



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

RECLASSIFICAÇÃO DAS MANCHAS DE SUSCETIBILIDADE A INUNDAÇÃO DO MUNICÍPIO DE PORTO VELHO (RO) E AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA VERTICAL DE MDEs DE FONTE ABERTA

Philippe Souza Simões

Monografia apresentada ao curso
Introdução ao Geoprocessamento do
curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto do Instituto
Nacional de Pesquisas Espaciais.

INPE
São José dos Campos
2020

RESUMO

As inundações acontecem quando as águas de um curso d'água saem do leito de escoamento e passam a ocupar as margens do curso d'água em questão. Estes eventos são naturais ou provocados por ações humanas e podem ser potencializados pelas características do relevo, cobertura vegetal, potencial de drenagem do solo e intensidade de chuvas. Dados os danos causados por estes eventos, sobretudo à população atingida, este estudo performou a reclassificação das manchas de suscetibilidade a inundações do município de Porto Velho (RO) com base nos dados populacionais por setor censitário do município utilizando métodos de inferência *Fuzzy*. Sabendo que Modelos Digitais de Elevação são imperativos para geração de tais manchas, este estudo também objetivou avaliar a acurácia vertical dos modelos ALOS World 3D-30m, SRTM GL1 reamostrado pela *Alaska Satellite Facility* (ASF) e TOPODATA. A partir da reclassificação das manchas, obteve-se as áreas de alerta de risco à população no caso da ocorrência de inundações. A avaliação da acurácia vertical dos modelos digitais de elevação mostrou o ALOS World 3D-30m como mais acurado, com RMSE de 6,17 m, seguido pelo SRTM GL1 ASF e TOPODATA com RMSE de 6,63 e 8,23 m, respectivamente.

Palavras-chave: Inundação. *Fuzzy*. Modelo Digital de Elevação. Acurácia Vertical.

**RECLASSIFICATION OF FLOOD SUSCEPTIBILITY PATCHES OF PORTO
VELHO (RO) AND VERTICAL ACCURACY ASSESSMENT OF OPEN
SOURCE DEMs**

ABSTRACT

Floods occur when waters of a river or another watercourse come out of the riverbed and occupy its banks. Flood events are natural or caused by human actions. This type of event causes damage to the population and can be intensified by rains, urbanization, topography, and land cover. Thus, this study purposes to reclassify the flood susceptibility patches of Porto Velho using Fuzzy operators based on population data. Also, knowing the digital elevation models importance to flood mapping, this study aims to assess the vertical accuracy of ALOS World 3D-30m, SRTM GL1 resampled by Alaska Satellite Facility (ASF) and TOPODATA digital elevation models. From the reclassified patches it was possible to identify the critical points for the population on flooding events. The vertical accuracy assessment showed the ALOS World 3D-30m as the most accurate, with 6,17 m expressed as RMSE, followed by SRTM GL1 ASF and TOPODATA with 6,63 and 8,23 m RMSE respectively.

Keywords: Flood. Fuzzy. Digital Elevation Model. Vertical Accuracy.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1.1 – Localização da Área de Estudo.....	4
Figura 2.1 – Diagrama OMT-G.....	5
Figura 2.2 – Mapa Coroplético Denotando a População Por Setor Censitário... 9	9
Figura 2.3 – Mapa Coroplético Denotando a População Idosa Por Setor Censitário	9
Figura 2.4 – Malha de Pontos Cotados com Destaque para os Pontos Amostrados	12
Figura 2.5 – Recorte dos MDEs para a Área de Estudo	12
Figura 3.1 – Manchas de Alerta de Risco à População.....	14
Figura 3.2 – Manchas de Alerta de Risco à População Idosa	15
Figura 3.3 – Dispersão dos Erros.....	17
Figura 3.4 – Espacialização dos Erros em Isolinhas	18

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 3.1 – Síntese das Estatísticas Propostas.	16

LISTA DE QUADROS

	<u>Pág.</u>
Quadro 2.1 – Detalhamento dos Dados de Entrada.....	6
Quadro 2.2 – Graus de Alerta de Risco à População em Caso de Inundação. 10	10
Quadro 2.3 – Síntese das Estatísticas Propostas.	13

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Caracterização da Área de Estudo.....	4
2 METODOLOGIA.....	5
2.1 Dados de Entrada.....	6
2.2 Processamento dos Dados.....	8
2.2.1 Reclassificação das manchas de suscetibilidade a inundação	8
2.2.2 Avaliação da acurácia vertical dos MDEs	10
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	14
3.1 Manchas de Alerta de Risco a População	14
3.2 Acurácia Vertical dos MDEs	16
4 CONCLUSÕES.....	19
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	20

1 INTRODUÇÃO

As inundações urbanas são recorrentes desde a formação de cidades e aglomerados urbanos e acontecem quando as águas de rios, riachos, galerias pluviais saem do leito de escoamento passam a ocupar áreas de infraestrutura urbana, tais como ruas, rodovias, moradias, entre outros. A ocorrência de inundações está relacionada aos processos climáticos locais e regionais e seus danos podem ser amplificados por incapacidade de escoamento, drenagem e permeabilização dos ambientes urbanos e classificam-se como fenômenos hidrológicos extremos (TUCCI; BERTONI, 2003; RAMOS, 2013).

Estes eventos não possuem frequência fixa, são naturais ou provocados por ação humana. De modo geral, as inundações podem ser tipificadas como fluviais, de depressões topográficas, costeiras e urbanas (RAMOS, 2013). O relevo, a intensidade de chuvas, cobertura vegetal e o potencial de drenagem do solo, são características naturais cruciais que favorecem a ocorrência de inundações. Contudo, também existem importantes características artificiais que influenciam estes eventos, tais como as relacionadas ao uso e manejo do solo, a exemplo de obras hidráulicas, urbanização, desmatamento e reflorestamento (GOLDONI; VESTENA, 2016).

O Brasil, um país com dimensões espaciais comparável a continentes e com malha hidrográfica ímpar, sobretudo na região amazônica, não está isento desse tipo de evento. Anualmente, diversas cidades brasileiras reportam a ocorrência de inundações, principalmente na estação chuvosa de cada região, na qual é esperado um aumento das cotas dos rios e sobrecarga dos sistemas de drenagem das cidades.

Dado o fato que a frequência dos eventos de inundações não é fixa, instituições como o Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia (CENSIPAM), possuem iniciativas de monitoramento e identificação das áreas suscetíveis a inundações. Dentre outros fatores, estas iniciativas consideram processos pluviométricos, processos do sistema aquático envolvido e também, a topografia local.

A depender da inundação, os danos por ela causados podem ser de grande porte, levando muitas vezes, as autoridades competentes a decretarem estado de emergência. Nesse contexto, as instituições supracitadas fornecem produtos cartográficos que auxiliam no entendimento da dinâmica espacial das inundações, bem como, servem como subsídio para tomada de decisão em eventos de inundação.

Dentre estes produtos, cita-se as Cartas de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações fornecida pela CPRM, que possui como um dos objetivos específicos, salientar as suscetibilidades incidentes nas áreas urbanizadas e/ou edificadas que correspondem aos locais de maior concentração populacional, que eventualmente podem estar sujeitas aos processos de Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações (CPRM, 2015?).

Além disto, o produto mencionado acima, também visa estabelecer indicadores que forneçam uma estimativa da magnitude da incidência destes eventos em relação às populações residentes de modo a tornar mais fácil a comunicação entre os tomadores de decisão e as comunidades envolvidas. Assim, as Cartas de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações configuram-se como um instrumento de planejamento e gestão territorial, que podem ser usadas para derivar informações complementares.

Desse modo, a presente pesquisa objetiva relacionar as manchas de suscetibilidade a inundação do município de Porto Velho, no estado de Rondônia, fornecidas pela CPRM, com dados populacionais dos setores censitários do censo demográfico de 2010 fornecidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) a partir da aplicação de inferência geográfica utilizando a lógica *Fuzzy*.

