



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE**



ARTHUR TIBÉRIO DE LACERDA VIEIRA

**IDENTIFICAÇÃO DAS VULNERABILIDADES A DESASTRES POR
INUNDAÇÕES RELACIONADAS AO CANAL DA TRANSPOSIÇÃO DO RIO
SÃO FRANCISCO NA REGIÃO DE MONTEIRO - PB**

**JOÃO PESSOA – PB
MARÇO – 2021**

ARTHUR TIBÉRIO DE LACERDA VIEIRA

**IDENTIFICAÇÃO DAS VULNERABILIDADES A DESASTRES POR
INUNDAÇÕES RELACIONADAS AO CANAL DA TRANSPOSIÇÃO DO RIO
SÃO FRANCISCO NA REGIÃO DE MONTEIRO - PB**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Desenvolvimento e Meio
Ambiente da Universidade Federal da
Paraíba, para obtenção do título de Mestre.

Orientador: PROF. DR. HAMILCAR JOSÉ
ALMEIDA FILGUEIRA

JOÃO PESSOA – PB

MARÇO – 2021

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

V658i Vieira, Arthur Tibério de Lacerda.

Identificação das vulnerabilidades a desastres por inundações relacionadas ao canal da transposição do Rio São Francisco na região de Monteiro - PB / Arthur Tibério de Lacerda Vieira. - João Pessoa, 2021.

67 f. : il.

Orientação: Hamilcar José Almeida Filgueira.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CCEN.

1. Desastres por inundações. 2. Riscos de desastres - Planejamento e gestão. 3. Rio São Francisco - Transposição de águas. 4. Modelos hidrológicos. 5. Modelo descritor do terreno. I. Filgueira, Hamilcar José Almeida. II. Título.

UFPB/BC

CDU 504.4(043)

ARTHUR TIBÉRIO DE LACERDA VIEIRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente – PRODEMA – da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de mestre.

Dissertação Aprovada. João Pessoa, PB, 31 de março de 2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Hamilcar José Almeida Filgueira
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Edson Ramos de Andrade (Membro Interno)
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr^a. Angela Amorim de Araújo (Membro externo)
Universidade Federal da Paraíba

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA

ATA Nº 538/2021 - PRODEMA - MEST (11.01.14.50)

Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO

João Pessoa-PB, 31 de Março de 2021

Ata da 541ª Sessão Pública de Defesa de Dissertação de Arthur Tibério de Lacerda Vieira do Curso de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, do Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, na área de Gerenciamento Ambiental. Aos trinta e um dias de março de dois mil e vinte um às 14h00min, via videoconferência, reuniu-se, na forma e termos do art. 82 do Regulamento Geral dos Cursos e Programas de Pós-Graduação "stricto sensu" da UFPB, anexo à Resolução CONSEPE nº 79/2013, a Banca Examinadora, composta pelos professores doutores: **Hamilcar José Almeida Filgueira - PRODEMA/UFPB**, na qualidade presidente/orientador, **Edson Ramos de Andrade - PRODEMA/UFPB**, na qualidade de membro interno/UFPB e **Angela Amorim de Araújo - UFPB** na qualidade de membro externo ao Programa, para julgamento da dissertação de mestrado do aluno, Arthur Tibério de Lacerda Vieira, sob o título "**Identificação das vulnerabilidades a desastres por inundações relacionadas ao canal da transposição do Rio São Francisco na região de Monteiro - PB**". A sessão pública foi aberta pelo Prof. Dr. **Hamilcar José Almeida Filgueira**, presidente da banca. Após a apresentação dos integrantes da banca examinadora, o mestrando iniciou a exposição de seu trabalho. Em seguida o Prof. Dr. **Hamilcar José Almeida Filgueira** passou a palavra a examinadora externa, a Profª. Drª. **Angela Amorim de Araújo**, que iniciou a arguição. Na sequência, o Prof. Dr. **Edson Ramos de Andrade** fez os seus comentários e o processo de arguição foi finalizado pela Prof. Dr. **Hamilcar José Almeida Filgueira**. O presidente da banca examinadora solicitou a retirada da plateia para que a banca pudesse proceder com a avaliação do discente em sessão secreta. Após a análise da banca examinadora foi atribuído o conceito **APROVADO**, conforme o art. 83 do anexo à Resolução CONSEPE-UFPB nº 79/2013. Nada mais havendo a tratar, eu, **Clara Tavares Gadelha**, secretária, lavrei a presente Ata, que lida e aprovada, assino juntamente com os demais membros da banca examinadora.

(Assinado digitalmente em 31/03/2021 23:30)
ANGELA AMORIM DE ARAUJO
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
Matrícula: 2526011

(Assinado digitalmente em 01/04/2021 16:03)
CLARA TAVARES GADIELHA
TECNICO EM SECRETARIADO
Matrícula: 2004872

(Assinado digitalmente em 01/04/2021 05:46)
EDSON RAMOS DE ANDRADE
PROFESSOR MAGISTERIO SUPERIOR - VISITANTE
Matrícula: 3156974

(Assinado digitalmente em 31/03/2021 22:50)
HAMILCAR JOSE ALMEIDA FILGUEIRA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
Matrícula: 1070867

Processo Associado: 23074.032743/2021-64

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sipac.ufpb.br/documentos/> informando seu número: 538, ano: 2021, documento (espécie): ATA, data de emissão: 31/03/2021 e o código de verificação: 400eca852d

Dedico essa dissertação a minha amada
filha Lara de Castro Vieira, por iluminar
minhas ideias e minha vida.

AGRADECIMENTOS

A coordenação do Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA).

Ao meu orientador, Professor Doutor Hamilcar José Almeida Filgueira, pelo apoio, incentivo e aceite à orientação.

A Professora Doutora, e amiga, Angela Amorim de Araújo, pelo acolhimento e condução ao esplêndido e desafiador mundo acadêmico.

Ao Professor Doutor Edson Ramos de Andrade, por aceitar o convite para compor a banca examinadora.

Ao Comandante Geral do Corpo de Bombeiros Militar da Paraíba, Coronel Marcelo Augusto de Araújo Bezerra, por fomentar e proporcionar o investimento intelectual de seus subordinados.

A minha amada esposa Silvia Fernanda de Castro Vieira, pelo apoio e cumplicidade durante toda essa jornada.

Aos meus pais, Francisco Vieira de Freitas e Edinalva Soares de Lacerda Vieira, e a toda minha família por todo amor dado e incentivo aos estudos proporcionados.

Aos graduandos Rafaella Gouveia Loureiro Oliveira e Carlos Adilson Alves Rocha por toda ajuda em momentos cruciais da pesquisa.

A todos os colegas e amigos do PRODEMA, pelo companheirismo e afeto durante todo o período deste mestrado.

“Resiliência é, entre outras coisas, a resistência à uma vulnerabilidade imposta.” (Messias Figueiredo)

RESUMO

Esta pesquisa teve como objetivo identificar as vulnerabilidades a risco de desastres por inundação relacionadas ao transbordamento das águas do canal da transposição do rio São Francisco no município de Monteiro-PB. A área de estudo deste trabalho foi o perímetro urbano do município, inserida à margem das obras do eixo leste da transposição. A metodologia aplicada foi a transversal quantitativa descritiva, com visitas de campo para a coleta de dados e dimensionamento das áreas suscetíveis a inundações em caso de transbordamento da estrutura. Para o delineamento das áreas propensas a risco de desastres por inundação, foi utilizado o modelo descritor do terreno *Height Above the Nearest Drainage* (HAND), que utiliza o Modelo Digital de Elevação (MDE) como único dado de entrada. O MDE utilizado da área de estudo foi obtido de imagens de satélites disponíveis da missão ALOS PALSAR. Definindo como parâmetros de estudo, foram estabelecidas projeções de transbordamento do canal da transposição, graduadas em 0,5 m, 3 m e 5 m, acima da borda do canal na área de estudo. Como resultado, as imagens demonstraram que tais projeções evidenciam um grau de segurança aceitável da estrutura do canal, onde os danos causados por uma possível inundação decorrente do transbordamento não afetam severamente a zona urbana. Assim, o estudo foi capaz de delimitar as zonas afetadas pelas simulações de inundação, graduando as áreas em níveis de risco, podendo subsidiar o poder público na tomada de decisões em ações de prevenção e mitigação de danos.

Palavras-chave: planejamento e gestão, modelo descritor do terreno, redução de risco de desastres.

ABSTRACT

This research aimed to identify the vulnerabilities to risk of flood disasters related to the overflow of water from the São Francisco river transposition channel in the municipality of Monteiro-PB. The study area of this work was the city's urban perimeter, inserted in the margin of the works of the east axis of the transposition. The methodology applied was descriptive quantitative cross-sectional, with field visits for data collection and dimensioning of areas susceptible to flooding in case of overflow of the structure. To delineate the areas prone to risk of flood disasters, the Height Above the Nearest Drainage (HAND) terrain descriptor model was used, which uses the Digital Elevation Model (DEM) as the only input data. The DEM used in the study area was obtained from available satellite images from the ALOS PALSAR mission. Defining as study parameters, overflow projections of the transposition channel were established, graduated at 0.5 m, 3 m and 5 m, above the edge of the channel in the study area. As a result, the images showed that such projections show an acceptable degree of safety of the channel structure, where damage caused by possible flooding resulting from the overflow does not severely affect the urban area. Thus, the study was able to delimit the areas affected by the flood simulations, grading the areas in risk levels, being able to support the government in decision-making in actions to prevent and mitigate damages.

Keywords: planning and management, terrain descriptor model, disaster risk reduction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação da seção transversal do canal da transposição.....	17
Figura 2 - Número de desastres por tipo nos anos de 1998 a 2017	20
Figura 3 - Prejuízos econômicos causados por desastres relacionados com fenômenos naturais nos anos de 1998 a 2017	21
Figura 4 - Evolução temporal por classificação de tipos de desastres e por custos, Brasil, 2000-2015.....	22
Figura 5 - Limites de inundação e enchente	23
Figura 6 - Fluxograma dos modelos hidrológicos	27
Figura 7 - Método D8 utilizado pelo HAND: (a) codificação usada para distinguir as oito direções de fluxo possíveis no método; (b) atribuição de direção de fluxo pela regra da maior declividade.....	32
Figura 8 - Etapas para a consistência hidrológica do MDT: (a) consistência hidrológica; (b) determinação da direção de fluxo; (c) extração da rede de drenagem	34
Figura 9 - Esquema explicativo do modelo matemático aplicado ao HAND	35
Figura 10 - Localização do município de Monteiro, Paraíba, Brasil.	37
Figura 11 - Histórico de desastres relacionados com fenômenos naturais registrados no município de Monteiro-PB, no período do ano 2000 a 2020.....	38
Figura 12 - Imagens da cobertura do radar do ALOS Palsar de 2006 a 2011	39
Figura 13 - Recorte do Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo, obtido da imagem de satélite do ALOS Palsar	40
Figura 14 - Limiar de drenagem da área de estudo	41
Figura 15 - Modelo Digital de Elevação da área de recorte	43
Figura 16 - Aplicação do modelo HAND simulando extravasamento das águas em 0,5 metro acima do nível limite do canal.....	47
Figura 17 - Mapa das Áreas de Preservação Permanente do Município de Monteiro, Paraíba.	48
Figura 18 - Aplicação do modelo HAND simulando extravasamento das águas em 3 metros acima do nível limite do canal.....	49
Figura 19 - Aplicação do modelo HAND simulando extravasamento das águas em 5 metros acima do nível limite do canal.....	51

Figura 20 – Aplicação do modelo HAND na área de estudo em gradações de 0,5 m, 3 m e 5 m, respectivamente, acima do limite da borda do canal53

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Alguns conceitos utilizados para definir as inundações24

Quadro 2 - Processo dos passos metodológicos para o uso do modelo HAND nesta
pesquisa42

LISTA DE ABREVIATURAS

ALOS	<i>Advanced Land Observing Satellite</i>
APP	Área de Preservação Permanente
AESA	Agência Executiva de Gestão de Águas da Paraíba
ARP	Aeronave Remotamente Pilotada
COBRADE	Classificação e Codificação Brasileira de Desastres
D8	<i>Deterministic Eight-Neighbors</i>
DFD	Direção de Fluxo de Drenagem
HAND	<i>Height Above the Nearest Drainage</i>
HEC-RAS	<i>Hydrologic Engineers Corps - River Analysis System</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais
ISDR	<i>International Strategy for Disaster Reduction</i>
LDD	<i>Local Drain Direction</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDR	Ministério do Desenvolvimento Regional
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital do Terreno
Palsar	<i>Phased Array Type L-band Synthetic Aperture Radar</i>
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PNPDEC	Política Nacional de Proteção e Defesa Civil
RRD	Redução de Risco de Desastres

SEDEC	Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil
TELEMAC-2D	<i>Telemac-Mascaret</i>
UNISDR	<i>United Nations Office for Disaster Risk Reduction</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 HIPÓTESE	13
3 OBJETIVOS	14
3.1 OBJETIVO GERAL	14
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
4 REFERENCIAL TEÓRICO	15
4.1 TRANSPOSIÇÕES HÍDRICAS	15
4.2 TRANSPOSIÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO	16
4.3 VULNERABILIDADE A DESASTRES DA POPULAÇÃO LOCAL	18
4.4 DESASTRES RELACIONADOS COM FENÔMENOS NATURAIS E SEUS IMPACTOS	19
4.5 DESASTRES RELACIONADOS COM FENÔMENOS NATURAIS NO BRASIL E SEUS IMPACTOS.....	21
4.6 INUNDAÇÃO.....	22
4.5 MODELOS HIDROLÓGICOS E MODELO DESCRITOR DO TERRENO. 25	
4.6 MODELO HAND	31
4.7 MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS À INUNDAÇÃO	35
5 MATERIAL E MÉTODOS.....	37
5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	37
5.2 APLICAÇÃO DO MODELO HAND.....	38
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
8 REFERÊNCIAS.....	58

1 INTRODUÇÃO

O Rio São Francisco, importante corpo hídrico brasileiro, muito embora carregue consigo muito da cultura do Nordeste brasileiro, tem a sua nascente na região mineira da Serra da Canastra e sua bacia hidrográfica é composta por cinco estados, sendo eles Minas Gerais, Goiás, Bahia, Alagoas, Sergipe, além do Distrito Federal. Com 2.700 quilômetros de extensão o seu fluxo de água pode variar de 2.100 m³/s, chegando até 3.000 m³/s em alguns trechos mais próximos à foz entre os estados de Alagoas e Sergipe, culminando no litoral do Atlântico (REBOUÇAS *et al.*, 2002).

Algumas discussões iniciaram-se ainda no século XVIII a respeito do uso dos recursos hídricos do Rio São Francisco, para solucionar os problemas relacionados com a seca na região Nordeste do Brasil, que há muito tornou-se um problema não apenas social, mas político. O fator primordial era a localização do rio e seu volume de vazão, os quais foram pontos discutidos para desenvolver um projeto que iria manter diversas regiões do Nordeste com irrigação. Entretanto, os fatores ambientais e discussões a respeito da efetivação do projeto por diversos motivos, fizeram com que a execução, desde sua concepção até a finalização, demorasse a ser implantada (MELLO, 2011).

Com o intuito de transportar 1,4% da água do Rio São Francisco, foi idealizado e executado um projeto com 478 km de extensão, onde estão incluídos a construção de canais, aquedutos, túneis, estações elevatórias, reservatórios e subestações de energia elétrica. A obra foi dividida em dois eixos, Norte e Leste, que ao serem concluídos levarão água para a população de 390 municípios distribuídos em quatro estados nordestinos.

Após o primeiro passo relacionado com a efetivação da transposição, em março de 2017, a presença de suas águas na região paraibana do município de Monteiro, divisa com o estado de Pernambuco, parte do projeto do eixo Leste tornava-se, após séculos de anseios, então uma realidade (ARRAES, 2013).

No entanto, logo no início de funcionamento do eixo Leste o Ministério da Integração Nacional (MI), atualmente reformulado para Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR), notificou o rompimento da estrutura do trecho do canal adutor no município de Salgueiro, no sertão pernambucano, que ocasionou transtornos de erosão hídrica ao meio ambiente. A partir desse noticiário, veiculado em âmbito nacional, surgiu o problema de que caso houvesse outro incidente, e a

região não estivesse preparada para uma situação de desastre, devido ao grande volume de água, danos estruturais causariam impactos significativos na região beneficiada pela transposição.

Em estudos para a estimativa de áreas passíveis de inundação entorno de obras hidráulicas o poder público normalmente utiliza, como forma mitigadora, medidas não-estruturais, como a delimitação espacial de áreas susceptíveis a inundações, para auxiliar a sociedade em ações de socorro em caso de desastres. Comumente, essas entidades utilizam programas computacionais que modelam o sistema hidráulico do fluxo de água nos leitos de rios e outros canais, para projetar as áreas inundáveis e produzir mapas de suscetibilidade à inundação. Porém, para o funcionamento desses modelos são exigidos variados dados de entrada, além de recursos tecnológicos de processamento de alta performance, o que inviabiliza, por vezes, a sua utilização (SAVAGE *et al.*, 2014).

Isto posto, os Modelos Digitais de Elevação (MDE), por meio de suas características morfológicas, se apresentam como uma alternativa prática e economicamente viável, principalmente quando os dados hidrológicos forem indisponíveis (NOMAN *et al.*, 2001).

Rennó *et al.* (2008) desenvolveu no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) um modelo descritor de terreno denominado *Height Above the Nearest Drainage* (HAND), que pode ser traduzido livremente como “altura acima do ponto de drenagem mais próximo”, o qual projeta o saldo da altura de cada ponto (*pixel*) de um MDE com o ponto (*pixel*) de drenagem mais próximo.

