doutor Agostinho Vilanculos

Maputo
2024

UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICA E INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO
GEOGRÁFICA PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

APLICAÇÃO DOS SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA PARA O MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCEPTÍVEIS À INUNDAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BÚZI

FILOCA ALEXANDRE FONDO BILA

Relatório de estágio de mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Informação Geográfica da Universidade Eduardo Mondlane, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Sistemas de Informação Geográfica para o Desenvolvimento Sustentável.

Aprovado em ____ de ____ de 2024, por:

Doutor Alberto Mulenga
(Arguente - DMI-UEM)

Doutor Ernesto Muheca
(Presidente - DMI-UEM)

Doutora Sheyla Ratan Rodrigues Cassy
(Supervisora – DMI-UEM)

Maputo

Maio/2024

Declaração de Compromisso

Declaro que, este relatório nunca foi apresentado para a obtenção de qualquer grau ou num outro âmbito e que ele constitui o resultado do meu labor individual. Este relatório é apresentado em cumprimento parcial dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Sistemas de Informação Geográfica Para o Desenvolvimento Sustentável da Universidade Eduardo Mondlane.

Maputo, Maio de 2024

A autora

Filoca Alexandre Fondo Bila

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, o maior orientador da minha vida. Ele sempre me iluminou, mesmo nos momentos difíceis, ele colocou a sua luz de esperança em mim.

Aos meus pais, pilares da minha formação como ser humano.

AGRADECIMENTOS

Este estudo não se tornaria uma realidade se não fosse o apoio incondicional de certas pessoas especiais.

Agradeço aos meus supervisores Doutora Sheyla Cassy e Doutor Agostinho Vilanculos que incansavelmente lutaram comigo, me ensinando, me mostraram os métodos para elaboração deste estudo. Muito obrigada.

Agradeço imenso ao colega e amigo Dércio Zandamela, pelo seu apoio físico e moral na elaboração deste estudo. Muito obrigada.

A toda equipa da DNGRH em especial do DGRH, pela paciência e moral fornecida durante todo o período da realização do curso. Muito obrigada.

O meu muito obrigada aos meus pais Alexandre e Eugénia e meus irmãos Bernabé, Ivaldina e Leocáldia que sempre envidaram esforços em me mostrar o caminho da academia, que sempre disseram para mim, muita força filha! Força caçula!

E por fim, o meu agradecimento muito especial ao meu esposo Gércio Bila e meus filhos Gércio Jr e Allen que mesmo em momentos difíceis, conseguiam me transmitir sua alegria e força para que eu conseguisse encontrar mais ânimo e determinação para levar esta jornada até a recta final. Obrigado amores.

RESUMO

A inundação é o fenómeno climático que lidera na lista dos eventos extremos que mais cria desastres no mundo. Moçambique é um dos países mais afectados pelas inundações na África, registando mais de 20 inundações nos últimos 30 anos, com consequências negativas para a vida das populações e para a economia do país. A tomada de medidas de mitigação aos eventos climáticos faz parte de um dos objectivos do desenvolvimento sustentável, sendo o mapeamento de áreas de risco das inundações uma das ferramentas úteis no processo de redução de risco de desastres. O presente estudo tem como objectivo mapear as áreas de inundação na bacia do rio Búzi usando o GIS *Flood Tool* (GFT), fazendo a comparação com a mancha de inundação da imagem de satélite aquando da passagem do ciclone tropical IDAI. Para o mapeamento das áreas de inundação foi usado o Modelo Digital de Elevação (MDE) aplicada a ferramenta GFT que envolve a implementação da equação de *Manning* para fluxo constante em um canal aberto ao longo do rio. A estimativa dos caudais máximos foi calculada usando método de análise de risco de cheias, e as extensões de inundação geradas pelo algoritmo foram validadas através de comparação com as extensões extraídas das imagens de satélite do mesmo período. Os resultados mostram a probabilidade de ocorrência de um evento similar num intervalo de 200 a 1000 anos. O mapeamento feito pelo GFT em diferentes níveis de inundação indicam que para o nível 1 a área inundada é de aproximadamente 170 km², o nível 2 ocupa uma área de aproximadamente 500 km² e o nível 3 uma área de aproximadamente 1200 km², colocando em risco cerca de 12400 habitantes, 26 escolas e 7 unidades sanitárias. A bacia do Búzi é mais susceptível ao fenómeno da inundação na parte jusante, esta susceptibilidade está associada a declividade visto que apresenta altitudes mais baixas variando de 0 a 230 metros. As conclusões obtidas por este estudo fornecem dados para possíveis intervenções público-privadas na identificação dos locais óptimos para a implantação de infraestruturas e encontrar a melhor medida de mitigação das inundações.

Palavras-chaves: Mudanças Climáticas, Risco, Inundações, Susceptibilidade, GIS *Flood Tool*.

ABSTRACT

Flooding is the climatic phenomenon that leads the list of extreme events that create the most disasters in the world. Mozambique is one of the countries most affected by floods in Africa, recording more than 20 floods in the last 30 years, with negative consequences for the lives of the population and the country's economy. Taking measures to mitigate climate events is part of one of the objectives of sustainable development, with the mapping of flood risk areas being one of the useful tools in the disaster risk reduction process. The present study aims to map the flood areas in the Búzi river basin using the GIS Flood Tool (GFT), making a comparison with the flood area in the satellite image during the passage of tropical cyclone IDAI. To map flood areas, the Digital Elevation Model (DEM) was used and the GFT tool was used, which involves implementing the Manning equation for constant flow in an open channel along the river. The estimate of maximum flows was calculated using a flood risk analysis method, and the flood extents generated by the algorithm were validated by comparison with the extents extracted from satellite images from the same period. The results show the probability of a similar event occurring within a period of 200 to 1000 years. The mapping carried out by GFT at different flood levels indicates that for level 1 the flooded area is approximately 170 km², level 2 occupies an area of approximately 500 km² and level 3 an area of approximately 1200 km², putting at risk approximately of 12,400 inhabitants, 26 schools and 7 health units. The Búzi basin is more susceptible to the phenomenon of flooding in the downstream part, this susceptibility is associated with the slope as it has lower altitudes ranging from 0 to 230 meters. The conclusions generated by this study provide data for possible public-private interventions in identifying the optimal locations for implementing infrastructure and finding the best flood mitigation measure.

Keywords: Climate Change, Risk, Floods, Susceptibility, GIS Flood Tool.

ÍNDICE

DEDICATÓRIA.....	ii
AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	iv
ABSTRAT.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS.....	xi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Contexto	1
1.2. Problema.....	2
1.3. Justificação	2
1.4. Objectivos.....	2
1.4.1. Objectivo Geral.....	2
1.4.2. Objectivos Específicos	2
1.5. Estrutura do relatório.....	3
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	4
2.1. Cheias e inundações	4
2.1.1. Causas das Inundações	5
2.1.2. Impacto das Inundações.....	8
2.1.3. Medidas de Mitigação das Inundações	11
2.2. Métodos de estimativa de inundações	12
2.2.1. Método de Registos Históricos.....	13
2.2.2. Métodos empíricos	13
2.2.3. Métodos estatísticos ou probabilísticos	13
2.2.4. Métodos determinísticos.....	14
2.2.5. Métodos de transformação da chuva em escoamento	14
2.3. Métodos de mapeamento de áreas de inundação	16

2.3.1. Modelo Digital de Elevação	16
2.3.2. Imagens de Satélite.....	18
3. MATERIAL E MÉTODO	20
3.1. Descrição da Área de Estudo	20
3.2. Características fisiográficas da bacia do rio Búzi	21
3.2.1. Topografia	21
3.2.2. Clima	22
3.2.3. Solos	23
3.2.4. Uso e cobertura do solo	24
3.3. Materiais.....	25
3.4. <i>Software</i>	27
3.5. Métodos.....	27
3.5.1. Análise de Frequência de cheias.....	27
3.5.2. Processo de obtenção dos mapas de risco de inundação	28
3.5.3. Validação dos resultados	30
3.5.4. Avaliação de impacto das inundações na bacia hidrográfica do rio Búzi	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1. Análise da frequência de ocorrência de cheias na bacia hidrográfica do rio Búzi.....	31
4.2. Mapeamento de área de risco a inundações na bacia hidrográfica do rio Búzi	31
4.3. Impacto das inundações nas infraestruturas socioeconómicas.....	33
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	35
5.1. Conclusões	35
5.2. Limitações e Recomendações do estudo	36
5.3. Finalidades do Estudo	37
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38
7. ANEXOS.....	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de cheia e inundação.....	4
Figura 2: Variações da Temperatura da Superfície do Mar no Oceano Pacífico Equatorial....	6
Figura 3: Projecções da evolução dos níveis de Dióxido de Carbono de 1990 a 2018	7
Figura 4: Distribuição dos ciclones tropicais por bacia oceânica.....	8
Figura 5: Inundações provocadas pelo rio Shirakawa, na cidade de Kumamoto, na ilha de Kyusho, no Sudeste do Japão, a 15 de Julho de 2012 (esquerda); Inundações provocadas pelo rio Yabe, em Yanagawa, na província de Fukuoka 14 de Julho de 2012 (direita)	9
Figura 6: Inundações provocadas pela passagem do ciclone tropical IDAI na cidade da Beira	10
Figura 7: Exemplo de medidas de mitigação adoptadas em alguns países, a (direita) construção de uma nova parede de alvenaria para o alívio de enchentes em Kilkenny na Irlanda; (esquerda) construção de aldeia de reassentamento no Planalto de Nakai, província de Khammoune em Bangladesh.....	12
Figura 8: Exemplo de esquematização da relação entre a área do fluxo de caudais e o perímetro molhado numa secção de um rio.....	17
Figura 9: Exemplo de mapeamento de áreas das cheias nas bacias do Búzi e Púnguè, após a passagem do ciclone IDAI, em 2019	19
Figura 10: Localização geográfica da bacia hidrográfica do rio Búzi.....	21
Figura 11: Variação espacial da topografia na bacia hidrográfica do rio Búzi	22
Figura 12: Distribuição sazonal da temperatura e precipitação média mensal ao longo da bacia do rio Búzi durante o período de 1960 - 2000	23
Figura 13: Distribuição espacial dos tipos de solo da bacia do Búzi	24
Figura 14: Distribuição espacial das classes de uso e cobertura do solo.....	25
Figura 15: Concepção do MDE Relativo	29

Figura 16: Processos do fluxo do MDE Relativo e MDE Condicionado.....	30
Figura 17: Risco de inundação na bacia hidrográfica do rio Búzi gerados pelo GFT.....	32
Figura 18: Área de inundação gerada pelo GFT (a) e a área captada pela imagem de satélite dos dias 13 a 26 de Março de 2019 (b)	32
Figura 19: Impacto das inundações nas infraestruturas socioeconómica de nível 1	33
Figura 20: Impacto das inundações nas infraestruturas socioeconómica de nível 2	34
Figura 21: Impacto das inundações nas infraestruturas socioeconómica de nível 3	34

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Resumo de medidas de mitigação.....12

Tabela 2: Períodos de retorno da estação de Goonda e Dombe, usando a distribuição Gumbel
.....31

ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS

ARA-Sul	Administração Regional de Águas do Sul
CENACARTA	Centro Nacional de Cartografia e Teledetecção
CENOE	Centro Nacional Operativo de Emergência
CRED	<i>Centre for Research on the Epidemiology of Disasters</i>
DINAF	Direcção Nacional de Florestas
DGRH	Departamento de Gestão de Recursos Hídricos
DHI	<i>Denmark Hydraulic Institute</i>
DNGRH	Direcção Nacional de Gestão de Recursos Hídricos
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
GFT	<i>GIS Flood Tool</i>
HAND	<i>Height Above the Nearest Drainage</i>
INAM	Instituto Nacional de Meteorologia
INGD	Instituto Nacional de Gestão e Redução do Risco de Desastres
IIAM	Instituto de Investigação Agrária de Moçambique
INE	Instituto Nacional de Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
IWRI	<i>Institute of Water Research Integrate</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MICOA	Ministério para a Coordenação de Acção Ambiental
ODS	Objectivo do Desenvolvimento Sustentável
OMM	Organização Mundial de Meteorologia
OPW	<i>Office of Public Water</i>
PDI	Processamento Digital de Imagens
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
SPRING	Sistema de Processamento de Informação Georreferenciada
UNHCR	<i>United Nations High Commissioner for Refugees</i>
UNISDR	<i>United office for Disaster Risk Reduction</i>
USAID	Agência dos Estados Unidos para o Desenvolvimento Internacional
USGS	<i>United States Geological Survey</i>

WMO	<i>World Meteorological Organization</i>
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contexto

Estudos realizados pelo *United Nations Office for Disaster Risk Reduction* (UNISDR) e *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters* (CRED) em 2017, indicam que, os desastres relacionados com o clima estão a tornar-se cada vez mais frequentes, em grande parte devido a um aumento do número de inundações e tempestades. Só as inundações foram responsáveis por 47% de todas as catástrofes relacionadas com o clima de (1995-2015), afectando 2,3 mil milhões de pessoas. A ocorrência de fenómenos de origem natural (cheias, inundações e ciclones) trazem consequências de nível social e económicos (Fernandes, 2016). As inundações lideram na lista dos fenómenos extremos climáticos que mais causam desastres no mundo. África e a Ásia são os continentes mais afectados pelas inundações (UNISDR e CRED, 2017). As perdas crescentes resultantes de inundações, tanto em países desenvolvidos quanto os países em desenvolvimento, indicam que a mitigação de desastres não é uma questão simples relacionada ao desenvolvimento económico, mas sim uma questão mais complexa, na qual a ciência e a tecnologia poderiam desempenhar um papel importante (Flor, 2003; Cheng, 2006).

A Organização Mundial de Meteorologia (OMM) na sua Declaração de 2020 sobre o Estado do clima no mundo, identifica os riscos relacionados com as alterações climáticas como uma das metas do Objectivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (PNUD, Sd; Sindall *et al.*, 2022).

O mapeamento de inundações e a identificação de áreas em risco de inundação são os principais passos na formulação de qualquer estratégia de gestão de inundações (Di Baldassarre *et al.*, 2010; Patel *et al.*, 2017; Vilanculos, 2022). De modo a reduzir o número de vítimas e os danos nas infraestruturas e nas planícies aluviais, é necessário prever os níveis das águas dos rios, incluindo a extensão das cheias, para o mapeamento dos riscos (Timbadiya *et al.*, 2014; Patel *et al.*, 2017).

Desta forma o presente estudo, consiste em mapear as áreas de risco de inundações na bacia hidrográfica do rio Búzi, usando a extensão do ArcMap o *GIS Flood Tool* com base no Modelo Digital de Elevação (MDE). Mostrando assim como as novas técnicas de sistemas de Informação Geográfica (SIG) podem ajudar no monitoramento das inundações de forma mais simplificada.

1.2. Problema

A gestão das inundações em Moçambique, constitui um dos maiores desafios para as instituições governamentais com mandato específico para o efeito. Este desafio é agravado pela fraca capacidade de avaliar atempadamente o risco de inundações e quantificar os seus impactos, de forma a auxiliar os decisores, a encontrar melhor forma de poder dar uma resposta atempada em casos de emergência.

1.3. Justificação

A bacia hidrográfica do rio Búzi é uma das mais afectadas pelas inundações, devido a falta de conhecimento real das áreas de risco para diferentes magnitudes de cheias, agravado pela falta de infraestruturas reguladoras de cheias. Com o avanço das tecnologias de informação geográficas, tais como o SIG, o sensoriamento remoto e a modelação hidrológica, oferecem alternativas para a mitigação dos efeitos das inundações através de metodologias diversas e o mapeamento de extensão de risco possibilita igualmente quantificar atempadamente os seus impactos.

1.4. Objectivos

1.4.1. Objectivo Geral

Mapear o risco de inundações para os diferentes períodos de retorno, usando o GFT, tomando como referência a grande cheia do ano 2019 aquando da passagem do ciclone tropical IDAI.