Pode-se entender um conjunto *Fuzzy*, de acordo com Câmara et al. (2001), como uma metodologia de caracterização de classes que não estabelece limites concretos entre estas classes e possui sua utilização recomendada quando os fenômenos a serem analisados abordarem ambiguidade, abstração ou ambivalência.

Com base na inferência *Fuzzy*, espera-se reclassificar as manchas de suscetibilidade a inundação de acordo com o total da população e o total da população com mais de 60 anos, que eventualmente que podem ser atingidos pela ocorrência de inundações. Assim, obtendo um mapa de alerta para as áreas que potencialmente podem ter um maior número de atingidos. A premissa deste estudo consiste na possibilidade da agregação de dados, visando obter informações diferenciadas que, entre outras aplicações, possam apontar regiões críticas durante a ocorrência de inundações no município de Porto Velho.

A escolha de uma faixa etária específica, neste caso, a de pessoas com mais de 60 anos, é baseada no fato de que o declínio funcional de pessoas idosas pode causar, entre outros fatores, a redução gradativa da percepção de risco, estado de alerta e da mobilidade. Por esses e outros motivos, em situações emergenciais, a população idosa demanda atendimentos que contemplem suas necessidades especiais (BODSTEIN et al., 2014).

Além das manchas de suscetibilidade a inundação, o banco de dados geográficos fornecidos pela CPRM também fornece uma malha de pontos de campo, que dentre outras informações, fornece a altitude destes. Sabendo que as referidas manchas foram obtidas a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) derivado da iniciativa TOPOTADA, esta pesquisa também objetiva avaliar a acurácia vertical de diferentes MDEs na referida área de estudo, em relação aos pontos disponibilizados pela CPRM.

Para a avaliação, foram selecionados os MDEs, ALOS World 3D-30m (AW3D30) e SRTM GL1 reamostrado pela *Alaska Satellite Facility* (ASF), com resolução espacial de 12,5 m e TOPODATA. O MDE AW3D30 é de uso livre, disponibilizado pela *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) e configura-se como um *downscale* do MDE AW3D. Em relação ao SRTM GL1 ASF, este foi gerado pela ASF no contexto da iniciativa *radiometrically terrain-corrected* (RTC), que realizou a correção radiométrica de imagens ALOS PALSAR a nível global (ASF, 2015).

A partir dos resultados da avaliação da acurácia vertical dos MDEs, espera-se indicar qual modelo pode fornecer dados topográficos com menores erros

verticais em relação aos dados de campo da área de estudo, assim, fomentando estudos futuros a utilizarem MDEs com erros controlados e conhecidos.

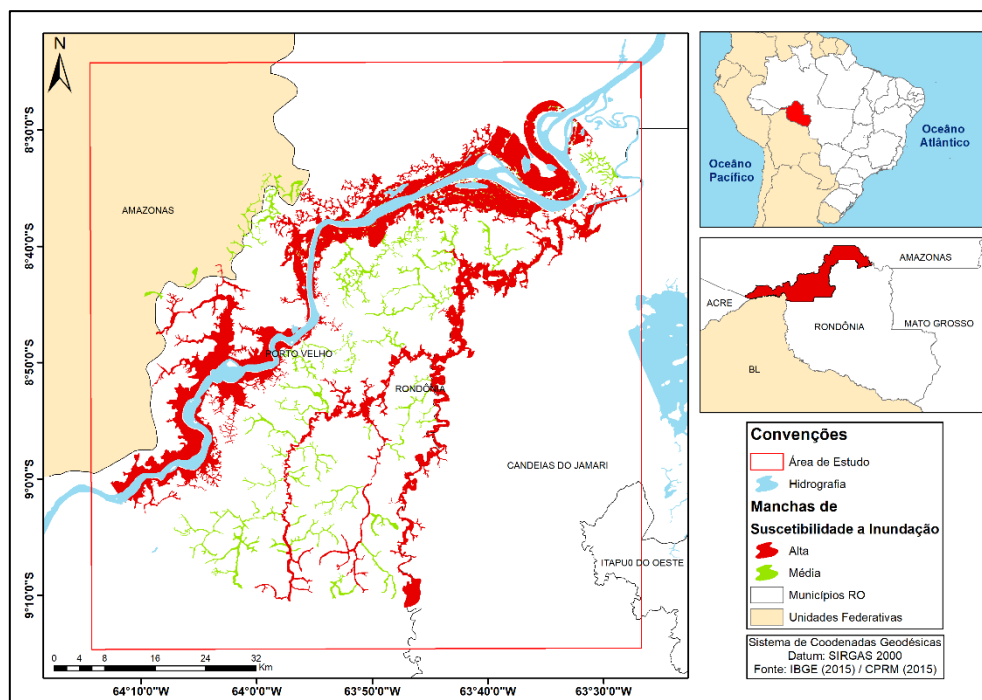
1.1 Caracterização da Área de Estudo

A área de estudo desta pesquisa concentra-se no município de Porto Velho, no estado de Rondônia, na Região Amazônica Brasileira. A cidade de Porto Velho é a capital do estado de Rondônia e localiza-se à margem leste do Rio Madeira, na Bacia Hidrográfica do Rio Amazonas.

A região está inserida no bioma Amazônia e o clima tropical superúmido é predominante na região (PORTO VELHO, 2020). De acordo com o IBGE (2020), com base no censo de 2010, a população estimada em 2020 é de 539.354 pessoas, sendo a área total do município aproximadamente 34.090 km².

O retângulo que envolve as manchas de suscetibilidade a inundações causadas pelo Rio Madeira na cidade de Porto Velho, possui uma área de aproximadamente 8.093 km², incluindo zonas urbanas e rurais do município. As manchas de suscetibilidade a inundações interceptam um total de 195 setores censitários. A área de estudo é apresentada na Figura 1.1.

Figura 1.1 – Localização da Área de Estudo.



Fonte: Produção do autor.

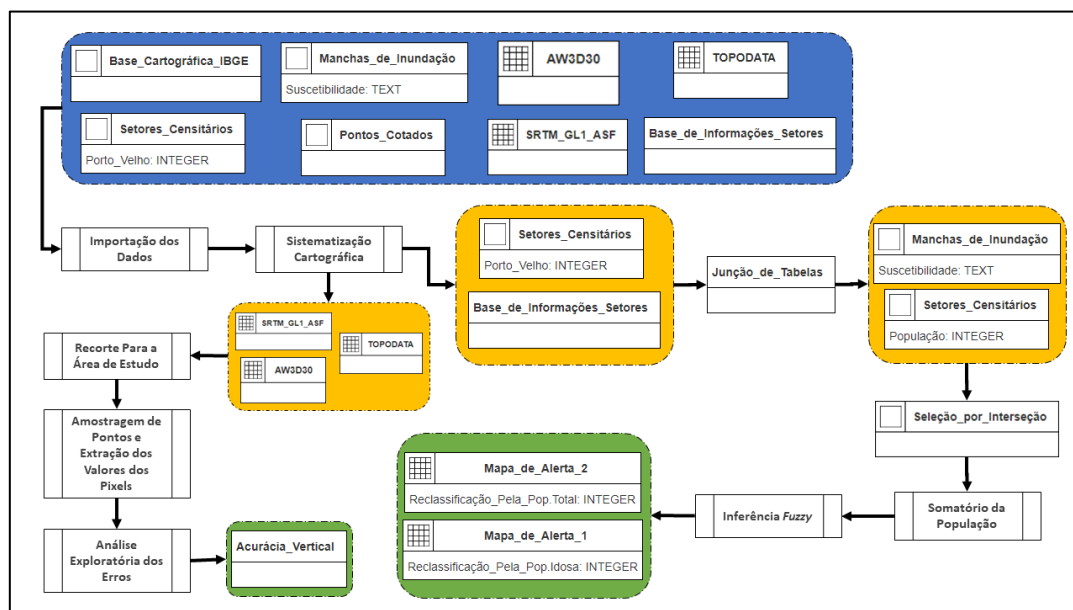
2 METODOLOGIA

A metodologia básica aplicada para reclassificação das manchas de suscetibilidade a inundação do município de Porto Velho consistiu na aquisição dos dados, processamento e plotagem. Para a avaliação da acurácia vertical dos MDEs, procedeu-se as etapas de aquisição dos modelos, extração dos valores de altitude e análise exploratória dos erros e cálculo do estimador Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE, em inglês).

