

COMPARAÇÃO E AVALIAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO DOS SENSORES SRTM, ASTER, TANDEM/TERRASAR –X, NASADEM, COPERNICUS DEM E ALOS PALSAR PARA ANÁLISE DIGITAL DE TERRENO PARA APLICAÇÕES NO SANEAMENTO BÁSICO.

Fernando Yogi⁽¹⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (2008), mestre pela Universidade Federal de São Carlos. Atualmente é engenheiro da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo.

Fabio Noel Stanganini⁽²⁾

Geógrafo pela Universidade Estadual Paulista - UNESP (2007), mestre e doutor em Engenharia Urbana pela Universidade Federal de São Carlos. Tem experiência na área de Geografia e Engenharia Urbana, com ênfase em Geografia da Saúde, Planejamento Ambiental Urbano e Sistema de Informação Geográfica.

Endereço⁽¹⁾: Rodovia Washington Luis, km 235 - São Carlos - SP – BR CEP: 13565-905 Telefone: (16) 3351-8295- e-mail: fyogi@sabesp.com.br.

RESUMO

Modelos Digitais de Elevação (MDEs) são modelos matemáticos que buscam reproduzir uma superfície topográfica a partir coordenadas cartesianas “x e y”, com atributos altimétricos “z”, sendo que “z” representa a variação de uma superfície. Os MDEs Apresentam várias aplicações, dentre as quais, podem ser aplicados na gestão de recursos hídricos e ambientais, como por exemplo, mapeamento de redes de drenagem, delimitação de área correspondente à extensão ou superfície de escoamento de um rio central e seus afluentes, levantamentos altimétricos, declividade, confecção de mapas topográficos, orientação de vertentes, ordem dos contribuintes, traçado de rede hidrográfica dentre outros. Neste âmbito, o objetivo do trabalho é verificar através de diferentes sistemas sensores que geram os subproduto MDEs, os *SRTM* (1, 2 e 3), *COPERNICUS DEM*, *TOPODATA*, *ASTER GLOBAL DEM 2* e o *ALOS PALSAR*, de qual apresentam os melhores subprodutos, comparar entre si, binomialmente por intermédio de análise física e estatística a variável altimétrica, verificando sua dispersão e precisão através de dados de levantamentos de fontes confiáveis, visando a elaboração de um MDE preciso que possa auxiliar diversos projetos na gestão de recursos hídricos. Verificando quais subprodutos são mais representativos para o Município de São Carlos. A análise física do perfil altimétrico decorrente do talvegue de maior extensão de São Carlos indicou que no percurso da nascente até a foz, ocorrem a divergências nos Sensores componentes binomial são maiores conforme o relevo se torna mais proeminente em uma outra vertente a análise consistiu em realizar uma avaliação estatística de dados altimétricos obtidos dos MDE com Teste T de Student e Análise de Variância (ANOVA). A análise física demonstrou nos Mapas de Orientação de Vertente quais foram as vertentes predominantes, por fim os Perfis Altimétricos foram obtidos dos MDEs demonstraram diferenças altimétricas posicionais. A comparação demonstra que toda avaliação binária, a melhor correlação ocorre com os sensores da missão espacial SRTM, enquanto a pior é verificada pelos sensores da família TANDEM/TERRASAR-X. Quanto às comparações visuais e a estatística descritiva dos instrumentos, afirma-se a pertinência quanto à similaridade entre SRTM 30, TopoData e NASADEM, e a maior diferença entre ASTER GDEM e TANDEM/TERRASAR-X. Acredita-se que a maior diferença ocorreu devido ao processo de constituição do MDE e principalmente pela resolução espacial de cada.

PALAVRAS-CHAVE: Modelo Digital de Elevação, Modelo Digital do Terreno, Sensoriamento Remoto, Geoprocessamento.

INTRODUÇÃO

Um Modelo Digital de Elevação (MDE) é uma representação matemática de elementos presentes na superfície terrestre, caracterizadas por um plano cartesiano (x, y) de uma região de uma superfície, com o diferencial de possuírem uma terceira informação, a altitude (z). Para Iorio et al (2012) Faithy et al (2019), Littidej e Buasri (2019) e Ye et al (2019) dados de relevo, levantamentos de profundidades de redes hídricas são produtos cartográficos obtidas destes modelos e estão bem difundidos entre os estudos de finalidade hídrica e ambiental

No entanto, segundo Yogi (2018) para as suas aplicações e desenvolvimentos estratégicos para planejamento é necessário a compreensão de diferentes dinâmicas ecológicas e antrópicas em múltiplas escalas (dimensões espaciais) para assimilar conceitos em nível de detalhe para precisão de estudos hidrológicos que as envolvem.