Dentre as diversas aplicações desse modelo, tem-se a mensuração das áreas susceptíveis a inundação. Uma das características que diferencia o modelo HAND de outros modelos hidrodinâmicos já estabelecidos, é que esse não necessita de dados específicos, e às vezes complexos, como a batimetria e fluxo de vazão do corpo hídrico, sendo necessário apenas um MDE com informações hidrológicas consistentes para a execução de um mapa de inundação (NOBRE *et al.*, 2016).

Pela atual facilidade de obtenção de dados topográficos, o HAND se torna um promissor recurso de gestão de risco de desastres por inundação, principalmente para a comunidade acadêmica e entidades públicas.

Momo *et al.* (2016) avaliou com bastante amplitude o desempenho do método HAND na geração de mapas de áreas com suscetibilidade à inundação, por

meio de pesquisas topográficas e mapeamentos de áreas de inundações acessíveis para as cidades catarinenses de Brusque e Blumenau, ficando evidente que o HAND demonstrou ser tão eficaz quanto outros modelos hidrodinâmicos que, porém, utilizam dados de entrada mais específicos e complexos.

2 HIPÓTESE

Um desastre hidrológico na região, decorrente de danos ou obstrução na estrutura do canal responsável pela transposição do Rio São Francisco, acarretaria em consequências inestimáveis à população do município paraibano de Monteiro em função da sua inundação.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Identificar as vulnerabilidades a risco de desastres por inundação relacionadas ao transbordamento das águas do canal da transposição das águas do Rio São Francisco no município de Monteiro no estado da Paraíba.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Gerar Modelos Digitais de Elevação da área de interesse a partir de imagens de alta resolução espaciais disponíveis, obtidas por meio de satélites de missões espaciais;
- Graduar em classes de vulnerabilidade as áreas passíveis de inundações aplicando o modelo *Height Above the Nearest Drainage* (HAND);
- Apresentar mapa de suscetibilidade a inundação para subsidiar o poder público local na resposta ao desastre e na mitigação de danos.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 TRANSPOSIÇÕES HÍDRICAS

A transposição hídrica, de forma mais abrangente, tem por escopo mitigar problemas decorrentes da escassez de água em regiões distintas, ocasionadas por fatores permanentes ou sazonais. Países com um grau razoável de infraestrutura são capazes de interligar bacias hidrográficas por meio de técnicas específicas. Historicamente, os chineses detêm o pioneirismo nessa técnica, realizando obras de transposição no Rio Amarelo milênios antes de Cristo. Da mesma forma, os rios Tigre e Nilo tiveram seus cursos desviados para abastecer as regiões áridas da Mesopotâmia e do Egito. Dentre os países que utilizaram a transposição de rios para essa finalidade, destacam-se Estados Unidos da América, Canadá, Espanha, México, Argentina, Paquistão, China, Peru, dentre outros (NEVES *et al.*, 2009).

Como exemplo, nos Estados Unidos da América cerca de 22 milhões de hectares de terra são beneficiados por obras de transposição hídrica, distribuídos entre vinte estados americanos. Dentre as transposições mais importantes, destaca-se a do Rio Colorado, que possui uma expressiva bacia hidrográfica, cuja área cobre, aproximadamente, 440 mil quilômetros quadrados e percorre sete estados americanos. O uso da água é polivalente, sendo a irrigação sua principal utilização (ANDERSON, 2002).

Apesar do desenvolvimento da região contemplada, a transposição do Rio Colorado também trouxe discussões acerca dos direitos sobre as águas, uma vez que a sua nascente fica no Canadá. Além dos aspectos legais, problemas ambientais também foram discutidos pois as inundações interferiram no bioma aquático, pois os peixes encontraram dificuldade para alcançar a maturidade.

No Brasil, a transposição do Rio São Francisco, apesar do seu grande porte, não é pioneira no país. A mesma técnica já foi utilizada em bacias hidrográficas que apresentavam déficits hídricos nas cidades, a exemplo do Rio de Janeiro, onde a transposição do rio Paraíba do Sul teve 63% de sua vazão comprometida para suprir o abastecimento da região metropolitana. Da mesma forma aconteceu em São Paulo, quando o rio Piracicaba teve seu curso desviado para o abastecimento do Sistema Cantareira o que acarretou em uma diminuição de 78% de sua vazão original (NEVES *et al.*, 2009).

4.2 TRANSPOSIÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO

A história da humanidade está intrinsecamente ligada a episódios de desastres. Esses fenômenos são responsáveis por impactos significativos na vida do ser humano, não apenas no aspecto de salubridade, mas também sociais, ambientais, econômicos e culturais.

A população do Nordeste do Brasil, mais precisamente na região denominada semiárida, é influenciada fortemente, dentre os atributos físicos, pelo clima. A falta de políticas públicas amplifica os efeitos danosos dos períodos de seca.

O denominado Nordeste Setentrional, formado pelos estados do Rio Grande do Norte, Ceará, Pernambuco e Paraíba, somando-se às regiões dos sertões de Alagoas, Oeste de Sergipe, Sudeste do Piauí e Norte da Bahia, é o local de maior incidência do fenômeno das secas da região Nordeste (ENGEORPS/HARZA, 2000).

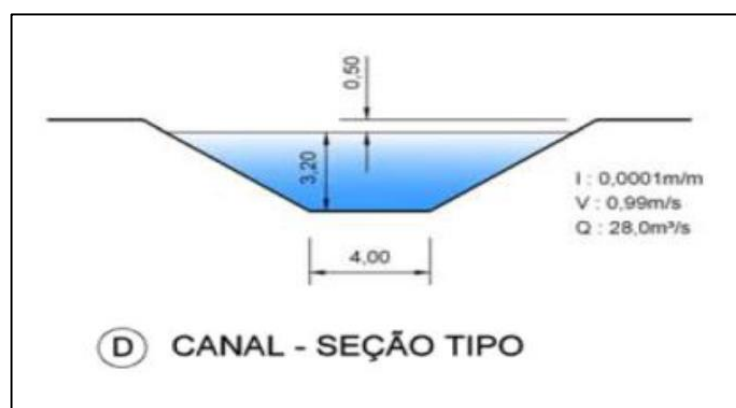
Dentre o rol de ações governamentais voltadas para amenizar a situação da falta de água na região Nordeste, a de maior visibilidade, sem dúvida, é a transposição do Rio São Francisco. Foi um período extenso marcado por idealizações, proposições, reformulações e, finalmente, pela execução do que foi intitulado de “Projeto de Integração do São Francisco com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional”, caracterizado, contudo, pelas interrupções e retomadas de suas obras, muitas vezes por períodos longos entre elas (CASTRO, 2010).

A obra de transposição tem como principal característica a movimentação de recursos hídricos de uma área mais abundante a uma de maior escassez. Conceitualmente tem-se o recalque, ou adução, como sendo o transporte de água de um ponto a outro (habitualmente para um local de maior altitude) fazendo uso de um sistema propulsor de água, chamado comumente de sistema adutor. Assim, a transposição pode ser definida da mesma forma que o recalque (ou adução), porém com a particularidade da observância quanto ao ambiente natural do local de origem da fonte hídrica supridora (SUASSUNA, 2001).

Para a execução do projeto da transposição das águas do Rio São Francisco, foi necessária a implementação de 38 quilômetros de túneis, 592 quilômetros de canais, 4,9 quilômetros de aquedutos, 4,5 quilômetros de adutoras, 27 reservatórios e 9 estações elevatórias (ENGEORPS/HARZA, 2012).

O projeto de engenharia envolvendo o sistema de adução hídrica foi concebido para que 82% do percurso das águas fossem realizados em condutos livres ou canais abertos. Essas estruturas foram projetadas em seções trapezoidais (Figura 1) de dimensões variáveis, sendo os maiores com 25 metros de largura e com cinco metros de profundidade, revestidos por uma geomembrana de Polietileno de Alta Densidade (PEAD), protegida por uma camada de concreto. Nos setores que foi necessária a transposição de rios e riachos foram utilizados os aquedutos. Para chegar a localidades com grandes altitudes e transpor barreiras naturais do relevo como elevações e serras, foram projetados túneis com seções de arco-retangular com seus revestimentos definidos pelas investigações geotécnicas locais (ENGECORPS/HARZA, 2012).

Figura 1 - Representação da seção transversal do canal da transposição



Fonte: ENGECORP/HARZA (2012).

A energia potencial armazenada em um canal é enorme. Em caso de um rompimento, essa energia potencial dissipada cineticamente podendo provocar grandes danos, envolvendo o risco de perdas de vidas humanas e graves consequências econômicas, sociais e ambientais. Esse perigo aumenta quando há uma concentração urbana próxima ao canal, o que é o caso do município de Monteiro, no estado da Paraíba.

Em 2012 entrou em vigor a Lei Federal nº 12.608 que estabeleceu a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC) que, dentre outras providências, outorgou a institucionalização do sistema de informações e monitoramento de desastres. Ficou estabelecido que compete a República Federativa (União, Estados, Municípios e o Distrito Federal), a adoção de providências indispensáveis

à contração dos riscos a desastres, em cooperação com instituições públicas ou privadas e com a população. Dentre as obrigações previstas em Lei, está o incremento do reconhecimento e avaliação das ameaças, grau de destrutibilidade e vulnerabilidades a desastres, de maneira a impossibilitar ou restringir sua incidência, por meio da diagramação das zonas propensas a risco de desastres, nos estudos de reconhecimento de ameaças, fragilidades, vulnerabilidades e perigo, bem como nas diversas atividades voltadas à prevenção, atenuação, aprestamento, resolução e recuperação. A imprecisão quanto ao risco de uma tragédia não constituirá empecilho para a aplicação das ações preventivas e amenizadoras da circunstância de risco (BRASIL, 2012).

4.3 VULNERABILIDADE A DESASTRES DA POPULAÇÃO LOCAL

O desastre pode ser considerado como sendo um evento adverso provocado pela intervenção do homem em um ecossistema vulnerável, ocasionando a interrupção das atividades de uma localidade, trazendo danos como mortes humanas, prejuízos materiais, financeiros, ambientais, cuja magnitude do evento exceda a capacidade da comunidade no enfrentamento a situação sem demandar apoio externo (UNISDR, 2012).

Por risco, entende-se como a probabilidade de uma perda esperada em uma área ocupada em um determinado intervalo de tempo (KOBAYAMA *et al.*, 2006).

Por sua vez, a vulnerabilidade é um fator interno do risco de desastres que pode ser sistematicamente definido pela suscetibilidade de um elemento ou sistema afetado por um fenômeno, o qual desse configura como ameaça. Portanto, o risco de desastres pode ser conceituado como o potencial de perdas, fruto da evolução da ameaça e da vulnerabilidade. Para que haja a diminuição do risco, é necessário que a vulnerabilidade dos elementos expostos a esse risco seja diminuída (CARDONA, 2001).

Segundo a *International Strategy for Disaster Reduction* (ISDR), um escritório das Nações Unidas que tenta regulamentar estratégias para a redução do risco de desastres (RRD), a ameaça é o evento físico, fenômeno natural ou atividade humana potencialmente danosos, que podem causar mortes, danos às propriedades, distúrbios sociais e econômicos ou degradação ambiental (ISDR, 2004). É o fator externo do risco de desastres (FILGUEIRA, 2013).

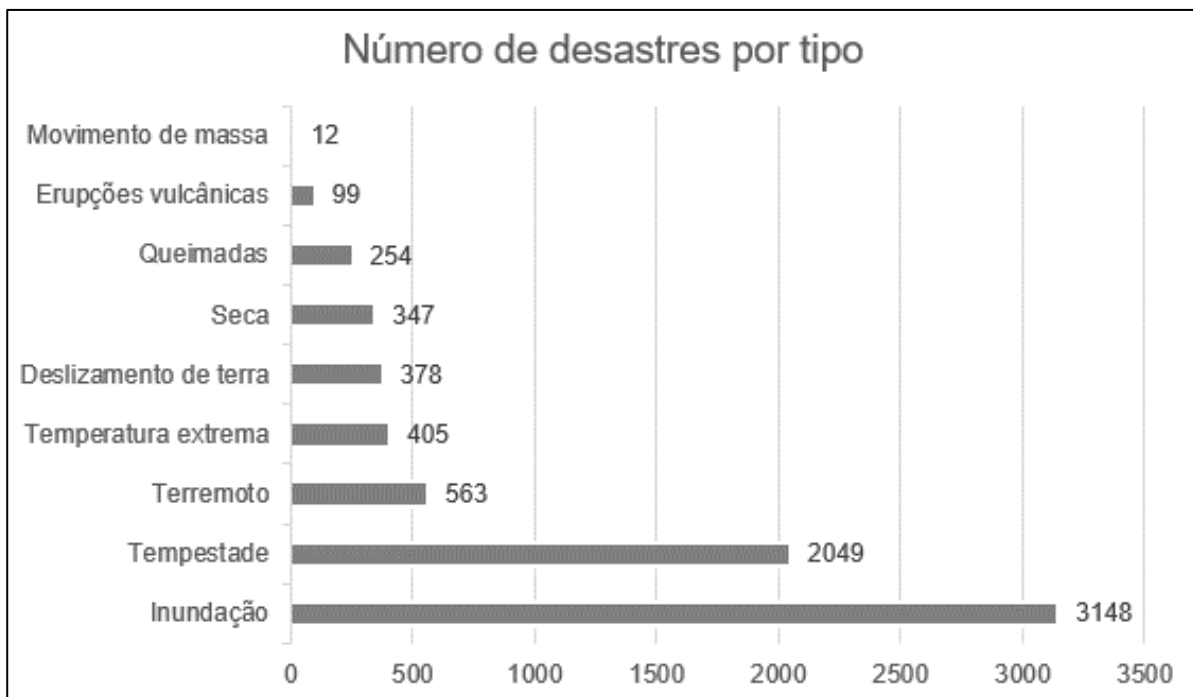
Ainda nesse viés, o risco de desastres é a probabilidade de danos e perdas que se revistam de significado social. Segundo Cardona (1993) o risco será existente a partir da interação entre os fatores de ameaça e de vulnerabilidade. Dessa forma, é possível equacionar o risco de desastre em razão da ameaça latente e da vulnerabilidade do conjunto e seus elementos quanto a essa ameaça, sucedendo na seguinte sentença: “Risco de desastre = Ameaça x Vulnerabilidade” (FILGUEIRA, 2013).

Medidas estruturais, como diques, muros de contenção, etc., embora demonstrem certa eficiência, acabam oferecendo uma aparente proteção que não é absoluta. E pela razão de eventos de colapsos dessas estruturas serem raros com relação a sua frequência, uma parcela da população acaba ocupando indevidamente áreas próximas a essas, sob a ilusão da seguridade. Por outro lado, medidas não estruturais se correlacionam a planos de ação que visam preparar a comunidade para o convívio com episódios de inundação e outros desastres naturais. A agregação entre as medidas estruturais e não estruturais demonstra ser o fator de maior gestão da inundação, fazendo com que a população de área propensa a risco de desastres amenize seus prejuízos e lide de forma conciliadora com o agente causador do risco (GOERL, 2013).

4.4 DESASTRES RELACIONADOS COM FENÔMENOS NATURAIS E SEUS IMPACTOS

Segundo o relatório *Economic Losses, Poverty and Disasters* das Nações Unidas (UNISDR, 2017), os desastres climáticos, em termos de contagem, se mantêm no topo do quadro geral de ocorrências divididas entre “geofísicas” e “relacionadas ao clima” no período de recorte de 20 anos, contabilizando 91% do total de todos os eventos pontuados nessas duas categorias em duas décadas (de 1998 a 2017). As inundações lideram em termos de incidência no rol de desastres mais frequentes, representando 43% de todos os registros (Figura 2).

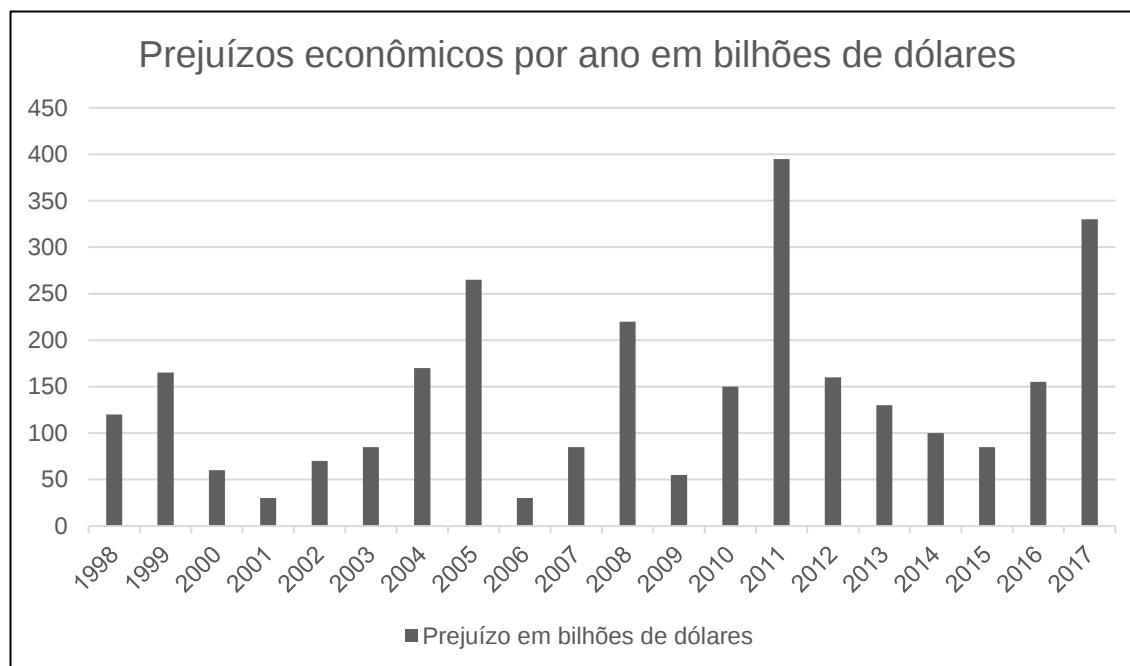
Figura 2 - Número de desastres por tipo nos anos de 1998 a 2017



Fonte: UNISDR (2017). Organização: autor.