Com base nas fotos do trabalho de campo, acredita-se que, os pontos fornecidos foram obtidos com receptores dos sinais *Global Navigation Satellite System* (GNSS) de navegação. Em testes preliminares, notou-se a possibilidade de os valores de altitude destes pontos referirem-se à altitude elipsoidal. Por esse motivo, foi performada a correção para altitude ortométrica, a partir da obtenção da ondulação geoidal em cada ponto.

Além disto, sabendo que os valores dos *pixels* do MDE SRTM GL1 reamostrados pela ASF referem-se também à altitude elipsoidal, realizou-se a correção destas ao modelo *Earth Gravitational Model 1996* (EGM96), assim, obtendo as altitudes ortométricas. A Figura 2 apresenta o diagrama *Object Modeling Technique for Geographic Applications* (OMT-G) da presente pesquisa.

Figura 2.1 – Diagrama OMT-G



Fonte: Produção do autor.

2.1 Dados de Entrada

Em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica), foram inseridos os dados vetoriais disponibilizados pela CPRM, correspondentes às manchas de suscetibilidade inundação e o conjunto de pontos com cotas altimétricas. Em rela o aos dados vetoriais, o conjunto de entrada também foi composto por dados disponibilizados pelo IBGE, sendo estes base cartográfica nacional em escala 1:250.000, arquivos vetoriais e dados tabulados referentes aos setores censitários do estado de Rondônia. Estes dados foram baixados dos repositórios *online* da CPRM e IBGE.

No que diz respeito aos dados em formato matricial, os MDEs AW3D30, SRTM GL1 ASF e TOPODATA foram obtidos, respectivamente, através das plataformas de *download* da JAXA, ASF e do Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil, mantido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). De posse das cenas necessárias para recobrir a área de estudo por cada modelo, estas foram inseridas no ambiente SIG supracitado. O Quadro 2.1 discretiza os dados de entrada no banco de dados de trabalho.

Quadro 2.1 – Detalhamento dos Dados de Entrada.

Tipo	Dado	Extensão	Fonte
Vetorial	Base Cartográfica	.shp	IBGE
	Setores Censitários		
	Manchas de Suscetibilidade a Inunda�o		CPRM
	Pontos Cotados		
Matricial	AW3D30	.tif	JAXA
	SRTM GL1 ASF		ASF
	TOPODATA		INPE
Tabulado	Base de Informa�es dos Setores	.xls	IBGE

Fonte: Produ o do autor.

De acordo com CPRM (2015?), as manchas de suscetibilidade a inunda o foram obtidas a partir do estudo morfométrico da bacia hidrográfica, aplica o do

modelo *Height Above the Nearest Drainage* (HAND) e integração com dados de zoneamento em áreas de planícies e terraços. Esta metodologia leva em consideração uma série de variáveis e processos que estão descritos em CPRM (2015?). Além disto, as manchas de suscetibilidade a inundação para o município de Porto Velho são categorizadas em suscetibilidade a inundação média e alta.

Os vetores referentes aos setores censitários do estado de Rondônia caracterizam-se como geo-objetos com informações mínimas descritas na tabela de atributos. As variáveis referentes aos dados populacionais são obtidas separadamente em uma planilha disponibilizada pelo IBGE. Desse modo, é necessário que se faça a integração entre os vetores e suas respectivas variáveis.

Em relação aos MDEs, o AW3D30 foi obtido a partir de técnicas baseadas em estereoscopia, utilizando imagens adquiridas pelo sensor *Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping* (PRISM), a bordo da plataforma ALOS, com aquisições entre 2006 e 2011, caracterizando o AW3D30 como o modelo com aquisição de dados mais recente entre os dados neste estudo investigados. (TADONO et al., 2016; TAKAKU et al., 2016, JAXA, 2020).

Os MDEs SRTM GL1 ASF e TOPODATA configuram-se como dados reamostrados do MDE derivado da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). A missão SRTM foi uma iniciativa da *National Aeronautics and Space Agency* (NASA) para mapeamento topográfico da superfície terrestre a nível global. Para isto, valeu-se da técnica de Interferometria SAR (Synthetic Aperture Radar) em banda C e X. Os sensores SAR foram embarcados no ônibus espacial Endeavour, que decolou do *Kennedy Space Center* em 11 de janeiro de 2000 e adquiriu dados durante 10 dias. (FARR, et al., 2007).

Originalmente, o MDE SRTM possui 30 m de resolução, apesar disto, até 2015 foi disponibilizado para fora dos Estados Unidos com resolução de 90 m. O projeto TOPODATA foi executado sobre o MDE SRTM de 90 m e derivou um modelo reamostrado com resolução de 30 m (VALERIANO; ROSSETTI, 2012).

Em contrapartida, o MDE SRTM GL1 ASF tem como base o MDE SRTM na resolução original em sua versão GL1. A reamostragem para resolução de 12,5 m se deu a partir do processo *radiometrically terrain-corrected* (RTC) de imagens ALOS PALSAR a nível global, que tem como um dos seus produtos o MDE com 12,5 m (ASF, 2015).

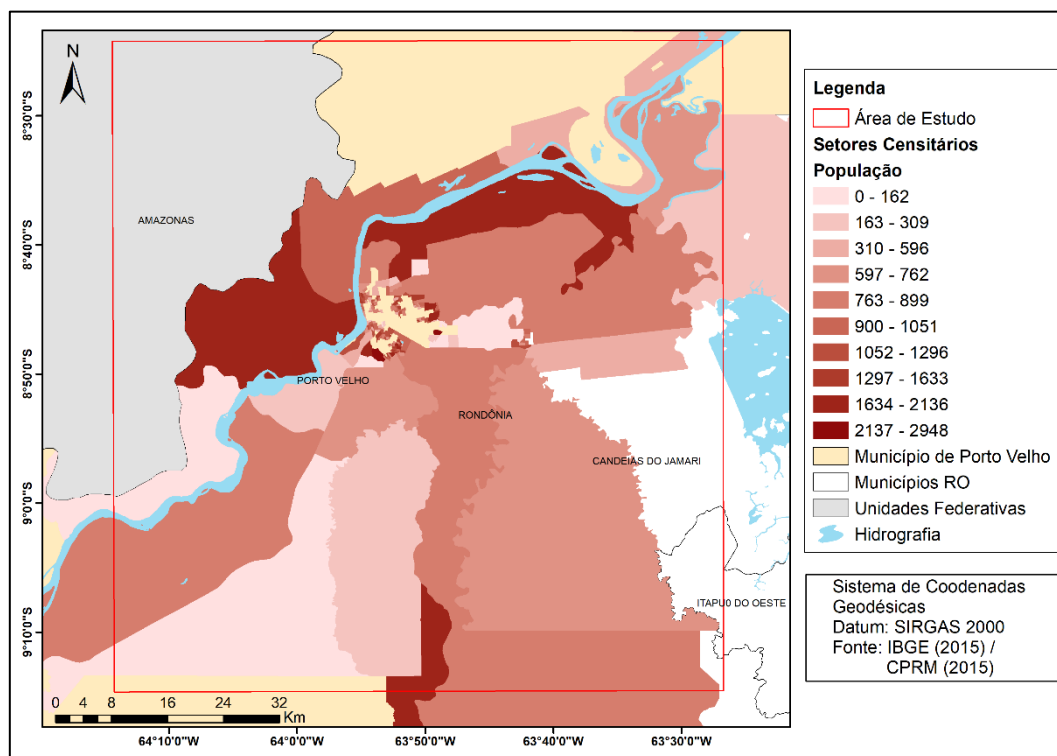
2.2 Processamento dos Dados

2.2.1 Reclassificação das manchas de suscetibilidade a inundação

Estando os dados em ambiente SIG, executou-se os seguintes procedimentos para a reclassificação das manchas de suscetibilidade a inundação:

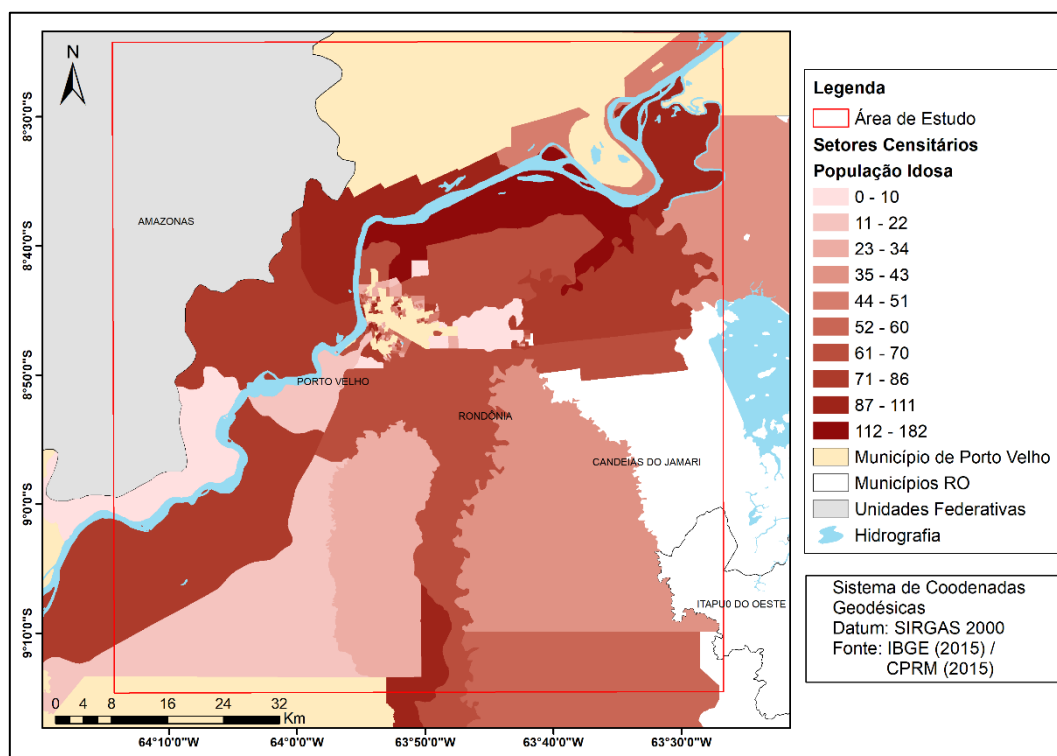
- I. Seleção por localização dos setores censitários que interceptam as manchas de suscetibilidade a inundação;
- II. Exportação dos vetores correspondentes aos setores censitários de interesse;
- III. Junção de tabelas entre a tabela de atributos dos setores censitários e a planilha de base de informações dos setores com correção de dados omissos;
- IV. Utilizando a calculadora da tabela de atributos, computou-se a população total e a população com mais de 60 anos por setor censitário, uma vez que na base de dados, a população é segregada por faixa etária; As Figuras 2.2 e 2.3 denotam estes somatórios;
- V. Conversão dos vetores de manchas e setores para o tipo matricial definindo células com 10x10 m, utilizando os atributos de população total, população idosa e suscetibilidade a inundação; os *pixels* das manchas assumiram o valor 0 (média) e 1 (alta); os *pixels* dos setores assumiram o respectivo valor da população total;
- VI. Devido os setores possuírem valores diferentes e maiores que um (1), aplicou-se uma função de pertencimento (*membership*) do tipo *LARGE* no *software* ArcMap 10.6; a utilização desta função é recomendada quando os maiores valores dos *pixels* devem representar os maiores valores no intervalo entre 0 e 1;

Figura 2.2 – Mapa Coroplético Denotando a População Por Setor Censitário



Fonte: Produção do autor.

Figura 2.3 – Mapa Coroplético Denotando a População Idosa Por Setor Censitário



Fonte: Produção do autor.

Ressalta-se que, devido a incompatibilidade entre as geometrias, foram selecionados setores pouco representativos (setores em zona rural), pois a maior parte de sua extensão estão fora da área de estudo. Realizados os processamentos descritos, foi possível realizar de fato a inferência *Fuzzy*, na qual as informações a respeito a suscetibilidade das manchas foram relacionadas com as informações a respeito do total populacional de cada setor censitário através de uma função de soma *Fuzzy*.

Vale ressaltar que, devido a incompatibilidade de geometrias, as manchas reclassificadas indicam das áreas que na ocorrência de inundações, potencialmente podem ter os maiores e menores número de atingidos, uma vez que as manchas não compreendem geometricamente os setores censitários e vice-versa.

Desse modo, as manchas de suscetibilidade foram reclassificadas como manchas de alerta de risco à população em caso de ocorrência de inundação. Dados os valores dos *pixels* entre 0 e 1, definiu-se os graus de risco como médio, alto e muito alto, conforme o Quadro 2.2, uma vez que na classificação inicial das manchas, o menor grau de suscetibilidade correspondia a médio.

Quadro 2.2 – Graus de Alerta de Risco à População em Caso de Inundação.

Grau de Risco	Intervalo	
	População Total	População Idosa
Médio	0 a 0,33	0 a 0,24
Alto	0,33 a 0,75	0,24 a 0,53
Muito Alto	0,75 a 1	0,53 a 1

Fonte: Produção do autor.

2.2.2 Avaliação da acurácia vertical dos MDEs

Para avaliar a acurácia dos MDEs em relação aos pontos disponíveis no banco de dados disponibilizados pela CPRM, foram utilizadas metodologias propostas por Congalton e Green (2009). A avaliação da acurácia será apresentada em termos do RMSE e em termos da análise exploratória dos erros calculados entre os pontos de referência e os respectivos MDEs. O RMSE é um estimador da

magnitude do erro aceito mundialmente como um dos principais parâmetros de avaliação da acurácia de mapas.

Se fez necessário corrigir as altitudes dos pontos cotados de altitudes geométricas para ortométricas, supondo que estas foram obtidas com receptores de navegação dos sinais GNSS e não passaram pela devida correção. Além disto, um processamento fundamental que também foi realizado, consistiu na correção das altitudes do MDE SRTM GL1 ASF ao modelo EGM96. Desse modo, equiparando todos os referenciais altimétricos entre os modelos testados.

A seguir, são apresentados os procedimentos aplicados sobre os pontos cotados e MDEs anteriormente ao cálculo da acurácia e estatísticas dos erros.