Assim torna-se constante o desafio para a veiculação correta dos investimentos em infraestrutura, destaque pode ser dado em situações em que há um contraste entre o urbano e o rural. Nota-se que nas regiões que estão em constante urbanização, Egg, Grip Júnior & Medeiros, 2019 indicam que tais cenários, ainda que carecem de infraestrutura tornam-se o centro de atenções para modelagem do terreno juntamente ao mapeamento em escala adequada, enquanto para Zhang & Montgomery (1994) e Idoeta (2007) abrangem regiões com características urbanizadas

Uma das etapas realizadas para a modelagem do terreno pode ser realizada por Sensoriamento Remoto integradas com um Sistema de Informação Geográfica (SIG), sinergia que deve ser capaz de mapear e classificar subprodutos de um MDE para planejamento e gestão dos espaços. Produto de Sensoriamento Remoto que se destaca nesse processo, são as imagens SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), o ASTER GLOBAL DEM2, o COPERNICUS, o ALOS PALSAR, o TOPODATA, e o BARE-EARTH

Dentre os diversos MDE disponíveis, dentre os gratuitos estão o SRTM-3, o ASTER GLOBAL DEM2, o COPERNICUS, o ALOS PALSAR, o TOPODATA, e o BARE-EARTH SRTM. Sendo a resolução espacial (capacidade que cada sensor ou cada conjunto sensor possui em detectar e captar objetos na superfície terrestre, quanto melhor a resolução espacial melhor serão identificados os objetos captados) de 30 metros. O SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) e o ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission Reflection Radiometer) GLOBAL DEM (Digital Elevation Model) 2. O ALOS PALSAR possui resolução espacial de 12,5 metros, ALOS (Advanced Land Observing Satellite-1) com esta finalidade, não menos importante, o BARE-EARTH SRTM possui resolução espacial de 90 metros.

A qualidade de um MDE depende de sua acurácia e tipo e da grandeza dos erros à que foram atribuídos. É importante considerar que os erros são inevitáveis, visto que os MDEs são representações matemáticas da superfície terrestre. Os parâmetros modelados são, portanto, subjetivos, embora sua representação possa realizar-se com maior ou menor acurácia. Acurácia que depende da fonte de dados, da resolução espacial e escala de trabalho, sendo que para tal há uma preocupação com o uso indiscriminado que são usados muito frequentemente sem qualquer referência à grandeza destes erros ou à técnica aplicada para sua validação (CHAGAS et al, 2010).

Desta forma, para que um MDE possa ser utilizado na produção cartográfica e análise ambiental, deve-se, primeiro, conhecer sua confiabilidade locacional dos dados representados, tanto em um plano cartesiano quanto para planos que estão atribuídas as dimensões de altura ou profundidade. Conforme o Decreto de Brasil (1984), a validação da acurácia altimétrica dos MDEs tem sido realizada pela aplicação do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), normatizado no Decreto 89.817 de 1984.

Pompermyer (2013) esclarece que a formação do relevo é crucial para determinação de parâmetros em uma porção do terreno como a bacia hidrográfica e a partir MDE é possível obter elementos topográficos como altitude, declividade, comprimento do talvegue e por meio de algoritmos mapas de fluxo capaz de indicar a direção de escoamento de uma área de drenagem para um corpo d água.

Oliveira et al (2010) ressalta que a identificação dos interflúvios e do contorno da bacia através de dados oriundos dos MDEs são vantajosos uma vez que pode-se definir formas automatizadas para área de drenagem de uma bacia hidrográfica, permitindo um traçado padronizado.

A partir dos MDEs e seus subprodutos podem ser realizados estudos ambientais: regiões sujeitas à erosão, delimitação de rede hidrográfica e bacia hidrográfica, mapeamento de áreas de preservação permanente e subsídio ao projeto executivo de rodovias e drenagens, adequações a possíveis extravasamentos de bacias de esgotamentos sanitários em áreas de fundo de vale, instalação de reservatórios para distribuição de água conforme as zonas de abastecimento (Zona baixa, média ou alta) adequações do sistema viário e construção de obras de arte (barragens, túneis etc.) (ABRAHÃO, 2020).

