

CAPÍTULO 2

AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA ALTIMÉTRICA DE DIFERENTES MODELOS DIGITAIS DE TERRENO-MDTS DA CIDADE DE PELOTAS/RS, COMO FERRAMENTA DE MODELAGEM DE INUNDAÇÃO

Data de submissão: 06/06/2024

Fecha de aceptación: 01/07/2024

Alexandre Felipe Bruch

Universidade Federal de Pelotas, Centro
de Engenharias
Pelotas – RS
<https://orcid.org/0000-0003-1734-6799>

Karina Retzlaff Camargo

Universidade Federal do Rio Grande,
Escola de Engenharia
Rio Grande – RS
<https://orcid.org/0000-0002-6427-329X>

George Marino Soares Gonçalves

Universidade Federal de Pelotas, Centro
de Desenvolvimento Tecnológico
Pelotas – RS
<https://orcid.org/0000-0003-2307-1875>

Gilberto Loguercio Collares

Universidade Federal de Pelotas, Centro
de Desenvolvimento Tecnológico
Pelotas – RS
<https://orcid.org/0000-0003-4910-5420>

Marciano Carneiro

Universidade Federal do Rio Grande do
Sul, Instituto de Geociências
Porto Alegre – RS
<https://orcid.org/0000-0003-4436-1935>

RESUMO: Este trabalho aborda a avaliação da acurácia altimétrica de diferentes Modelos Digitais de Terreno (MDTs) na cidade de Pelotas/Rio Grande do Sul, com foco na modelagem de inundações. O MDT é definido como uma representação digital matemática tridimensional que descreve as características da superfície terrestre. Os MDTs são essenciais para diversas aplicações, como planejamento urbano, engenharia civil, agricultura, geologia, gestão de recursos hídricos e previsão de inundações. O estudo avaliou dois MDTs, denominados Geo Pelotas e URB, com foco na precisão cartográfica, utilizando o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) e as Especificações Técnicas dos Produtos dos Conjuntos de Dados Geoespaciais (ET-PCDG). Foram realizados testes estatísticos para avaliar a tendenciosidade e precisão dos MDTs, com base em pontos de checagem altimétrica. Os resultados indicaram que o MDT URB apresentou melhor acurácia, enquadrando-se na classe A da PEC-PCD, enquanto o MDT Geo Pelotas não atingiu os critérios de precisão, sendo enquadrado na classe D. Além disso, a análise das discrepâncias altimétricas e o teste Qui-quadrado mostraram que o MDT URB é mais preciso em comparação com

o MDT Geo Pelotas, o que é crucial para a identificação de áreas de inundação com alta confiabilidade. A pesquisa conclui que o MDT URB é adequado para a delimitação de áreas de inundação em níveis centimétricos, enquanto o MDT Geo Pelotas é mais indicado para caracterização do relevo em mapeamentos em pequenas escalas.

PALAVRAS-CHAVE: MDT, PEC-PCD, Inundação, Acurácia, Precisão

EVALUATION OF THE ALTIMETRIC ACCURACY OF DIFFERENT DIGITAL TERRAIN MODELS-DTMS IN THE CITY OF PELOTAS/RS, AS A FLOOD MODELING TOOL

ABSTRACT: This paper reports the evaluation of the altimetric accuracy of different Digital Terrain Models (DTMs) in Pelotas/Rio Grande do Sul city, focusing on flood modelling. MDT is defined as a three-dimensional mathematical digital representation that describes the characteristics of the Earth's surface. MDTs are essential for diverse applications such as urban planning, civil engineering, agriculture, geology, water resources management and flood forecasting. The study evaluated two DTMs, called Geo Pelotas and Geo URB, focusing on cartographic accuracy, using the Cartographic Accuracy Standard (CAS) and the Technical Specifications for Geospatial Data Sets Products (TS-GDSP). Statistical tests were carried out to evaluate the bias and precision of DTMs, based on altimetric checkpoints. The results indicated that the DTM URB presented better accuracy, falling into class A of the ET-PCDG, while the DTM Geo Pelotas did not achieved the accuracy criteria, falling into class D. Furthermore, the analysis of discrepancies elevation and the chi-square test showed that the DTM URB is more accurate compared to Geo Pelotas one, which is crucial for identifying flood areas with high reliability. The research concluded that MDT URB is suitable for delimiting flood areas at centimeter level, while the DTM Geo Pelotas is more suitable for characterizing the relief in small-scale mapping.

KEYWORDS: DTM, PEC-PCD, Flood, Accuracy, Precision

INTRODUÇÃO

Um Modelo Digital do Terreno (MDT) é uma representação digital matemática em três dimensões-3D que descreve as características da superfície terrestre, incluindo variações de elevação do terreno (ASSAD e SANO, 1998). Assim, um MDT mostra a topografia do terreno sem considerar a presença de objetos (como árvores, edifícios, etc.). Por sua vez, um Modelo Digital de Superfície (MDS) inclui não apenas a topografia do terreno, mas também quaisquer objetos acima da superfície do mesmo, como construções, vegetação e outros elementos físicos (EVANS, 2012). Em resumo, o MDT representa a forma natural da superfície topográfica do terreno, enquanto o MDS inclui características artificiais e naturais sobre a superfície do terreno (CRUZ *et al.*, 2011).

Os MDTs são importantes em diversas áreas, como no Planejamento Urbano e Rural, por permitirem analisar e projetar o uso da terra, a drenagem de água, estradas e outras infraestruturas com base na topografia do terreno. Na Engenharia Civil, como ferramenta

para projetar estradas, ferrovias, barragens, túneis e outras construções, as quais necessitam levar em consideração a elevação do terreno. Na Agricultura os MDTs auxiliam na análise do terreno para determinar os melhores locais para plantio, drenagem, irrigação e planejamento de cultivos (FELGUEIRAS, 2023).