1.4.2. Objectivos Específicos

- Calcular os diferentes períodos de retorno das inundações tomando como base as cheias do ano 2019;
- Validar a extensão de inundação gerada através do GFT em comparação com a extensão de inundação captada por satélite;

- Avaliar o impacto das inundações para os diferentes níveis;

1.5. Estrutura do relatório

O presente trabalho encontra-se organizado em 5 capítulos. No capítulo 1 faz-se a descrição da parte introdutória do trabalho, contextualizando o trabalho, descreve o problema de pesquisa, a justificação e descreve os objectivos do trabalho. No capítulo 2, é o capítulo da revisão da literatura, neste capítulo são descritos os conceitos básicos relevantes para o trabalho de acordo com diferentes autores, tratando-se de um tema relacionado com as inundações, descreve-se as causas, impactos das inundações, são descritas também as medidas de mitigação das inundações, os métodos de estimativa de cheias e os métodos de mapeamento das áreas de risco de inundação. O capítulo 3, capítulo dos materiais e métodos, faz a descrição da área de estudo, as suas características fisiográficas e os materiais e métodos usados para a realização do estudo. Capítulo 4, são apresentados os resultados do estudo e faz a discussão deles de acordo com outros autores. E por fim o capítulo 5 apresenta um resumo das conclusões obtidas na elaboração deste trabalho, algumas recomendações, limitações e finalidades do trabalho.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Cheias e inundações

Os conceitos de cheia e inundação é por algumas vezes entendido como se fossem conceitos sinônimos, diversos autores ajudam a entender a diferença entre esses conceitos. Entende-se por cheia o transbordo do curso de água relativamente ao seu leito original, este pode ser de origem natural ou humana (Chow *et al.*, 1988). O relatório do PNUD (2000), define cheias como sendo uma ocorrência natural caracterizada por uma subida acentuada dos escoamentos nos cursos de água e expectativas de alturas hidrométricas (alturas de água). Esta subida geralmente origina galgamento das margens dos cursos (rios) e originam inundações nas zonas baixas adjacentes. De acordo com Cunha e Pinto (2011), a ocorrência de cheias está associada ao caudal muito elevado de um rio que origina o transbordo do seu leito inundando as margens dos rios, inundação é a ocupação pela água de uma área habitualmente não ocupada pela água. As cheias provocam inundações, mas nem todas as inundações são consequência das cheias.

O conceito de cheia e inundação melhor enquadrada para o presente trabalho foi de Macedo *et al.* (2004), segundo o qual as águas das chuvas ao alcançarem um curso de água aumentam a vazão deste por determinado tempo, a este acréscimo na descarga da água é chamado cheia (enchente). Quando o acréscimo da água em um rio for superior à sua capacidade de vazão transbordando para áreas marginais (planície de inundação), que no curso normal do rio não são ocupados pelas águas, ocorre o fenómeno de inundação. O processo de inundação é esquematizado na Figura 1.



Figura 1: Esquema de cheia e inundação

Fonte: IPT (2007).

Tucci (2003), defende que as inundações podem ser ribeirinhas e devido a urbanização. As inundações ribeirinhas, constituem um processo normal do ciclo hidrológico de modo que o rio escoar pelo seu leito maior. As inundações urbanas são decorrentes do processo de urbanização, quando as populações ocupam as áreas marginais do rio, obstruindo o curso normal do rio e reduzindo a capacidade de infiltração do solo.

2.1.1. Causas das Inundações

As inundações são causadas por uma série de factores, que podem ser meteorológicos e não meteorológicos (INAM, 2002; MICOA, 2006). Em Moçambique as inundações são muitas das vezes causadas por grandes chuvas de monções, causadas pelos padrões de circulação global das massas de ar, que ocorrem na Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e também os elevados níveis de actividade ciclónica que acabam resultando no fracasso no sistema de infraestrutura de protecção existente.

- Clima: o clima influencia a ocorrência de inundações na medida em que a interação entre os fenómenos atmosféricos e oceânicos designados por El Niño Oscilação Sul (ENSO¹) e do Dipolo do Atlântico provocam a variação do clima e do estado do tempo (Ferreira e Mello, 2005; UNHCR, 2014). O ENSO é o fenómeno conjunto entre o oceano e a atmosfera mais importante, influenciando a variabilidade do clima a escala global (Allan *et al.*, 2013). O ENSO apresenta três fases: El Niño (fase quente), fase negativa da oscilação meridional caracterizada pelo enfraquecimento da pressão alta; La Niña (fase fria), propícia a ocorrência de anos neutros e chuvosos a muito chuvosos e a fase neutral. De acordo com Galvin (2016), o cálculo do ENSO é feito com base na análise quantitativa:
 - i. Da intensidade da oscilação meridional, usando índices relacionados com os gradientes de pressão atmosférica, e ou;
 - ii. Das anomalias da temperatura da superfície do oceano no Pacífico (regiões equatoriais ou próximas a esta região) Estas regiões são representadas na Figura 2.

¹ É um fenómeno oceânico-atmosférico de macro escala, formado a partir de variações da temperatura da superfície do mar no Oceano Pacífico Equatorial (UNHCR, 2014).

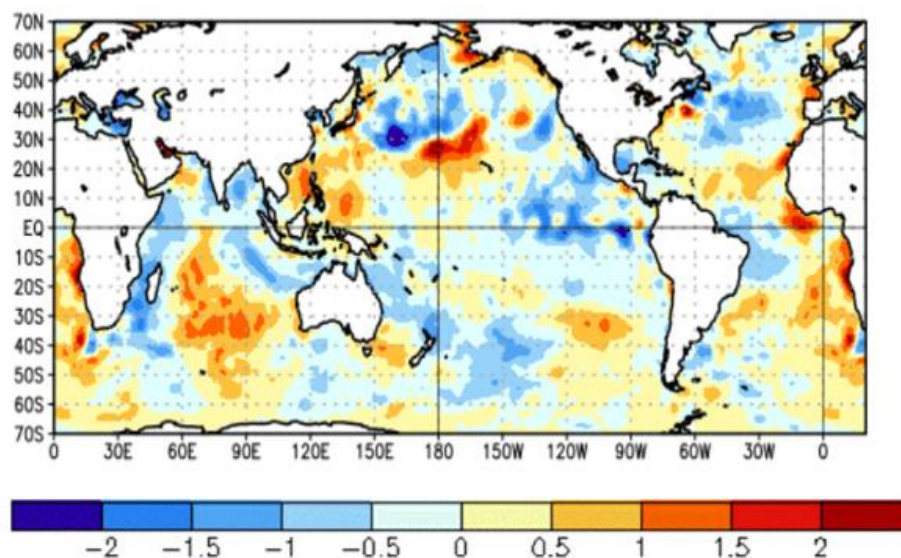


Figura 2: Variações da Temperatura da Superfície do Mar no Oceano Pacífico Equatorial

Fonte: www.cpc.ncep.noaa.gov/products/CFSv2 (2017).

A influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é uma dos factores do clima que contribui para a ocorrência de fortes chuvas de monções causando as inundações (Beilfuss e Dos Santos, 2001; Asante *et al.*, 2008). A ZCIT é originada em baixos níveis da atmosfera pela convergência de ventos alísios do Nordeste oriundos do hemisfério Norte, com ventos alísios do Sudeste oriundos do hemisfério Sul (Asnani, 1993; Glickman, 2000). Quando as massas de ar que afundam e divergem da célula de Hadley formam um cinturão subtropical de alta pressão permanente nas latitudes 20° a 40° Sul. Esse cinturão é amplamente composto por anti-ciclones, que se formam como resultado da alta pressão e conforme a ZCIT, muda de posição, as correntes de jato e o cinturão de alta pressão subtropical também são deslocadas causando chuvas fortes no Sudeste (Vilanculos, 2022).

- Mudanças ou alterações do clima: o clima é a variação do tempo e outras intempéries num intervalo de tempo, o cálculo dessa variação do clima é feito através de uma série de dados estatísticos como a média, variância, a covariância e ou probabilidades de ocorrência de valores extremos dos parâmetros climatológicos, como temperatura, precipitação, humidade do ar e ventos, entre outros (Barry e Chorley, 2004). Pequenas alterações do clima podem ter impactos no tipo de vida da população (Barry e Chorley, 2004). Para Buckle (1996), o clima não depende apenas do estado da atmosfera, mas também de outras componentes tais como os oceanos, as calotes polares e a superfície da terra, com a sua diversificada vegetação. A variação do clima depende das mudanças que ocorrem no interior de cada um dos subsistemas

do sistema climático (hidrosfera-oceanos, atmosfera, criosfera, litosfera e biosfera) ou nas suas fronteiras (Peixoto, 1987; Barry e Chorley, 2004). As alterações verificadas no clima no século XX indicam que as condições do clima não são estacionárias e que é muito influenciada pela actividade humana que contribui no aumento do consumo de combustíveis fósseis, elevando os níveis de dióxido de carbono (Barry e Chorley, 2004). A Figura 3, mostra as projecções da evolução dos níveis do CO₂ ao longo do tempo.

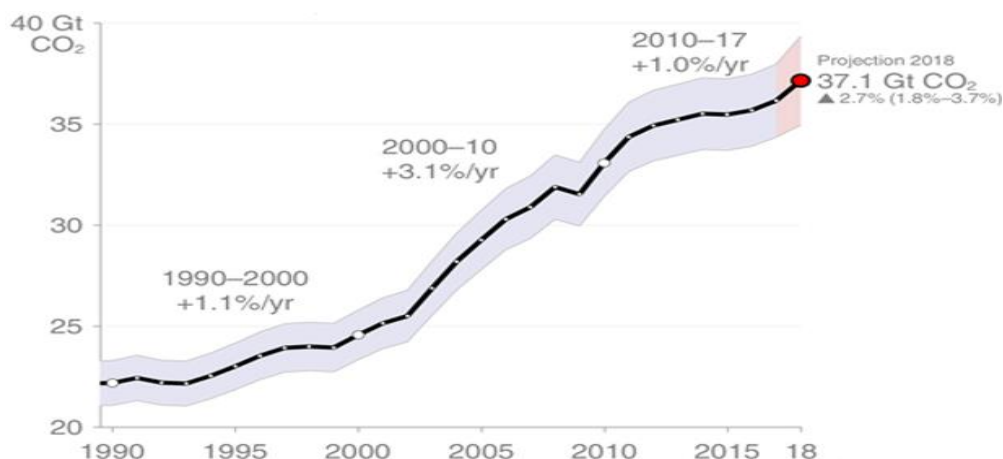


Figura 3: Projecções da evolução dos níveis de Dióxido de Carbono de 1990 a 2018

Fonte: WMO (2018).

- **Ciclones tropicais:** os ciclones tropicais, tem diferentes designações de acordo com a sua região de formação (Mcllveen, 1992). Os ciclones tropicais são a tempestade mundial mais mortífera, que tiram mais vidas a cada ano do que todas as outras tempestades juntas (Buckle, 1996; Barry e Chorley 2004; Ramsay, 2017). De acordo com Ahrens (1994); Galvin (2016); Rebelo (2020), dependendo de onde estes são formados, são atribuídos diferentes nomes. São chamados de tufão os que se formam no Atlântico Norte Ocidental e Caraíbas, furacão no Pacífico Norte Ocidental e Mar da China e de ciclones tropicais os formados no Pacífico Sul Ocidental e Oceano Índico. As diferentes zonas de formação são representadas na Figura 4.



Figura 4: Distribuição dos ciclones tropicais por bacia oceânica

Fonte: <https://www.tudogeo.com.br/> (2023).

2.1.2. Impacto das Inundações

De acordo com Goerl (2017), inundações são processos naturais, inerentes à dinâmica fluvial. Ao longo da história humana, este processo tem influenciado positivamente e negativamente a sociedade.

- Impacto negativo: Na maior parte das vezes as cheias trazem danos prejudiciais a sociedade (Goerl, 2017) Segundo Mendes *et al.* (2004), os principais impactos causados por inundações são as perdas materiais e humanas, interrupção de actividade económica e social nas áreas inundadas, contaminação por doenças de veiculação hídrica (leptospirose e cólera, por exemplo), contaminação da água (pela inundação de depósitos de material tóxico e estações de tratamento, por exemplo). Os danos causados por cheias possuem efeitos primários e secundários (Murwira, 2006). Os efeitos primários incluem a perda de vidas humanas e de animais; danos físicos à propriedades e infraestruturas como pontes, estradas e sistemas de esgoto; a erosão de terras agrícolas e a destruição de plantações (El Raey e Beoro, 2003; Jinchi, 2005). Os efeitos secundários ocorrem depois que as cheias diminuem e podem incluir falhas nas infraestruturas de abastecimento de água e saneamento ou a contaminação das fontes de água. Ambas as falhas podem levar a condições anti-higiênicas e à propagação de doenças (Murwira, 2006; Moel *et al.*, 2009).

Exemplo de impactos negativos da inunda  o, foi o transbordo do rio Shirakawa, na cidade de Kumamoto, na ilha de Kyusho, no Sudeste do Japão, a 15 de Julho de 2012 ilustrada na Figura 5 (esquerda) e inunda  es provocadas pelo rio Yabe, em Yanagawa, na província de Fukuoka 14 de Julho de 2012 Figura 5 (a direita). Estas inunda  es causaram a destrui  o de casas, infraestruturas socioecon  micas e perdas de vidas.



Figura 5: Inunda  es provocadas pelo rio Shirakawa, na cidade de Kumamoto, na ilha de Kyusho, no Sudeste do Japão, a 15 de Julho de 2012 (esquerda); Inunda  es provocadas pelo rio Yabe, em Yanagawa, na província de Fukuoka 14 de Julho de 2012 (direita)

Fonte: Guerreiro (2015).

Em Moçambique a inunda  o tem causado graves danos ao país, pesquisa realizada por Mário e Uacane (2023), mostra que na região centro em particular na cidade da Beira, no período 2019-2021 as inunda  es criaram grande impacto negativo para a popula  o, mais de 300 famílias perderam suas culturas agrícolas, mais de 600 famílias perderam as suas habita  es, para além destes danos as inunda  es criaram bloqueio de várias vias de acesso e turbidez da água ocasionando doenças de origem hídrica. A Figura 6, mostra algumas imagens da destrui  o causada pelas inunda  es a quando da passagem do ciclone tropical IDAI.



Figura 6: Inundações provocadas pela passagem do ciclone tropical IDAI na cidade da Beira

Fonte: https://static.dw.com/image/48047735_1004.webp

- **Impacto Positivo:** alguns autores afirmam que as cheias não só trazem problemas a sociedade, mas também trazem alguns ganhos tais como a restauração de ecossistemas naturais; o fornecimento de água doce abundante para agricultura; a saúde e o saneamento e a deposição de sedimentos ricos em nutrientes em várias áreas, aumentando, assim, o rendimento das culturas (Beilfuss e Dos Santos, 2001; El Raey e Beoro, 2003; Jinchi, 2005). Por exemplo, após a cheia de 1999, na Bacia do Rio Amarelo, Jinchi (2005), concluiu que a produção agrícola de algodão na China aumentou em 15%. El Raey e Beoro (2003), mostraram que as cheias anuais da bacia do rio Nilo servem de fonte de abastecimento de água para as actividades agrícolas no Egito. Em muitos países, como Bangladesh, mais de 30% da população total depende da água subterrânea para obter água doce. Esses aquíferos, por sua vez, dependem das águas das cheias para recarga e reposição (FAO *et al.*, 2003). Em Moçambique, após as cheias de 2000, novos estudos sobre previsão e gestão das cheias foram conduzidos (Artan *et al.*, 2002; USGS e ARA-Sul, 2002; DHI, 2006) e novos métodos para previsão das cheias foram postos em prática. Desde a cheia de 2000, o governo de Moçambique criou mais de 200 novas áreas de reassentamento para mover a população das áreas de alto risco de cheias para locais mais seguros (Arnall *et al.*, 2013). No estudo sobre cheias, reassentamento e mudança nos meios de subsistência, por Arnall *et al.* (2013), evidências da zona rural de Moçambique demonstraram que as políticas desenvolvidas e implementadas pelo governo de Moçambique, após as cheias de 2000, tiveram impacto positivo nas condições de vida dessa população.