Considerando que as obras de Saneamento possuem em média um horizonte de projeto de 20 a 30 anos é de vital importância a manutenção das informações técnico-operacionais destes sistemas. E um dos principais problemas que permeio o setor de saneamento básico é a ausência de cadastro técnico de base de dados de clientes das redes de abastecimento de água e de esgoto sanitário. Os SIGs permitem a estruturar tais informações, possibilitam uma análise integrada para o planejamento das ações ao longo do tempo, facilitando suas atualizações. Além da integração dos SIGs com os softwares de modelagem hidráulica compilam dados

essenciais à simulação e dimensionamento dos componentes, principalmente conforme a aderência às vertentes do abastecimento de água. (RIBEIRO E PARAMANHOS FILHO, 2021)

O emprego de métodos estatísticos nos trabalhos científicos como instrumento extremamente útil na organização e interpretação de dados. Sendo assim, proporcionando uma avaliação adequada da variabilidade observada nos dados georreferenciados que segundo Matsumoto & Flores (2012) podem ser empregadas em análises métricas de relações espaciais, como estatística espacial. Comparam-se as situações experimentais e permitem determinar a margem de erro que estão associadas às amostras georreferenciadas.

Segundo Mendonça Junior e Issmael (2020) medições de qualquer natureza estão sujeitas aos mais diferentes tipos de erros, sejam eles caracterizados como grosseiros, sistemáticos ou aleatórios, assim, os dados altimétricos provenientes de um MDE podem acumular erros fora do intervalo admitido do Desvio Padrão, assim, erros mais grosseiros, os outliers, são detectados facilmente. Erros sistemáticos são produzidos por causas conhecidas e podem ser evitados por técnicas especiais de observações, por modelação devendo ser tratados estatisticamente.

A distribuição T de Student é utilizada quando o desvio padrão é desconhecido e quando a população original tem distribuição essencialmente normal, as amostras que apresentam variáveis independentes podem ser verificadas como as mais significativas a partir de testes T de Student.

A análise de variância (ANOVA) é uma técnica estatística que permite avaliar o erro de medição e fontes variáveis de dados pertinentes a um sistema de medição. A análise de variância de um único fator é um incremento do teste T de Student, (One-Way ANOVA), permite segundo Oliveira et al (2018) verificar “qual o efeito de uma variável independente de natureza qualitativa, também chamada de fator, numa variável dependente ou resposta, de natureza quantitativa” O ANOVA consiste em agrupar as observações da variável dependente em cada um dos fatores analisados, comparando as médias amostrais. A existência de pelo menos um grupo com média diferente dos outros origina a rejeição da hipótese, ultrapassa o nível de significância indicando que está dentro da probabilidade de rejeitar a hipótese inicial.

O Erro Quadrático Médio (EQM) também pode ser usado como uma medida do erro de previsão. O EQM é determinado somando os erros de previsão ao quadrado e dividindo pelo número de erros das amostras.

Com a evolução da tecnologia aero espacial para obtenção de dados para o Sensoriamento Remoto, subprodutos cartográficos, como pode-se ver mais a frente, o Modelo Digital de Elevação (MDE) levou a minimização, depreciação e acúmulo de erros para geração de mapas, uma vez que analisa-se tanto a acurácia de dados posicionais no plano X Y e também em Z para leitura de dados verticais.

Esta pesquisa realiza uma comparação e avalia os Modelos Digitais de Elevação dos sensores SRTM, ASTER, TANDEM/TERRASAR-X, NASADEM, COPERNICUS DEM e ALOS PALSAR para análise digital de terreno, verificando qual Modelo possui maior acurácia, por conseguinte verifica de quais subprodutos dos MDEs são mais representativos para o Município de São Carlos. Análise consistiu em realizar uma análise estatística de dados altimétricos obtidos de cada um dos Modelos Digitais de Elevação com testes binários entre os dados de MDE com Teste T de Student e Análise de Variância (ANOVA), os subprodutos como os: (i) Mapas de Orientação de Vertente foram gerados no intuito de demonstrar a vertente predominante dos oito MDEs; (ii) Perfis Altimétricos foram obtidos dos oito MDEs diferentes para demonstrar que além diferenças altimétricas apresentam-se também diferenças de coordenadas. A comparação binária demonstra a melhor correlação ocorre com os sensores da missão espacial SRTM, enquanto a pior é verificada pelos sensores da família TANDEM/TERRASAR-X. A comparação do perfil altimétrico decorrente do talvegue de maior extensão de São Carlos indica que no percurso da nascente até a foz, ocorrem a divergências nos Sensores componentes dos binômios são maiores conforme o relevo se torna mais proeminente.