Por sua vez, nas geociências, principalmente na Geologia e Geomorfologia, os MDTs são utilizados para o mapeamento geológico básico, identificação de falhas, dobras, bacias sedimentares e outras características do relevo. Estes produtos também são importantes fontes de informação para a navegação e a elaboração de documentos cartográficos, por serem base para a produção de mapas e cartas topográficas, de forma a auxiliar na orientação e navegação terrestre.

Ainda são importantes informações para a Gestão de Recursos Hídricos, pois são fundamentais para simular fluxos de água, identificar áreas alagadas, prever enchentes e manejar recursos hídricos de forma eficiente. Ainda, os MDTs desempenham um papel crucial na gestão de áreas de inundação, principalmente no mapeamento e previsão de níveis, onde são essenciais para mapear e modelar áreas propensas a inundações, permitindo identificar regiões de risco com base na topografia e nas características do terreno.

Já com a combinação de MDTs com dados hidrológicos e meteorológicos, é possível prever inundações e calcular potenciais níveis de água em diferentes cenários, auxiliando na evacuação e planejamento de emergências. Além disso, com base nos MDTs, é possível projetar sistemas de drenagem eficientes para lidar com o escoamento de água durante eventos de chuva intensa, minimizando danos por inundação.

Nesse sentido, os principais produtos derivados dos MDTs ajudam a identificar áreas de alto e baixo risco de inundação, possibilitando um zoneamento adequado para uso do solo e planos de desenvolvimento que levem em conta a segurança contra inundação e com informações sobre infraestruturas vulneráveis, como rodovias, pontes e edifícios, é possível avaliar e mitigar os riscos associados às inundações (IPT, 2023).

Portanto, este trabalho apresenta os resultados dos testes de precisão e acurácia dos MDTs mais utilizados no município de Pelotas para a delimitação de áreas de inundação, sendo os MDTs denominados de MDT GEO Pelotas e MDT URB.

AVALIAÇÃO DA PRECISÃO CARTOGRÁFICA DE MDTs

O Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) foi criado no Brasil pelo Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984, estabelecendo os critérios para a elaboração de cartas, a avaliação de sua exatidão e à distribuição de erros ao longo das mesmas. Através do seu artigo 8º, inciso 1º, a norma define que a estatística de exatidão de trabalhos cartográficos deve ser enquadrada em uma probabilidade de 90%, ou seja, noventa por cento dos pontos bem definidos no produto cartográfico, quando avaliados no terreno, não deverão apresentar

erro superior ao PEC. Este limiar é importante porque norteia os testes estatísticos (SANTOS, 2016). O PEC também disponibiliza uma classificação para as cartas, conforme sua exatidão, em A, B, C.

O referido decreto foi um importante instrumento de avaliação da qualidade dos produtos cartográficos analógicos, sendo que com a evolução das tecnologias, principalmente com a cartografia digital, novos padrões de qualidade foram implementados pela Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro – DSG (2011), surgindo as Especificações Técnicas dos Produtos dos Conjuntos de Dados Geoespaciais (ET-PCDG). A ET-PCDG estabelece as tolerâncias para que um produto cartográfico digital possa ser aceito no Sistema Cartográfico Nacional (SCN), e conseqüentemente, para a Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE). A partir da ET-PCDG se extrai o Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD), que é uma evolução da PEC de 1984 (SANTOS *et al.*, 2016 e BRUCH *et al.*, 2019).

A PEC-PCD amplia as classes da PEC de 1984, sendo possível realizar o enquadramento de Modelos Digitais de Elevação (MDE), de Terreno (MDT), de Superfície (MDS) e para pontos cotados, ambos com escala de precisão de 1:1.000. O comparativo das classes PEC e das PEC-PCD com as tolerâncias para a avaliação da acurácia altimétrica dos pontos cotados é encontrada da Tabela 1. O Erro Padrão (EP) e o Desvio Padrão na PEC são considerados sinônimos (BRUCH *et al.*, 2019)

Classe PEC	Classe PEC-PCD	PEC (m)	EP (m)
-	A	0,27	0,17
A	B	0,50	0,33
B	C	0,60	0,40
C	D	0,75	0,50

Tabela 1. PEC altimétrica para Pontos Cotados, MDT, MDE e MDS em produtos cartográficos digitais.

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foram avaliadas as precisões cartográficas de dois MDTs, sendo o primeiro denominado de Geo Pelotas, a qual é amplamente utilizado para a caracterização do relevo do sítio urbano da cidade de Pelotas/RS, Já o Segundo é denominado de GEO URB e é utilizado para a volumetria da cidade de Pelotas, assim como para o mapeamento da expansão urbana.

Primeiramente os dois MDTs no formato TIFF (*Tagged Image File Format*) foram importados para um banco de dados em ambiente SIG (Sistema de Informações Geográficas) no programa QGIS – Quantum GIS. Foi definido o Sistema Geodésico de Referência Planimétrico SIRGAS 2000 e o Sistema Geodésico de Referência Altimétrico Imbituba. Também foi definida a Projeção Universal Transversa de Mercator, no seu Fuso 22 para a produção dos documentos cartográficos.