2.1.3. Medidas de Mitigação das Inundações

Segundo Barbosa (2006), as medidas para o controle das inundações podem ser classificadas em estruturais, quando o homem modifica o rio, e em não-estruturais, quando o homem convive com o rio. Medidas estruturais são as medidas de controle através de obras hidráulicas como barragens, diques e canalização. Medidas não estruturais defendem na sua concepção a melhor convivência da população com as inundações e para que estas medidas se tornem, de facto, eficazes, a participação conjunta entre o poder público e a comunidade local é fundamental, de modo que garanta uma convivência tranquila sem prejuízos materiais e, principalmente, perdas humanas.

A Figura 7, mostra o exemplo de algumas medidas estruturais e não-estruturais adotadas em alguns países a (direita) construção de uma nova parede de alvenaria para o alívio de enchentes em Kilkenny na Irlanda e a (esquerda) construção de aldeia de reassentamento no Planalto de Nakai, província de Khammoune em Bangladesh.

Medidas estruturais e não-estruturais não se opõem umas às outras e, em geral, as estratégias de gestão bem-sucedidas integram os dois tipos, sendo necessário reconhecer, também, que essas não poderão controlar totalmente o risco associado à ocorrência das cheias, bem como seus prejuízos. Tais medidas focalizam-se na minimização do risco, de modo a garantir à sociedade o mínimo prejuízo possível e possibilitar uma convivência menos conflituosa com o meio ambiente. Ademais, a não dissociação dessas formas de medidas de controlo das cheias pode ser uma boa estratégia de gestão do impacto causado pelo fenómeno, na busca por soluções racionalmente integradas e compatibilizadas com o esperado desenvolvimento urbano (Jha *et al.*, 2012).

Segundo Barbosa (2006), não se pode achar que as medidas poderão controlar totalmente as inundações; as medidas sempre visam minimizar as suas consequências. Para o controle de inundações de forma eficiente torna-se necessária a associação de medidas estruturais e não estruturais, de modo que garanta à população o mínimo de prejuízo possível além de possibilitar uma convivência harmoniosa com o rio. Para as populações ribeirinhas, essa convivência é fundamental para evitar perdas materiais e até, em alguns casos, perdas humanas. A tabela 1, mostra as medidas de mitigação de forma resumida.



Figura 7: Exemplo de medidas de mitigação adoptadas em alguns países, a (direita) construção de uma nova parede de alvenaria para o alívio de enchentes em Kilkenny na Irlanda; (esquerda) construção de aldeia de reassentamento no Planalto de Nakai, província de Khammoune em Bangladesh

Fonte: OPW (2009).

Tabela 1: Resumo de medidas de mitigação.

Medidas estruturais	Medidas não-estruturais
• Construção de barragens, • Desvio do rio, • Construção de diques, • Alargamento do leito do rio, • Retenção de água da cheia em lagoas / lagos de mineração, barragens de abastecimento de água, barragens hidroelétricas.	• Restrições no planeamento de desenvolvimento, • Permeabilização, • Seguro contra cheias, • Previsão das cheias e sistemas de alerta.

Fonte: Vilanculos (2015).

2.2. Métodos de estimativa de inundações

Os métodos de estimativa das inundações podem ser directamente, como funções de registos históricos dos caudais máximos instantâneos, por relações empíricas, estatísticas ou por técnicas de modelos de transformação da chuva em escoamento, quando todo o hidrograma ou série de hidrogramas são desejados (Chow *et al.*, 1988; US Army Corps of Engineers, 2003).

2.2.1. Método de Registos Históricos

As cheias históricas podem ser analisadas a partir dos picos anuais de cheias, comparando os caudais máximos anuais, comparados com os de um caudal acima de um limiar. De acordo com Rosa (2011), a principal crítica à utilização de séries de máximos anuais em detrimento do uso de séries de caudal acima do limiar está relacionada ao facto de, nas primeiras, se considerar somente o maior evento de cada ano hidrológico, não se tendo em conta o segundo, o terceiro, em diante, os maiores eventos que, com tudo, podem ser superiores aos máximos eventos de outros anos. Para Henriques (1990), este método apresenta algumas limitações pelo facto de um dos principais problemas ser a fixação do limite, que constitui, em regra, um factor arbitrário. Em muitos casos, o limiar é seleccionado por alguns autores como indicativo do nível pelo qual, uma vez superado, a probabilidade de ocorrência de uma cheia é quase certa, tendo por base as cheias anteriores.

2.2.2. Métodos empíricos

Este método começou a ser desenvolvidos por volta do Século XIV, onde as bacias hidrográficas são delineadas na base de características homogéneas da região. A área de drenagem é calculada em função inversa do pico da cheia (Chow *et al.*, 1988; Kovác, 1988). A relação matemática descrita por Chow *et al.* (1988) e Kovác (1988), é descrita pela Equação (2.1):

$$Q_{peak} = C \cdot A^n, \quad (2.1)$$

onde Q_{peak} = fluxo de pico ($m^3 s^{-1}$), C e n são constantes regionais e A = a área da bacia (km^2).

Este método apresenta algumas fragilidades tais como: Incertezas na localização das fronteiras de áreas homogéneas; em bacias muito grandes e muito pequenas não podem ser contabilizados por um único coeficiente regional devido ao comportamento hidrológico referencial, da influência de elementos primários, como a precipitação, solos, vegetação, não são consideradas neste tipo de análises.

2.2.3. Métodos estatísticos ou probabilísticos

Método usado desde os anos de 1930, é muito importante porque faz uma relação entre os máximos picos de cheias e a probabilidade de ocorrência. Estes métodos têm as seguintes

desvantagens: Os períodos de retornos são em muitos casos arbitrários e muito longos (Alam *et al.*, 2018). A relação matemática é descrita pela Equação (2.2):

$$T(X_m) = \frac{1}{P(X_m)}, \quad (2.2)$$

onde: $P(X_m)$ - Probabilidade de ocorrência; m - ranking de observações começando de maior valor para o menor; $T(X_m)$ - Período de retorno.

2.2.4. Métodos determinísticos

Os métodos determinísticos têm vindo a ser aplicados desde os anos 1950. São métodos que usam o princípio do diagrama unitário como princípio de geração dos fluxos de cheias (Clarke, 1973; Maidment, 1993). A equação que governa os diferentes aspectos de geração de caudais pode ser encontrada em Vilanculos (2006). As desvantagens da utilização destes métodos é a falta de conhecimento da modificação do comportamento dos caudais em respostas aos eventos hídricos em caso de estes estarem a ocorrerem a jusante dos pontos das condições iniciais (Kavacs, 1988).

2.2.5. Métodos de transformação da chuva em escoamento

Um modelo de transformação da chuva em escoamento é um método matemático que descreve a relação da precipitação-escoamento de uma bacia hidrográfica (Zeeuw, 1973). Existem vários tipos de modelos para transformação da precipitação em escoamento. Clarke (1973), classificou os modelos chuva-escoamento, com base em sua estrutura, como modelos de caixa preta (empírica), caixa cinza (conceitual) ou caixa branca (físicos).

- Modelos Empíricos: Os modelos usam relações estatísticas não lineares entre entradas e saídas. São modelos orientados para observações, pois levam apenas as informações dos dados existentes, sem considerar as características e os processos do sistema hidrológico (Avant, 2017). Esses modelos envolvem equações matemáticas derivadas de séries temporais simultâneas de entrada e saída e não dos processos físicos da bacia (Devia *et al.*, 2015). A equação geral dos modelos empíricos é descrita na Equação (2.3)

$$Q = f(X, Y), \quad (2.3)$$

onde Q é o escoamento e X , Y são conjuntos de dados de entrada de precipitação e escoamento histórico, respectivamente.

- **Modelos Conceptuais:** Estes modelos são baseados em equações físicas simplificadas do processo hidrológico. Eles fornecem uma ideia conceptual do comportamento de uma bacia hidrográfica e representam a equação do balanço hídrico com a conversão da precipitação em escoamento, evapotranspiração e água subterrânea (Avant, 2017; Devia *et al.*, 2015). Cada componente da equação do balanço hídrico é estimado por equações matemáticas que distribuem a precipitação em dados de entrada (Avant, 2017). Esses modelos necessitam de uma série de parâmetros e dados meteorológicos de entrada (Pechlivanidis *et al.*, 2011; Beven, 2012). A equação geral que rege o modelo conceptual é dada pela fórmula (2.4), é a versão da Equação do balanço hídrico, que controla a água superficial e as flutuações de armazenamento (Beven, 2012).

$$\frac{dS}{dt} = P - ET - Q_s \pm GW, \quad (2.4)$$

onde $\frac{dS}{dt}$ é a mudança no armazenamento do reservatório; P é a precipitação; ET é a evapotranspiração; Q_s é o escoamento superficial e GW é a água subterrânea.

- **Modelos físicos:** Os modelos físicos representam os processos hidrológicos (como evapotranspiração, infiltração, cheias, fluxo de zona saturada e insaturada) usando as equações de movimento (geralmente formuladas como equações com diferenciais parciais não lineares) baseadas na mecânica contínua (Wheater *et al.*, 1993). Geralmente, as equações de movimento dos processos constituintes são resolvidas numericamente, usando uma diferença finita ou uma discretização espacial de elementos finitos; entretanto, podem existir soluções analíticas (Wheater *et al.*, 1993). Em teoria, os modelos baseados na física são definidos por parâmetros totalmente mensuráveis e podem fornecer simulação contínua da resposta do escoamento sem calibração (Beven e Freer, 2001). As equações adoptadas pelos modelos baseados em física são as equações de St. Venant, Boussinesq's, Darcy e Richard's, e a forma semi-discreta da equação de St. Venant usada no sistema integrado de modelação hidrológica, como é dada pela Equação (2.5).

$$\frac{\partial h}{\partial t} = P_0 - I - E_0 - Q_{0c} + \sum_{j=1}^3 Q_s^{ij}, \quad (2.5)$$

onde $\frac{\partial h}{\partial t}$ é a profundidade da água no tempo t ; Q_s^{ij} é o fluxo superficial do elemento i para j ; P_0 é a precipitação; I é a infiltração; E_0 é a evaporação e Q_{0c} é a interação entre o fluxo superficial e o canal roteamento.

2.3. Métodos de mapeamento de áreas de inundação

Para além da identificação de eventos de cheia severas, a partir dos resultados de cálculos estatísticos, simulação usando modelos, os mapas de risco de inundação são uma ferramenta importante para a avaliação prévia do impacto das cheias (Bollin *et al.*, 2003; Kugler *et al.*, 2007 e Ho *et al.*, 2010).

Os mapas de risco de inundação são importantes para a avaliação prévia dos impactos das inundações, pois complementam as informações previstas a partir de modelos hidrológicos e permitem identificar a população, assim como as infraestruturas que poderão ser afectadas pelas inundações (Vilanculos, 2022).

2.3.1. Modelo Digital de Elevação

O MDE é de grande importância para o mapeamento de susceptibilidade a inundações em grandes áreas, onde as cheias tornam-se um problema e originam danos humanos e sociais (Perin *et al.*, 2003). De acordo com Asante *et al.* (2008), o uso do MDE foi aplicado durante as cheias da África Austral, em 2000, onde foram observadas áreas inundadas com 20 km a 30 km de largura, ao longo dos principais rios, como o Limpopo e o Incomáti, em Moçambique. As novas geotecnologias e produtos orbitais (disponibilizados gratuitamente) como imagens de Radar SRTM, possibilitam um levantamento mais rápido e detalhado das bacias hidrográficas (Araújo *et al.*, 2009). O uso desses produtos facilitam o processo de delimitação fornecendo uma dinâmica da análise dessas regiões, de modo que, a pesquisa e desenvolvimento possam acompanhar de perto o uso e a degradação das bacias hidrográficas a fim de criar formas sustentáveis de uso ou parâmetros que dê subsídio a criação e implantação de leis. O mapeamento dos fluxos roteados para a planície de cheia é comumente feito usando o MDE de maior resolução disponível (Oliveira e Loucks, 1997; e Horritt e Bates, 2001b). O mapeamento realizado desta forma tira proveito da representação

3D da topografia, conforme oferecido pelo MDE e usa cálculos de fluxo em estado estacionário simples (Jones *et al.*, 1998). A expressão matemática envolvida é a equação do *Manning*, que permite calcular a relação entre os caudais e as alturas (Q-h). Esta equação é frequentemente usada para um regime de caudais específico e para prever o intervalo da cheia. A equação de *Manning* (Equação 2.6), é frequentemente usada para um regime de caudais específico, para prever o intervalo da cheia e relaciona a profundidade de um fluxo em velocidade (Verdin, *et al.*, 2016).

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} \sqrt{S}, \quad (2.6)$$

onde: V = velocidade em metros por segundo; R = raio hidráulico em metros; S = declive da linha de energia; n = coeficiente de roughness.

De acordo com os autores Verdin, *et al.* (2016), a profundidade e a descarga possuem uma relação directamente proporcional. Esta relação auxilia na determinação da profundidade do fluxo e o intervalo para uma dada descarga. Assim, deve-se transformar a profundidade do fluxo em padrões de inundação, usando o modelo digital de elevação, para garantir eficiência e reprodutividade. O raio hidráulico é um parâmetro importante no dimensionamento de canais, aquedutos, tubos e outros componentes das obras hidráulicas. É comumente usado para estimar o raio de tubos e canais com secção transversal não-circular. A representação esquemática dos parâmetros (área e perímetro molhado) é exibida pela Figura 8 e a expressão matemática de cálculo é apresentada pela Equação (2.7).

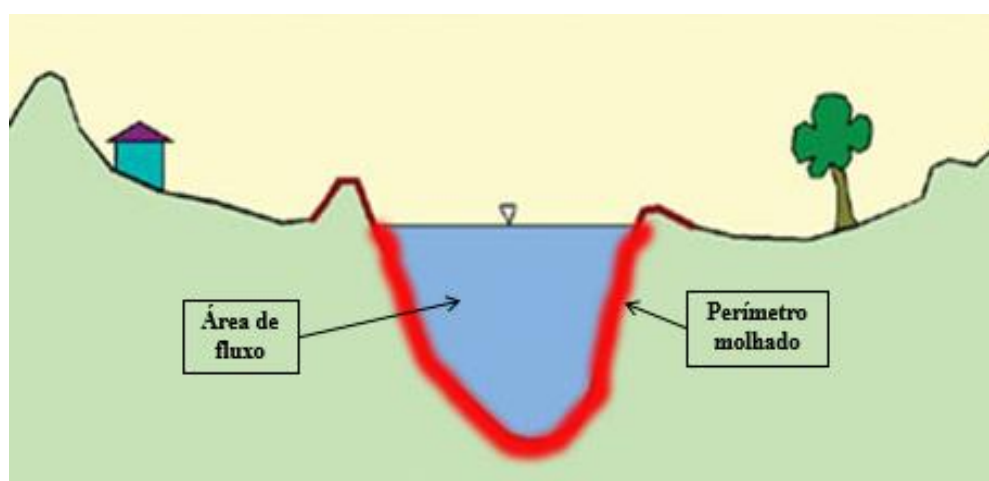


Figura 8: Exemplo de esquematização da relação entre a área do fluxo de caudais e o perímetro molhado numa secção de um rio

Fonte: Verdin, *et al.* (2016).

$$R = \frac{A}{P}, \quad (2.7)$$

onde R = raio hidráulico (m); A = área de fluxo (m^2); P = perímetro molhado (m).

O raio hidráulico varia dependendo da profundidade do fluxo de caudais e é calculado em faixas de profundidades. Finalmente, uma relação profundidade-descarga para cada alcance pode ser usada para uma gama de caudais estimados pela Equação (2.8) descrita por Verdin, *et al.* (2016).

$$Q = V.A, \quad (2.8)$$

onde Q = Caudal em metros cúbicos por segundo; V = Velocidade em metros por segundo; A = Área em metros.