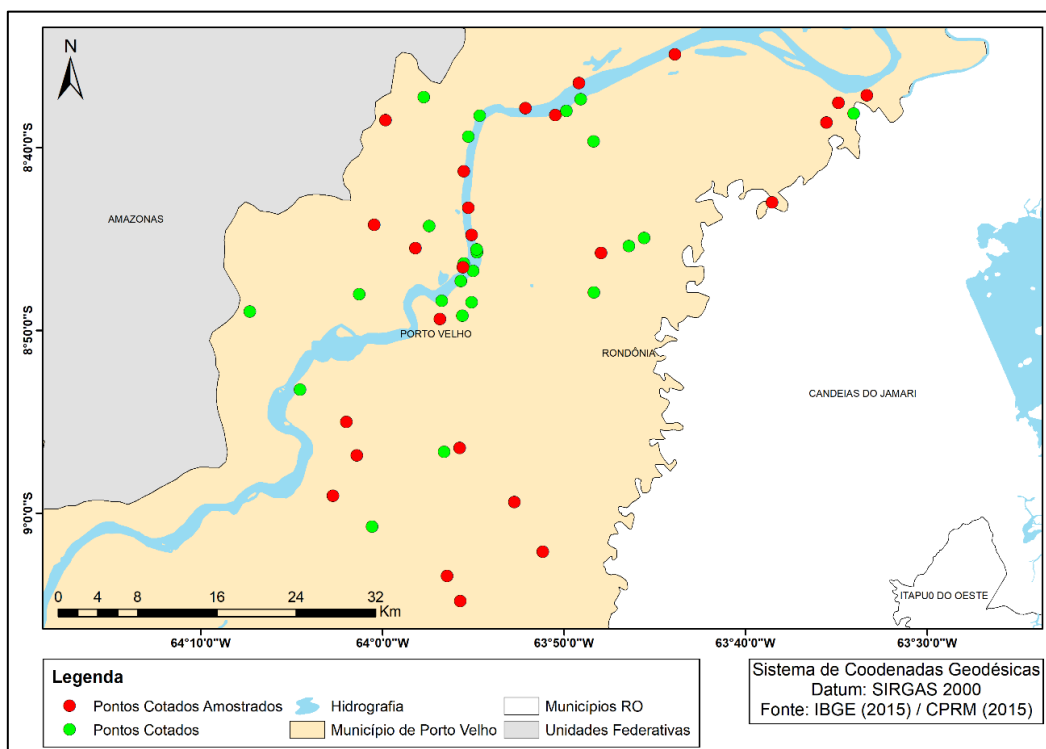
- I. Mosaico das cenas de cada MDE;
- II. Correção das altitudes geométricas dos pontos cotados para altitudes ortométricas a partir das respectivas ondulações geoidais das localizações dos pontos obtidas através do MAPGEO2015;
- III. Dentre a malha de pontos cotados disponíveis, amostrou-se aleatoriamente 25 pontos com pelo menos 2 km de distância entre eles; Congalton e Green (2009) sugerem pelo menos 20 pontos para o cálculo de acurácia;
- IV. A partir dos pontos amostrados, extraiu-se em cada MDE, o valor da cota altimétrica nos *pixels* espacialmente correspondentes aos pontos de referência.

A Figura 2.4 apresenta a malha total de pontos com destaque para os 25 pontos amostrados aleatoriamente enquanto a Figura 2.5 apresenta os recortes dos MDEs para a área de estudo. De posse dos pontos de referência (disponibilizados pela CPRM) e pontos observados (MDEs), calculou-se os erros para os 25 pontos amostrados aleatoriamente conforme a Equação 1:

$$\Delta Z = Z_{MDE} - Z_{Ref} \quad (1)$$

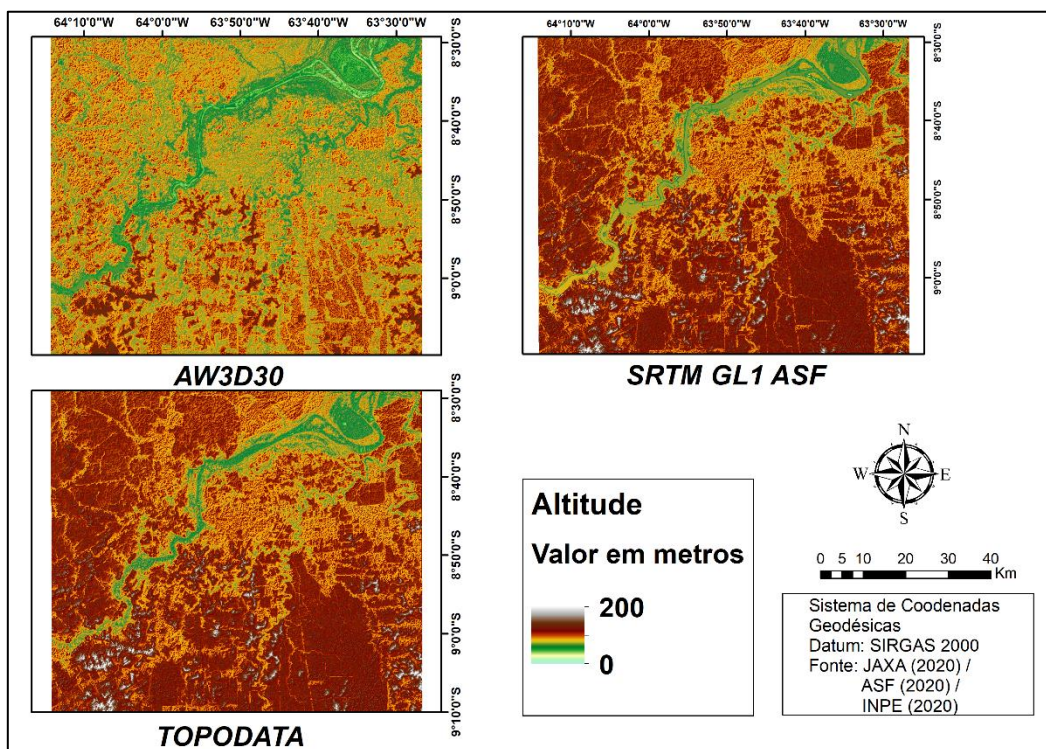
onde, ΔZ é o erro vertical, Z_{MDE} a altitude no MDE e Z_{Ref} a altitude de referência.

Figura 2.4 – Malha de Pontos Cotados com Destaque para os Pontos Amostrados



Fonte: Produção do autor.

Figura 2.5 – Recorte dos MDEs para a Área de Estudo



Fonte: Produção do autor.

A seguir, utilizou-se o auxílio de um pacote estatístico para verificar a existência de *outliers*. Constatou-se que, dentre as 25 amostras, uma foi considerada *outlier* em relação aos modelos AW3D30 e SRTM GL1 ASF pelo teste de Grubbs a 5% de significância. Desse modo, removeu-se a amostra atípica nos modelos supracitados, bem como no TOPODATA, para manter a igualdade do número de amostras nos três modelos. Logo, para a realização dos cálculos seguintes, foram utilizadas as 24 amostras restantes.

A partir dos erros verticais, realizou-se a interpolação dos pontos utilizando a interpolação *Inverse Distance Weighting* (IDW) a fim de se obter isolinhas dos erros verticais a partir do arquivo *raster* gerado. De posse dos erros verticais, foi possível calcular o RMSE conforme a Equação 2:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta Z_i)^2}{n}} \quad (2)$$

onde $\sum_{i=1}^n (\Delta Z_i)^2$ representa a somatória dos erros ao quadrado e n o número de amostras.

Com base nos erros verticais de cada modelo, calculou-se os valores mínimos (ΔZ_{min}), máximos (ΔZ_{max}) e os estimadores média ($\overline{\Delta Z}$) e desvio padrão ($S_{\Delta Z}$). O Quadro 2.3 sintetiza as estatísticas calculadas com base nos erros.

Quadro 2.3 – Síntese das Estatísticas Propostas.