As inundações também despontam como os eventos de maior incidência quando se trata de desastres relacionados com fenômenos naturais, sendo responsáveis pela afetação direta de mais de dois bilhões de pessoas em todo o mundo. Em termos de perdas econômicas causados por esses desastres (Figura 3), a inundação é responsável por cerca de 23% desse total, representando um prejuízo de mais de 656 bilhões de dólares nesses 20 anos.

Figura 3 - Prejuízos econômicos causados por desastres relacionados com fenômenos naturais nos anos de 1998 a 2017



Fonte: UNISDR (2017). Organização: autor.

4.5 DESASTRES RELACIONADOS COM FENÔMENOS NATURAIS NO BRASIL E SEUS IMPACTOS

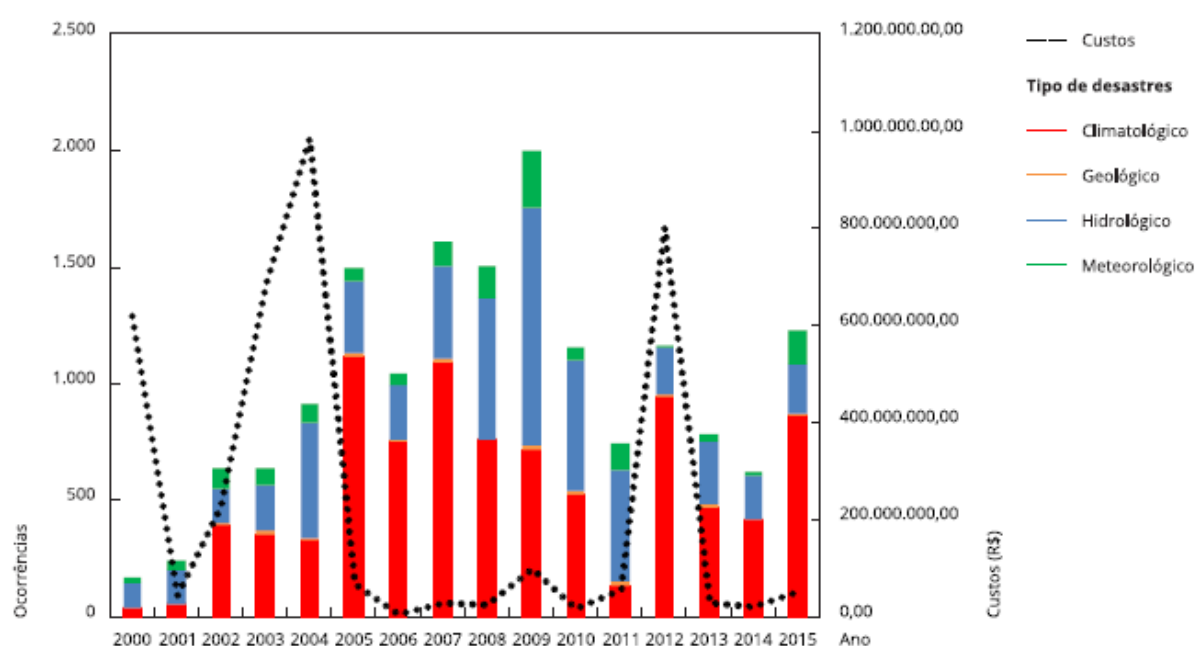
As mudanças climáticas evidenciam um crescente aumento nos danos causados às populações, sobretudo às mais vulneráveis, como é o caso boa parte da população do Brasil. Os efeitos reverberam por meio dos impactos negativos materializados mais fortemente na saúde e na economia. Tendo como base as informações registradas no Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2iD), da Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil (SEDEC)/MDS, no recorte compreendido entre os anos 2000 e 2015, foram contabilizadas 15.960 (quinze mil e novecentos e sessenta) ocorrências. Porém, apenas cerca de 29% dos registros tiveram seus custos mensurados, o que resultou em um valor aproximado de 4 bilhões de reais (FREITAS *et al.*, 2020).

Apesar dos desastres climatológicos serem os mais contumazes no rol do relatório, os desastres hidrológicos despontam como os mais danosos economicamente, representando prejuízos aproximados de três a quatro vezes maiores quando comparados aos desastres geológicos e meteorológicos. Dentre os estados mais recorrentes a esses eventos adversos estão Pernambuco, Santa

Catarina e Amazonas. O impacto sobre a população também foi contabilizado, chegando à marca de 97 milhões de pessoas atingidas nas 33 mil ocorrências computadas no período de 1991 a 2010.

A partir da classificação de desastres relacionados com fenômenos naturais no país, no recorte do ano 2000 ao ano de 2015, evidencia-se que os desastres ligados ao clima despontam com 56% dos números de ocorrências, vindo em seguida os hidrológicos com 35% dos casos, como pode ser verificado na Figura 4.

Figura 4 - Evolução temporal por classificação de tipos de desastres e por custos, Brasil, 2000-2015

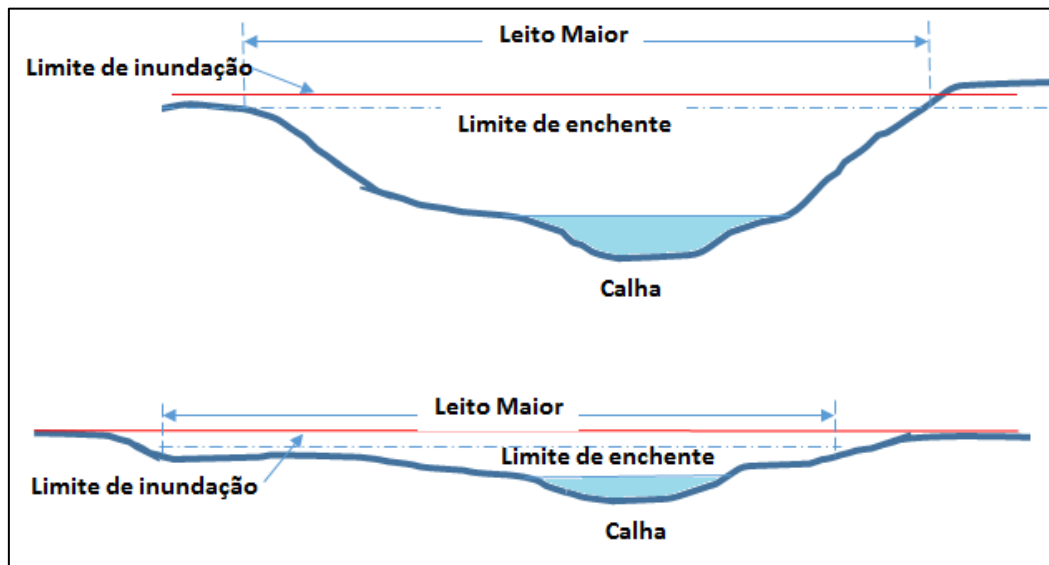


Fonte: Freitas *et al.* (2020)

4.6 INUNDAÇÃO

Também conhecida equivocadamente como enchente, a inundação é o incremento do nível do corpo hídrico acima de sua vazão normal, onde há um extravasamento de água sobre as regiões vicinais a ele, cuja essas áreas atingidas são chamadas de planícies de inundação (KOBİYAMA *et al.*, 2006) (Figura 5).

Figura 5 - Limites de inundação e enchente



Fonte: Licco *et al.* (2015).

De acordo com a Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE), as inundações fazem parte do grupo dos desastres naturais hidrológicos, e podem ser definidas como:

Submersão de áreas fora dos limites normais de um curso de água em zonas que normalmente não se encontram submersas. O transbordamento ocorre de modo gradual, geralmente ocasionado por chuvas prolongadas em áreas de planície (BRASIL, 2012, p. 73).

A classificação das inundações, de acordo com a SEDEC, é expressa de acordo com a sua magnitude, sendo elas extraordinárias, de grande magnitude, regulares e de pequena magnitude, como também em razão de seu parâmetro evolutivo, sendo eles: inundação gradual, inundação brusca, alagamento e inundação litorânea (CASTRO, 2010). Muito embora haja essa distinção, a maioria das situações de emergência ou de estado de calamidade pública é ocasionada por meio das inundações graduais e bruscas (KOBIYAMA *et al.*, 2006).

O termo *flood* (oriundo da língua inglesa) é maciçamente utilizado para definir inundação, muito embora haja outros termos bastante comuns (Quadro 1).

Quadro 1 - Alguns conceitos utilizados para definir as inundações

Termo	Autor	Definição
<i>Flood</i>	NFIP (2005)	Uma condição geral ou temporária de parcial ou completa inundação de dois ou mais acres de uma terra normalmente ou de duas ou mais propriedades (uma das quais é a sua propriedade), proveniente da inundação de águas continentais ou oceânicas.
<i>Flood</i>	<i>National Disaster Education Coalition</i> (2004)	Inundações ocorrem nas chamadas planícies de inundação, quando prolongada precipitação por vários dias, intensa chuva em um curto período de tempo ou um entulhamento de gelo ou de restos, faz com que um rio ou um córrego transbordem e inundem a área circunvizinha.
<i>Flood</i>	NWS/NOAA (2005)	A inundação de uma área normalmente seca causada pelo aumento do nível das águas em um curso d'água estabelecido como um rio, um córrego, ou um canal de drenagem ou um dique, perto ou no local onde as chuvas precipitaram.
<i>Flood</i>	FEMA (1981)	Inundação resulta quando um fluxo de água é maior do que a capacidade normal de escoamento do canal ou quando as águas costeiras excedem a altura normal da maré alta. Inundações de rios ocorrem devido ao excessivo escoamento superficial ou devido ao bloqueio do canal.
Inundações Graduais ou Enchentes	Castro (1996)	As águas elevam-se de forma paulatina e previsível, mantém em situação de cheia durante algum tempo e, a seguir, escoam-se gradualmente. Normalmente, as inundações graduais são cíclicas e nitidamente sazonais.
<i>River Flood</i>	Choudhury <i>et al.</i> (2004)	Inundações de rios ocorrem devido às pesadas chuvas das monções e ao derretimento de gelo nas áreas a montante dos maiores rios de Bangladesh. O escoamento superficial resultante causa a elevação do rio sobre as suas margens propagando água sobre a planície de inundação.
Inundações Ribeirinhas	Tucci e Bertoni (2003)	Quando a precipitação é intensa e o solo não tem capacidade de infiltrar, grande parte do volume escoar para o sistema de drenagem, superando sua capacidade natural de escoamento. O excesso de volume que não consegue ser drenado ocupa a várzea inundando-a de acordo com a topografia das áreas próximas aos rios.
<i>Flood</i>	<i>Office of Thecnology Assessment</i> (1980)	Uma inundação de terra normalmente não coberta pela água e que são usadas ou utilizáveis pelo homem.
<i>River Flood</i>	Kron (2002)	É o resultado de intensas e/ou persistentes chuvas por alguns dias ou semanas sobre grandes áreas, algumas vezes combinadas com neve derretida. Inundações de rios que se elevam gradualmente, algumas vezes em um curto período de tempo.

Fonte: Kobiyama *et al.* (2006). Organização: o autor.

Um fenômeno expressivo acontece desde o início dos anos 2000, onde o número de habitantes das zonas urbanas do nosso planeta representava cerca de 15% de toda população, e que projeções indicam que esse percentual poderá atingir o índice de 50% até o final deste século (TUCCI, 2007). Esse crescimento se torna mais expressivo em países da América Latina, onde a taxa do incremento

demográfico alcança, aproximadamente, 4% a cada ano. O Brasil, por sua vez, tomando como parâmetro as últimas décadas, acompanhou essa tendência fazendo com que surgissem as aglomerações intituladas regiões metropolitanas. Esse aumento acentuado culminou no acúmulo de pessoas em áreas que não foram preparadas para o acolhimento daquela população, principalmente pela ausência de infraestrutura. As consequências deste crescimento populacional podem ser refletidas no déficit de políticas públicas capazes de suprir as necessidades primárias, sobretudo as hídricas, como saneamento básico, fornecimento e distribuição de água, tratamento de esgoto e drenagem de águas pluviais.

De acordo com Tucci (2007), dentre todos os transtornos decorrentes desse aumento populacional, também se destacam as enchentes urbanas. O crescimento desordenado produz mais impactos em áreas urbanizadas em relação a zonas rurais, uma vez que o acúmulo de água em áreas de várzeas é refreado pela vegetação local e absorvido pelo subsolo, fazendo com que o restante seja conduzido naturalmente pelo solo, causando ápices de enchentes mais contidos. Diante disso, é primordial o planejamento da urbanização dessas áreas e que todos os seus elementos básicos de infraestrutura sejam contemplados afim de evitar transtornos econômicos e impactos sociais danosos, bem como a preparação da população com ações resilientes.

4.5 MODELOS HIDROLÓGICOS E MODELO DESCRITOR DO TERRENO

Para facilitar o entendimento da dinâmica da inundação se faz necessário mensurar a vazão de cheias produzida pelo excedente de precipitação pluviométrica em uma bacia hidrográfica. Dessa forma, pode-se descrever o processo hidrológico por meio de uma explicação bastante simples. Todo o excedente da precipitação que não é absorvido pelo solo é acumulado em pequenos sulcos e, posteriormente, esse volume de água é transformado em lâminas de água, findando o processo com o esvaziamento superficial ou defluência de superfície (SULEIMAN, 2004).

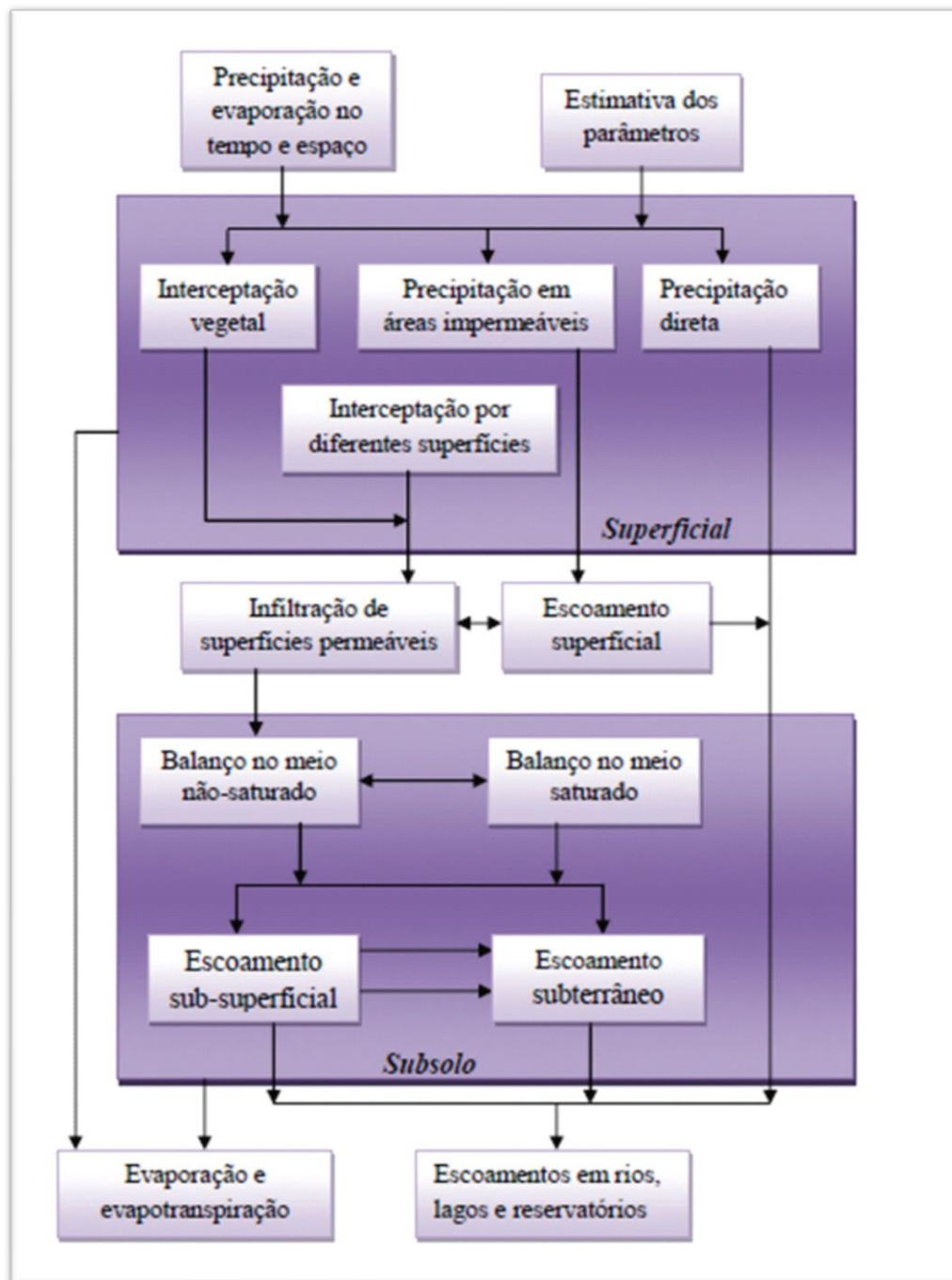
Equações matemáticas tem o escopo de explicar o processamento da chuva até o seu escoamento, representando o método com um caráter simplista, validando seus resultados a partir de comparações com os resultados obtidos por meio de métodos mais tradicionais como as mensurações dos níveis de água e suas vazões.