Para a avaliação da acurácia e precisão dos Modelos Digitais do Terreno foram rastreados com receptor GNSS (*Global Navigation Satellite System*) Geodésico, 32 pontos de checagem altimétrica através da técnica NTRIP - *Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*. Esta é uma tecnologia para transporte de dados GNSS que utiliza protocolo TCP-IP para enviar, aos receptores GNSS, dados para operar em modo RTK (*Real Time Kinematic*). É um protocolo de comunicação usado para transmitir correções diferenciais de GNSS em tempo real por meio da Internet (Figura 1).

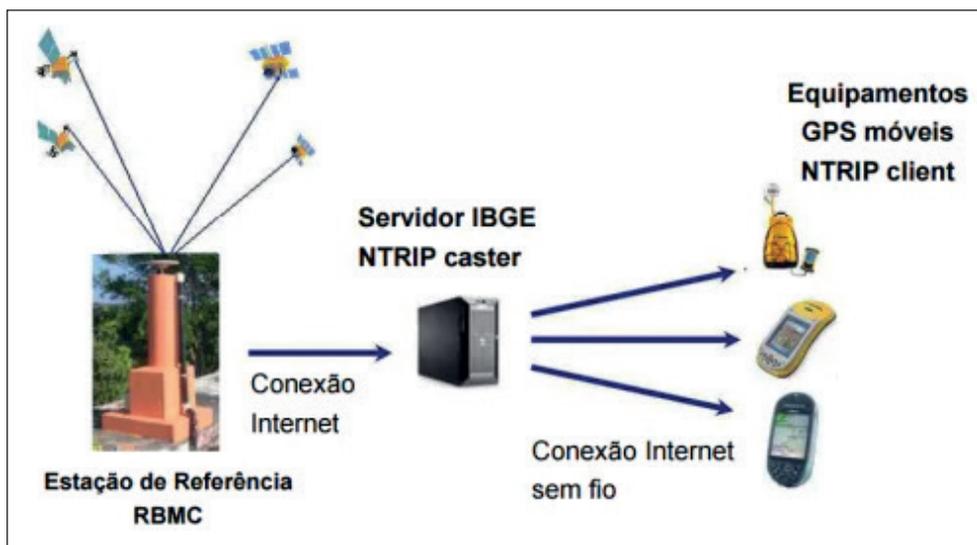


Figura 1: Técnica NTRIP utilizada no levantamento GNSS. Adaptado de IBGE (2013)

O receptor GNSS utilizado para o levantamento dos pontos de checagem é da marca EMLID, modelo Reach RS2, bandas L1, L2 e multi constelação (GPS, GLONASS, BeiDou e GALILEO). A base conectada para a recepção das conexões foi a RSPE-IBGE localizada no Campus Capão do Leão da UFPEL. Para o posicionamento dos Pontos de Checagem foram armazenadas as posições apenas em solução FIXA, ou seja, após as ambiguidades de sinal serem resolvidas dentro das precisões do equipamento e em intervalo estimado de 5 segundos.

A partir da tabela com dos 32 pontos de checagem, os mesmos foram comparados com as altitudes nos MDTs Geo Pelotas e GEO URB e foi avaliada as discrepâncias nas altitudes conforme o Padrão de Exatidão Cartográfico Brasileiro, para produtos digitais PEC-PCD. Além disso, foram realizados testes estatísticos de tendência e erros sistemáticos, conforme Galo e Camargo (1994), adaptados por Nogueira Jr. (2003), Silva (2015), Silva *et al.* (2016) e Bruch *et al.* (2019).

Sendo assim, é realizada a comparação dos valores assumidos como referência (h_p), que foram determinados com o GNSS e as feições determinadas nos MDTs (h_o), gerando a discrepância (Δh), conforme equação 1. Com os mesmos dados, gera-se a estatística da discrepância média ($\overline{\Delta h}$) (equação 2), e o desvio padrão ($S_{\Delta h}$) (equação 3), onde n é o número total amostral.

Equação 1

$$\Delta h = (h_o - h_p)$$

Equação 2

$$\overline{\Delta h} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta h$$

Equação 3

$$S_{\Delta h} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta h - \overline{\Delta h})^2}$$

Também é realizado o teste de tendência são utilizadas as hipóteses $H_0: \overline{\Delta h} = 0$, quando o h não é tendencioso e $H_1: \overline{\Delta h} \neq 0$, o h é tendencioso. Conhecendo as hipóteses a serem identificadas, a próxima etapa é a realização do cálculo estatístico amostral do *t* de *Student*, objetivando verificar se o resultado está no intervalo de aceitação ou rejeição da hipótese nula (ELIAS *et al.*, 2017). O valor de *t* é calculado conforme equação 4 (BRUCH *et al.*, 2019).

Equação 4

$$t = \frac{\overline{\Delta h}}{S_{\Delta h}} \sqrt{n}$$

Se o valor do teste *t* de *Student* for inferior ao valor limite tabelado $t_{n-1;\alpha/2}$, onde n é o número de pontos amostrais e atendendo a equação 5, o MDT está livre de erros sistemáticos significativos.

Equação 5

$$|t_{calc}| < t_{n-1;\alpha/2}$$

Para a análise da precisão, autores como Silva (2015), Silva *et al.* (2016) e Elias *et al.* (2017) sugerem o uso do teste Qui-quadrado e o enquadramento conforme estabelecido na Especificação Técnica da ET-PCDG e o Erro Padrão (EP) altimétrico. Para realizar o teste Qui-quadrado primeiramente é calculado o erro padrão esperado (σ_n), exemplificado na equação 6.