Erro	$\Delta Z = Z_{MDE} - Z_{Ref}$				
Estatísticas Derivadas	ΔZ_{min}	ΔZ_{max}	$\overline{\Delta Z}$	$S_{\Delta Z}$	RMSE

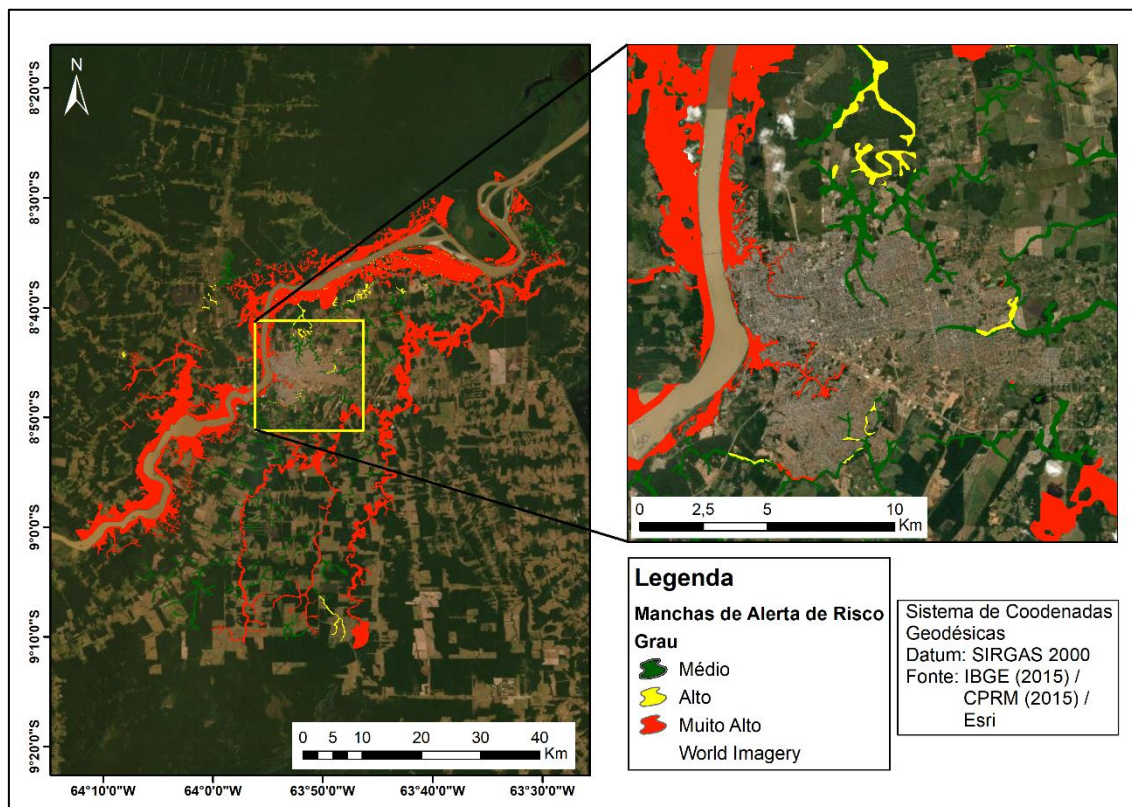
Fonte: Produção do autor.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Manchas de Alerta de Risco a População

A Figura 3.1 apresenta o mapa contendo as manchas reclassificadas denotando as áreas de Alerta de Risco com base na População Total em caso de ocorrência de inundações no município de Porto Velho.

Figura 3.1 – Manchas de Alerta de Risco à População



Fonte: Produção do autor.

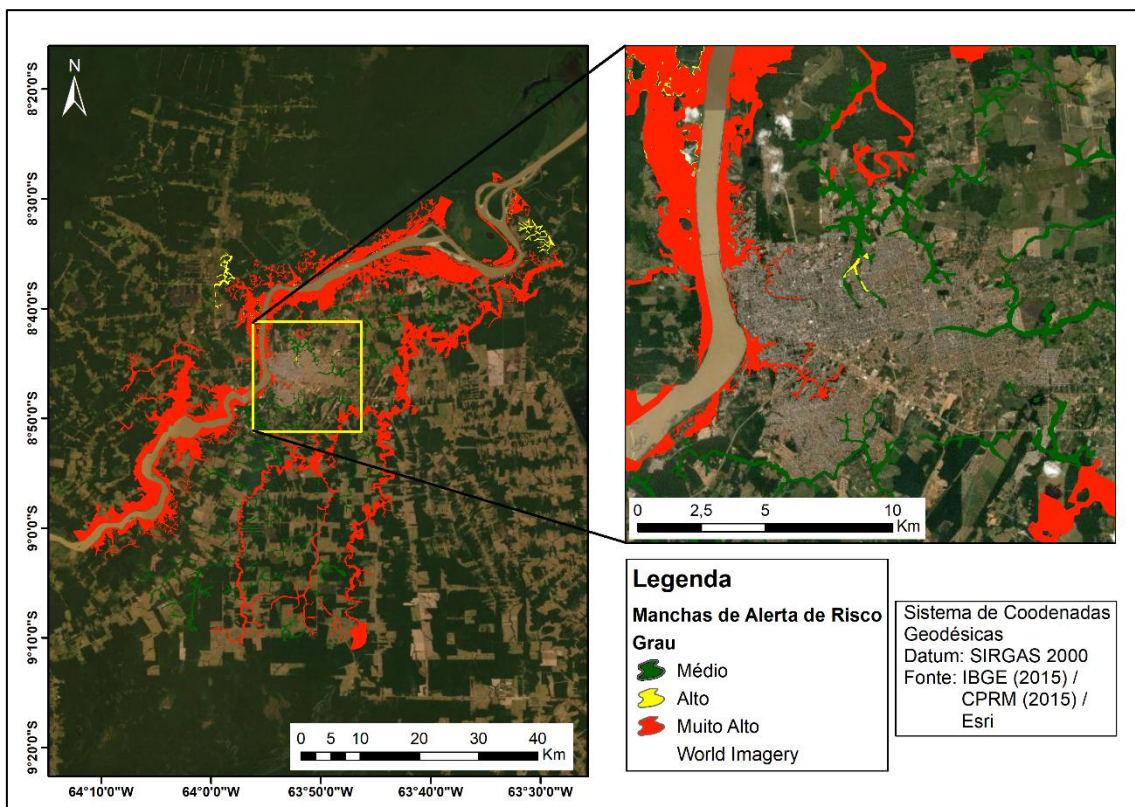
Pode-se observar que em relação às manchas de suscetibilidade a inundações originais as mudanças foram sutis, contudo, carregam informação muito útil. Diretamente às margens do Rio Madeira, é um ponto crítico, uma vez que de acordo com os vetores de Vulnerabilidade a Inundações da CPRM, este trecho do Rio é caracterizado com vulnerabilidade a inundações alta.

Na obtenção das Manchas pela CPRM (2015?), a urbanização é um fator que incrementa na estimativa de suscetibilidade. Como pode ser observado na figura 3.1, na área urbana de Porto Velho concentra os pontos de alerta de risco à população, na qual apresenta dos três graus de risco definidos. Tais pontos,

podem ser usados pelas entidades de gestão do município como subsídio de informações tomadas de decisão referentes as ocorrências de inundações, salientando que, conforme a incompatibilidade entre as geometrias que geraram o dado, a dado indica manchas que atingem os setores com maior número de pessoas residentes.

A Figura 3.2 apresenta os pontos de Alerta de Risco com base na População Idosa por setor censitário.

Figura 3.2 – Manchas de Alerta de Risco à População Idosa



Fonte: Produção do autor.

Nos pontos que consideram somente a população idosa, os graus de magnitude predominantes são médio e muito alto, principalmente na zona urbana do município. Em relação aos pontos de alerta levando em conta a população total, estes dados trazem menos informação nova, contudo, ainda são importantes para a compreensão dos pontos nos quais, pessoas com mais de 60 anos, estão potencialmente expostas a ocorrência de inundações.

3.2 Acurácia Vertical dos MDEs

A Tabela 3.1 apresenta os resultados das estatísticas calculadas sobre os erros dos MDEs AW3D30, SRTM GL1 ASF e TOPODATA. Os resultados do cálculo do RMSE para os modelos AW3D30, SRTM GL1 ASF e TOPODATA foram, respectivamente 6,17 m, 6,63 m e 8,23 m.

Tabela 3.1 – Resultados da Análise Exploratória dos Erros.