2.3.2. Imagens de Satélite

O avanço dos sensores, no processamento de imagem e sua integração com SIG têm permitido um aumento significativo no número de informações disponíveis e manipuláveis. As técnicas de tratamento de imagens têm facilitado a representação e o mapeamento de áreas susceptíveis a inundação (Dos Santos, 2012). Conforme Vilanculos (2022), o processo de mapeamento das áreas de risco de inundação usando as imagens de satélites consiste na utilização de técnicas de classificação de imagens com o a finalidade de reconhecer, automaticamente, objectos em função de determinado critério de decisão, agrupando em classes, os objectos que apresentam similaridade em suas respostas espectrais. Na classificação, procura-se rotular cada pixel da imagem em uma classe temática, semelhante ao que se faz na abordagem visual e, para isso, usa-se os algoritmos de classificação. Além dos níveis de cinza, também devem ser interpretadas a textura e a forma da imagem. Para o processamento e análise de imagens de satélite, é necessário recorrer a *softwares* específicos, que permitem aplicar técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI), como correcção e realce. No mercado, existe uma gama de variedades de *softwares* para analisar e processar imagens de satélites, por forma a avaliar riscos de cheias, tais como o Sistema de Processamento de Informação Georreferenciada (SPRING). Os *softwares* de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), como ArcGIS, ArcView 3.x, ERDAS, ILWIS, IDRIS, QGIS, são exemplos de *softwares* livres e comerciais usados para reproprocessamento que geram, directamente, um plano de informação e uma carta temática, e que possibilitam pesquisar, sobrepor e integrar, à imagem analisada outros dados como assentamentos humanos, estradas, infraestruturas socioeconómicas, para avaliação de riscos de cheias para

diferentes magnitudes A limitação das imagens de satélite reside na diferença das datas em que as imagens são obtidas, o que pode não corresponder exactamente à ocorrência de um evento de cheia (Hess *et al.*, 1995; Ho *et al.*, 2010). A Figura 9, exemplifica um mapeamento feito através de imagens de satélites na bacia do Púnguè e Búzi, após a passagem do ciclone tropical IDAI, em 2019.

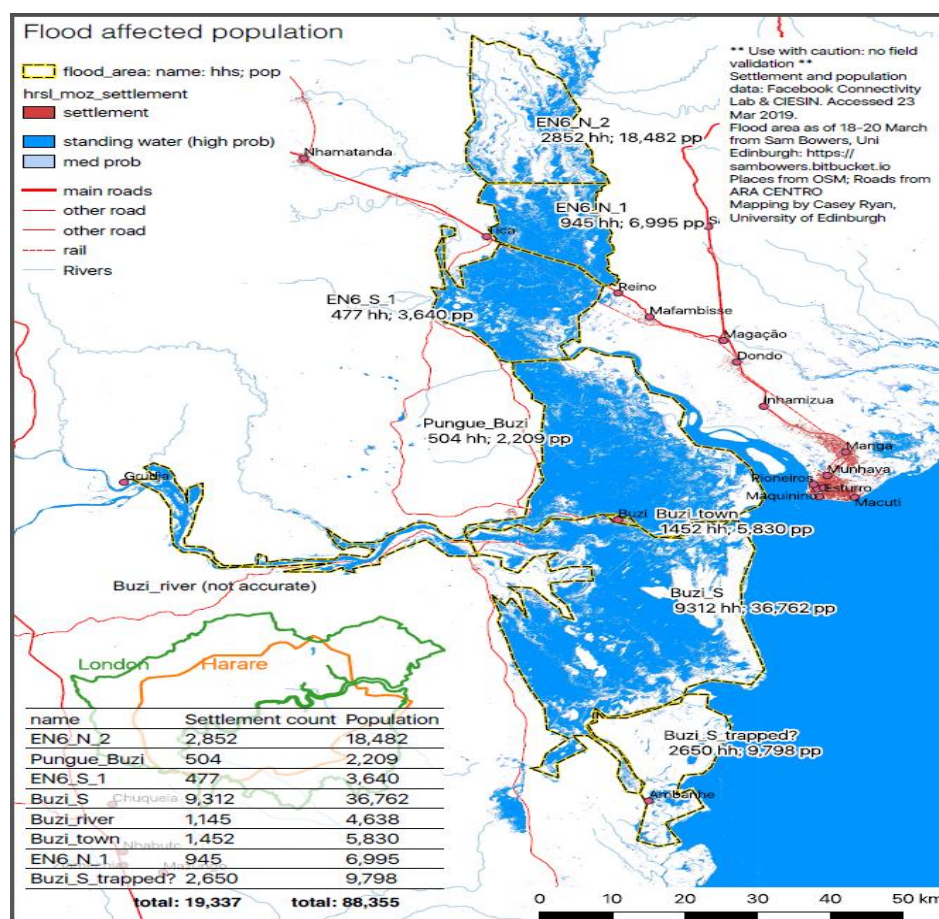


Figura 9: Exemplo de mapeamento de áreas das cheias nas bacias do Búzi e Púnguè, após a passagem do ciclone IDAI, em 2019

Fonte: Vilanculos (2022).

3. MATERIAL E MÉTODO

3.1. Descrição da Área de Estudo

A Figura 10, mostra a localização geográfica da bacia hidrográfica do rio Búzi, a bacia do Búzi é uma bacia internacional, compartilhada entre a República do Zimbábwe e a República de Moçambique. Dentro do território moçambicano a bacia do rio Búzi atravessa as províncias de Sofala e Manica abrangendo os distritos de Gondola, Machaze, Manica, Mossurize, Sussundenga e cidade de Chimoio na província de Manica e os distritos de Búzi, Chibabava e Nhamatanda, na província de Sofala.

O rio Búzi tem a sua nascente nas montanhas do Leste da República do Zimbábwe a uma altitude superior a 3.000 m e estende-se do Leste até à costa da República de Moçambique atravessando as províncias de Manica e Sofala, desaguando no Oceano Índico, o rio Búzi tem uma extensão fluvial de 374 km na República de Moçambique e cerca de 20 km de extensão fluvial na República do Zimbábwe. Tem como principais afluentes os rios Lucite e Revué. O rio Búzi é fortemente curvilíneo nas planícies aluviais a leste, o regime hídrico do rio ocasiona transbordos frequentes, levando a alterações no curso do rio (SWECO, 2011).

De acordo com o relatório da DNGRH (2021), a bacia hidrográfica do rio Búzi compreende uma área de cerca de 28 870 km², dos quais 6 066 km² (21%) corresponde ao território da República do Zimbábwe e 22 804 km² (79%) corresponde ao território da República de Moçambique.

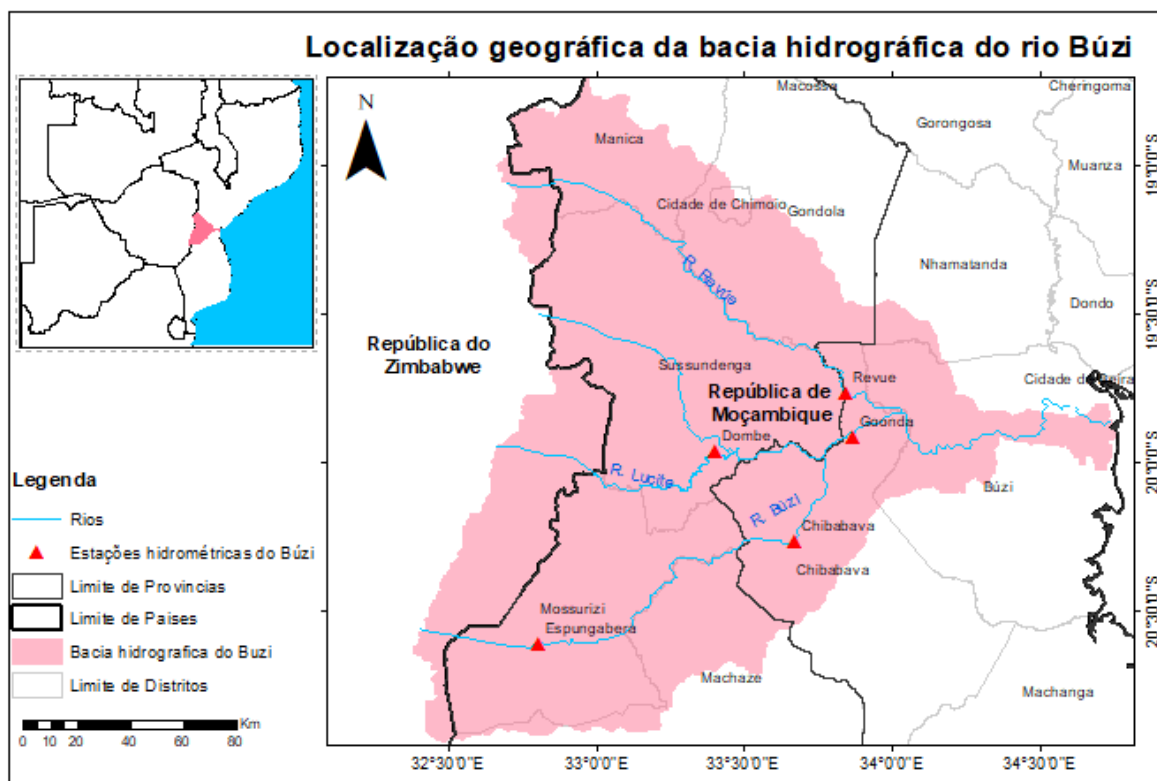


Figura 10: Localização geográfica da bacia hidrográfica do rio Búzi

Fonte: CENACARTA (2005).

3.2. Características fisiográficas da bacia do rio Búzi

3.2.1. Topografia

Conforme Vilanculos (2015), muitos modelos hidrológicos utilizam uma grade de dados de elevação para criar características topográficas que descrevem as características físicas de cada sub-bacia a ser modelada. A Figura 11, mostra o mapeamento das faixas de elevação dividida em 5 classes onde de 0 m - 230 m foi considerada a altitude muito baixa, 230 – 480 m altitude baixa, 480 – 784 m altitude média, 784 – 1233 m altitude alta e de 1233 – 2427 m altitude muito alta. Ainda de acordo com a Figura, verifica-se maior ocorrência de áreas muito baixas com a altitude menor a 230 metros, na parte Sudeste da bacia. As áreas mais altas com altitudes acima de 2000 metros são mais registadas na parte Noroeste da bacia.

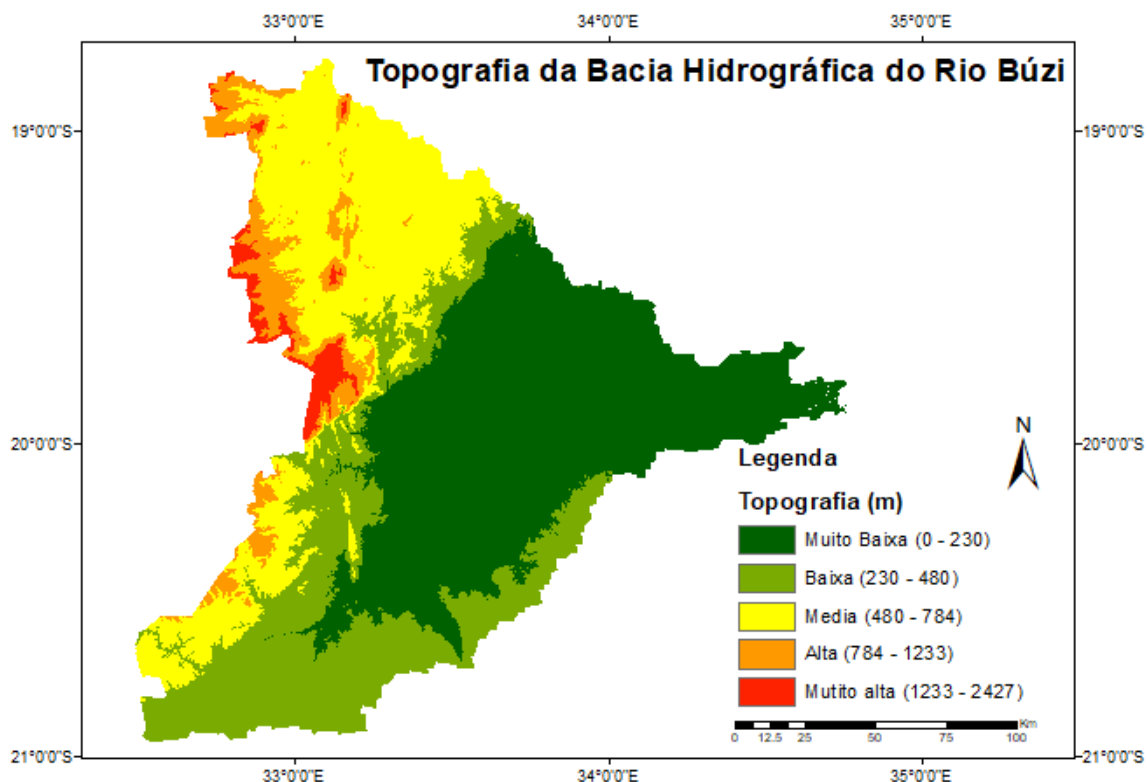


Figura 11: Variação espacial da topografia na bacia hidrográfica do rio Búzi

Fonte: USGS (2015).

3.2.2. Clima

A Figura 12, mostra a representação gráfica da variação da precipitação e da temperatura anual ao longo da bacia do rio Búzi. Segundo SWECO (2011), a bacia do Búzi tem um clima tropical e húmido, de acordo com a classificação climática de Köppen. A temperatura média anual da bacia do Búzi ronda entre os 18 e 23°C, sendo que a temperatura média mínima ronda entre os 16°C nos meses de Junho a Julho.

De acordo com os gráficos de precipitação, os maiores valores de precipitação são registados entre os meses de Dezembro a Março, que corresponde ao período chuvoso, com a precipitação média mensal a variar de 180 a 286 mm e os meses de Junho e Julho os meses de estiagem, registam menor precipitação a rondar de 16 a 30 mm.

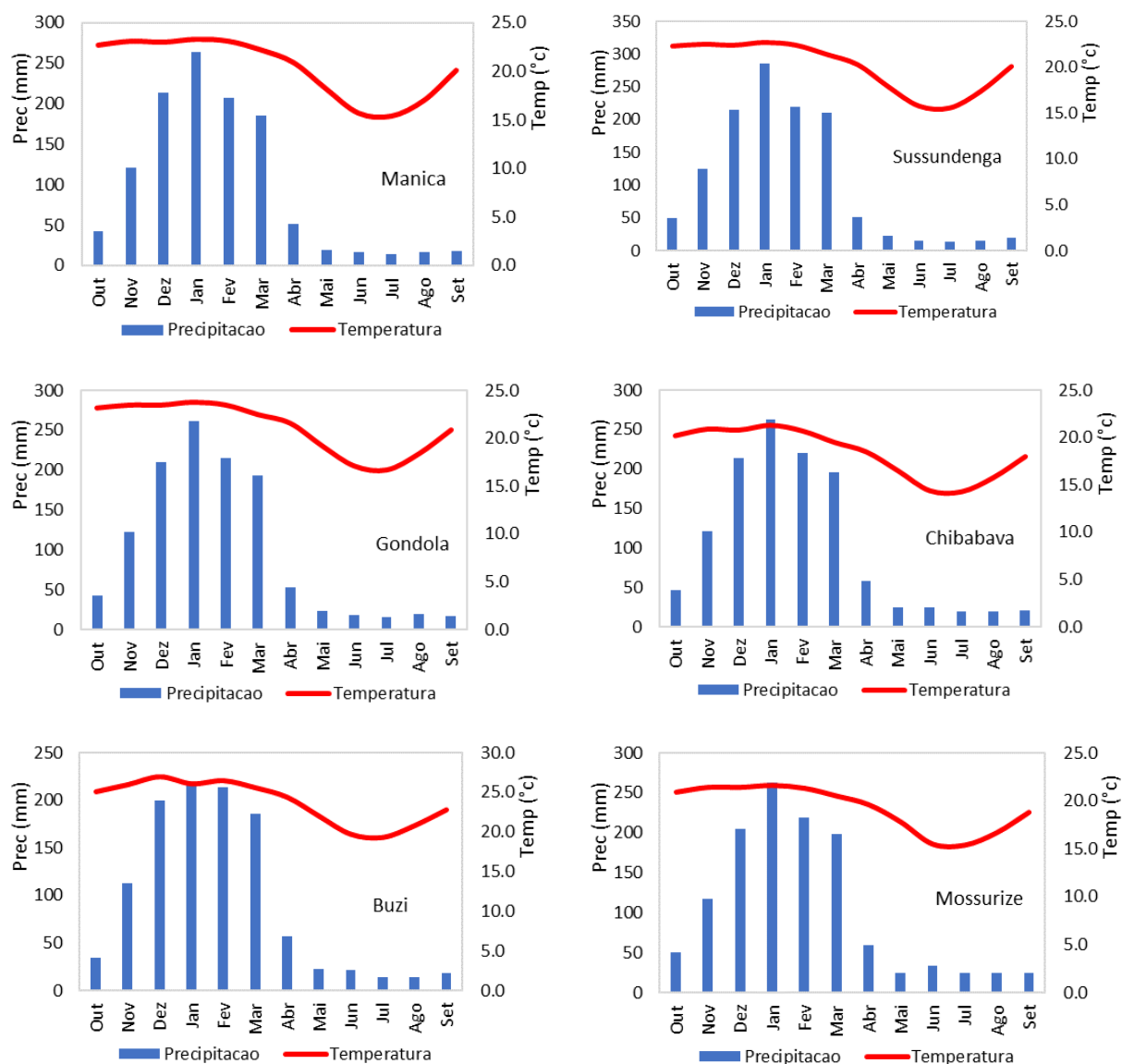


Figura 12: Distribuição sazonal da temperatura e precipitação média mensal ao longo da bacia do rio Búzi durante o período de 1960 - 2000

Fonte: IWRI (2012).