Como conceito, a hidrologia pode ser definida como o estudo dos fenômenos naturais inseridos no ciclo hidrológico. Para que a análise desses fenômenos seja mais acertada, muitos parâmetros devem ser levados em consideração. Porém, a análise desses parâmetros é dificultada pela diversidade de fatores que podem influenciar esses dados. Com o intuito de facilitar a compreensão de como funcionam esses fenômenos inseridos no sistema da bacia hidrográfica, houve o desenvolvimento de diversos modelos hidrológicos capazes de simular a incidência desses (SILVA, 2007).

Para Tucci (2007), modelo hidrológico é um instrumento empregado para dimensionar os fenômenos ocorridos na bacia hidrográfica e gerar uma previsibilidade das ocorrências decorrentes em comparação aos parâmetros observados previamente. Serve ainda como mecanismo capaz de auxiliar pesquisadores, engenheiros e pessoas que labutam na área a compreender com maior clareza os fenômenos e as suas condutas em uma bacia hidrográfica, como também viabilizar a previsão do comportamento delas quando expostas a circunstâncias adversas. Segundo Marinho Filho *et al.* (2013), grande parcela dos modelos retrata somente parte dos procedimentos ocorridos em uma bacia hidrográfica, já que a maior barreira encontrada é a representação desses procedimentos por meio de modelos matemáticos.

Como forma de expressar o esquema de como funcionam os diversos processos hidrológicos estabelecidos dentro do contexto do ciclo hidrológico tem-se a Figura 6 a seguir:

Figura 6 - Fluxograma dos modelos hidrológicos



Fonte: Tucci (2007).

Segundo Nobre *et al.* (2016), estão disponíveis diversos tipos de modelos hidrológicos utilizados com o intuito de mapear inundações. Esses modelos se apresentam variando de acordo com sua complexidade, pelo tipo de aplicação e pelos parâmetros exigidos para o seu funcionamento. Dentre os mais comuns, podem-se destacar o *Hydrologic Engineering Center's - River Analysis System* (HEC-RAS) como modelo unidimensional desenvolvido pelo corpo de engenheiros

das Forças Armadas americana, e o modelo francês *Telemac-Mascaret* (TELEMAC-2D) que trabalha como parâmetros bidimensionais. Ambas são consideradas ferramentas de média complexidade e aplicam equações que representam o processo de escoamento em canais abertos, usualmente reconhecidas por equações de Saint-Venant. Para uma aplicação plena dessas ferramentas é exigido um entendimento mais aprofundado sobre dados de geometria hidráulica e variantes ligadas a defluência, e o uso dos cálculos simplificados aceita hipóteses que relevam a alternância de campos como rugosidade, por exemplo. Assim, os modelos citados necessitam de uma calibração mais rigorosa, não dispensando a observação *in loco* em sua aplicação.

Outra ferramenta disponível é o *RiverTrak* que se apresenta como uma solução inovadora que produz, rapidamente, mapas dinâmicos de profundidades e extensões de inundação, e é personalizada para bacias hidrográficas regionais. Os mapas são criados e distribuídos com base nos mais recentes valores de medição observados e previstos disponíveis no banco de dados do Serviço Nacional de Meteorologia dos Estados Unidos (*National Weather Service*) ou em redes privadas. Para áreas afetadas pelas inundações fluviais, o *RiverTrak* fornece mapas históricos, como também mapas em tempo real, e cenários que podem ser perfeitamente integrados aos esforços existentes de mitigação de riscos e à tecnologia da informação (CRANSTON *et al.*, 2019). Esse *software* utiliza Modelo Digital do Terreno (MDT) de alta qualidade e o modelo de inundação FLDPLN (*floodplain*) para criar um banco de dados de elevações da superfície da água para uma ampla gama de inundações para um determinado rio ou bacia hidrográfica. O processo exclusivo do *RiverTrak* acessa esse banco de dados com entradas atuais, históricas ou cenários de nível de água para produzir elevações da superfície da água e mapas de inundação.

Desenvolvido pela *Federal Emergency Management Agency* (FEMA), o RASPLOT é um *software* que propicia ao usuário o desenvolvimento de perfis de inundações por meio da extração automatizada de informações oriundas dos arquivos de modelagem hidráulica do HEC-RAS. Os relatórios dos *Flood Insurance Study* (Estudos de Seguro de Inundação), que geralmente acompanham o *Flood Insurance Rate Map* (Mapa da Taxa de Seguro de Inundação) para comunidades que participam do Programa Nacional de Seguro de Inundação da FEMA são necessários a inclusão dos perfis de inundação (MAREAN *et al.*, 2020).

O *GIS Flood Tool* (GFT) é uma ferramenta de mapeamento de inundação baseada nos Sistemas de Informação Geográfica, desenvolvida pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (*United States Geological Survey*). Ao invés de executar a modelagem tradicional, o GFT usa um MDE relativo, cujo ponto zero foi referenciado ao ponto mais baixo do canal de fluxo ao longo do alcance especificado. A área de inundação é determinada para uma descarga de rio ou estágio de fluxo especificado pelo usuário, aplicando a fórmula de Manning em cada célula da rede. Dessa forma, é calculada a velocidade com a qual o fluxo passará por essa célula e de que maneira a água fluirá. Os padrões de inundação resultantes podem ser aprimorados juntando informações geográficas adicionais, como padrões de assentamento, redes de transporte e uso / cobertura do solo. Esse método é menos detalhado e se baseia em algumas suposições generalizadas, mas produz um mapa de inundação rápido e básico (VERDIN *et al.*, 2016).

Também desenvolvido pelos americanos, o *National Streamflow Statistics* (NSS) é baseado na compilação de equações de regressão aplicada para estimar projeções de fluxo advindas do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) para diversas regiões nos Estados Unidos da América. Os cálculos de regressão inseridas nesta ferramenta são utilizados para trasladar as estatísticas de fluxo de ambientes conhecidos para ambientes desconhecidos, utilizando as características do clima e da bacia hidrográfica. Cada cálculo utilizado no *software* é o produto do empenho para analisar e registrar a conduta dos fluxos em cada ambiente. Dessa maneira, cada equação possui comedimentos que precisam ser levadas em consideração pelo usuário previamente ao uso dos resultados encontrados (LAI *et al.*, 2020).

Os modelos considerados de maior complexidade são aqueles que retratam o fluxo hídrico em seu triplo eixo, ensejando uma exibição mais fidedigna à realidade, graças às suas projeções em três dimensões (3D). Para a adequada aplicação desses modelos é necessário um esforço computacional mais arrojado e a minuciosa calibração de dados. O uso de novas tecnologias, como o uso de detecção remota (sensoriamento remoto), contribuiu com o sistema de coleta de dados e com a calibração desses modelos. Porém, existe a necessidade da observação de registros históricos de inundações para que haja a correta aplicação, e ainda, a recalibração a cada novo evento. Portanto, a utilização de cada modelo hidrológico deverá ser norteadada pela deliberação sobre quais objetivos se pretende

alcançar, pois essas decisões definirão o nível de minuciosidade dos dados produzidos (NOBRE *et al.*, 2016).

A utilização de cada modelo hidrológico deverá ser norteada pela deliberação sobre quais objetivos se pretende alcançar, pois essas decisões definirão o nível de minuciosidade dos dados produzidos. Outros aspectos que devem ser levados em consideração na escolha de um modelo hidrológico são as oscilações temporais e espaciais, bem como os atributos físicos e climáticos da região em análise. Não obstante, também deve ser ressaltada a disponibilidade de dados, pois, via de regra, quanto maior a precisão do modelo, maior será a requisição de dados para a sua execução (MARINHO FILHO *et al.*, 2013).

Face aos empecilhos impostos ao uso dos modelos hidrodinâmicos mais usuais, Godbout (2018) afirma que ainda é parca a oferta de mecanismos que supram as necessidades dos usuários dessas ferramentas. A necessidade de inserção de informações mais específicas como dados de inundações pretéritas ou calibrações refinadas, impossibilita o uso mais amplo dos modelos hidrodinâmicos disponíveis para a confecção de mapeamentos de inundações. Conquanto haja a carência de mapas de inundação com grandes resoluções para dirimir ações e planejamentos sobre o tema, o alcance a essa ferramenta se restringe a um grupo muito pequeno dentro dos territórios passíveis de inundações em todo o planeta.

O uso de descritores de terreno se apresenta como uma opção para a elaboração de mapas de inundação quando comparados aos modelos hidrodinâmicos convencionais. Goerl *et al.*, (2017) ressaltam que a vantagem é atribuída à facilidade na obtenção de informações, visto que a fonte de dados pode ser extraída de um MDE que detenha alguma convergência espacial com as áreas susceptíveis à inundação. Visto que a oferta dessas informações topográficas é mais alta, o uso dessa ferramenta está se tornando gradativamente mais frequente.

Nessa esteira, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) desenvolveu o modelo descritor de terreno chamado *Height Above the Nearest Drainage* (HAND), que utiliza deste princípio para oferecer uma alternativa entregando um MDT normalizado em referência à rede hidrográfica. Para Nobre *et al.* (2016), a proposta é oferecer um mecanismo mais simplista para desenvolver mapas de áreas inundadas, incluindo suas dimensões, no qual não necessite de informações históricas de inundações ou parâmetros hidrológicos. O diferencial está na requisição de apenas uma única informação de entrada, o que torna esse

instrumento, além de bastante acessível técnica e financeiramente, uma ferramenta de fácil aplicabilidade pela vasta disponibilidade de informações topográficas.

4.6 MODELO HAND

O modelo HAND foi concebido por cientistas do INPE e exposto em 2008, pela primeira vez. Esse modelo compõe o *plugin* TerraHidro do *software* livre, TerraView, também desenvolvido pelo INPE. A abordagem simples fez desse modelo uma poderosa ferramenta de mapeamento de áreas de inundação, pois não necessita de informações inundações pregressas, nem tampouco outras informações hidrológicas, sendo necessário apenas o MDE corrigido. Tais características o tornam uma ferramenta versátil por ser aplicável em qualquer área com dados topográficos acessíveis e pelo seu baixo custo (RENNÓ *et al.*, 2008; NOBRE *et al.*, 2011; NOBRE *et al.*, 2016).

Aplicado para projetar a área de inundação em zonas definidas, o HAND é um algoritmo que faz uso de um MDE como dado de entrada para estimá-la. Acrescido ao MDE, se faz necessário determinar um limiar de área mínima de drenagem coeso com a rede de drenagem da zona de recorte do estudo. O HAND foi projetado para tornar nula a altitude do canal de drenagem, fazendo com que sua referência de cota deixe de ser o nível do mar (altitude) e passe a ser definida pela drenagem principal. Esses pontos definidos no MDE são representados por um *pixel*. Dessa forma, um *pixel* de valor menor se torna mais suscetível a inundações, uma vez que ele se encontra em um ponto de altitude mais baixa em comparação a rede de drenagem mais próxima (NOBRE *et al.*, 2016).

O produto obtido com o uso do modelo descritor do terreno HAND, aqui chamado de “mapa HAND”, conceitualmente, é considerado um tipo de mapa topográfico digital normalizado em comparação à rede de drenagem por meio de dois conjuntos de procedimento em um MDE (RENNÓ *et al.*, 2008; NOBRE *et al.*, 2011; NOBRE *et al.*, 2016).

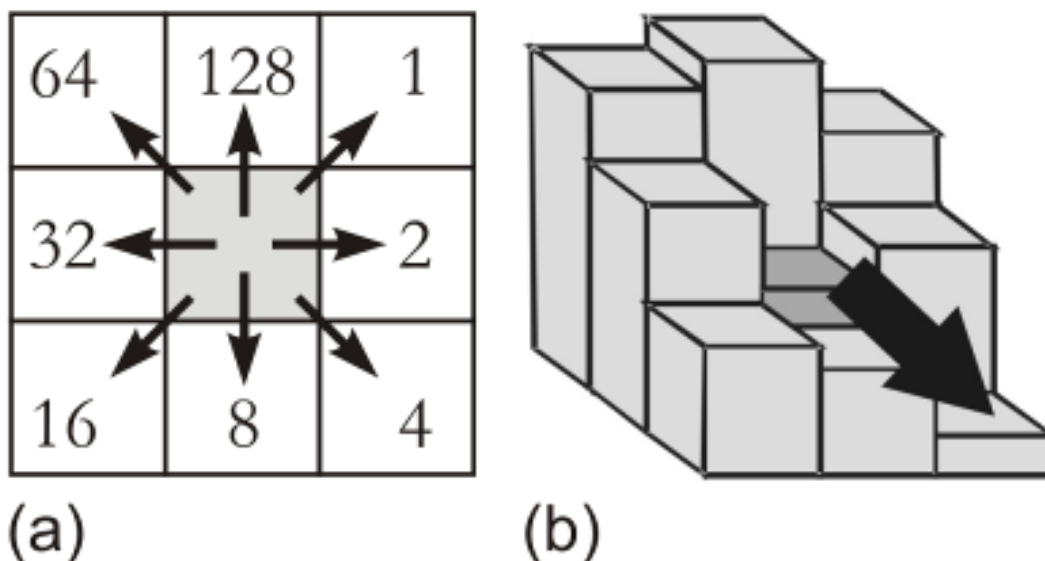
O modelo HAND efetua, inicialmente, uma série de cálculos para obter um MDE hidrológicamente coerente, bem como determinar direções de fluxo e delimitar os canais de drenagem. De acordo com Lindsay (2006), esse é o método mais robusto e eficaz para o mapeamento de canais (NOBRE *et al.*, 2016).

O processamento do modelo HAND para a obtenção do produto final, do mapa de áreas passíveis de inundação, o mapa HAND, se divide em três etapas,

sendo as duas iniciais bem definidas por Jenson e Domingue (1988), e a última baseada no método criado por Nobre *et al.* (2011) especificamente para aplicação no HAND.

Na primeira etapa é realizada a definição da direção do fluxo de drenagem e correção do MDE. Para cada *pixel* é determinada a direção do fluxo da água, e a junção hidrológica entre esses *pixels* é definida pelo caminho percorrido pelo escoamento superficial, que é estabelecido por meio do método D8 (*Deterministic Eight-Neighbors*) (Figura 7), que emprega a norma da declividade mais acentuada para definição da direção do fluxo.

Figura 7 – Método D8 utilizado pelo HAND: (a) codificação usada para distinguir as oito direções de fluxo possíveis no método; (b) atribuição de direção de fluxo pela regra da maior declividade



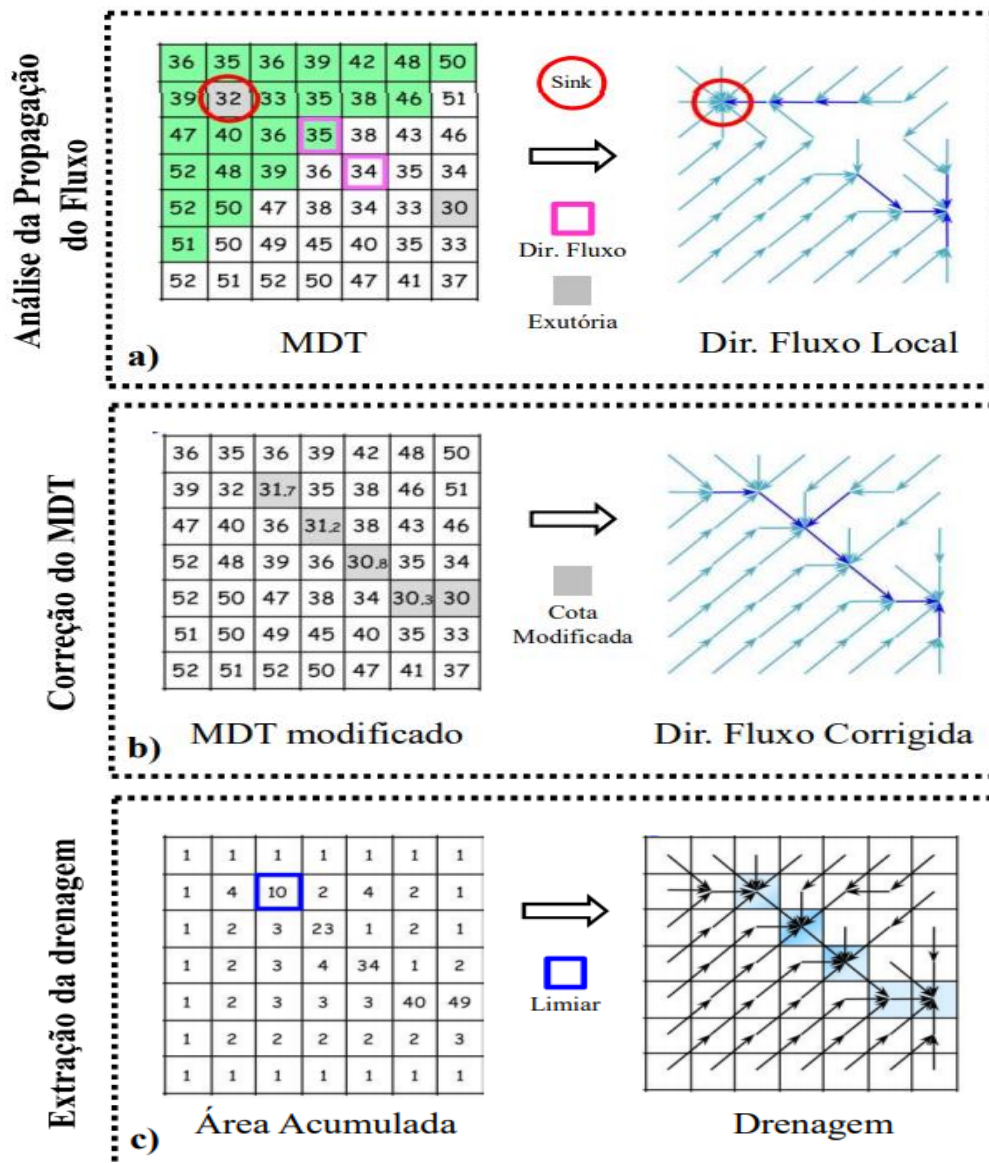
Fonte: Buarque *et al.* (2009).