MDE	$\Delta Z_{mín}$ (m)	$\Delta Z_{máx}$ (m)	$\bar{\Delta Z}$ (m)	$S_{\Delta Z}$ (m)	RMSE (m)
AW3D30	-14,30	15,09	2,23	5,88	6,17
SRTM GL1 ASF	-15,42	11,58	3,62	5,68	6,63
TOPODATA	-14,30	13,09	5,23	6,50	8,23

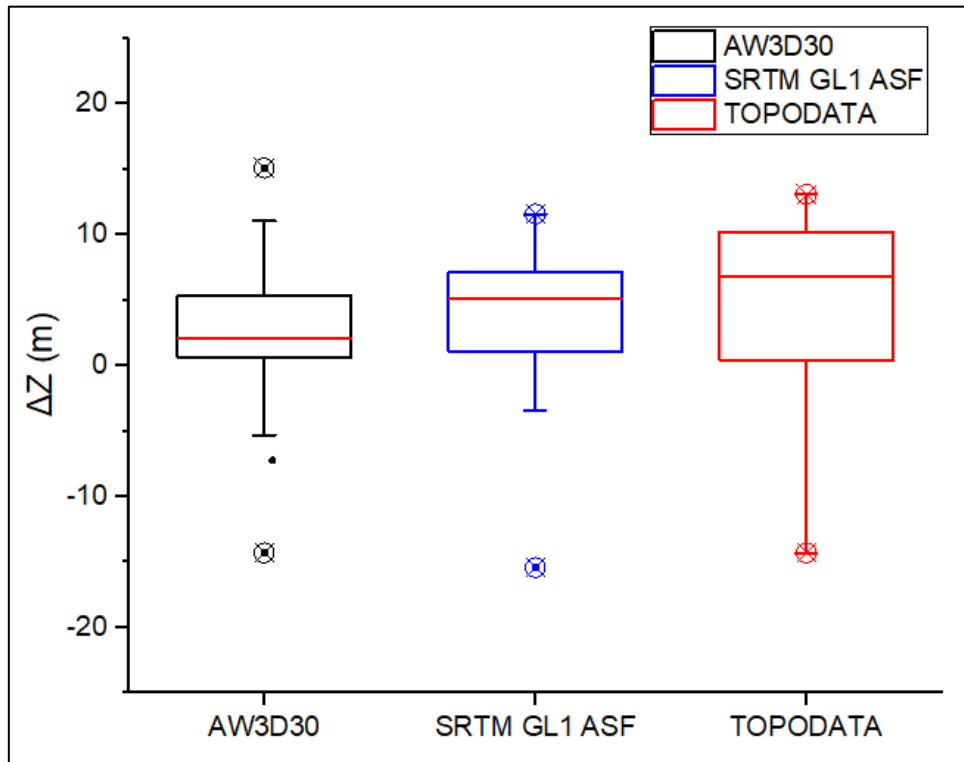
Fonte: Produção do autor.

Desse modo, conclui-se dentre os modelos testados, o AW3D30 apresentou menores erros, seguido do SRTM GL1 ASF e TOPODATA. Nominalmente, de acordo com Tadono et al. (2016), a acurácia vertical do AW3D30 é da ordem de 4 m a nível global. A depender da topografia da área de estudo, o incremento de erro pode ser diferente do que o estimado pela agência que disponibiliza o dado.

De acordo com Farr et al. (2007), a acurácia do MDE SRTM de um arco de segundo (30 m) para a América do Sul é da ordem de 6 m. Contudo, os produtos reamostrados oferecidos pela ASF e INPE não dispõem de informações a respeito da acurácia altimétrica. Santillan et al. (2016) avaliaram o AW3D30 e concluíram que a densa cobertura vegetal incrementa o valor do RMSE, que foi 6,75 m para áreas de densa cobertura vegetal e 4,29 m para áreas com construções verticais.

As medidas de mínimo, máximo e desvio padrão dos erros foi muito semelhante entre os três modelos testados. Todavia, a média dos erros foi menor para o AW3D30, na casa de 2,23 m, seguido por 3,62 do SRTM GL1 ASF e 5,23 do TOPODATA. Esses resultados provam a consistência do AW3D30 e o colocam um dos melhores MDEs de fonte aberta disponíveis a nível global. Na Figura 3.3 é apresentada a dispersão dos erros através de um diagrama de caixa (*bloxplot*).

Figura 3.3 – Dispersão dos Erros

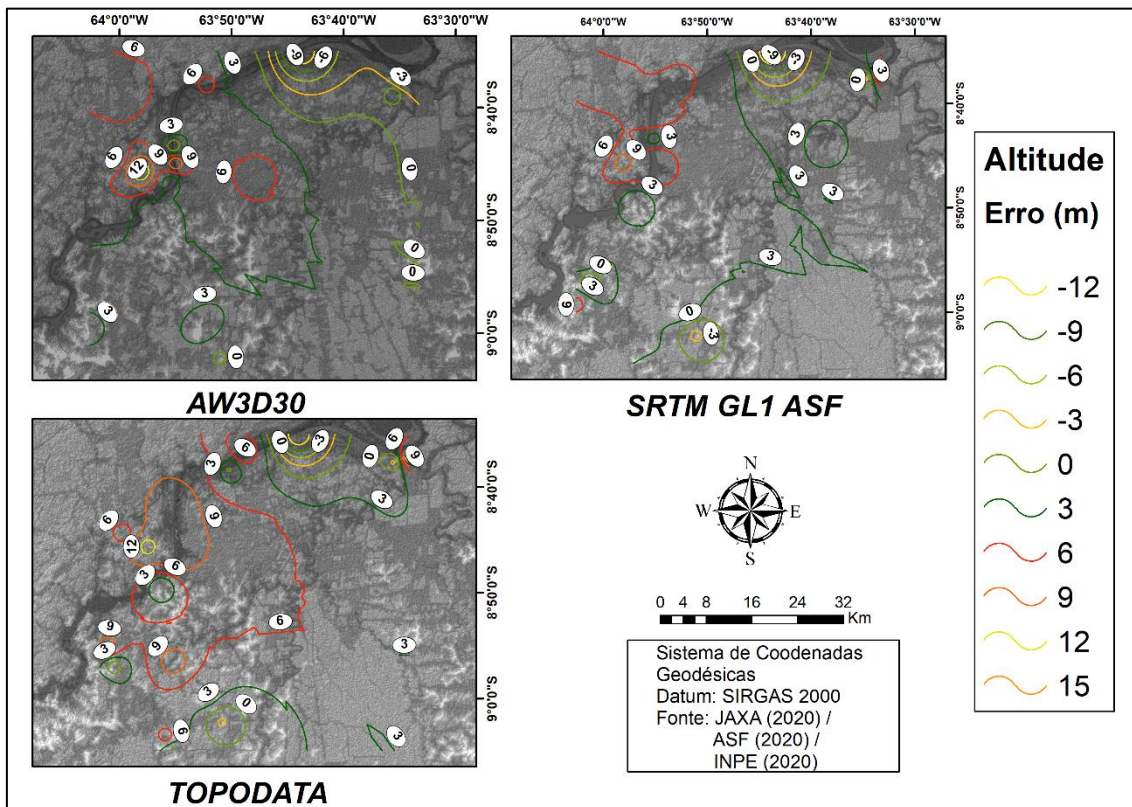


Fonte: Produção do autor.

No gráfico, pode-se observar os erros menos dispersos para os MDEs AW3D30 e SRTM GL1 ASF, uma vez que as caixas são menos alongadas. Em adição, se pode notar a mediana referente aos erros do MDE AW3D30 mais próxima do valor zero. Em relação a caixa correspondente aos erros do MDE TOPODATA, além de possuir a caixa mais alongada, também se observa os valores de erro mínimo e máximo mais expressivos.

Para especializar os erros, é apresentada a Figura 3.4, denotando os erros verticais em isolinhas com equidistâncias de três metros. Os Erros do MDE AW3D30 geraram isolinhas no intervalo de [-12;15] m, enquanto as isolinhas dos erros dos MDEs SRTM GL1 ASF e TOPODATA variaram entre [-15;9] m e [-12;12] m, respectivamente.