Equação 6

$$\sigma_h = EP_{Alt} \times Eq. \text{ das curvas de nível}$$

Na etapa final da avaliação das da acurácia dos MDTs, a partir do σ_h aplica-se um teste de hipótese, comparando o desvio padrão das discrepâncias das alturas com o EP esperado para a classe PEC-PCD a qual deseja testar, $H_0: S_{\Delta h}^2 = \sigma_h^2$, contra $H_1: S_{\Delta h}^2 > \sigma_h^2$ (SILVA *et al*, 2016). O valor do teste Qui-quadrado calculado x_h^2 conforme equação 7 deve apresentar valor inferior ao teste Qui-quadrado tabelado demonstrado na equação 8, possibilitando determinar a escala de representação a qual o MDT se enquadra dentro das classes (A, B, C ou D). O tamanho da amostra é representado pelo n , o s é o desvio padrão das discrepâncias e o σ é o EP esperado para uma determinada classe PEC-PCD.

Equação 7

$$x_h^2 = (n-1) \frac{s_{\Delta h}^2}{\sigma_h^2}$$

Equação 8

$$x_h^2 \leq x_{(n-1, \alpha)}^2$$

ÁREA DE ESTUDO

O município de Pelotas/RS é um dos mais populosos do Estado do Rio Grande do Sul, com cerca de 343.000 moradores, sendo que aproximadamente 93% vivendo no sítio urbano (IBGE, 2020). A cidade está limitada pelas coordenadas UTM em seu Fuso 22S de 360.000 e 386.000 mE, e 6.481.000 e 6.500.000 mN (Figura 2). O distrito Sede a qual perfaz a área urbana do município, apresenta uma área aproximada de 192 km².

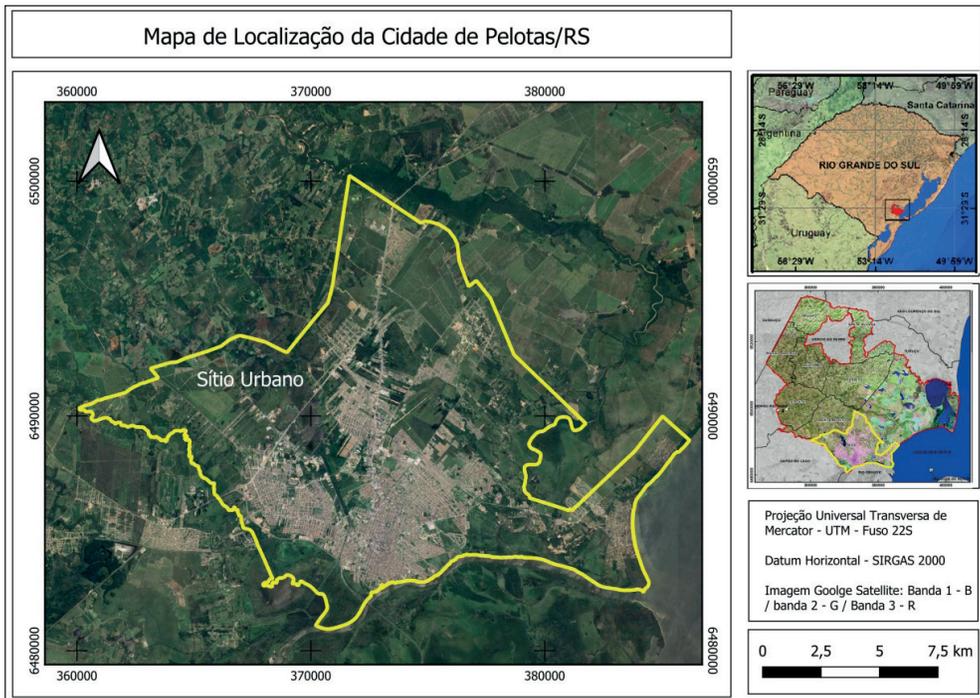


Figura 2: Mapa de localização da cidade de Pelotas/RS. Adaptado de Xavier (2017).

A cidade de Pelotas está inteiramente localizada na Planície Costeira do Rio Grande do Sul, na Unidade Morfoestrutural da Bacia de Pelotas. De forma simplificada, a formação dos terrenos da Planície Costeira está atrelada à ocorrência de um amplo sistema de leques aluviais somados ao acréscimo lateral de quatro sistemas de deposição do tipo “Laguna-Barreira”. Nesse contexto de formação, ocorrem diferentes formas geomorfológicas, predominando Planícies Lacustres, Planície Alúvio-lacustre, Postais arenosos, Planície paludial, Planície Alúvio-lagunar, Planície Alúvio-coluvionar, dunas, lombadas e terraços (SILVA e REHBEIN, 2018). Sendo assim, pela cidade estar inteiramente na Planície Costeira, ela apresenta um relevo extensamente plano, condicionado a uma morfologia com baixa declividade e pequena amplitude topográfica.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Visto a precisão necessária para a elaboração de produtos voltados à gestão de recursos hídricos, principalmente para a determinação de áreas de inundação na cidade de Pelotas/RS, os testes de precisão e acurácia altimétrica foram baseados na Classe A da PEC-PCD, ou seja, 90% dos pontos não podem apresentar erro superior a 0,27m e o Desvio Padrão ou Erro Padrão (EP) não deve ser superior a 1/6 da equidistância, portanto o limite de 0,17m. A tabela com os pontos de checagem e suas comparações com as posições altimétricas no MDT URB e o MDT Geo Pelotas constam na tabela 3.