Como produto dessa operação, obtém-se uma rede de pontos denominada Direção de Fluxo de Drenagem (DFD), ou, comumente chamada de *Local Drain Direction* (LDD), em sua nomenclatura em inglês. Dessa forma, o que determina a direção do fluxo da água, por via de regra, é a força da gravidade que estabelece o caminho que a água percorrerá, até o ponto mais baixo do terreno. Porém, se um desses *pixels* tiver altura inferior ou igual ao menor dos seus oito *pixels* mais próximos, ele é classificado como sumidouro, que podem ser naturais ou causados

por algum tipo de desordem dos dados, originados na execução computacional topográfica no momento do processamento do MDT (obtido no processamento do HAND a partir do MDE de entrada, porém sem os atributos naturais ou edificados da superfície do terreno), o que pode interferir na fluidez da rede de drenagem. Ainda de acordo com Momo *et al.* (2016), há alguns métodos que podem ser utilizados para a normalização da rede, sendo os mais comuns o *fill* (encher) ou *breach* (escavar), pois retifica as deformidades do levantamento topográfico.

Na segunda etapa, é obtida a rede de drenagem (Figura 8). Após as correções do MDT e do LDD, são deliberados para cada *pixel* a quantidade de fluxo reunido, onde as células com números mais elevados atestam um acúmulo de fluxo mais expressivo. Então, o *pixel* que reunir uma área de contribuição mais elevada definirá a rede de drenagem.

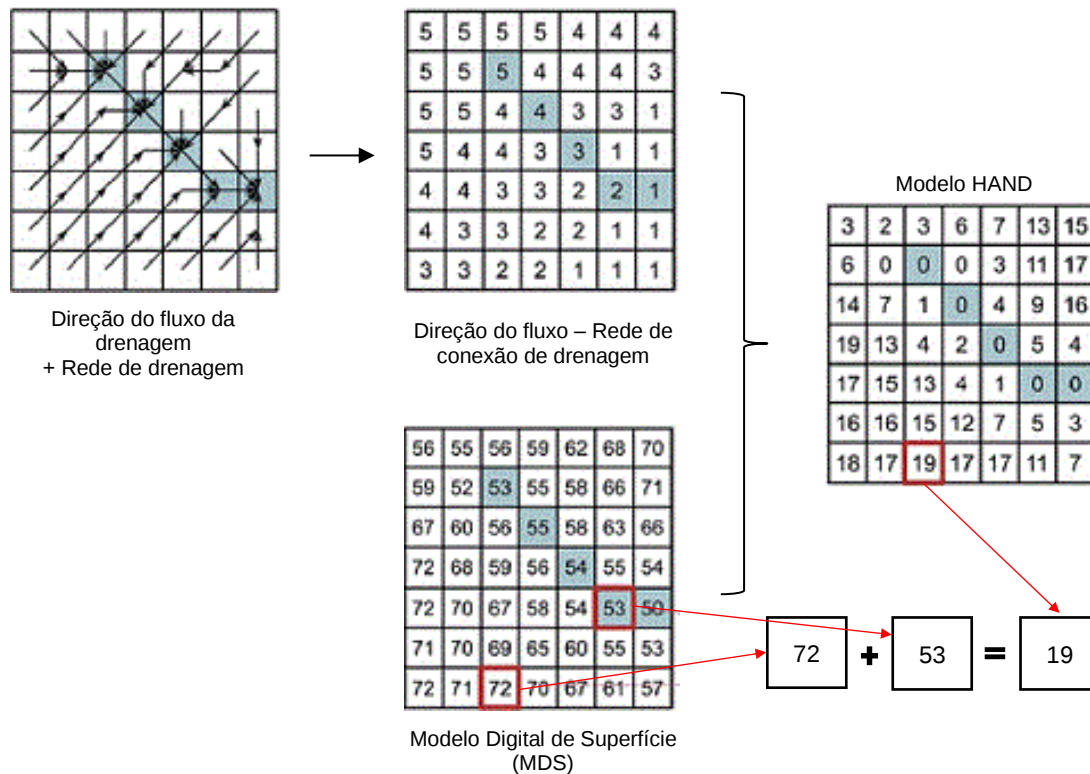
Figura 8 - Etapas para a consistência hidrológica do MDT: (a) consistência hidrológica; (b) determinação da direção de fluxo; (c) extração da rede de drenagem



Fonte: Nobre et al. (2011).

Na terceira e última etapa é realizada a delineação do HAND, onde são classificados todos os *pixels* de entrada em conformidade com as diferenças de níveis do trajeto do fluxo até o corpo hídrico mais próximo. Como produto desse processo é obtido um MDT normalizado, cujo cada *pixel* é remodelado a uma nova cota relacionado com a rede de drenagem do terreno. Como demonstrado a seguir (Figura 9) os quadrados em destaque representam os *pixels* pertencentes à rede de drenagem; apenas as setas em preto são consideradas como direção de fluxo das drenagens.

Figura 9 - Esquema explicativo do modelo matemático aplicado ao HAND



Fonte: adaptado de Rennó *et al.* (2008).

Neste trabalho, foi empregado o MDE extraído do satélite - ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*), equipado com o sensor de microondas, Palsar (*Phased Array Type L-band Synthetic Aperture Radar*), disponíveis no site da *Alaska Satellite Facility*. A resolução espacial das imagens é de 12,5 m x 12,5 m, ou seja, cada *pixel* da imagem representa uma área com estas dimensões.

4.7 MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS À INUNDAÇÃO

Sousa (2012) afirma que houve um avanço na implementação de recursos que colaboram com a diminuição da incidência de inundações, que vão desde estratégias mais simplistas até as mais sofisticadas, incluindo a geração de mapas de suscetibilidade à inundação e a confecção de modelos de gestão de riscos.

Segundo Barbosa (2006), a produção de mapas de suscetibilidade à inundação é um recurso primordial no monitoramento preventivo à eventos dessa natureza. Sua elaboração necessita de uma longa base de dados, fazendo com que sua aplicação seja restrita, quer seja pela escassez de dados ou pela baixa

confiabilidade dos mesmos. Apesar das dificuldades ora expostas, a confecção desses mapas ainda desponta como um recurso importante devido ao seu fácil entendimento de seus resultados pela sociedade, o que favorece o uso desses dados em programas voltados a fomentação da preservação do meio ambiente, assim como apoiando políticas de prevenção e mitigação de inundações.

Dispositivos legais, a exemplo da Lei 12.608/2012 que estabelece Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC), permitem que a União subsidie os Estados e Municípios com as medidas necessárias à redução de riscos a desastres, tais como “elaborar mapeamento contendo as áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos de grande impacto, inundações bruscas ou processos geológicos ou hidrológicos correlatos” (BRASIL, 2012, Art. 2. § 2º). Ainda nessa Lei sobre o mapeamento das áreas propensas a risco de desastres, tem-se o inciso IV do Art. 6º da mesma carta legal:

IV - apoiar os Estados, o Distrito Federal e os Municípios no mapeamento das áreas de risco, nos estudos de identificação de ameaças, suscetibilidades, vulnerabilidades e risco de desastre e nas demais ações de prevenção, mitigação, preparação, resposta e recuperação; (Grifo nosso)

Para Godbout (2018), a utilização dos mapas de inundações por parte poder público e da população oportuniza uma reação mais adequada aos potenciais desastres, fazendo com que seus danos sejam amenizados ou até mesmo evitados. Órgãos governamentais utilizam mapas de inundações com frequência para propiciar uma resposta mais eficaz em casos de desastres dessa natureza.

De acordo com Momo *et al.* (2016), o mapeamento das áreas de inundação representa um item primordial no estabelecimento de ações não estruturais de mitigação a danos causados por desastres naturais, através de planejamentos de defesa civil.

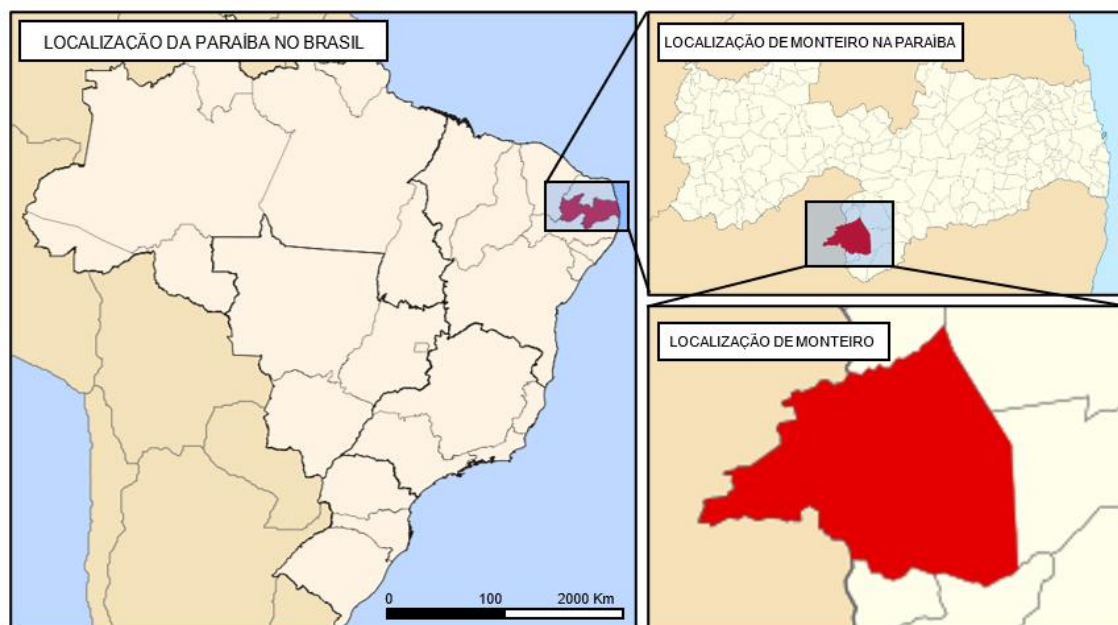
Segundo o Relatório de danos materiais e prejuízos decorrentes de desastres naturais no Brasil – 1995-2014 (UFSC, 2016), cerca de 9 mil desastres hidrológicos foram registrados no país naquele período. O montante do prejuízo decorrente dos danos causados por desastres naturais é calculado em 72 bilhões de reais, sendo 14 bilhões de reais apenas referentes aos prejuízos da causados na Região Nordeste.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O local de pesquisa foi a região da zona urbana do município de Monteiro, estado da Paraíba, que contém parte das obras do eixo Leste da transposição do Rio São Francisco. Monteiro é o maior município paraibano em extensão, com área total de 992,620 quilômetros quadrados e, aproximadamente, 319 quilômetros de distância da capital do Estado, João Pessoa. O município fica localizado na Região Geográfica Imediata de Monteiro, da Região Geográfica Intermediária de Campina Grande (IBGE, 2017). Sua população é estimada em 33.433 pessoas, com densidade demográfica de 31,28 habitantes por quilômetro quadrado. O índice de desenvolvimento humano municipal, considerado médio, de 0,628, e ocupa a 19ª posição no *ranking* geral no estado. A população idosa representa 10,58% de seu total (IBGE, 2020). Têm como municípios limítrofes: ao Norte, o município de Prata; a Oeste, os municípios de Sertânia, Iguaraci e Tuparetama (estado de Pernambuco); ao Sul, os municípios de Zabelê e São Sebastião do Umbuzeiro; e a Leste, Sumé e Camalaú (Figura 10).

Figura 10 - Localização do município de Monteiro, Paraíba, Brasil.

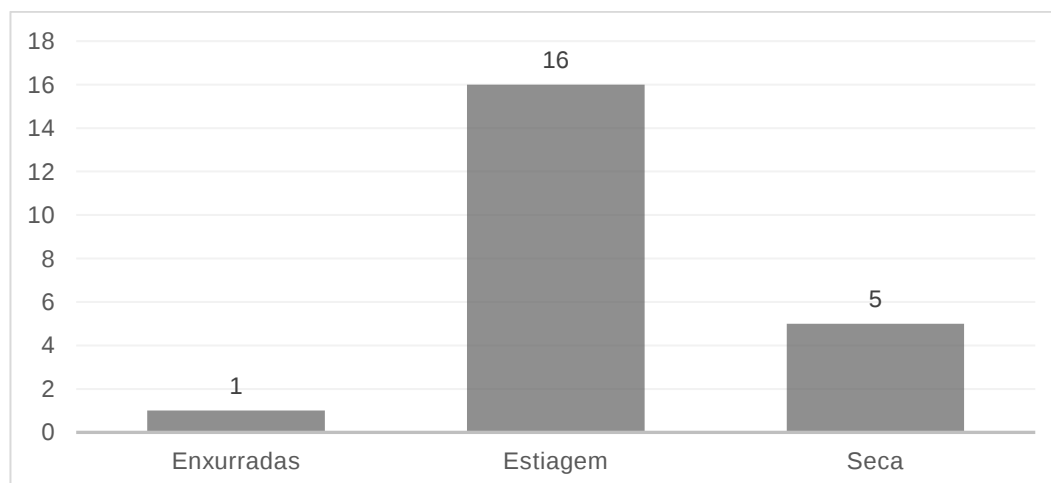


Fonte: IBGE (2020). Organização: o autor.

Apesar da quantidade ínfima de desastres por eventos adversos relacionados a inundações, enchentes ou enxurradas, o município de Monteiro se

destaca por episódios de seca e estiagem, os quais justificam uma obra da magnitude da transposição de águas naquela localidade (Figura 11).

Figura 11 - Histórico de desastres relacionados com fenômenos naturais registrados no município de Monteiro-PB, no período do ano 2000 a 2020



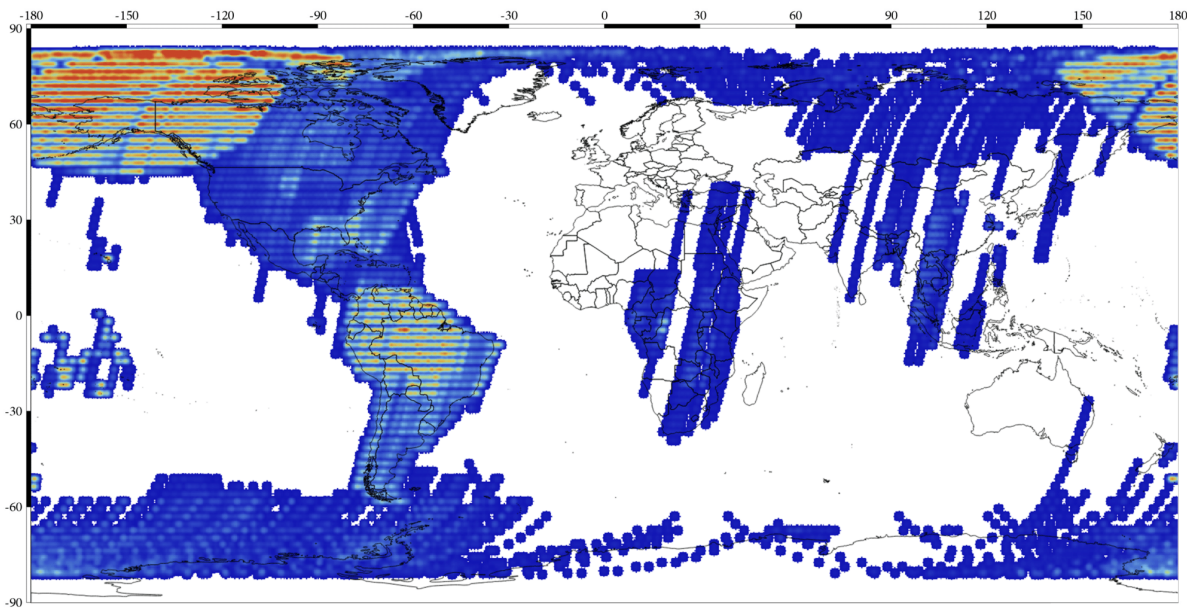
Fonte: Brasil (2020). Organização: o autor.

Como critério de inclusão para o desenvolvimento deste estudo têm-se as áreas construídas dos canais em funcionamento ao longo da estrutura da transposição do Rio São Francisco. Essas áreas estão situadas dentro dos limites da zona urbana do município, onde foi realizado o estudo do tipo transversal quantitativo descritivo, com deslocamento exploratório em solo e registro fotográfico.

5.2 APLICAÇÃO DO MODELO HAND

Para a composição dos mapas de vulnerabilidades ou zoneamentos das áreas propensas a risco de desastres por inundação da área de estudo, foi necessário a pesquisa detalhada das missões espaciais que disponibilizam gratuitamente, imagens de satélites com boas resoluções espaciais. Para este trabalho as imagens escolhidas foram do ALOS Palsar, captadas em 3 de março de 2011, geradas através de 7.020 quadros (*frames*), por fornecer imagens de qualidade com resolução espacial de 12,5 metros x 12,5 metros. O mapa, demonstrado na Figura 12 mostra o total de cobertura do produto de polarização única de feixe fino de nível 1.5 do ALOS PALSAR disponíveis no acervo do *site* da *Alaska Satellite Facility*.