Figura 3.4 – Espacialização dos Erros em Isolinhas



Fonte: Produção do autor.

Observa-se que os maiores erros se concentram nas proximidades do Rio Madeira, contudo, podem ser derivados de uma série de fatores. Dentre eles, a composição heterogênea dos *pixels*, visto que, o *pixel* de um MDE representa a média da altitude dos diferentes elementos nele contidos. Sabendo que um MDE é um modelo que considera não só o terreno, mas também as feições acima dele, a área urbana também concentra valores consideráveis de erros, devido as construções verticalizadas.

Ainda observando os padrões das isolinhas, também pode-se supor os maiores erros devidos à descontinuidade de feições entre floresta e superfícies de menor altitude, como o por exemplo, áreas de solo exposto adjacentes. Ademais, ao extrair a altimetria de *pixels* com 30 e 12,5 m em planimetria, assume-se a existência de um erro sistemático, desse modo, relaciona-se a acurácia altimétrica também à acurácia planimétrica dos MDEs.

4 CONCLUSÕES

O método empregado para a reclassificação das manchas de suscetibilidade a inundação do município de Porto Velho mostrou que apesar da incompatibilidade entre as geometrias, pode-se ter indícios dos locais onde há um número de maior de pessoas expostas à ocorrência de inundações, desse modo, fornecendo subsídios para a implementação de medidas preventivas ou corretivas relativas às ocorrências de inundações, sobretudo na área urbana do município, onde os setores censitários são predominantemente menores e mais representativos.

Ademais, vale destacar que como alguns setores, principalmente os da zona rural, somente interceptam a área de estudo e conseqüentemente as manchas de suscetibilidade a inundação, espera-se que os resultados não sejam representativos nessas áreas. Sobretudo, acredita-se que os resultados podem ser mais fidedignos na área urbana do município de Porto Velho, que concentra a maior parte da população e onde as áreas dos setores censitários são menores em relação aos setores localizados em zona rural.

Em relação à avaliação da acurácia vertical dos MDEs, concluiu-se que neste teste, o MDE AW3D30 apresentou menor RMSE em relação aos modelos SRTM GL1 ASF e TOPODATA. Dada a variedade de dados de elevação com uso livre disponíveis, cabe ao usuário conhecer os erros dos dados utilizados a fim de utilizar os dados que podem aprimorar os resultados derivados dos MDEs.

Assim, sugere-se que os próximos estudos que objetivem obter Manchas de Suscetibilidade a Inundação ou informações correlatas, na indisponibilidade de MDEs atualizados, obtidos por levantamento de campo ou levantamentos aerofotogramétricos, utilizem diferentes MDEs providos por sensores orbitais e avaliem os resultados alcançados, de modo a selecionar o melhor resultado obtido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALASKA SATELLITE FACILITY. **ASF Radiometrically Terrain Corrected ALOS PALSAR Products**. Disponível em: https://asf.alaska.edu/wp-content/uploads/2019/03/rtc_product_guide_v1.2.pdf. Acesso em: 01 jul. de 2020.

BITAR, O. Y. **Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações-1: 25.000: nota técnica explicativa**. São Paulo: IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo; Brasília, DF: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 50. Disponível em: http://dSPACE.cprm.gov.br/bitstream/doc/16588/1/NT-Carta_Suscetibilidade.pdf. Acesso em: 01 jul. 2020.

BODSTEIN, A.; LIMA, V. V. A. D.; BARROS, A. M. A. D. A vulnerabilidade do idoso em situações de desastres: necessidade de uma política de resiliência eficaz. **Ambiente & Sociedade**, v. 17, n. 2, p. 157-174, abr. 2014. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1414-753X2014000200011&script=sci_arttext. Acesso em: 02 jul. 2020.

CÂMARA, G., DAVIS, C., & MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à ciência da geoinformação**. 2001. Disponível em: <https://biblioteca.isced.ac.mz/bitstream/123456789/570/1/publicacao.pdf>. Acesso em: 03 jul. 2020.

CONGALTON, R. G.; GREEN, K. **Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 183. 2009.

FARR, T. G., ROSEN, P. A., CARO, E., CRIPPEN, R., DUREN, R., HENSLEY, KOBRICK, M. P, PALLER M. RODRIGUEZ E., ROTH L., SEAL D., SHAFFER S., SHIMADA J., UMLAND U., WERNER M., OSKIN M., BURBANK D., ALSDORF D. **The Shuttle Radar Topography Mission. Reviews of Geophysics**, [S.l.], v. 45, p. 1-33. maio. 2007.

GOLDONI, T. R.; VESTENA, L. R. Mapeamento das áreas de risco à inundação na cidade de Guarapuava–PR. Encontro nacional de geógrafos-a construção do brasil: geografia, ação política e democracia, São Luís. **Anais do evento**, v. 18, p. 14-30. 2016

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Porto Velho**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ro/porto-velho/panorama>. Acesso em: 15 jul. 2020.

IWAMOTO, H. Generation of the 30 M-Mesh Global Digital Surface Model By ALOS PRISM. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLI-B4, p. 157-162, jun. 2016. Disponível em: <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLI-B4/157/2016/isprs-archives-XLI-B4-157-2016.pdf>. Acesso em: 01 ago. 2020.

JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY. **Precise Global Digital 3D Map "ALOS World 3D" Homepage**. Disponível em: http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d/index_e.htm. Acesso em: 01 ago. 2020.

PREFEITURA DE PORTO VELHO. **A cidade**. 2020. Disponível em: <https://www.portovelho.ro.gov.br/artigo/17800/a-cidade>. Acesso em: 21 jul. 2020.

RAMOS, C. Perigos naturais devidos a causas meteorológicas: o caso das cheias e inundações. **e-LP Engineering and Technology Journal**, v. 4, p.1-6, jun. 2013. Disponível em: <https://revistas.ulusofona.pt/index.php/revistae-lp/article/view/3320#:~:text=As%20cheias%20s%C3%A3o%20fen%C3%B3menos%20hidrol%C3%B3gicos,est%C3%A1%20a%20submergir%20terrenos%20c osteiros>. Acesso em: 01 jul. 2020.

SANTILLAN, J. R.; MAKINANO-SANTILLAN, M.; MAKINANO, R. Vertical Accuracy Assessment of ALOS WORLD 3D – 30m Digital Elevation Model Over Northeastern Mindanao, Philippines. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Beijing, **Anais IEEE**, 2016. p. 5374-5377 nov. 2016.

TADONO, T.; NAGAI, H.; ISHIDA, H.; ODA, F.; NAITO, S.; MINAKAWA, K.; TAKAKU, J.; TADONO, T.; TSUTSUI, K.; ICHIKAWA, M. **Validation of 'AW3D' Global DSM Generated From ALOS PRISM**. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. III-4, Prague, jul. 2016. Disponível em: https://www.aw3d.jp/wp/wp-content/themes/AW3DJapanese/technology/doc/pdf/technology_01.pdf. Acesso em: 02 set. 2020.

TUCCI, C.; BERTONI, J. C. **Inundações urbanas na América do Sul**. 1a edição. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 156. Disponível em: <https://www.cepal.org/samtac/noticias/documentosdetrabajo/5/23335/inbr02803.pdf>. Acesso em: 16 set. 2020.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. **Topodata: Brazilian Full Coverage Refinement of SRTM data**. Applied Geography, [Amsterdam], v. 32, p. 300-309, mar. 2012. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143622811000786?casa_to ken=B6WNYWHi5CUAAAAA:cPsRkzB_qwF5ltXqgdWcw2AnsVjRwmcj372BwKX IPKUXFvOAebxbBqgaXsoldcCZSKOY6SmyOKo. Acesso em: 12 ago. 2020.