Ponto	h_r (m)	MDTURB h_o (m)	Geo Pelotas $h_o(m)$	Discrepância MDTURB (Δ)(m)	Discrepância Geo Pelotas (Δ)(m)
1	14,115	14,16	14,170	-0,045	-0,055
2	12,228	12,2	12,169	0,028	0,059
3	10,395	10,39	10,950	0,005	-0,555
4	9,895	10,08	9,980	-0,185	-0,085
5	7,454	7,43	7,660	0,024	-0,206
6	7,432	7,43	7,865	0,002	-0,433
7	6,606	6,51	7,423	0,096	-0,817
8	7,606	7,65	8,014	-0,044	-0,408
9	7,805	7,82	8,272	-0,015	-0,467
10	3,9	3,84	3,895	0,060	0,005
11	11,544	11,29	11,504	0,254	0,040
12	4,463	4,41	3,668	0,053	0,795
13	11,511	11,46	13,333	0,051	-1,822
14	14,547	14,51	14,719	0,037	-0,172
15	8,696	8,76	4,883	-0,064	3,813
16	9,089	9,11	9,323	-0,021	-0,234
17	3,252	3,31	5,648	-0,058	-2,396
18	3,538	3,33	2,768	0,208	0,770
19	3,053	2,98	3,206	0,073	-0,153
20	2,668	2,64	2,372	0,028	0,296
21	2,856	2,87	2,870	-0,014	-0,014
22	3,655	3,83	2,886	-0,175	0,769
23	3,186	3,07	1,746	0,116	1,440
24	2,825	2,79	2,263	0,035	0,562
25	1,923	1,9	1,884	0,023	0,039
26	1,691	1,64	1,586	0,051	0,105
27	2,311	2,09	1,404	0,221	0,907
28	2,32	2,31	1,344	0,010	0,976
29	2,738	2,94	2,314	-0,202	0,424
30	10,618	10,63	9,628	-0,012	0,990
31	6,471	6,43	6,816	0,041	-0,345
32	3,159	3,13	3,85	0,029	-0,691
Média				0,019	0,098
Dev. Padrão				0,100	1,029

Tabela 3: Pontos de Checagem altimétrica do MDT URB e Geo Pelotas

Conforme a figura 3, as discrepâncias altimétricas do MDT URB estão na escala centimétrica, enquanto no MDT Geo Pelotas as discrepâncias alcançam valores métricos. Os pontos que apresentaram discrepâncias métricas são os: 13, 15, 17 e 23, sendo que ambos os pontos encontram-se nas bordas da matriz numérica ou no contorno das variações abruptas do relevo. Possivelmente as discrepâncias altimétricas estão relacionadas também ao deslocamento posicional planimétrico dos produtos.

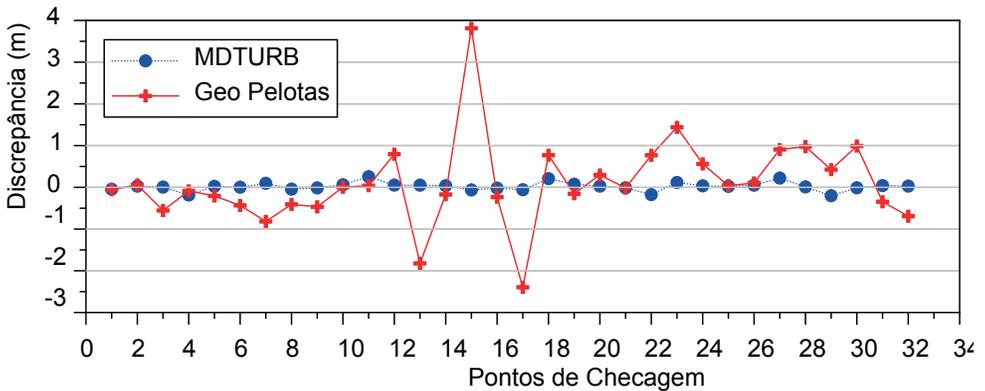


Figura 3: Discrepância altimétrica entre os MDTs.

A Figura 4 foi elaborada com os mesmos dados da Figura 3. Desta vez os dados são apresentados em termos de mediana e distribuição dos quartis dos valores analisados. Conforme pode ser observado, todo o intervalo de discrepância apresentado pelo MDTURB está compreendido entre o primeiro e terceiro quartis do MDT Geo Pelotas, o que, mais vez, evidencia a diferença de precisão entre ambos. Destaca-se que até mesmo os pontos discrepantes do MDT URB estão mais próximos da mediana da discrepância do que os limites dos primeiro e segundo quartis do outro modelo analisado.

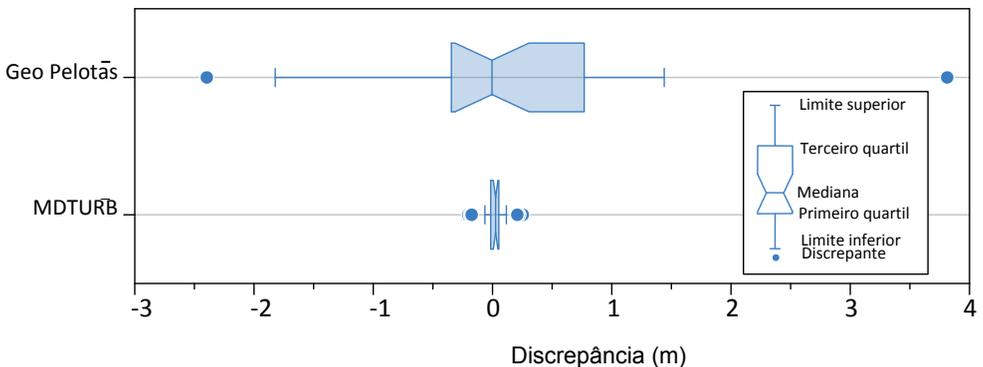


Figura 4: Distribuição dos valores de discrepância altimétrica.