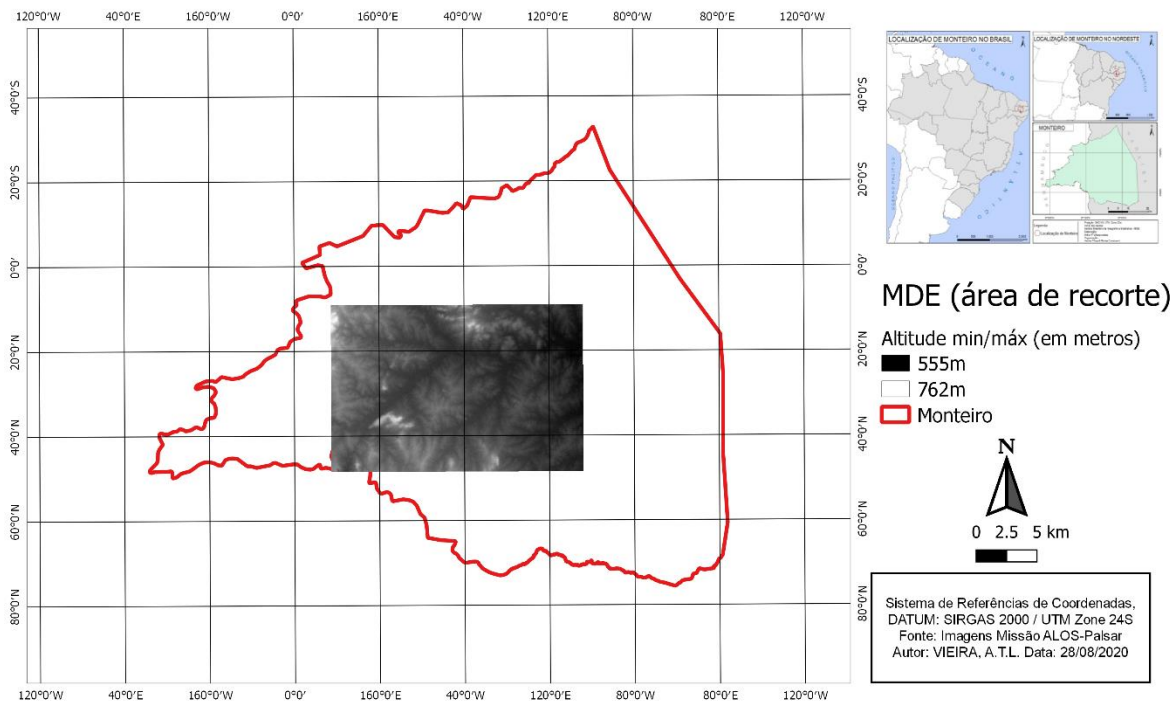
Figura 12 - Imagens da cobertura do radar do ALOS Palsar de 2006 a 2011



Fonte: ALOS Palsar – ASF, 2020. Disponível em: <<https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/alos-palsar/>>

A referida missão realizou sua última captação de imagens por satélite e radar no ano de 2011, época em que as obras do eixo Leste da transposição do Rio São Francisco ainda não haviam sido concluídas. Portanto, não sendo vislumbrada a sua estrutura física do canal nessas imagens. No entanto, para que a estrutura do canal pudesse ser visualizada no MDE desse arquivo, foi utilizado o *software* livre de código-fonte aberto QGIS para criar um dado matricial (*raster*) do polígono da área de recorte sobrepondo o canal da transposição do rio São Francisco na área de estudo. Isso não prejudicou o trabalho, pois a sobreposição de informações supre a defasagem da imagem original. Para a representação da estrutura do canal no MDE da área de estudo (Figura 13), utilizou-se o método denominado *stream burning*, que se trata de um procedimento para aprofundamento da rede de drenagem, onde foi subtraído um valor de 3,7 metros referente a profundidade do canal da transposição em relação a sua borda, dos *pixels* sobrepostos ao vetor de drenagem criado, simulando o rebaixamento proveniente do canal. A quota de altimetria a área de recorte para o MDE está no intervalo de 554 metros a 762 metros.

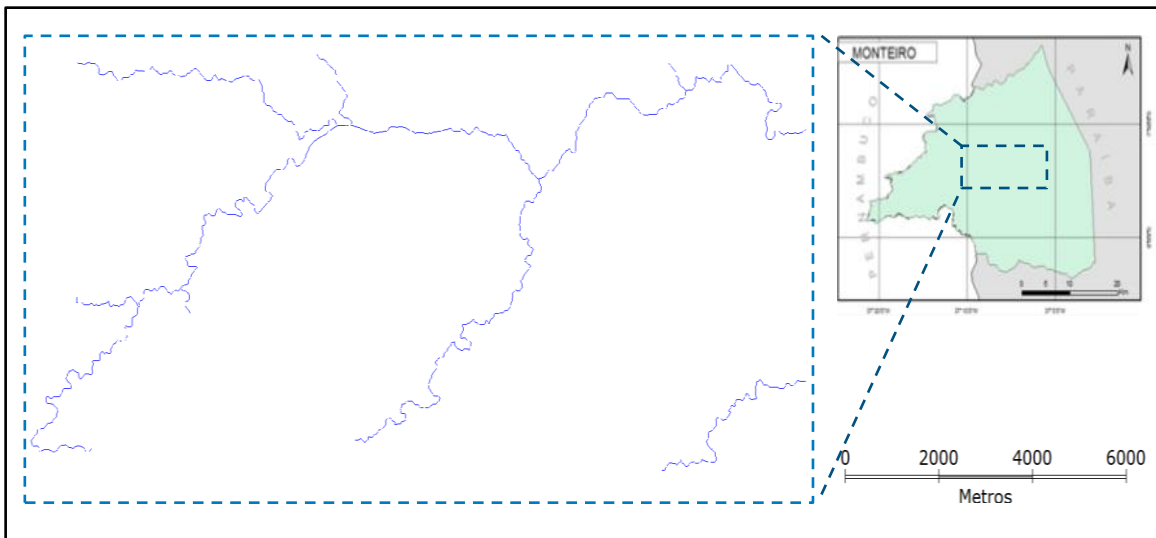
Figura 13 – Recorte do Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo, obtido da imagem de satélite do ALOS Palsar



Elaboração: o autor.

Na aplicação do programa computacional de código aberto *TerraView* foram importados os dados matriciais da imagem obtida do ALOS Palsar, por meio da importação do arquivo *Raster*, ajustando as características geográficas para UTM (projeção) e SIRGAS2000 (*Datum*), respectivamente. Esses dados matriciais foram ajustados para apenas um único nível em sua característica de multiresolução. O próximo passo realizado foi a extração dos direcionamentos do fluxo (LDD – *Local Drain Direction*), através da aba *Flow Extraction* da ferramenta *Hydrological Tools* contida no *TerraView*. Posteriormente, foi calculada a área acumulada (*Contributing Area*), seguida da extração da rede de drenagem (*Drainage Extraction*) obtendo-se como produto o limiar de drenagem (Figura 14). O limiar de drenagem foi, em princípio, configurado discricionariamente e em seguida ajustado de forma a ser mensurado um valor que produza uma rede de drenagem similar à rede hidrográfica real. Nesse intuito, foram tomadas como padrão as bases cartográficas de hidrologia da localidade para detectar a rede de drenagem real da região.

Figura 14 - Limiar de drenagem da área de estudo



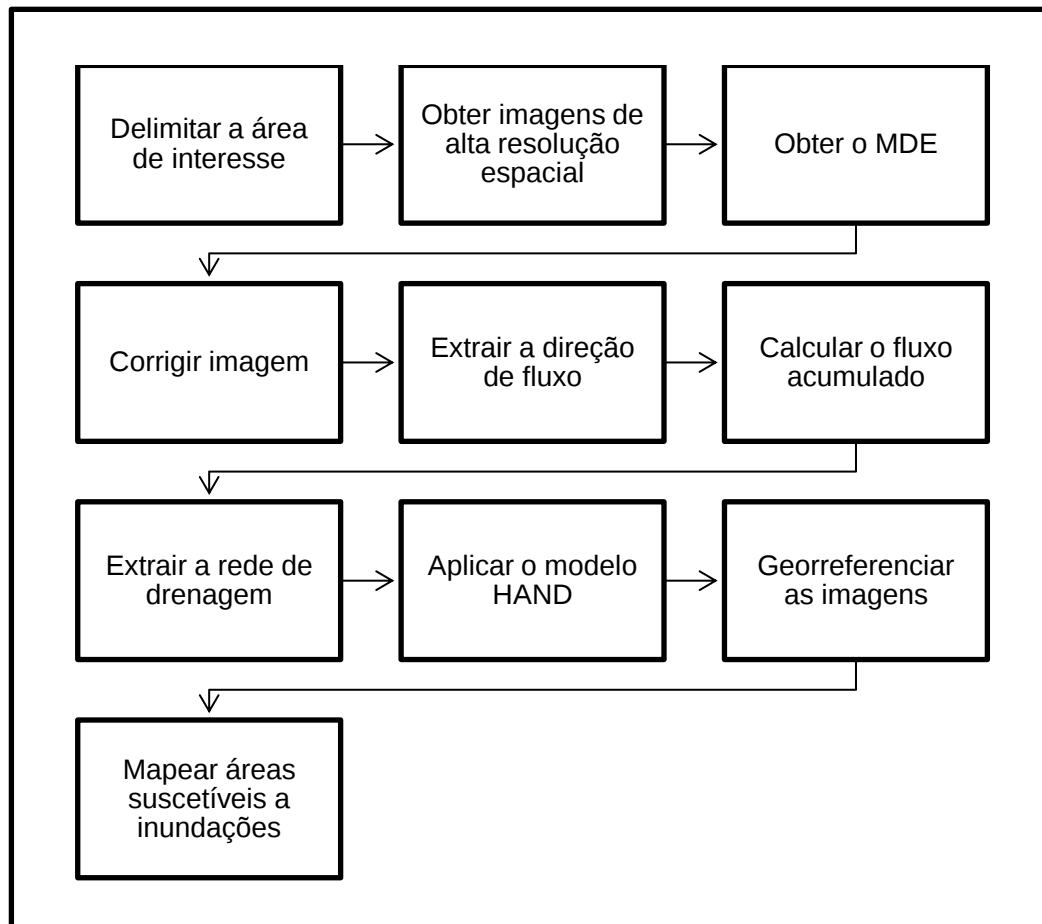
Fonte: o autor.

A versão 4.2.2 do *software* TerraView utilizada para a pesquisa oferece um *plugin*, uma extensão ao programa principal de uma ferramenta de uma outra aplicação, neste caso, o modelo HAND. Como parâmetros de entrada foram informados os arquivos gerados anteriormente para a obtenção do HAND. Para otimizar a visualização das zonas de alcance das águas, foi realizado o fatiamento do *Raster* definindo em três classes, com uma precisão de duas casas decimais, realizando a simulação do valor máximo da lâmina de água em três momentos distintos, sendo eles com 0,5 m, 3 m e 5 m, o que representam baixa suscetibilidade, média suscetibilidade e alta suscetibilidade a inundações, respectivamente, acima da linha limítrofe da bordadura do canal da transposição, ilustrando em cores distintas conforme suas classes.

Para o georreferenciamento das imagens produzidas pelo TerraView foi utilizado o *software* livre QGIS 3.10.7, por meio da sobreposição de imagens em sua correta localização geográfica, produzindo os mapas utilizados nesta pesquisa.

Para ilustrar todo o processo metodológico desenvolvido nesta pesquisa foi elaborado um esquema (Quadro 2).

Quadro 2 - Processo dos passos metodológicos para o uso do modelo HAND
nesta pesquisa

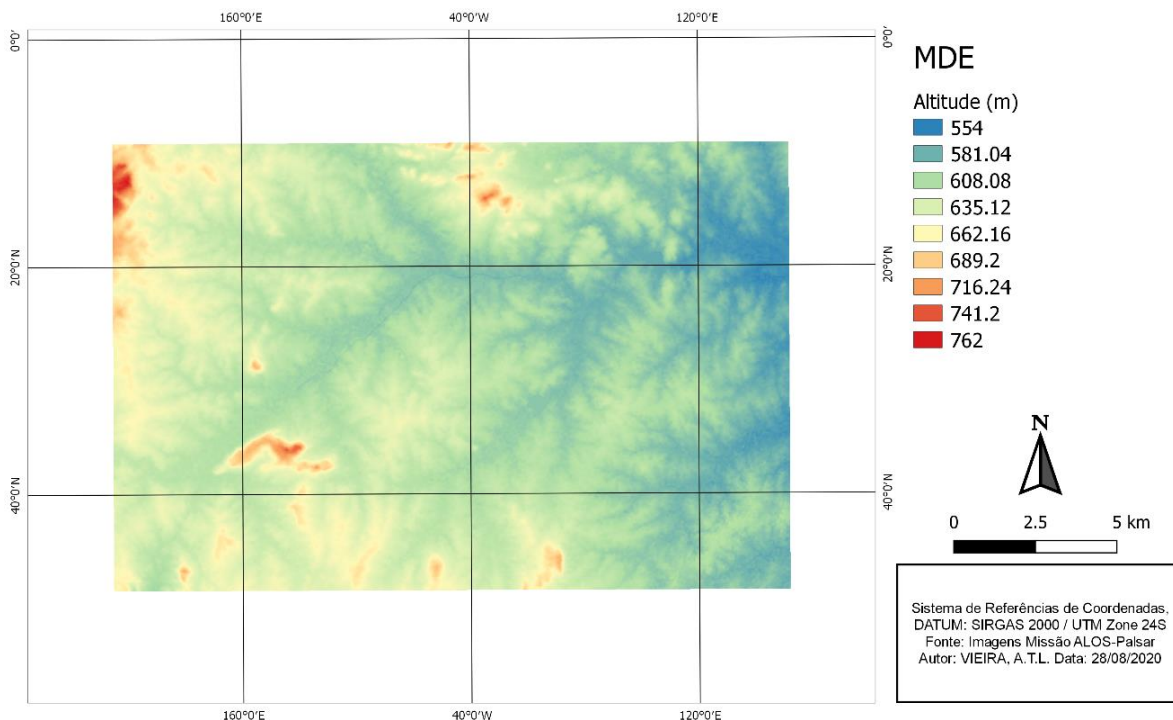


Elaboração: o autor.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a obtenção de bons resultados na estimativa de áreas passíveis de inundação utilizando o modelo HAND, há a necessidade de ter o único dado de entrada com boa resolução espacial. O MDE obtido da missão ALOS Palsar se mostrou satisfatório para a aplicação do modelo HAND, devido a sua boa resolução espacial que possibilitou o uso adequado do algoritmo (Figura 15). Esse fato também acresce um destaque por se tratar de imagens que podem ser obtidas sem custos, o que facilita o seu uso por parte de órgãos públicos e centros de pesquisas de maneira geral que não dispõem de aporte financeiro para tanto.

Figura 15 - Modelo Digital de Elevação da área de recorte



Fonte: O autor.

Na fase de mensuração da mancha da área inundável HAND, de forma mais específica na fase de processamento da matriz da malha de escoamento hídrico, foi aplicado o valor do limiar de drenagem, à princípio, de 53.326 *pixels*, de acordo com a configuração pré-estabelecida automaticamente pelo *software* TerraHidro. Dessa forma, todos os valores que foram superiores a 53.326 *pixels* em relação aos *pixels* da zona de contribuição, passaram a ser classificados como canais de drenagem. Com isso, o resultado obtido não se equiparou a rede de drenagem real

do local, apresentando uma rede de drenagem com uma densidade bastante elevada, que, após a devida comparação, constatou-se a discrepância com a realidade.

Para subsidiar este trabalho, foram utilizados arquivos oriundos da base de dados da Agência Executiva de Gestão de Águas da Paraíba (AESA) que continham a rede de drenagem efetiva da área de estudo. Dessa forma, o resultado do número que representou o limiar de drenagem foi produto do mecanismo de resolução de problemas de aplicação de tentativas para obter uma solução, partindo de 60.000 *pixels* e avaliando a cada 10.000 *pixels*, chegando ao valor que mais se aproxima do limiar de drenagem real o valor de 100.000 *pixels*, conforme demonstrado anteriormente na Figura 14.

Este trabalho se diferencia de outros por não utilizar dados de manchas de inundações históricas, pois o escopo do estudo foi observar as áreas susceptíveis a inundações causadas pelo colapso da estrutura do canal da transposição, simulando o rompimento da estrutura por uma ação antrópica e não por uma ação natural.

O modelo HAND, pelo motivo de não requerer dados hidrológicos mais complexos, tais como escoamento ou índices pluviométricos, não é capaz de mensurar a altura de uma inundação. Porém, quando essa altura é inserida como um dado no modelo, é gerada uma área que demonstra uma zona de inundação. Assim, as hipóteses aventadas neste trabalho sugerem um transbordamento hídrico acima da bordadura limítrofe do canal em três alturas distintas: 0,5 m, 3 m e 5 m.