3.2.3. Solos

Muitos processos do escoamento da bacia são regulados através do meio solo, que desempenha um papel primordial na sua capacidade de absorver, reter e redistribuir água (Schulze, 2007).

A Figura 13, mostra a distribuição espacial dos tipos de solo na bacia hidrográfica do rio Búzi, segundo a classificação da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação. Na parte Sul e Este da bacia, há maior predominância de solos de sedimentos marinhos, solos de aluviões estratificados, solos de mananga com cobertura arenosa e solos

arenosos não especificados, estes solos são susceptíveis a inundação. A parte Noroeste é mais caracterizada por solos arenosos vermelho e solos vermelhos, devido as suas capacidades de infiltração estes tipos de solos são menos susceptíveis a inundação.

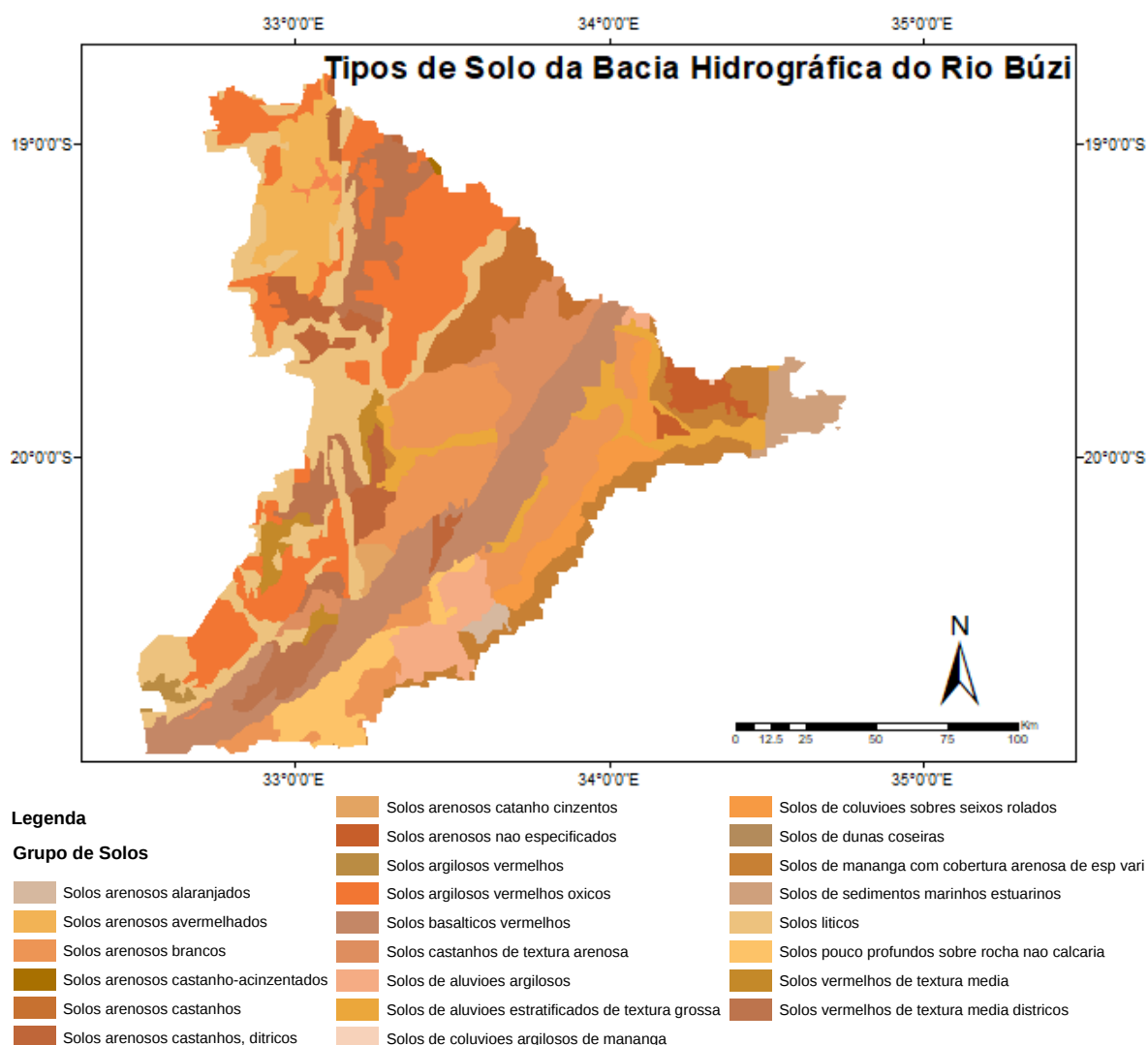


Figura 13: Distribuição espacial dos tipos de solo da bacia do Búzi

Fonte: IIAM (1992).

3.2.4. Uso e cobertura do solo

De acordo com Vilanculos (2015), os dados de uso e cobertura da terra são necessários para determinar a resposta da bacia aos eventos de chuva e, juntamente com os dados do solo, são usados para estimar os coeficientes de resposta usados pelos modelos hidrológicos para determinar o excesso de chuva, recarga ao sistema de águas subterrâneas e à quantidade de água armazenada no solo.

A Figura 14, mostra as diferentes classes de uso do solo na bacia hidrográfica do rio Búzi, onde a formação herbácea herborizada é a mais predominante em quase toda bacia, principalmente na parte Sueste, seguida da floresta de baixa altitude aberta que é mais predominante na parte Este e na parte central da bacia. A formação herbácea tem tido alguma predominância na parte Noroeste e sudoeste da bacia.

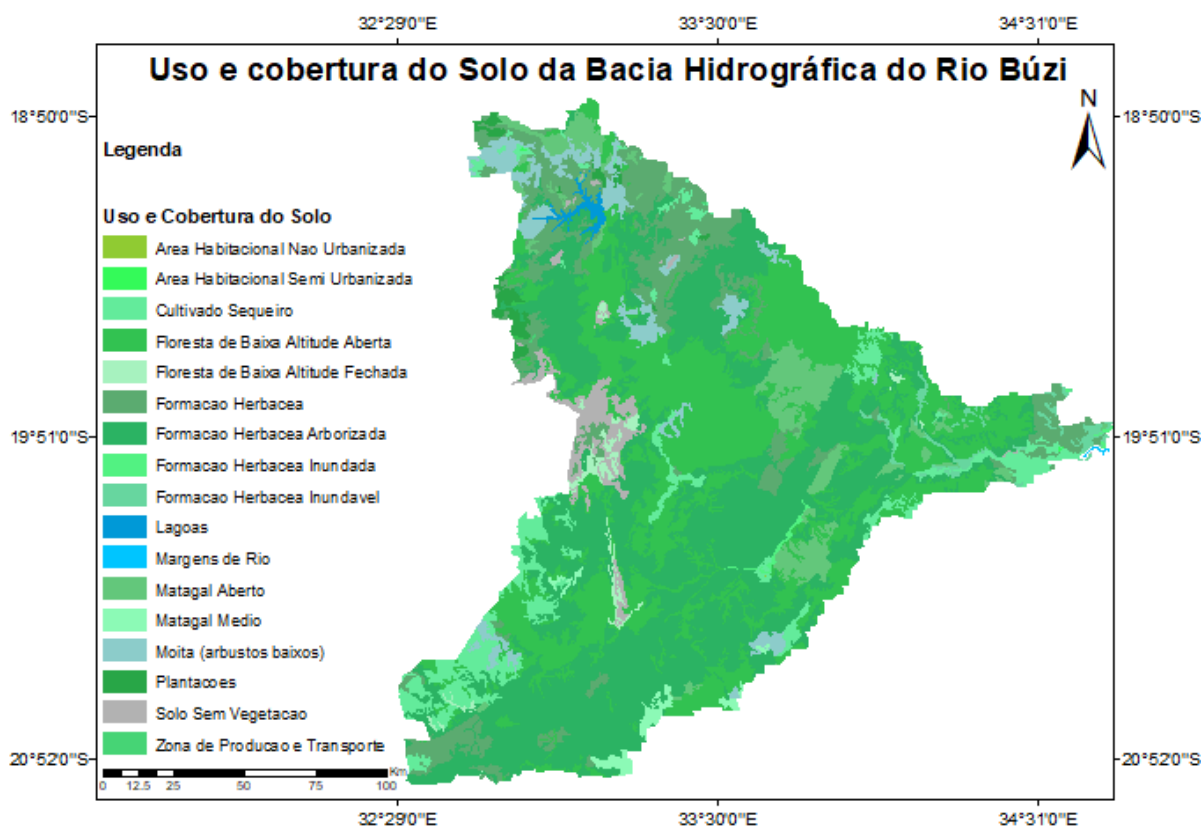


Figura 14: Distribuição espacial das classes de uso e cobertura do solo

Fonte: DINAF (2005).

3.3. Materiais

Para a realização do trabalho foram usados os seguintes dados:

I. Dados de Modelo Digital de Elevação

Os dados de modelo digital de elevação (DEM) foram obtidos no site do *Open Topography* (<https://portal.opentopography.org/raster?opentopoID=OTSRTM.082015.4326.1>). O DEM tem uma resolução espacial de 30 m. Os dados de modelo digital foram uteis no mapeamento de áreas de risco a inundações na bacia hidrográfica do rio Búzi.

II. Dados de Solos

Os dados de solos foram obtidos do Instituto de Investigação Agrária de Moçambique (IIAM) em formato *shapefile* e foram úteis na elaboração de mapa temático do solo da bacia hidrográfica do rio Búzi.

III. Dados de Uso e Cobertura do Solo

Os dados de uso e cobertura do solo foram obtidos na Direcção Nacional de Florestas (DINAF), em formato *shapefile*, os dados foram úteis para fazer mapa temático de uso e cobertura do solo da bacia hidrográfica do rio Búzi.

IV. Imagem de Satélite

Os *Shapefiles* ilustrando imagem de acumulação das águas superficiais entre os dias 13 a 26 de Março de 2019 nas províncias de Sofala e Manica foram obtidos no sítio do *United Nations Institute for Training and Research* (UNITAR) (<https://unitar.org/unosat/node/44/2896>). Estes dados foram úteis para avaliar a mancha de água causada pela passagem do ciclone tropical IDAI e fazer a comparação com área de inundação produzida pelo *software* GFT.

V. Dados de Precipitação e temperatura do ar

Os dados de precipitação e temperatura do ar foram obtidos no Instituto Nacional de Meteorologia (INAM) e na Direcção Nacional de Gestão de Recursos Hídricos (DNGRH). Os dados correspondem a uma série de 40 anos (1960 a 2000) extraídos da IWR, 2012. Os dados da precipitação e temperatura do ar foram usados para produzir gráficos de variação espacial da precipitação na bacia hidrográfica do rio Búzi.

VI. Dados de Divisão administrativa

Os dados em formato de *shapefile* da divisão administrativa foram obtidos no Centro Nacional de Cartografia e Teledetecção (CENACARTA), foram usados para elaboração de mapas de divisão administrativa da bacia.

VII. Dados da População

Os dados de população foram adquiridos no Instituto Nacional de Estatística (INE). São dados referentes ao IV CENSO geral da população do ano 2017. Os dados foram usados para quantificar o número de pessoas em risco de inundação na bacia hidrográfica do rio Búzi.

VIII. Dados de Caudais

Os dados de caudais foram obtidos na DNGRH no período de 1999 a 2022. Os dados são referentes as estações de medição em Dombe e Goonda. Estes dados foram úteis para o cálculo do período de retorno.

IX. Dados das Infraestruturas Socioeconómicas

Os dados de infraestruturas socioeconómicas analisadas neste trabalho são escolas, hospitais e aldeias destruídas pelas inundações a quando da passagem do ciclone IDAI na bacia hidrográfica do rio Búzi. Os dados foram obtidos no Instituto Nacional de Gestão e Redução de Risco de Desastre (INGD) e foram úteis para avaliar o impacto das inundações na bacia hidrográfica do rio Búzi.

3.4. Software

Para o desenvolvimento do trabalho foram usados os seguintes materiais:

- ArcMap 10.2 (para elaboração dos mapas temáticos),
- *GIS Flood Tool*, (é uma ferramenta que corre no ArcMap 10.2, para a determinação das áreas de inundação),
- *Microsoft Excel* (usado para elaboração dos gráficos de temperatura e precipitação),
- *Expert System for Frequency Analysis (SAEF)* usado para a determinação dos períodos de retorno.

3.5. Métodos

3.5.1. Análise de Frequência de cheias

A análise de frequência é uma das principais ferramentas para estimar a vazão de um rio para um determinado período de retorno. É utilizado quando existem dados hidrológicos suficientes no local e baseia-se em métodos estatísticos para definir a probabilidade de ocorrência de inundações (Stedinger *et al.*, 1993; Ahattab *et al.*, 2015).

Os valores de vazão máxima anual foram extraídos da série temporal observada nas estações de Goonda (E-456) e Dombe (E-246) de 1999 a 2022. A determinação dos períodos de retorno foi baseada na Equação (3.2). Para a amostra de inundação, foi usada a distribuição de valores extremos de Gumbel dada pela Equação (3.3), visto que, segundo Naghettini e

Pinto (2007) a distribuição de Gumbel considera os valores extremos que são ideais na análise de frequências hidrológicas.

$$T(X_m) = \frac{1}{P(X_m)}, \quad (3.2)$$

onde: $P(X_m)$ - Probabilidade de ocorrência; m - número de observações começando de maior valor para o menor; n - número de observações; $T(X_m)$ - Período de retorno.

$$F_Y(y) = \exp \left[- \exp \left(\frac{y - \beta}{\alpha} \right) \right], \quad (3.3)$$

onde: $F_Y(y)$ – Probabilidade acumulada de ocorrência de um evento y ; α, β – Parametro de forma, escala e posição respectivamente.

3.5.2. Processo de obtenção dos mapas de risco de inundação

O mapeamento de áreas de risco a inundações é baseado no MDE em um algoritmo desenvolvido pela *United States Geological Survey* (USGS) em 2014, designado por *GFT*. O método, difere dos demais, na medida em que explora as relações espaciais entre a inundação e o nível hidrométrico do rio em função do escoamento gerado em cada instante.