Na tabela 3 pode ser observada a elevada precisão média dos resultados das altitudes Normais do MDT URB, chegando próximo a 2 cm. O desvio padrão também apresentou ótimos resultados chegando próximo a 10 cm. O resumo dos resultados para o MDT URB pode ser observado na tabela 4.

Altimetria	Escala	Classe	PEC (m)	Discrepância Média	Condição ΔZ $+90\% \leq PEC$	Classificação
	1:1.000	A	0,27	Z		
				0,019		

Tabela 4: Enquadramento dos resultados na PEC-PCD do MDT URB

Na tabela 5 pode ser observada a precisão média dos resultados das altitudes Normais do MDT Geo Pelotas, chegando próximo a 10 cm. O desvio padrão apresentou resultados elevados para a classe A da PEC-PCD, com resultados chegando próximo a 1 m. Com esses resultados, o MDT Geo Pelotas foi reprovado em todas as classes de enquadramento da PEC-PCD, não sendo acurado e sem classificação com quatro *Outliers*.

Altimetria	Escala	Classe	PEC (m)	Discrepância Média	Condição ΔZ $+90\% \leq PEC$	Classificação
	1:1.000	A	0,27	Z		
				0,098		

Tabela 5: Enquadramento dos resultados na PEC-PCD do MDT Geo Pelotas

A figura 4 apresenta o mapa com a distribuição dos pontos de checagem e as variações altimétricas do MDT URB. As maiores altitudes encontram-se na borda nortenoeste do sítio urbano, principalmente onde ocorrem formas em Terraço Alúvio-coluvionar e Terraço Lagunar, chegando a altitudes próximas a 28 metros, acima do Datum vertical Imituba. Já as menores altitudes, próximas a 1 metro, estão nos terrenos que margeiam o canal São Gonçalo, na Planície Alúvio-lagunar do São Gonçalo (SILVA e REHBEIN, 2018).

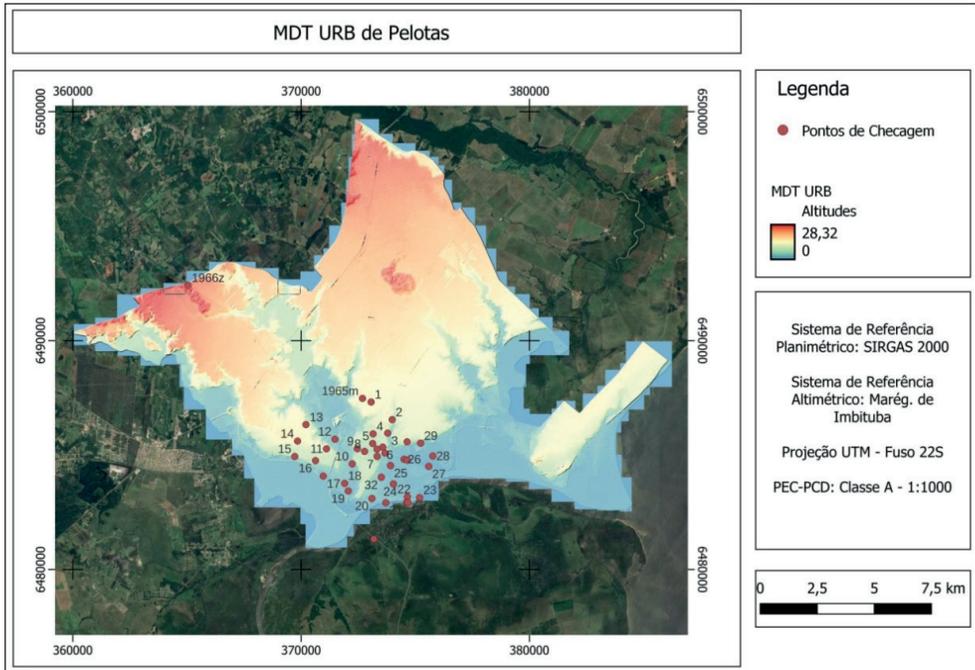


Figura 4: MDT URB com os pontos de checagem

Já a figura 5 apresenta o mapa com a distribuição dos pontos de checagem sobre as variações altimétricas do MDT Geo Pelotas. Pode ser observado que a amplitude topográfica é praticamente a mesma, cerca de 28 metros, sendo que parte das diferenças hipsométricas entre o MDT URB e Geo Pelotas estão atribuídas as variações de recorte espacial. Também observa-se a suavização do contorno das formas geomorfológicas, principalmente na região de proximidade com dunas existentes no Bairro Laranjal. Essa suavização do relevo pode estar relacionada a diferença de resolução espacial dos mesmos (1m e 2m).

Também foi realizada a subtração matricial dos dois MDTs para a verificação das discrepâncias altimétricas, ou seja, o resíduo posicional com as maiores e menores diferenças altimétricas, conforme pode ser observado na figura 6. As diferenças encontradas em algumas regiões do sítio urbano estão na escala métrica, principalmente nas regiões de contorno das diferentes formas geomorfológicas, as quais possuem patamares e aplainamentos em diferentes altitudes, como é o caso da transição entre as formas de Planície e formas em Terraço.