Para a confecção do mapeamento das áreas susceptíveis a inundações foram estabelecidas três classes de suscetibilidade a inundações das áreas que podem ser alcançadas pelas águas decorrentes do extravasamento do canal da transposição. Como forma de ilustrar graficamente essas classes, foram estabelecidas três cores distintas que variam de acordo com seu grau de suscetibilidade, do mais leve ao mais severo, sendo elas: verde, para as áreas de baixa suscetibilidade; amarelo, para as áreas de média suscetibilidade; e vermelho, para áreas de alta suscetibilidade. A espacialização da probabilidade de o evento inundação ocorrer pode ser determinado como perigo, assim como sua hierarquia pode ser denominada como classes de perigo.

A partir dos dados coletados, e após a aplicação do modelo HAND, estas classes foram representadas espacialmente. Percebe-se que o extravasamento das

águas não ocorreu em todo território urbano de Monteiro uniformemente, sendo atingidas com intensidades variadas.

As áreas hachuradas em vermelho indicam a primeira classe, o nível alto de suscetibilidade a inundações. São as áreas que serão atingidas com mais severidade nos casos de inundações causadas pelo colapso da estrutura do canal da transposição.

A cor amarela indica a segunda classe de suscetibilidade. As áreas hachuradas nessa cor representam zonas média suscetibilidade, sendo caracterizadas por perímetros que podem ser afetadas em um grau moderado de inundação.

Enquanto que as áreas destacadas pela cor verde simbolizam a terceira classe de suscetibilidade, onde ficam definidas como áreas de baixo risco a inundações, inseridas nas áreas com probabilidade de serem atingidas pelas águas extravasadas do canal, contudo, de forma mais amena.

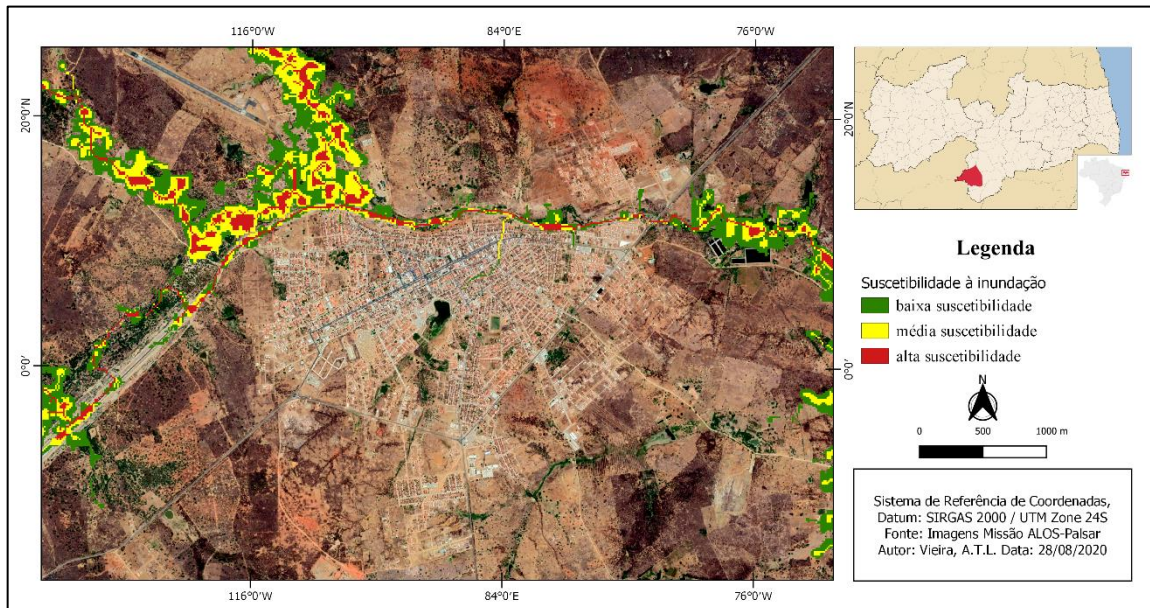
Muito embora as áreas representadas no mapeamento das zonas de susceptibilidade sejam baseadas em eventos hipotéticos, já que foram produzidas por meio de projeções conjecturadas de colapsos em estruturas de transposição hídrica, sugere-se que as áreas destacadas em vermelho não sejam destinadas a edificações habitacionais ou benfeitorias similares, por tratarem-se de locais de alta suscetibilidade à inundação.

Já as projeções das áreas representadas pelas classes subsequentes, sejam elas as de média e baixa suscetibilidade, necessitam de uma análise mais minuciosa quanto a sua forma de ocupação, uma vez que a probabilidade de serem atingidas por uma inundação é tratada como uma excepcionalidade.

Na primeira simulação, foram retratadas as inundações decorrentes do extravasamento das águas em 0,5 metro acima da linha limítrofe da bordadura do canal (Figura 16

Figura 16). A mancha de inundação, tanto para essa simulação quanto para as demais, foi graduada em três classes de vulnerabilidade, representadas por cores, sendo elas verde (baixa suscetibilidade), amarelo (média suscetibilidade) e vermelho (alta suscetibilidade).

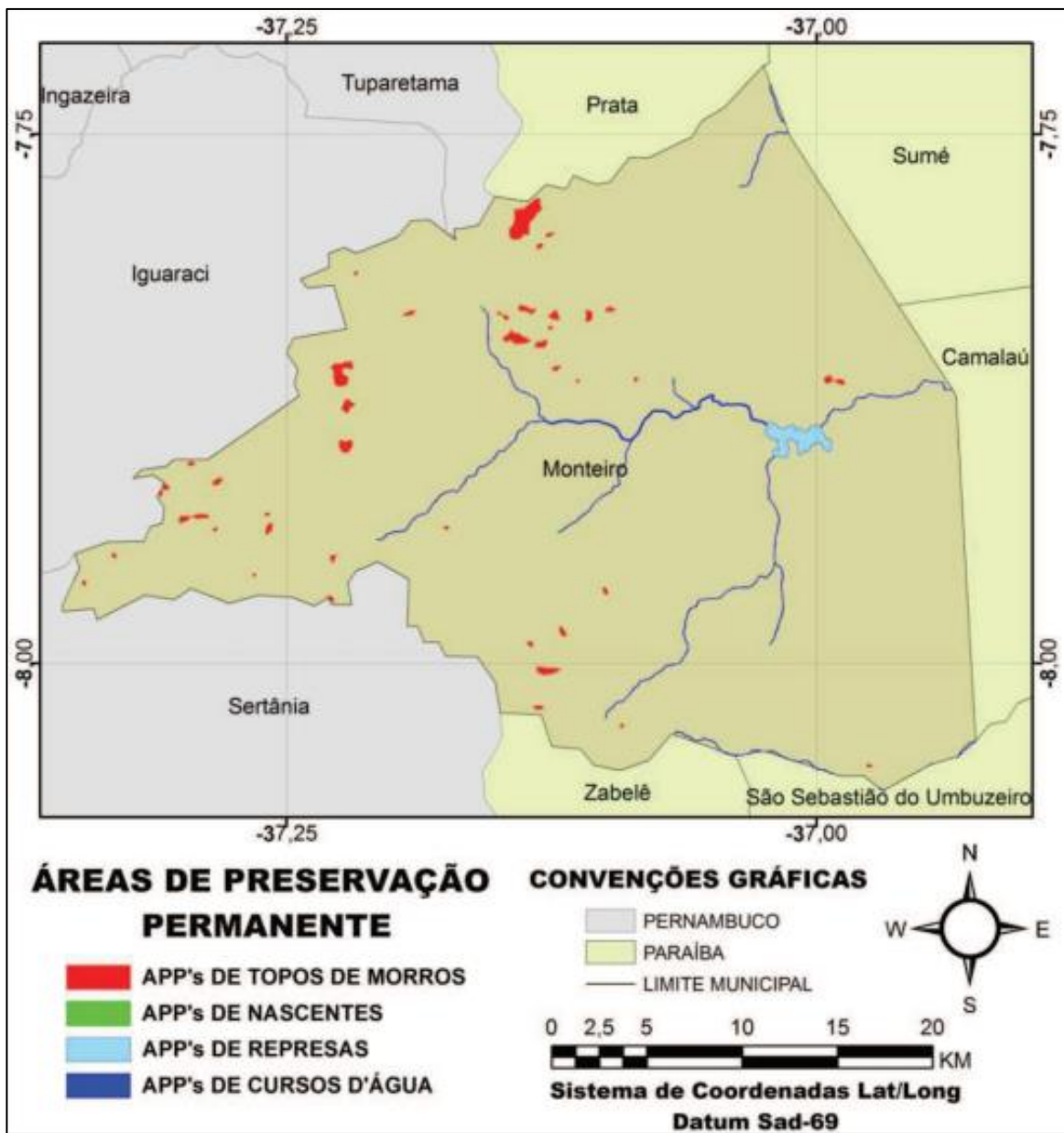
Figura 16 - Aplicação do modelo HAND simulando extravasamento das águas em 0,5 metro acima do nível limite do canal



Elaboração: o autor.

Verifica-se na Figura 16 que houve uma tendência da mancha de suscetibilidade à inundação se apresentar na margem Noroeste do canal, fora da malha urbana principal do município. No entanto, apesar de ter verificado essa tendência, isso pode trazer transtornos econômicos e de integridade física para os proprietários dessas áreas, atingindo áreas agricultáveis ou Áreas de Preservação Permanente (APP), conforme delimitação demonstrada na Figura 17.

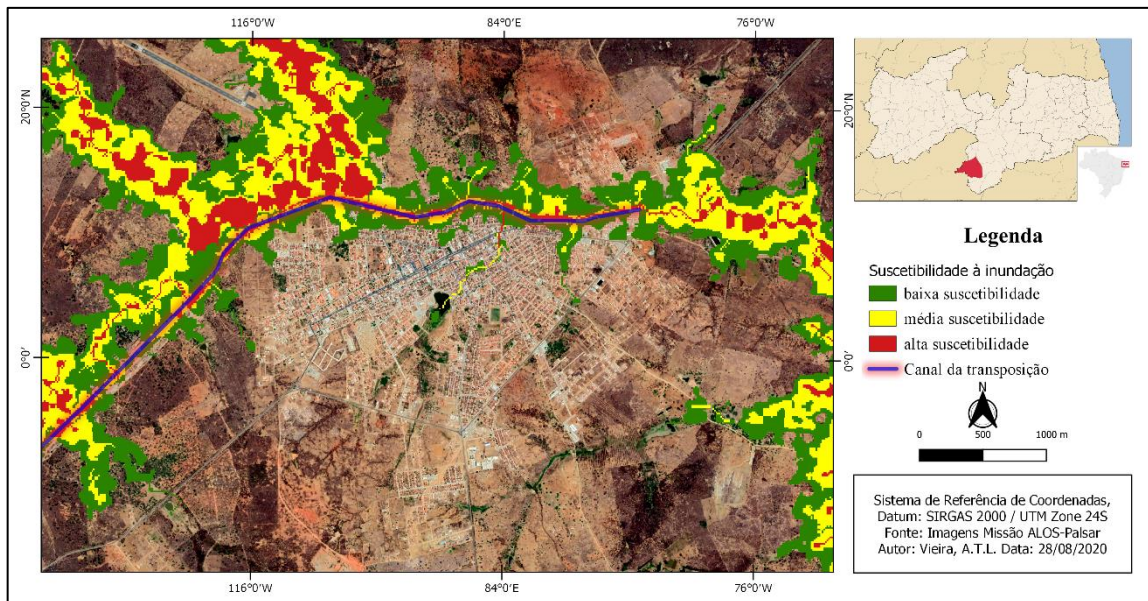
Figura 17 - Mapa das Áreas de Preservação Permanente do Município de Monteiro, Paraíba.



Fonte: Maranhão (2014).

Na segunda simulação, foram retratadas as inundações decorrentes do extravasamento das águas em 3 metros acima da linha limítrofe da bordadura do canal (Figura 18).

Figura 18 - Aplicação do modelo HAND simulando extravasamento das águas em 3 metros acima do nível limite do canal



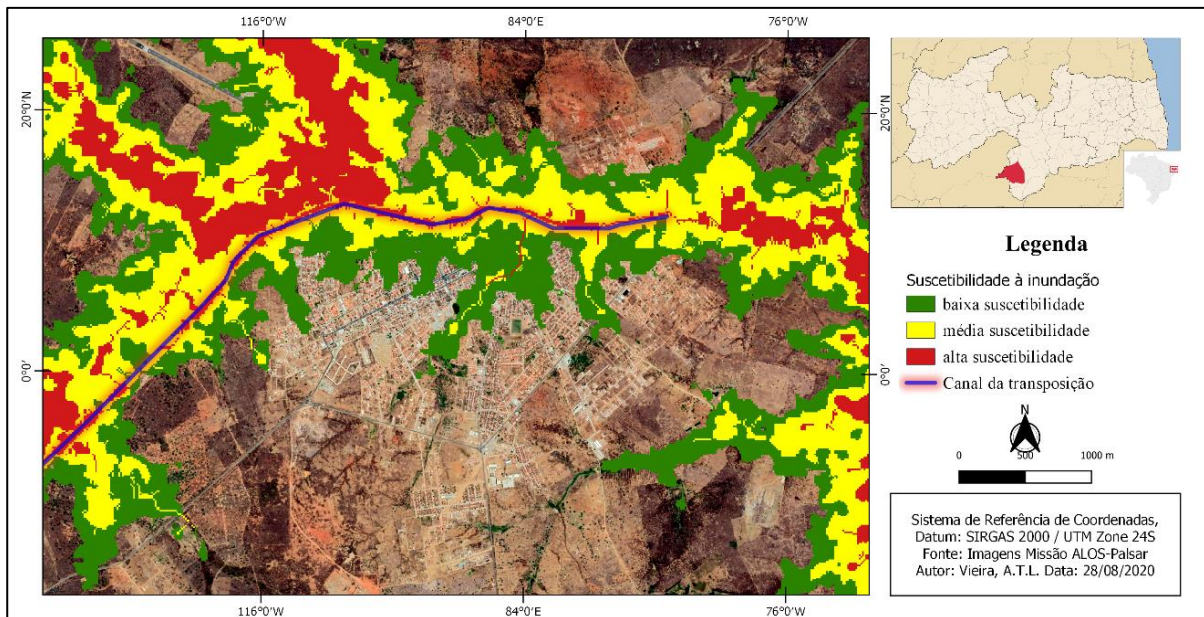
Fonte: o autor.

Observa-se na Figura 18 que houve um avanço na tendência da mancha de suscetibilidade à inundação, ficando mais evidente também na porção Noroeste da área de estudo, porém, ainda fora da malha urbana principal do município. No entanto, a malha urbana do município começou a ser afetada apresentando, em algumas áreas, baixa e média suscetibilidade à inundação.

Na terceira simulação, foram retratadas as inundações decorrentes do extravasamento das águas em 5 metros acima da linha limítrofe da bordadura do canal (

Figura 19).

Figura 19 - Aplicação do modelo HAND simulando extravasamento das águas em 5 metros acima do nível limite do canal



Fonte: O autor.

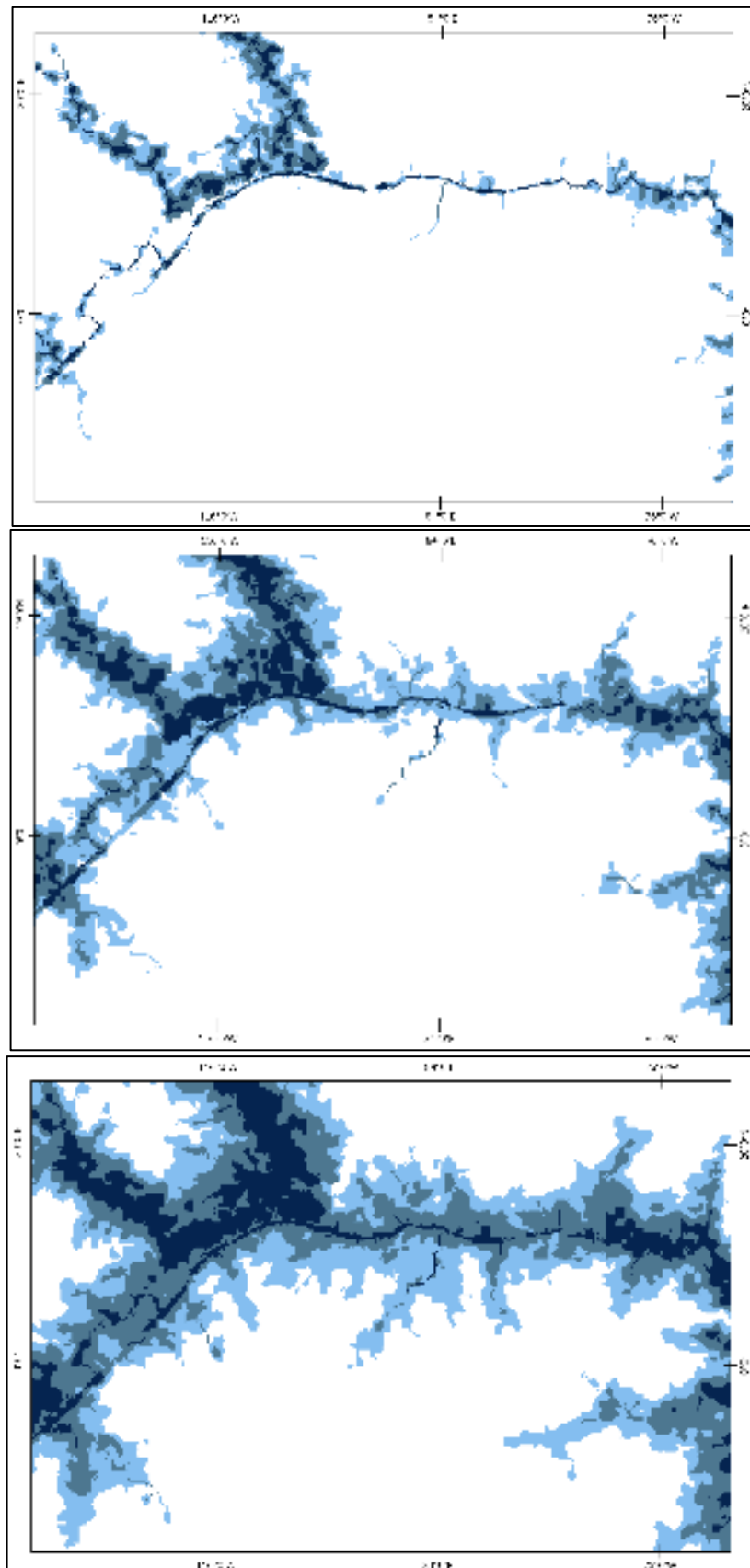
Percebe-se na

Figura 19 um considerável extravasamento hídrico na área de estudo, ficando evidente a alta suscetibilidade à inundação das áreas ao Norte do canal da transposição, bem como em sua extremidade a Nordeste da zona urbana, onde lança as águas para o curso do Rio Paraíba. O perímetro urbano também foi afetado mais severamente, atingindo áreas habitadas, podendo causar danos estruturais, transtornos sociais, bem como riscos à salubridade da população local.