A base técnica do GFT é a aplicação da equação de *Manning* Equação (3.4) para fluxo constante em um canal aberto, fazendo a relação de profundidade e a vazão para cada seção transversal do rio (Verdin, *et al.*, 2016).

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \sqrt{S}, \quad (3.4)$$

onde: V = velocidade em metros por segundo; R = raio hidráulico em metros; S = declive da linha de energia; n = coeficiente de roughness.

O Raio hidráulico (R) é obtido através da Equação (3.5).

$$R = \frac{A}{P}, \quad (3.5)$$

onde: A = Área de Fluxo (m^2); P = Perímetro húmido (m).

Após determinada a profundidade do rio pela aplicação da equação de *Manning*, é determinada a área inundada correspondente usando o MDE Relativo.

O MDE Relativo é uma versão do MDE de entrada que é processado pelo GFT para produzir valores de elevação que são expressos como altura acima do rio.

O MDE Relativo é processado para permitir a interconectividade entre os *pixels*, definindo quais *pixels* fluem para quais. Usando esses algoritmos, cada *pixel* sem fluxo no MDE é tributário de apenas um *pixel* de fluxo, este processo é representado na Figura 15. A elevação do *pixel* de fluxo é subtraída da elevação dos *pixels* não-fluxo que são tributários do *pixel* de fluxo; os *pixels* do fluxo recebem o valor de zero (0) (Verdin, *et al.*, 2016). A Figura 16, demonstra a interconctividade entre os *pixels* de fluxo de um MDE condicionado para os *pixels* que recebem o valor zero (0) no MDE Relativo.

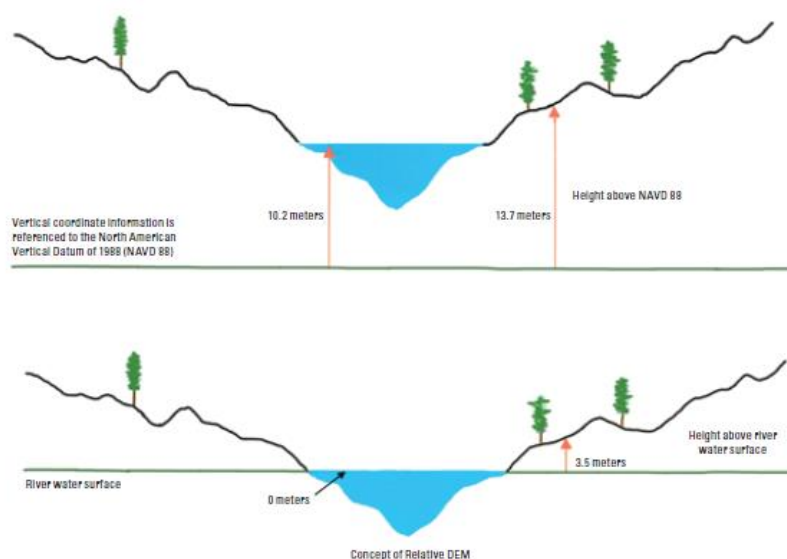


Figura 15: Concepção do MDE Relativo

Fonte: Verdin *et al.* (2016).

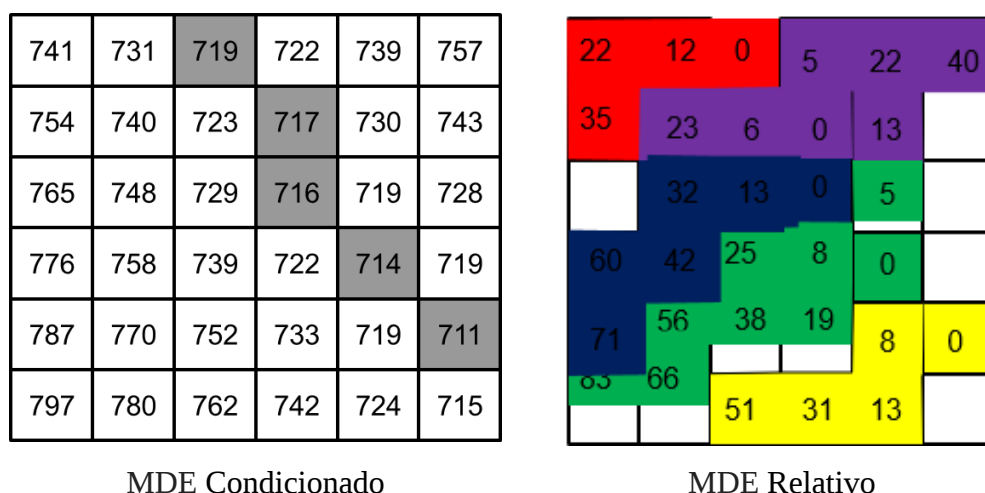


Figura 16: Processos do fluxo do MDE Relativo e MDE Condicionado

Fonte: Verdin, *et al.* (2016).

Após realizada a relação fluxo caudal, são estimadas as descargas para cada fluxo de modo a gerar padrões de inundação para cada alcance do fluxo da descarga especificada.

Para a execução do GFT são necessários quatro (4) conjuntos de dados:

- O MDE incondicionado (“bruto”) para a área,
- O MDE condicionado hidrologicamente,
- Direções de fluxo derivadas do MDE hidrologicamente condicionado, e

Acumulações de fluxo derivadas do MDE hidrologicamente condicionado.

3.5.3. Validação dos resultados

Para a validação dos resultados foram comparadas as imagens da extensão da inundação da água superficial dos dias 13 - 26 de Março 2019, dias da passagem do ciclone tropical IDAI com o resultado obtido no modelo GFT, gerado pelo processo no ArcMap.

3.5.4. Avaliação de impacto das inundações na bacia hidrográfica do rio Búzi

Para análise do impacto das inundações na bacia hidrográfica do Búzi foi feita uma avaliação da informação sobre perdas e danos obtidas no INGD/ CENOE. As informações colhidas no INGD/CENOE são referentes ao impacto das inundações causadas pelo ciclone tropical IDAI na destruição de casas, estradas e escolas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise da frequência de ocorrência de cheias na bacia hidrográfica do rio Búzi.

Da análise da frequência de cheia causada pelo ciclone tropical IDAI na bacia hidrográfica do rio Búzi, nas duas principais estações hidrométricas da bacia (Goonda – E456 e Dombe – E246), verifica-se que os caudais máximos atingidos durante a passagem do ciclone tropical IDAI foram de 33611.35m³ na estação hidrométrica do Goonda e de 16272.29m³ para a estação de Dombe. A tabela 2, mostra as estimativas do período de retorno, usando a distribuição de Gumbel. Os resultados mostram a ocorrência de um evento similar em um período de retorno de 200 a 1000 anos para o caudal da estação de Goonda e de aproximadamente 10 anos para o caudal da estação de Dombe.

Tabela 2: Períodos de retorno da estação de Goonda e Dombe, usando a distribuição Gumbel

Estação	Períodos de Retorno em anos						
	2	5	10	50	100	200	1000
Goonda – E456	8447.233	13640.02	17078.1	24644.77	27843.62	31030.79	46931.32
Dombe – E246	10530.43	14082.93	16435	21611.53	23799.94	25980.36	36858.27

4.2. Mapeamento de área de risco a inundações na bacia hidrográfica do rio Búzi

A Figura 17, mostra os diferentes níveis de risco de inundação na bacia hidrográfica do rio Búzi gerados pelo GFT, de acordo com o caudal registado durante a passagem do ciclone tropical IDAI. Os resultados mostram que o risco de nível 1 varia de 6 a 8 metros de altura do rio e ocupa uma área de aproximadamente 170 km²; o risco de nível 2 varia de 8 a 10 metros de altura, ocupando uma área de aproximadamente 500 km²; e por fim, o risco de nível 3 com uma altura maior de 10 metros, ocupando uma área de aproximadamente 1200 km². O MDE mostra que as áreas mais baixas com uma altitude, que varia de 0 a 230 metros, são susceptíveis ao risco de inundação e a parte jusante da bacia apresenta maior extensão da área inundada (Figura 17). Adicionalmente, pela análise, as áreas ao longo do curso do rio e superfícies de água são locais susceptíveis a inundação. As áreas com maior elevação que variam de 1000 a 2400 metros estão totalmente livres das inundações e, portanto, são seguras para a população. Este facto está associado as suas características topográficas, e também ao facto de se tratar de uma área onde desagua o rio. Resultados similares foram encontrados por Cuamba (2016) e Neves *et al.*, (2022).

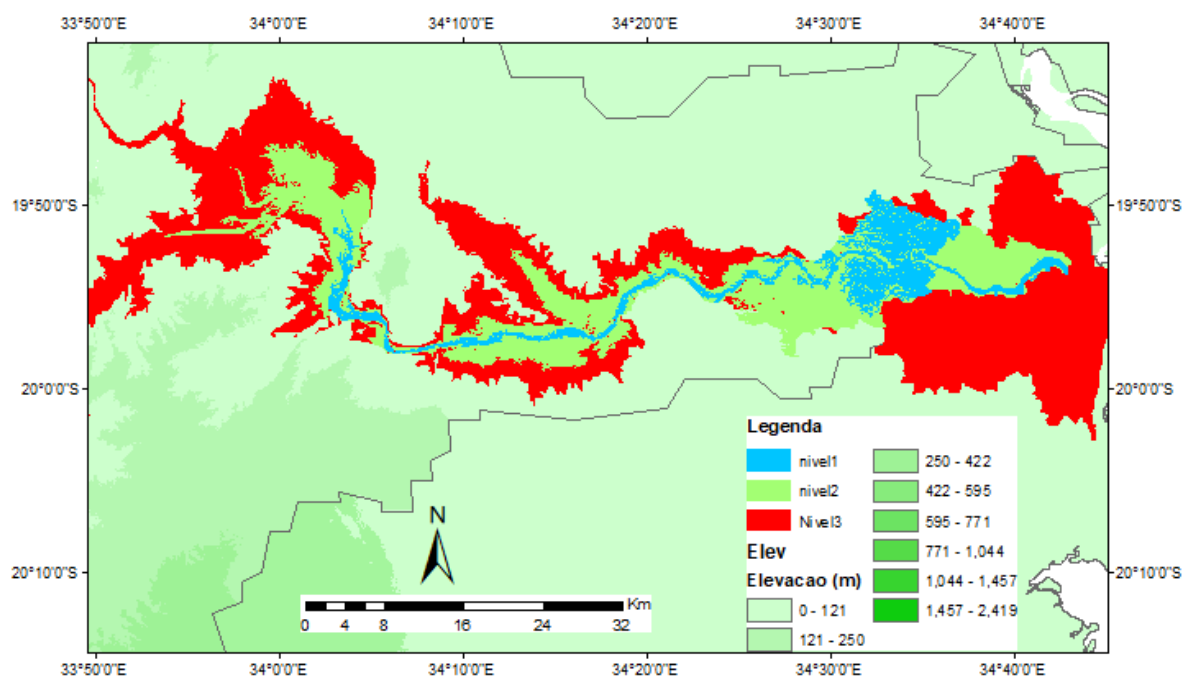


Figura 17: Risco de inundação na bacia hidrográfica do rio Búzi gerados pelo GFT

A Figura 18, mostra a área de inundação gerada pelo GFT e a imagem de satélite captada entre os dias 13 a 26 de Março de 2019. Comparando as áreas obtidas pelo GFT e a imagem de satélite, verifica-se uma semelhança nas áreas de risco de inundação, validando assim os resultados obtidos pelo GFT.

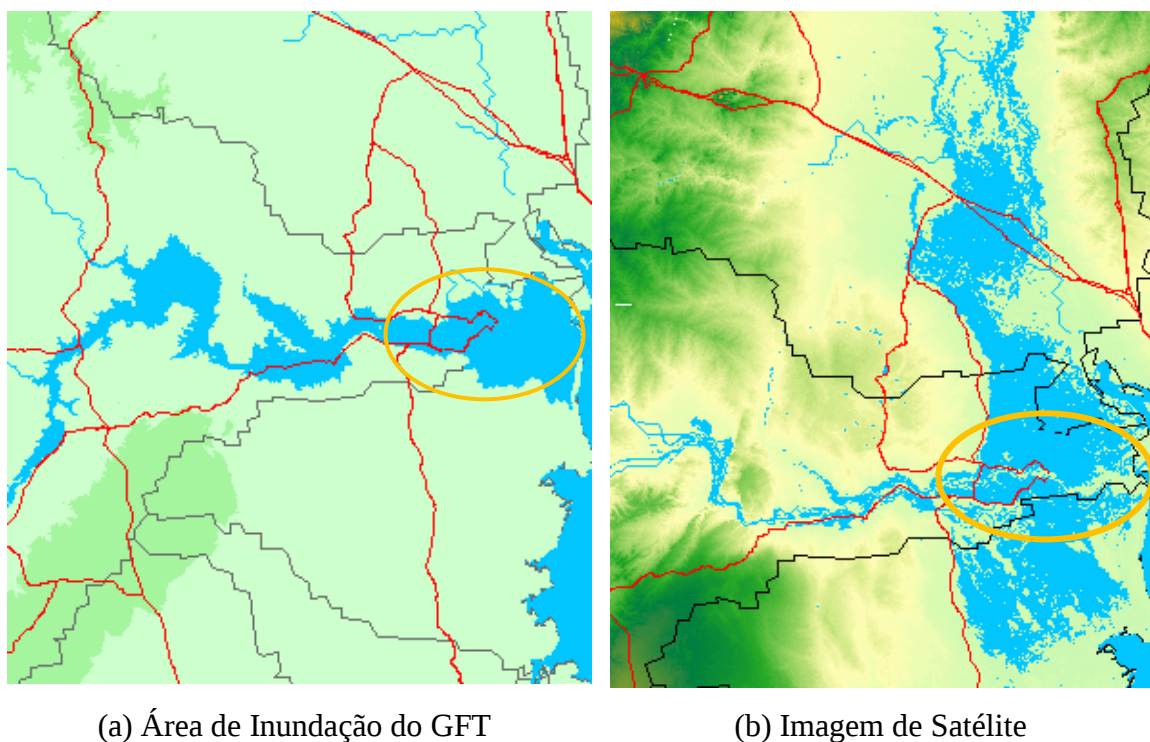


Figura 18: Área de inundação gerada pelo GFT (a) e a área captada pela imagem de satélite dos dias 13 a 26 de Março de 2019 (b)

4.3. Impacto das inundações nas infraestruturas socioeconómicas

As Figuras 19, 20 e 21, ilustram a sobreposição das infraestruturas socioeconómicas e as áreas de risco de inundação, por forma a identificar as infraestruturas que se encontram na área de risco. Os resultados mostram que tem 1 escola e cerca de aproximadamente 2690 habitantes na área de risco de nível 1. Para a área de risco de nível 2 encontram-se aproximadamente 3910 habitantes, 10 escolas e 2 hospitais. Para área de risco de nível 3 encontram-se na área de risco aproximadamente 12400 habitantes, 26 escolas e 7 hospitais, sendo esta a área que regista maior nível de impacto, muito provavelmente devido ao seu tamanho. Assim, com base nestes resultados, é essencial aumentar o investimento na protecção contra as inundações, para as infraestruturas críticas situadas em áreas de risco de inundação muito elevado. E para as infraestruturas mais recentes, devem ser desenvolvidas nas regiões com baixos riscos de inundação. Informação detalhada sobre as infraestruturas socioeconómicas que tiveram o impacto das inundações podem ser encontradas nas tabelas no anexo 2.