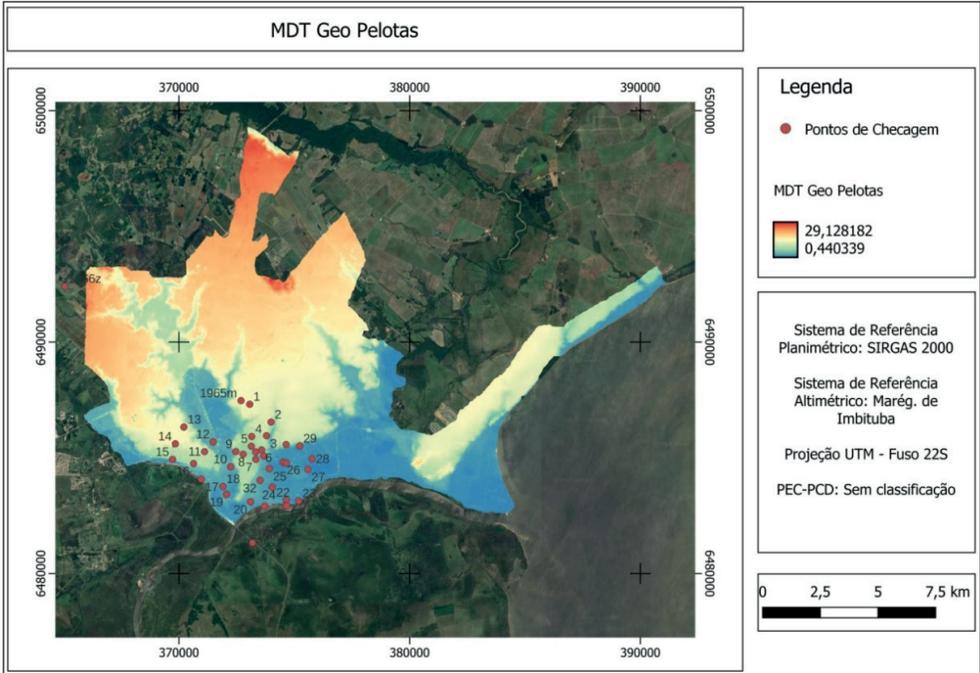


Figura 5: MDT Geo Pelotas com os pontos de checagem

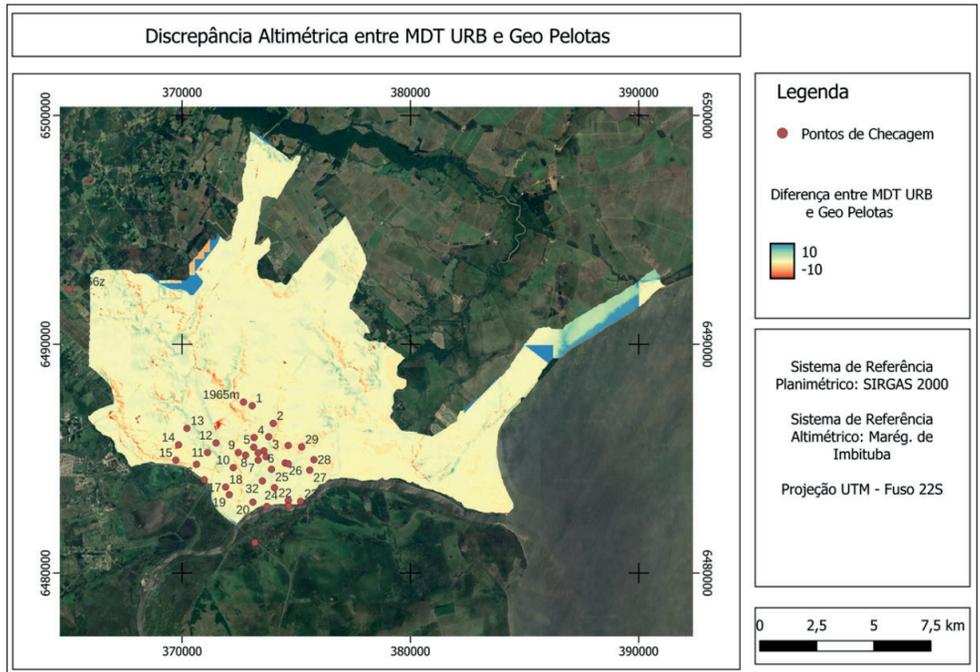


Figura 6: Resíduo altimétrico entre o MDT URB e Geo Pelotas

A avaliação da tendenciosidade dos MDTs é realizada através da verificação se os resultados estão dentro do intervalo de aceitação ou rejeição. Para tanto, foi calculado o teste t amostral para os dois modelos (MDT URB e MDT Geo Pelotas). O intervalo aceitável para um nível de confiança igual a 90% ($\alpha = 0,10$), ou seja $1 - \alpha$, tendo como referência os 32 pontos levantados em campo, obtém-se o valor limite de $t_{10}(31)$ tabelado igual a 1,696. Aplicando a equação 5, verificou-se que o MDT URB apresentou um t_{calc} de 1,075 (tabela 6), sendo estatisticamente aprovado no teste de acurácia. Já o MDT Geo Pelotas resultou um t_{calc} de 0,539 em um limite de 1,696, sendo aceito como acurado.

Avaliação da Acurácia		
	MDT URB	MDT Geo Pelotas
Δh	0,019	0,098
S	0,100	1,029
n	32	32
σ	0,170	0,170
$t_{10\% (31)}$	1,696	1,696
$ t_{calc} $	1,075	0,539
$\chi^2_{10\% (31)}$	41,422	41,422
$\chi^2_{calculado}$	18,235	63,798
Classe PEC-PCD	Classe A	Classe D

Tabela 5: Resultados dos testes estatísticos de Acurácia

Para a geração de manchas de inundação e conseqüentemente produtos cartográficos acurados a partir dos dois MDTs testados, nesta pesquisa considerou-se o erro padrão esperado (σ) de 1/6 da equidistância avaliada (1 m), concordando com Silva (2015) e Silva et al. (2016), com limite tabela χ^2 de 41,422, para uma número de amostras (n) igual a 32, com nível de significância de 10% e 31 graus de liberdade (tabela 6). O MDT URB, após a aplicação do teste Qui-quadrado exemplificado na equação 6, resultou em um $\chi^2_{calculado}$ de 18,235, enquadrando o levantamento no PEC-PCD na Classe A. Logo o MDT Geo Pelotas, apresentou um resultado de $\chi^2_{calculado}$ de 63,798, gerando um produto PEC-PCD classe D.