Por meio do mapeamento produzido pelo HAND foi possível compreender a dinâmica dos eventos de inundação que poderão ocorrer em caso de colapso (obstrução) da estrutura do canal do eixo Leste da transposição do Rio São Francisco na zona urbana do município de Monteiro.

Assim, foi possível a verificar a evolução da mancha de inundação, apresentadas anteriormente nas Figuras 16, 18 e 19, que simulam o extravasamento das águas do canal em 0,5 m, 3 m e 5 m acima da sua borda, respectivamente (Figura 20).

Figura 20 - Aplicação do modelo HAND na área de estudo em gradações de 0,5 m, 3 m e 5 m, respectivamente, acima do limite da borda do canal



Fonte: o autor.

Outros métodos para delimitação de áreas susceptíveis a inundações podem ser encontrados na literatura, cuja eficácia não será discutida nesta pesquisa, mas trazer à baila os dados necessários à identificação dessas zonas de susceptibilidade. Chaves et al. (2021), para mapearem a suscetibilidade à inundação de uma bacia hidrográfica, utilizaram a metodologia estatística bimodal razão de frequência, onde 12 fatores de influência foram levados em consideração, sendo eles: declividade, curvatura, aspecto, hipsometria, distância dos rios, índice de potência de escoamento, índice de transporte de sedimento, índice topográfico de umidade, índice de rugosidade do terreno, índice de escoamento superficial, uso e cobertura do solo e geologia.

Por sua vez, Menezes et al. (2021), com o intuito de zonearem e classificarem as áreas propensas a risco a inundação de um município do Rio Grande do Sul, utilizaram imagens de um aplicativo *opensource* de origem russa, com resolução espacial de 50 cm por 50 cm. As imagens foram processadas, georreferenciadas e vetorizadas no *software* ArcGIS, realizando a observação de tempos de recuo das áreas inundadas, de acordo com a série histórica das cotas do principal rio da região, possibilitando graduar os eventos a partir da probabilidade acumulada e excedente.

Dias et al. (2021) realizaram um mapeamento de áreas com suscetibilidade a inundações no município de Marabá, PA, utilizando o Processo de Análise Hierárquica (AHP), onde foram atribuídos pesos aos valores que não puderam ser obtidos de forma direta, e o processo de identificação de inundação por cotas.

Para obterem uma previsão de áreas com perigo de inundação na bacia hidrográfica do Rio da Pedra, no município catarinense de Jacinto Machado, Valdati et al. (2021) aplicaram o mapeamento geomorfológico de detalhe em seu trabalho e concluíram que parâmetros de morfometria não dispõem de elementos bastantes para o entendimento da dinâmica fluvial, sendo necessário a complementação de feições coletadas em trabalhos de campo.

Os trabalhos anteriores demonstram a necessidade de uma coleta de dados complexos que exigem a combinação de vários recursos para obtenção de um resultado por meio de outras metodologias. O modelo HAND se contrapõe nesse sentido, visto que para sua aplicação é necessário o uso de um modelo digital de elevação da área de estudo como único dado de entrada, simplificando o processo de pesquisa.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao tratar-se de desastres relacionados com fenômenos naturais, sobretudo aqueles inseridos em contextos urbanos, é sabido que esses ocorrem de forma abrupta e intempestiva, e possuem alto poder destrutivo, geralmente implicando em grandes danos e prejuízos, ou ainda ocasionando mortes. Desta forma, o emprego de gestão de riscos e ações de mitigação de danos deve levar em consideração medidas preventivas como a produção de mapas de vulnerabilidades à inundação, por exemplo.

Ficou evidenciado que a estrutura do canal apresenta condições de segurança aceitáveis, no que tange ao extravasamento de água pela sua bordadura, quando relacionadas aos mapas gerados pelo modelo HAND a partir do MDE do satélite ALOS Palsar. Na simulação de extravasamento das águas ocasionado por obstrução por fatores antrópicos (lançamento de resíduos sólidos no canal, por exemplo) ou por causas naturais (vegetação, animais, etc.) em 0,5 metro acima de sua bordadura (Figura 16), o perímetro urbano foi minimamente afetado. Em uma simulação de situação intermediária, com extravasamento da água com 3 metros acima da linha limítrofe da borda (Figura 18), a extensão da inundação aumenta, mas com consequências moderadas em relação à zona habitada do município. A hipótese mais preocupante se dá pela ocasião de um derramamento das águas em 5 (cinco) metros acima da borda do canal (

Figura 19), onde há consequências mais severas decorrentes de uma inundação mais extensa da zona urbana de Monteiro, atingindo inclusive vias públicas e residências.

Com os dados consolidados, o poder público poderá adotar medidas mitigadoras, delimitando as zonas propensas a risco de desastres por inundação baseadas nas informações aqui apresentadas, minimizando prejuízos econômicos e sociais daquela população. Os órgãos responsáveis pela segurança pública e defesa civil também poderão basear suas ações de busca, salvamento e ajuda humanitária em consonância com os mapas apresentados.

Este trabalho realizou um estudo sobre uma hipótese de inundação específica, cuja aplicação se restringiu ao município de Monteiro-PB. Ainda que os resultados da pesquisa apresentados tenham sido alcançados e seus objetivos contemplados, um exame mais extenso sobre todo o percurso da obra de transposição das águas do rio São Francisco traria mais informações acerca dos possíveis riscos a inundações sobre outras áreas habitadas.

A associação de vários recursos tecnológicos mostrou-se eficaz neste tipo de estudo, uma vez que a combinação de *softwares* como o TerraView, por meio de *plugins* como TerraHidro e HAND, otimizou e simplificou a análise dos dados. A não obrigatoriedade da requisição de informações mais complexas, como os dados de batimetria, que são essenciais em outros modelos hidrodinâmicos convencionais, por exemplo, torna o HAND uma ferramenta de aplicação simples, contudo eficiente.

Essa característica simplista do modelo HAND propicia a possibilidade de mapeamento de áreas suscetíveis a inundações em localidades desprovidas de recursos, ficando evidente sua pertinência social, uma vez que oferta de informações de topografia é universal e a aplicação do modelo é relativamente simples.

Contudo, os modelos hidrodinâmicos mais usuais não podem ser substituídos definitivamente pelo modelo HAND, visto que este não pode antever episódios de inundação, pois não leva em consideração a extensão de tempo de informações hidrológicas. Dessa forma, a confirmação de uma zona de inundação gerada pelo HAND necessitará estar condicionada a uma validação de uma quota de um evento histórico.

Em contraponto ao acervo de pesquisa compulsado para a elaboração deste estudo, verificou-se o pioneirismo deste trabalho por se tratar de aplicação do HAND para verificação de eficácia de estrutura de transposição hídrica em caso de colapsos que resultem em inundações. Assim, o estudo refere-se a uma utilização não usual do modelo HAND, evidenciando uma potencialidade de aplicação na administração, gerência e controle de eventos de inundação.

Como propostas para futuras pesquisas na área, sugere-se a ampliação da área de estudo, expandindo para todas as áreas de concentração urbana que margeiam as obras da transposição das águas do rio São Francisco. Ainda, o emprego de outras tecnologias para obtenção de MDE, tais como: aeronaves remotamente pilotadas; dados de outras missões espaciais, etc. Por fim, indica-se o confronto entre os resultados alcançados através da aplicação do modelo HAND e outros modelos hidrodinâmicos mais usuais.

8 REFERÊNCIAS

ANDERSON, D. Larry. **Utah's perspective: the Colorado river**. Utah Division of Water Resources, www.water.utah.gov/interstate/thecoloradoriverart.pdf, 2002.

ARRAES, Esdra. **Rio dos currais: paisagem material e rede urbana do rio São Francisco nas capitanias da Bahia e Pernambuco**. Anais do Museu Paulista. São Paulo. N. Sér. v. 21. n. 2. p. 47-77. jul-dez. 2013.

BARBOSA, F. A. R. **Medidas de proteção e controle de inundações urbanas na bacia do rio Mamanguape, PB**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2006.

BRASIL. Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012. **Institui a política nacional de proteção e defesa civil-PNPDEC**; dispõe sobre o sistema nacional de proteção e defesa civil-SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil-CONPDEC; autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres e dá outras providências. Diário Oficial da União, v. 70, 2012.

CARDONA, Omar Dario. **Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo**. In: MASKREY, Andrew (Ed.). Los desastres no son naturales. Colombia: LA RED; ITDG, p. 51-74, 1993.

CARDONA, Omar Dario. **La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo**. Centro de Estudios sobre Desastres y Riesgos CEDERI. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, 2002.

CASTRO, César Nunes de. **Transposição do Rio São Francisco**. Brasil em Desenvolvimento: Estado, planejamento e políticas públicas. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Brasília: Ipea, 2010.

CEMADEN. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. **Situação atual da seca no Semiárido e impactos em agosto de 2016**. Disponível em: <http://www.cemaden.gov.br>. Acesso em: 07 Set. 2020.

CHAVES, Hugo Leonardo Oliveira *et al.* Mapeamento de suscetibilidade à inundação utilizando o método da razão de frequência aplicado à bacia do Riacho Fundo-Distrito Federal. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 9, n. 1, p. 148-166, 2021.

CRANSTON, Michael; MARTIN, Gary; SMITH, Paul. **Developing a pan-European approach to community-based flood alerting and forecasting**. In: Geophysical Research Abstracts. 2019.

DIAS, Matheus Barros; GALINA, Nássila Ribeiro; ALVES, Camila Nascimento. Mapeamento da suscetibilidade a inundações em áreas urbanas: estudo de caso no município de Marabá, Sudeste do estado do Pará, região Norte do Brasil. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 6, 2021.

ENGEORPS/HARZA. **Projeto Transposição de Águas do Rio São Francisco para o Nordeste Setentrional**; Relatório R32 – Relatório Síntese de Viabilidade Técnico-Econômica e Ambiental – São Paulo: ENGEORPS/HARZA, 2000. 330 p.

ENGEORPS. PROJETO EXECUTIVO - EIXO NORTE - LOTE A: **Relatório final do projeto executivo das estações de bombeamento**. Barueri, 2012, 191 p.

FREITAS, Carlos Machado de *et al.* **Desastres naturais e seus custos nos estabelecimentos de saúde no Brasil no período de 2000 a 2015**. Cadernos de Saúde Pública, v. 36, p. e00133419, 2020.

FILGUEIRA, Hamilcar José Almeida. **Os desastres relacionados com fenômenos naturais no contexto dos sistemas organizacionais**. GARCIA, J. P.M (Org.), Desastres na Paraíba: riscos, vulnerabilidade e resiliência. João Pessoa: Editora Universitária da UFPB, 2013.

GODBOUT, L. D. **Error assessment for Height Above the Nearest Drainage inundation mapping**. Dissertação de mestrado. The University of Texas, Austin, 2018.

GOERL, Roberto Fabris; MICHEL, Gean Paulo; KOBIYAMA, Masato. Mapeamento de áreas susceptíveis a inundações com o modelo HAND e análise do seu desempenho em diferentes resoluções espaciais. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 1, 2017.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Coordenação de Geografia. **Divisão regional do Brasil em regiões geográficas imediatas e regiões geográficas intermediárias: 2017**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. 82 p.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais. **Estimativas da população residente com data de referência 1º de julho de 2020**. Rio de Janeiro: IBGE, 2020.

MENEZES, Daniel Junges; DE SOUZA ROBAINA, Luís Eduardo; TRENTIN, Romário. Zoneamento e classificação das áreas de risco a inundações no município de Alegrete, RS. **Raega-O Espaço Geográfico em Análise**, v. 50, p. 136-152, 2021.

ISDR. **International Strategy for Disaster Reduction. Visions of risk: a review of international indicators of disaster risk and its management.** London: Inter-Agency Task force on Disaster Reduction – Working Group 3, 2004. 73p.

JENSON, Susan K.; DOMINGUE, Julia O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. **Photogrammetric engineering and remote sensing**, v. 54, n. 11, p. 1593-1600, 1988

KOBIYAMA, Masato *et al.* **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos** – Curitiba: Ed. Organic Trading, 2006.

LICCO, Eduardo Antonio; MAC DOWELL, Silvia Ferreira. **Alagamentos, enchentes enxurradas e inundações: digressões sobre seus impactos sócio econômicos e governança.** Área de Pesquisa em Sustentabilidade Centro Universitário Senac, 2015.

LINDSAY, John B. Sensitivity of channel mapping techniques to uncertainty in digital elevation data. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 20, n. 6, p. 669-692, 2006.

MARANHÃO, Karinna Ugulino de Araújo *et al.* **Zoneamento ambiental do município de Monteiro-PB.** 2014.

MAREAN, James; GALE, William. **Utility situational awareness system.** U.S. Patent n. 10,831,940, 10 nov. 2020.

MARINHO FILHO, Gilberto Milhomem *et al.* Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 6, n. 2, p. 35-47, 2013.

MELLO, Flavio Miguez de. **As barragens construídas pelo DNOCS: a história das barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI: cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens.** Rio de Janeiro: CBDB, 2011.

MOMO, Marcos Rodrigo *et al.* **Desempenho do modelo HAND no mapeamento de áreas suscetíveis à inundação usando dados de alta resolução espacial.** RBRH, v. 21, n. 1, p. 200-208, 2016.

NOBRE, A. D. *et al.* Height Above the Nearest Drainage—a hydrologically relevant new terrain model. **Journal of Hydrology**, v. 404, n. 1-2, p. 13-29, 2011.

NOBRE, A. D. *et al.* **HAND contour: a new proxy predictor of inundation extent.** Hydrological Processes, v. 30, n. 2, p. 320-333, 2016.

NEVES, Cesar das; CARDOSO, A. P. **A experiência internacional com projetos de transposição de água—lições para o rio São Francisco**. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 29. Salvador, 2009.

REBOUÇAS, A.C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J.G. (Eds.) **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. 2.ed. São Paulo: Escrituras, 2002. p.451-471.

RENNÓ, C. D *et al.* HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 9, p. 3469, 2008.

SAVAGE, J. *et al.* **The impact of Scale on Probabilistic Flood Inundation Maps Using a 2D Hydraulic Model with Uncertain Boundary Conditions**. In: Proceedings of the Second International Conference on Vulnerability, Uncertainty and Risk Analysis and Management (ICVRAM), Liverpool, pp. 279-289, 2014.

SILVA, L. P. E. **Modelagem e Geoprocessamento na identificação de áreas com risco de inundação e erosão na bacia do Rio Cuiá - João Pessoa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana), UFPB/CT, 2007.

SOUSA, L. F. N. M. de. **Metodologia para o mapeamento de cheias em zonas de risco. Aplicação a um trecho de um rio do norte de Portugal**. Dissertação de Mestrado de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2012.

SUASSUNA, J. **Recalque e transposição de águas: equívocos nos conceitos**. Recife: Fundaj. 2001a. Disponível em <http://www.fundaj.gov.br>. Acessado em 28 de julho de 2019, 2001.

TUCCI, Carlos EM. **Inundações urbanas**. Porto Alegre: ABRH/RHAMA, v. 11, 2007.

TUNDISI, José Galizia; REBOUÇAS, A. da C.; BRAGA, BENEDITO. **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. São Paulo, 2002.

UNISDR. **Como construir cidades mais resilientes: um guia para gestores públicos locais**. Genebra, Suíça: Escritório das Nações Unidas para Redução de Riscos de Desastres, 2012.

UNISDR. **Economic losses, poverty and disasters 1998–2017**. United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2017.

UFSC. Universidade Federal de Santa Catarina. **Relatório de danos materiais e prejuízos decorrentes de desastres naturais no Brasil: 1995 – 2014**. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. Florianópolis: CEPED UFSC, 2016.

VALDATI, Jairo; FERREIRA, Daner Rosskamp; GOMES, Maria Carolina Villaça. Determinação do perigo de inundação a partir do mapeamento geomorfológico de detalhe. **Geosul**, v. 36, n. 78, p. 496-515, 2021.

VANELLI, Franciele Maria; KOBAYAMA, Masato; MONTEIRO, Leonardo Romero. Dicotomias associadas aos desastres. Encontro Nacional de Desastres, 2. II END. Rio de Janeiro, RJ, 15 a 18 de dezembro de 2020. **Anais...** Porto Alegre, RS: ABRHidro, 2021.

VERDIN, James *et al.* **A software tool for rapid flood inundation mapping**. US Geological Survey, 2016.