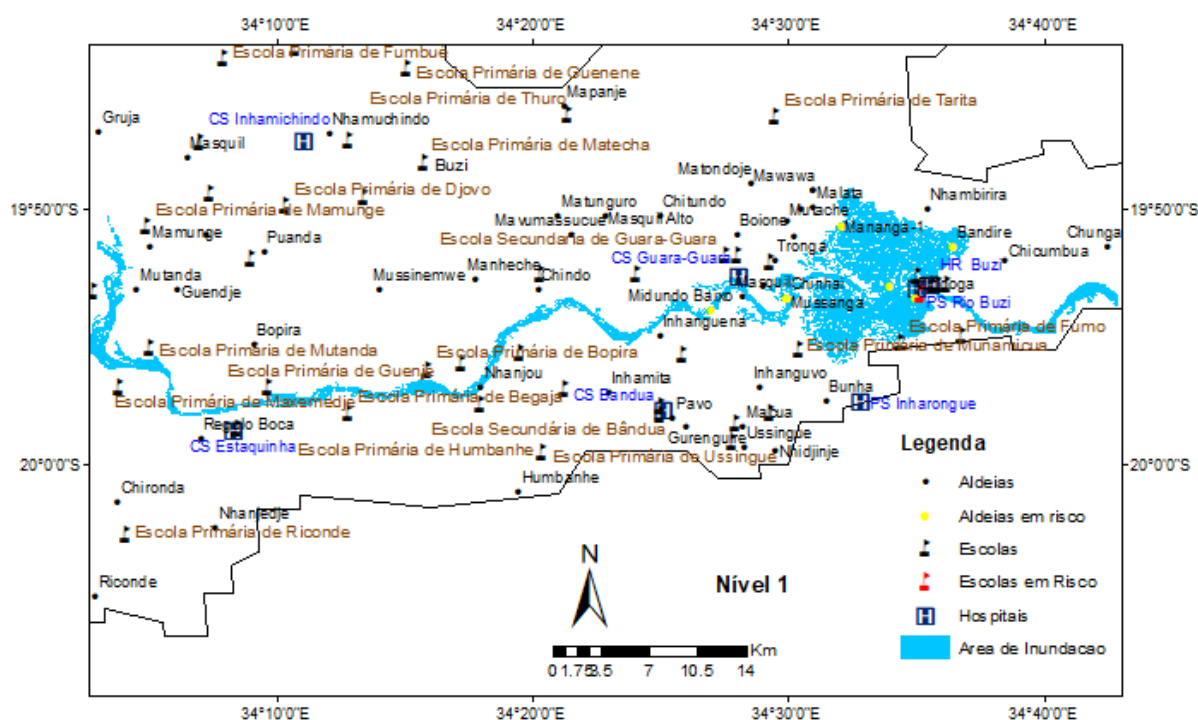


Figura 19: Impacto das inundações nas infraestruturas socioeconómica de nível 1

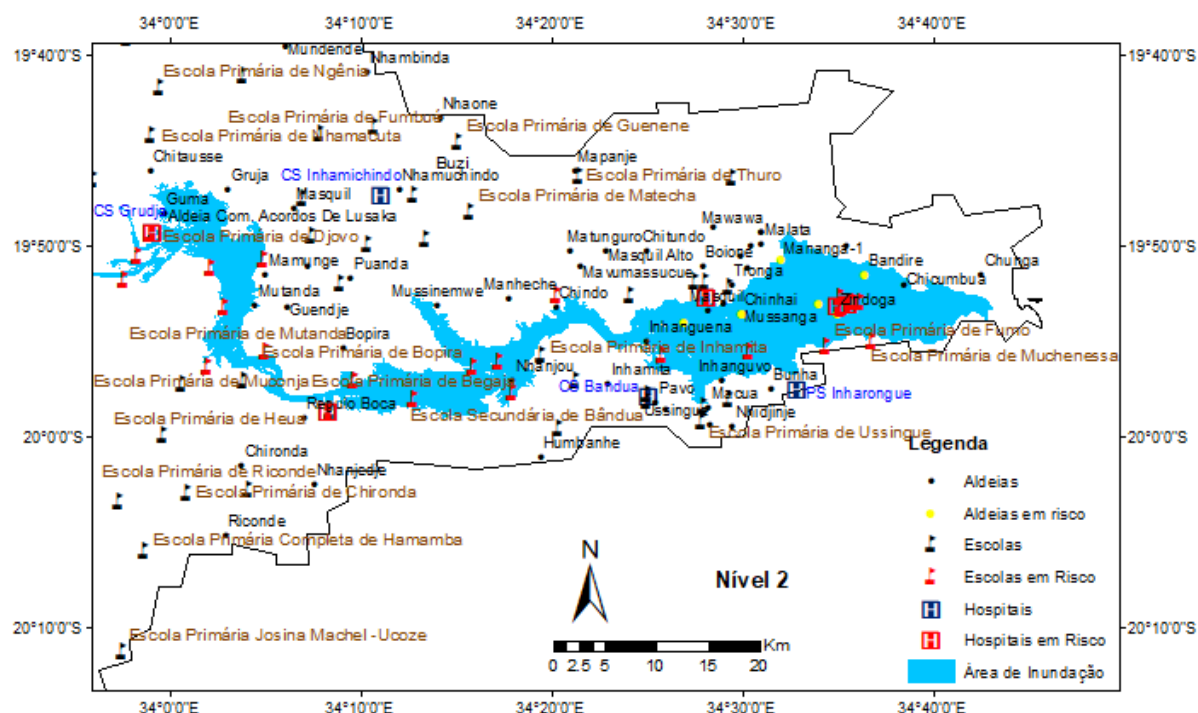


Figura 20: Impacto das inundações nas infraestruturas socioeconómica de nível 2

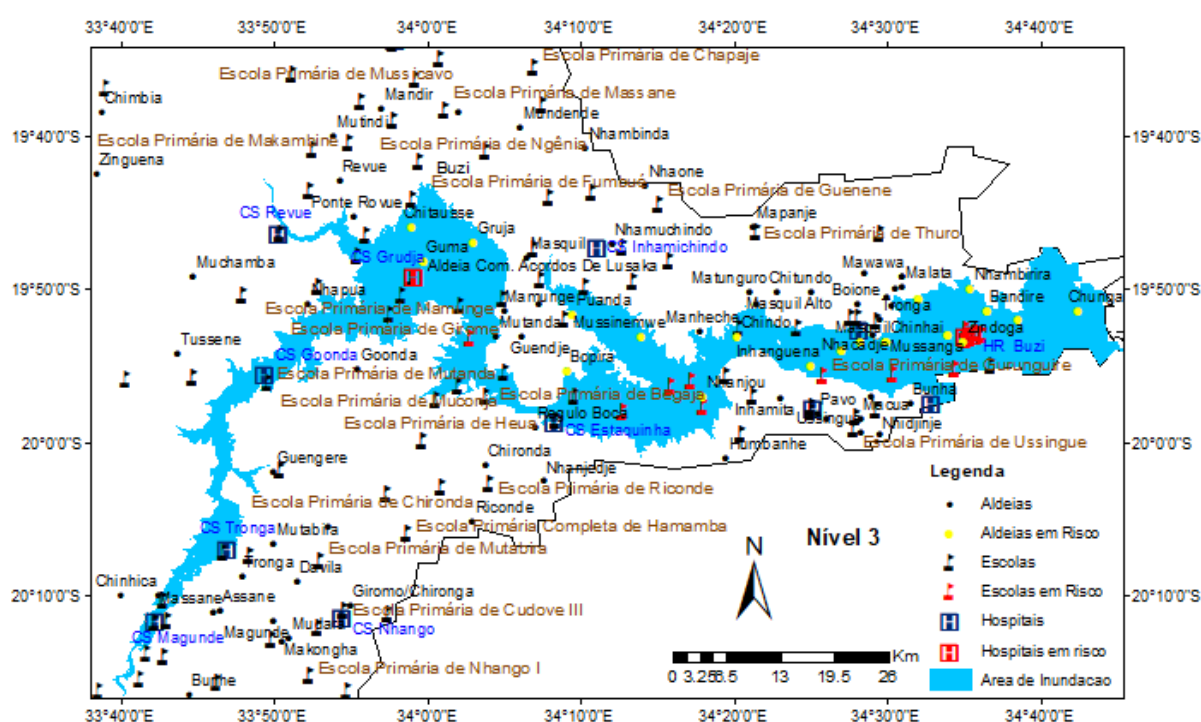


Figura 21: Impacto das inundações nas infraestruturas socioeconómica de nível 3

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1. Conclusões

O presente estudo teve como objectivo, mapear as áreas de inundação na bacia hidrográfica do rio Búzi usando o GIS *Flood Tool*, tendo como base a cheia registada durante a passagem do ciclone tropical IDAI. Do estudo obteve-se em três principais conclusões:

- O tempo estimado de retorno, para os caudais registados durante a passagem do ciclone tropical IDAI estimou-se um intervalo de período de retorno de 200 a 1000 anos. Esses resultados fornecem informações úteis para fins de tomada de decisões e políticas;
- Do mapa gerado pelo GFT constatou-se que, a Este da bacia é relativamente a que regista maior risco de inundação, isto é devido as suas características topográficas, pois, a parte Este da bacia tem baixas altitudes, variando de 0 a 230 metros. Adicionalmente, os resultados mostraram que as áreas ao longo do curso do rio e superfícies de água, são locais susceptíveis a inundação. A parte Oeste da bacia apresenta a topografia mais elevada que varia de 1000 a 2400 metros, tornando-a totalmente livre das inundações, portanto, são seguras para a população. Foram considerados três níveis de risco de inundação, onde o risco de nível 3, > 10 metros ocupa a maior extensão de inundação com uma área de aproximadamente 1200 km². Estes resultados do mapa gerado pelo GFT mostraram-se semelhantes com a imagem de satélite como a mancha da imagem de satélite captada entre os dias da passagem do ciclone tropical IDAI, validando assim estes resultados;
- Em termos de impacto causado pelas inundações nas infraestruturas socioeconómicas constatou-se que, tem 1 escola e cerca de aproximadamente 2690 habitantes na área de risco de nível 1. Para a área de risco de nível 2 encontram-se aproximadamente 3910 habitantes, 10 escolas e 2 hospitais, e, para área de risco de nível 3 encontram-se aproximadamente 12400 habitantes, 26 escolas e 7 hospitais. Estes resultados mostraram um maior impacto para o nível de risco 3, muito provavelmente devido ao seu tamanho.

5.2. Limitações e Recomendações do estudo

Embora este estudo forneça informações muito úteis e oportunas para a gestão de inundações, o mesmo tem como limitação o facto da data e a hora da imagem de satélite usada, normalmente não é o momento da cheia máxima e, portanto, a extensão da água que pode ser derivada destas imagens pode ser muito menor do que a extensão máxima da inundação.

Com base nos resultados deste estudo, recomenda-se ao governo Moçambicano e aos tomadores de decisão a:

- Terem em conta estudos desta natureza por forma a encontrar melhores soluções para a gestão de inundações e definir os melhores locais para a instalação de diferentes infraestruturas económicas;
- Aumentar o investimento na protecção contra as inundações, para as infraestruturas críticas situadas em áreas de risco de inundação muito elevado. E para as infraestruturas mais recentes, sugere-se que estas sejam desenvolvidas nas regiões com baixos riscos de inundação;
- Aplicação das medidas estruturais, através de construção de obras hidráulicas como barragens, diques e canalização, bem como a reabilitação das infraestruturas hidráulicas existentes na área de estudo, de modo a que se tornem resilientes capazes de suportar um fenómeno de igual magnitude com impacto reduzidos;
- Aplicação das medidas não estruturais, tais como mapeamento de áreas de risco de inundação e melhoramento dos sistemas de alerta, divulgação da informação sobre as áreas susceptíveis a inundação, tornando as pessoas mais conscientes sobre o risco de ocupar esta área.

De forma perspectiva, sugere-se a realização de mais estudos na área usando as mesmas técnicas de SIG ou técnicas comparáveis por forma a prever as inundações, promovendo a protecção de vidas e bens materiais.

5.3. Finalidades do Estudo

O mapa de risco de inundação fornece informações úteis sobre a gestão do risco de inundações e deverá ser útil na identificação de áreas de alto risco. Além disso, o estudo pode ter implicações de gestão consideráveis para a preparação para emergências, incluindo operações de ajuda e socorro em áreas de alto risco. Estes mapas podem também ajudar as autoridades responsáveis a compreender melhor os possíveis cenários de inundações. O público em geral será informado dos mapas das inundações, o que ajudará a compreender o risco de inundações. Finalmente, o mapa em formato digital pode ser utilizado como base de dados a ser partilhada entre as diversas agências governamentais e não-governamentais responsáveis pela construção e desenvolvimento de defesa contra inundações.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahattab, J., Serhir, N., e Lakhal, E. K. (2015). Versa elaboração de um sistema de ajuda à decisão para a escolha de métodos de estimativa de débitos máximos de contas: adaptação de dados hidrológicos recentes. *La Houille Blanche*.
- Ahrens, D. C. (1994). *Meteorology Today: An Introduction to weather, climate and the Environment*, Fifth edition: USA.
- Alam, M. Emura, K. O., Farnham, E. e Yuan, J. (2018). Distribuições de probabilidade e períodos de retorno mais adequados para a precipitação máxima mensal em Bangladesh, Artigo, Japão.
- Allan, J. D., McIntyre, P. B., Smith, S. D., Helpern, B. S., Boyer, A. B., Burton, G. A., Capbell, L. M., Chadderton, W. L., Ciborowski, J. J. H., Doran, P. J., Eder, T., Infante, D. M., Johnson, L. B., Joseph, C., Marino, A., Prusevich, A., Read, J. G., Rose, J. B., Rutherford, E. S., Sowa, S. P. e Steiman, A. (2013). Join analysis of stressors and ecosystem services to enhance restoration effectiveness.
- Araújo, E. P., Teles, M. G. L. e Lago, W. J. S. (2009). Delimitação das bacias hidrográficas da Ilha do Maranhão a partir de dados SRTM. Brasil.
- Arnall, A.; David, S. G., Chasca, T. e Liverman, D. (2013). *Flooding, resettlement, and change in livelihoods: evidence from rural Mozambique*, Published by Blackwell Publishing, 9600 Garsington Road, Oxford, OX4 2DQ, UK and 350 Main Street, Malden, MA 02148, USA.
- Artan, G. A., Restrepo, M. e Asante. K. O. (2002). *Flood early warning system for Southern Africa*, U.S. Geological Survey Open File Report, Reston, Virginia, USA.
- Asante, K. O., Artan, G. A., Pervez, S., Bandaragoda, C. e Rouland, J. (2008). A linear geospatial streamflow modelling system for data sparse environments. *International Journal of River Basin Management*.
- Asnani, G. C. (1993). *Tropical meteorology*, vol. 1. Indian Institute of Tropical Meteorology, Pune, India.

- Avant, J. S.C. K. (2017). An Overview of Rainfall-Runoff Model Types An Overview of Rainfall-Runoff Model Types, Georgia.
- Barbosa, F. D. (2006). Medidas de proteção e controle de inundações urbanas na bacia do rio Mamanguape/pb.
- Barry, R. G. e Chorley, R. J. Y. (2004). Atmosphere, Wheather and Climate, Eighth Edition.
- Beilfuss, R. e Dos Santos, A. (2001). Prescribed flooding and restoration potential in the Zambezi delta, Mozambique, International Crane Foundation.
- Beven, K. (2012). Rainfall-Runoff Modelling. In Rainfall-Runoff Modelling Catchment scale hydrological modelling: A review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications, Global Nest Journal.
- Beven, K. e Freer, J. (2001). Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology, Journal of Hydrology.
- Bollin, C., Cardenas, C., Hahn, H. e Vatsa, K. S. (2003) Natural disasters network: comprehensive risk management by communities and local Governments, Inter-American Development Bank, Washington, USA.
- Buckle, C. (1996). Weather and Climate in Africa, Longman, USA.
- CENACARTA. (2005). Base de dados geográficos e geológicos de Moçambique.
- Cheng, X.T. (2006). Avaliação e gestão de inundações e secas. In: Relatório Geral da Pergunta 87 do ICOLD, Barcelona.
- Chow, V. T. (1956). Hydrologic Studies of Floods in the United States. Inter. Assoc. Sci. Hydrol., Publ. nº 42.
- Chow, V. T., Maidment, D. R. e Mays, L. R. (1988). Applied Hydrology, McGraw-Hill, New York, USA.