CONCLUSÕES

Os MDTs são produtos indispensáveis na identificação de áreas de inundação, assim como a delimitação destas áreas de risco, sendo que a utilização de MDTs acurados possibilita a execução de ações e tomada de decisão com um elevado grau de confiabilidade. Nesta pesquisa foram avaliadas a acurácia e o enquadramento no PEC-PCD de dois MDTs utilizados na cidade de Pelotas/RS para a identificação e delimitação de áreas de Inundação, assim como para a caracterização topográfica e do relevo.

O MDT denominado URB foi o que apresentou os melhores resultados com média de discrepância posicional vertical de 0,019 m e um desvio padrão de 0,100 m, comparado com as altitudes de referência determinadas com GNSS em campo. Este MDT foi enquadrado na classe A da PEC-PCD para produtos cartográficos digitais. Já o MDT Geo Pelotas apresentou uma média de discrepâncias altimétricas de 0,098 m e um desvio padrão de 1,029 m, sendo enquadrado na classe D da PEC-PCD.

Destaca-se que o MDT URB apresenta qualidade de dados altimétricos compatíveis com a delimitação de níveis centimétricos de áreas de inundação. De forma contrária, o MDT Geo Pelotas, apresenta uma acurácia vertical bem menor, mas sem tendenciosidade, tendo o seu uso atribuído para a caracterização do relevo, principalmente e mapeamentos em pequenas escalas.

REFERÊNCIAS

ASSAD, E. D.; SANO, E. E. **Sistemas de Informações Geográficas**: aplicações na agricultura. 2ª edição. Brasília: Embrapa. 1998.

BRASIL. 1984. Decreto N° 89.817 de 20 de Junho de 1984. **Normas Técnicas Da Cartografia Nacional**. Brasil. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/D89817.htm.

BRUCH, A. F.; CIROLINI, A.; THUM, A. B.; CARNEIRO, M. Avaliação da Acurácia das Cubagens de Volumes de Mineração através de Levantamentos Convencionais e Fotogramétricos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 1. p. 283-298, 2019. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.1.p283-298>

CRUZ, C. B. M.; BARROS, R. S.; CARDOSO, F. V.; REIS, F. B.; ROSÁRIO, L. S.; BARBOSA, S. S.; RABACO, L. M. L.; LOURENÇO, J. S. Q. **Avaliação da exatidão planialtimétrica dos modelos digitais de superfície (MDS) e do terreno (MDT) obtidos através do LIDAR**. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba: INPE, p. 5463, 2011.

DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO – DSG: EXÉRCITO BRASILEIRO, DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV)**. Editoração e impressão pela Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro, 2ª Edição, 09 Agosto 2011.

EVANS, I. S. Geomorphology Geomorphometry and landform mapping: What is a landform? **Geomorphology**, v. 137, n. 1, p. 94–106, 2012.

FELGUEIRAS, C. A. **Modelagem Numérica de Terreno**. Cap.7. p.1. 2023 Disponível em: http://www.rc.unesp.br/igce/geologia/GAA01048/aulas_files/cap7-mnt.pdf. Acesso em: 30/09/2023.

GALO, M. e CAMARGO, P. O. **Utilização do GPS no controle de qualidade de cartas**. Artigo apresentado no 1º Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário, Florianópolis – Brasil, Tomo II, 1994, 41-48.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **IBGE une internet sem fio a GPS e lança serviço gratuito para posicionamento e navegação**. 2013. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/13644-asi-ibge-une-internet-sem-fio-a-gps-e-lanca-servico-gratuito-para-posicionamento-e-navegacao> Acesso em 01/05/2024.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. **Manual de Procedimentos Metodológicos**: delimitação de planícies de inundação e de áreas inundáveis. São Paulo, 1ª Ed. IPT, 2023

SILVA, C. A. Avaliação da acurácia dos ortomosaicos e modelos digitais do terreno gerados por vant e sua aplicação no cálculo de volume de pilhas de rejeito da pedra cariri. **Dissertação** (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Ceará – CE, 2015. 148p.

SILVA, C. A.; DUARTE, C. R.; SOUTO, M. V. S.; SANTOS, A. L. S.; AMARO, V. E.; BICHO, C. P.; SABADIA, J. A. B. Avaliação da acurácia do cálculo de volume de pilhas de rejeito utilizando VANT, GNSS e LIDAR. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 22, n. 1, 2016.

SILVA, A. R. E. da, e REHBEIN, M. O. (2018). ANÁLISE E MAPEAMENTO GEOMORFOLÓGICO DA ÁREA DE INFLUÊNCIA DA PLANÍCIE COSTEIRA DE PELOTAS (RIO GRANDE DO SUL, BRASIL). *Revista Brasileira De Geomorfologia*, 19(3). <https://doi.org/10.20502/rbg.v19i3.1342>

XAVIER, S. C. Mapeamento Geotécnico Aplicado ao Planejamento do Uso e Ocupação do Solo da Cidade de Pelotas/RS. **Tese**. Doutorado em Engenharia Civil. UFRGS. Porto Alegre, 2017..