- Clarke, R. T. (1973). A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use, *Journal of Hydrology*.
- Cuamba, A. D. (2016). Análise Espacial das Áreas Susceptíveis na Bacia Hidrográfica do rio Licungo, Dissertação, Maputo.
- Cunha, S., e Pinto, F. T. (2011). Aplicação De Uma Metodologia De Análise De Risco De Inundações À Zona Ribeirinha Do Peso Da Régua. Lisboa.
- Devia, G. K., Ganasri, B. P. e Dwarakish, G. S. (2015) A Review on Hydrological Models, *Aquatic Procedia*.
- DHI. (2006). MIKE 11: Rainfall-Runoff Modelling for flood forecasting in the Lower Zambezi, Basin, Final Report, Tete, Mozambique.
- Di Baldassarre, G., Schumann, G., Bates, P. D, Freer, J.E e Beven, K. J. (2010). Mapeamento de planícies aluviais: uma discussão crítica de abordagens determinísticas e probabilísticas. *Revista de Ciências Hidrológicas*.
- DINAF. (2005). Base de dados de uso e cobertura do solo de Moçambique.
- DNGRH. (2021). Moçambique e Zimbabwe assinam memorando a para partilha das águas do rio Búzi.
- Dos Santos, K. R. (2012). Inundações Urbanas, Um Passeio pela Literatura. Brasil.
- El-Raey, M. e Beoro, G. (2003) Inventory a Mitigation Option and Vulnerability Adoption Assessment, Ministry of Water Resources and Irrigation, Egypt, 1-116.
- FAO. (2003). Drought impact mitigation and prevention in the Limpopo River Basin, Final-Report, Maputo.
- Fernandes, N. D. (2016). Mapeamento de Áreas Susceptíveis a Inundação Em Santa Maria, RS. Brasil.

- Ferreira, A. G., e Mello, N. G. D. S. (2005). Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre A Região Nordeste do Brasil e a influência dos Oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região.
- Flor, R.B. (2003). Gestão de inundações uma chave para o desenvolvimento sustentável e recursos hídricos integrados Discurso de abertura da plenária de abertura do dia das enchentes no 3WWF.
- Galvin, J. F. P. (2016). An introduction to the Meteorology and Climate of the tropics, Wiley Blackwell, 1st edition.
- Glickman, T.S. (2000). Meteorology Glossary. Boston, American Meteorological Society, 855.
- Goerl, R. F. G. P. (2017). Mapeamento de áreas susceptíveis a inundação com o modelo HAND e análise do seu desempenho em diferentes resoluções espaciais. Brasil.
- Guerreiro, R. I. (2015). Definição do período de retorno (TR) para delimitação de áreas inundáveis – Estudo da ação combinada da maré e do escoamento.
- Henriques, A. G. (1990). Modelos de Distribuição de Frequências de Caudais da cheia. Dissertação de Doutorado em Engenharia Civil no Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Hess, L. L., Melack, J. M., Filoso, S. e Young, W. (1995). Delineation of inundated area and vegetation along the Amazon floodplain with the SIR-C Synthetic aperture Radar, Transactions on Geoscience and Remote Sensing,
- Ho, LTK; Umitsu, M. b e Yamaguchi, Y. (2010). Mapeamento de risco de inundação por imagens de satélite e SRTM DEM na planície aluvial de vu gia – thu bon, centro do Vietnã, Arquivo Internacional de Fotogrametria, Sensoriamento Remoto e Ciência da Informação Espacial, Parte 8, Quioto Japão.
- Horritt, M. S. e Bates, P. D. (2001b) Effects of spatial resolution on raster-based model of flood flow, Journal of Hydrology, 253, 239-249.
- IIAM. (1992). Base de dados de tipos de solos de Moçambique.

- INAM. (2002). Manual para interpretação de previsões sazonais, Relatório Técnico do INAM, Beira, Moçambique.
- IPT. (2007). Mapeamento de áreas de alto e muito risco de deslizamentos e inundações do Município de Jaguariúna (SP). São Paulo.
- IWRI. (2012). Climatic data, CD-ROM.
- Jha, A. K., Bloch, R. e Lamond, J. (2012) Cidades e cheias. Um guia para a Gestão Integrada do Risco da cheia urbana para o século XXI: Um resumo para os formuladores de políticas, Washington: The World Bank, USA.
- Jinchi H. (2005) Lessons learned from operation of flood detention basins in China, United Nations Development Programme Report.
- Jones, JL, Halusk, T., Williamson, AK e Erwin, ML (1998) Atualizando mapas de inundação de forma eficiente: com base em informações hidráulicas existentes e dados de elevação modernos com um GIS, US Geological Survey, Open-File Report, 98–200.
- Kováč, Z. (1988) Picos máximos de inundação regionais na África Austral, Relatório Técnico TR 137, Departamento de Assuntos Hídricos, Pretória, África do Sul.
- Kugler, Z., Groevea, T. D., Brakenridge, G. R. e Anderson, E. (2007) Towards a near-real time global flood detection system, Joint Research Centre, Ispra Site, European Commission, Ispra 21020, Via Fermi 1, Italy.
- Macedo, E. S., Ogura, A. T., Canil, K., Almeida Filho, G. S., Gramani, M. F., Silva, F. C., e Mirandola, F. A. (2004). Modelos de fichas descritivas para áreas de risco de escorregamento, inundação e erosão. Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais, 1(2004), 892-907.
- Maidment, D. (1993). Desenvolvendo um Hidrograma de Unidade Distribuída Espacial usando na Aplicação de GIS em Hidrologia e Gestão de Recursos Hídricos, Publicação da Associação Internacional de Hidrologia Científica.
- Mário, C. C., e Uacane, M. S. (2023). Análise De Riscos Da Inundação Urbana Na Cidade Da Beira – Moçambique, Vol. XVI.

- McIlveen, R. (1992). Fundamentals of weather and climate. Psychology Press.
- Mendes, H., Marco, G., Sousa, S. A., e Macedo, R. F. (2004). Reflexões Sobre Impactos Das Inundações e Propostas De Políticas De Públicas Mitigadoras, São Paulo, Brasil.
- MICOA. (2006). Avaliação das experiências de Moçambique na gestão de desastres climáticos (1999 a 2005), Relatório Final, MICOA, Maputo, Moçambique.
- Moel, H., Van Alphen, J. e Aerts, J. (2009) Flood maps in Europe – methods, availability and use Institute for Environmental Studies, Vrije University, Amsterdam, the Netherlands.
- Murwira, A. (2006). Curso de formação regional sobre previsão de cheias e aviso prévio, procedimentos, formação sobre previsão de cheias e aviso prévio, Boskop, África do Sul.
- Naghattini, M. C. e Pinto, E. J. A. (2007) Hidrologia Estatística. Belo Horizonte, CPRM.
- Neves, J. L., Sellick, T. K., Hasan, A., e Pilesjö, P. (2022). Flood risk assessment under population growth and urban land use change in Matola, Mozambique.
- Oliveira, R. e Loucks, D. P. (1997) Operating rules for multireservoir systems, Water Resource Research, 33(4).
- OMM e USAID. (2012). Consultas Nacionais de Moçambique sobre o desenvolvimento da estratégia de previsão de cheias e alerta precoce para a bacia do rio Zambeze, Relatório Nacional, 2012.
- OPW. (2009) Guidelines for Planning Authorities.
- Patel, DP, Ramirez, JA, Srivastava, PK, Bray, M. e Han, D. (2017). Avaliação do mapeamento de inundações da cidade de Surat com modelagem hidrodinâmica 1D/2D acoplada: uma aplicação de caso do novo HEC-RAS 5. Natural Hazards.
- Pechlivanidis, I., Jackson, B., McIntyre, N. e Wheeler, H. (2011). Basin scale hydrological modelling: A review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments, Global NEST Journal.

- Peixoto, J. P. (1987). O Homem, O Clima e o Ambiente II- As Variações do Clima e o Ambiente. Secretaria de Estado do Ambiente e dos Recursos Naturais, Mem Martins, Lisboa.
- Perrin, C., Michel, C. e Andréassian, V. (2003) Melhoria de um modelo parcimonioso para simulação de fluxo, *Journal of Hydrology*.
- PNUD. (2000). Cheias em Moçambique, Conferência Internacional de Reconstrução, Março de 2000, Roma, Itália.
- PNUD. (Sd). Sustainable Development Goals and targets.
- Ramsay, H. (2017). The global climatology of tropical cyclones. In *Oxford Research Encyclopedia of Natural Hazard Science*.
- Rebelo, M. S. C. (2020) Vulnerabilidade e Risco aos Perigos Naturais em Moçambique: o caso dos ciclones tropicais no Município de Angoche, Tese de Doutoramento, Universidade de Lisboa.
- Rosa, I. S. P. (2011). Factores determinantes para o planeamento urbano sustentável de zonas com risco de cheia (Doctoral dissertation, Faculdade de Ciências e Tecnologia).
- Schulze, R. E. (2007). Solos: Necessidades de Informação Agrohídrológica, Fontes de Informação e Apoio à Decisão. In: Schulze, RE (Ed). 2007. Atlas Sul-Africano de Climatologia e Agrohidrologia. Comissão de Investigação da Água, Relatório 1489/1/06, Secção 4.1, Pretória, África do Sul.
- Sindall, R., Mecrow, T., Queiroga, A. C., Boyer, C., Koon, W., Amy, e., Drowning, P. (2022). Risk and climate change: a state-of-the-art review.
- Stedinger, J. R., Vogel, R. M. e Foufoula-Georgiou, E. (1993). Análise de Frequência de Eventos Extremos. Manual de Hidrologia.
- SWECO. (2011). International AB, Southern African development community, Development of the Búzi river basin monograph and joint integrated water resources management strategy, Sweden.

- Timbadiya, P., Patel, P. e Porey, P. (2014). Um modelo hidrodinâmico acoplado 1D-2D para previsão de inundações fluviais em uma planície costeira urbana. *Jornal de Engenharia Hidrológica*.
- Tucci, C. E. (2003). Inundações urbanas na América do Sul. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.
- UNHCR. (2014). Planned Relocation, Disasters and Climate Change: Consolidating Good Practices and Preparing for the Future, Report, Sanremo, Italy.
- UNISDR e CRED. (2017). The Human Cost of Weather-Related Disasters 1995-2015.
- US Army Corps of Engineers (2003). HEC-ResSim Reservoir System Simulation, Online User's Manual.
- USGS e ARA-Sul. (2002) Mapas da cheia da Bacia do Limpopo, Final Report, Maputo, Mozambique.
- USGS. (2015). Disponível em: <http://earthexplorer.usgs.gov/>. acesso a 20 de Setembro de 2023.
- Verdin, J., Verdin, K., Mathis, M., Magadzire, T., Kabuchanga, E., Woodbury, M., e Gadain, H. (2016). A Software Tool for Rapid Flood Inundation Mapping.
- Vilanculos, A. (2006). Towards improving flood forecasting and early warning systems through integrated technology in the Limpopo Basin, MSc Thesis, University of Zimbabwe, Harare, Zimbabwe.
- Vilanculos, A. C. F. (2015). The use of hydrological information to improve flood management – integrated hydrological modelling of the Zambezi River basin. Tese de Doutorado. Rhodes University - Faculty of Science. South África.
- Vilanculos, A. C. F. (2022). Eventos hidroclimatológicos extremos, método de Análise e Previsão. Maputo.

Wheater, H. S., Jakeman, A. J. e Beven, K. J. (1993) Progress and directions in rainfall runoff modelling, Modelling change in environmental systems, ed. Jakeman A.J et al. editors, John Wiley and Sons.

WMO. (2018). Tropical Cyclone Naming. Disponível em: <https://public.wmo.int/>.

Zeeuw, J. W. (1973). Análise hidrográfica para áreas com escoamento principalmente de águas subterrâneas in: Princípio e Aplicações de Drenagem, Instituto Internacional para Recuperação e Melhoria de Terras.

7. ANEXOS

Anexos 1: Dados de níveis e caudais das estações hidrométricas de Goonda– E-456 e Dombe– E-246.

Goonda – E-456			Dombe – E-246		
Ano	Nível	Caudal	Ano	Nível	Caudal
2000	11.73	16949.33	2001	4.91	4710.94
2001	7.87	9285.66	2002	7.4	9004.89
2002	4.84	3931.21	2003	7.4	9004.89
2003	5.75	5435.09	2004	7.4	9004.89
2004	6	5869.5	2005	7.4	9004.89
2005	3.55	2090.41	2006	8.8	11903.14
2006	5.75	5435.09	2007	10.1	15160.57
2007	8.41	10301.94	2008	10	14890.5
2008	8.25	10000.02	2009	10.2	15433.97
2009	5.97	5816.98	2010	8.8	11903.14
2010	6.37	6525.1	2011	4.2	3570.7
2011	6.37	6525.1	2012	9.2	12845.53
2012	4.5	3408.14	2013	10.2	15433.97
2013	6.07	5992.44	2014	7.25	8725.1
2014	9.8	12964.65	2015	6.26	6971.25
2015	4.99	4169.22	2016	8.82	11948.97
2016	5	4185.24	2017	9.16	12748.86
2017	5.68	5314.86	2018	5.32	5387.78
2018	5.29	4657.37	2019	10.5	16272.29
2019	16	28556.57	2020	9.7	14099.19
2020	8.37	10226.4	2021	9.66	13995.85
2021	8.56	10585.59	2022	9.73	14177.02
2022	5.5	5008.84			

Anexo 2: Tabelas de Impactos das inundações, para os níveis 1, 2 e 3.

Nível	Aldeias	Escolas	Hospitais
I	Chinhai	Escola Primária 1 de Junho Buzi	
	Mussanga		
	Mananga-1		
	Bandire		
	Nharongue		
	Midundo Baixo		
	Zindoga		

Nível	Aldeias	Escolas	Hospitais
II	Masquil	Escola Primaria 1 de Junho-Búzi	Hospital Rural de Búzi
	Chinhai	Escola Primária de Mussinemue	Posto de saúde rio Búzi
	Mussanga	Escola Primária de Gurunguire	
	Bandire	Escola Primária 3 de Fevereiro - Búzi	
	Chicumbua	Escola Primária do Fumo	
	Nharongue	Escola Primária 25 de Setembro	
	Inhanguena	Escola Primária de Bopira	
	Midundo Baixo	Escola Primária de Munamicua	
	Zindoga	Escola Primária Completa do Búzi	
		Escola Primária de Begaja	

Nível	Aldeias	Escolas	Hospitais
III	Chindo	Escola Primária de Manheche	Centro de Saude de Goonda
	Masquil	Escola Primária de Mussinemue	Centro de Saude de Tronga
	Chinhai	Escola Primária de Guenje	Hospital Rural Buzi
	Mussanga	Escola Primária de Gurunguire	Posto de Saude de Rio Buzi
	Mananga-1	Escola Primária 3 de Fevereiro - Buzi	Centro de Saude de Guara-Guara
	Bandire	Escola Primária 1 de Junho - Buzi	Centro de Saude de Grudja
	Chicumbua	Escola Primária de Muchenessa	Centro de Saude de Estaquinha
	Nhambirira	Escola Primária 25 de Setembro	
	Chunga	Escola Primária de Fumo	
	Nharongue	Escola Primária Inhanjou Km 37	
	Inhanguena	Escola Primária de Bopira	
	Midundo Baixo	Escola Primária Acordos de Lusaka	
	Zindoga	Escola Primária de Mamunge	
	Mussinewe	Escola Primária de Munamicua	
	Puanda	Escola Primária Completa do Buzi	
	Bopira	Escola Secundária do Buzi	
	Gruja	Escola Primária de Begaja	
	Guma	Escola Primária de Mutanda	
	Aldeia Com. Acordos De Lusaka	Escola Primária Completa de Goonda Sede	
	Chitause	Escola Primária de Goonda Madjaca	
	Nhanjou	Escola Primária de Girome	
		Escola Primária de Muconja	
		Escola Primária de Chicuaça II	
		Escola Primária de Toronga	
		Escola Primária de Madombatomba	
		Escola Primária do 1º e 2º Grau Armando E. Guebuza de Veruca	