OBJETIVOS

Analisar estatisticamente dados altimétricos dos diferentes sensores (SRTM, COPERNICUS DEM, ALOS, TOPODATA, NASADEM, TERRASAR-X e ASTER)

Analisar subprodutos dos MDEs (orientação de vertente), geomorfometrias, dos diferentes sensores (SRTM, COPERNICUS DEM, ALOS, TOPODATA, NASADEM, TERRASAR-X e ASTER)

METODOLOGIA UTILIZADA

Área de Estudo

O Município de São Carlos (figura 01) está localizado na região central do Estado de São Paulo, entre as coordenadas 47° 30' e 48° 30' Longitude Oeste e 21° 30' e 22° 30' Latitude Sul, mais precisamente no final da Serra do Itaqueri.

Possui altitude variável, encontrando seu ponto mais elevado (900 metros) na Vila Nery, no sítio urbano de São Carlos, e o mais baixo, 544 metros, nas imediações da estação Santo Inácio.

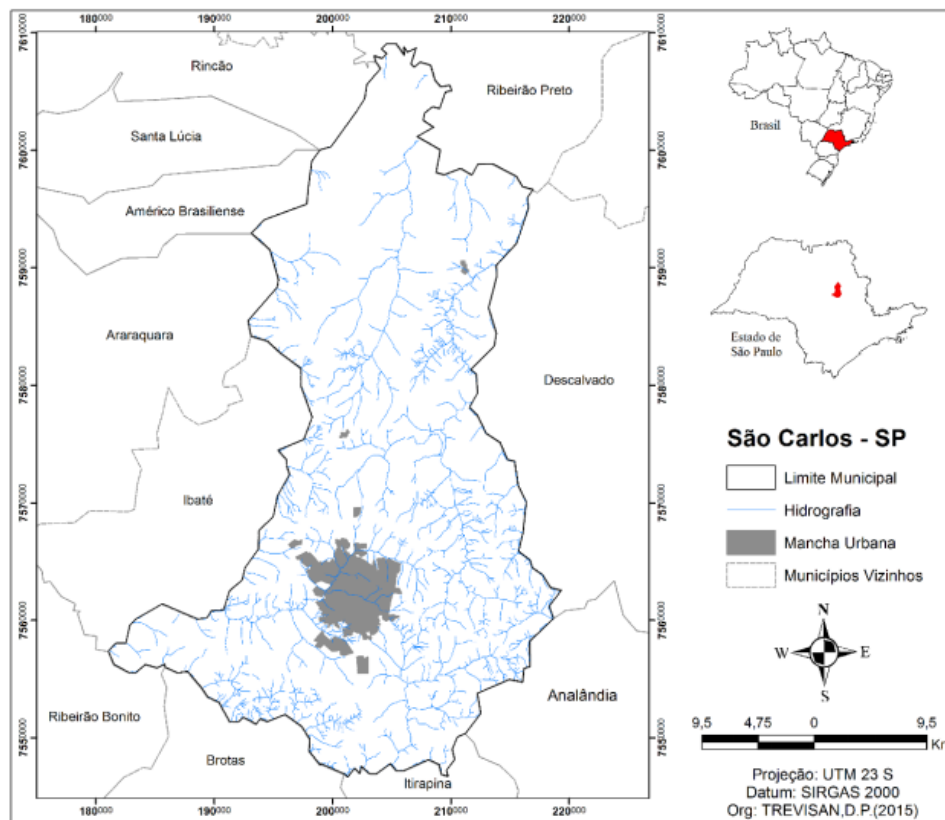


Figura 1. Localização Geográfica do Município de São Carlos (SP). Fonte: Trevisan e Moschini (2016).

Segundo Oliveira (1996), o Córrego do Monjolinho nasce na borda da cuesta localizada no setor sudeste da cidade de São Carlos, em altitude superior a 900 metros, segue inicialmente a norte, percorrendo o reverso da cuesta e posteriormente a oeste e sul e, finalmente, atinge a Cachoeira do Monjolinho.

O município está localizado sobre o divisor de águas que limita as bacias hidrográficas do Rio Mogi-Guaçu e Tietê, fato associado à sua localização elevada no Estado. Em razão disso, a maioria dos cursos d'água que drenam São Carlos e a totalidade dos que drenam a área urbanizada, têm suas nascentes localizadas no município

Ferramentas de dados para o Projeto

QGIS versão 2.18 mais estável Las Palmas, aplicação Taudem

Métodos

A análise divide-se em duas vertentes (figura 02), a primeira delas é decorrente da avaliação matricial proveniente dos subprodutos do MDE e análise estatística (T de Student e ANOVA) dos binômios formados pelos pares sensores de dados obtidos de Pontos de Controle (PCs) definidos à partir de uma camada interpolada de curvas de nível. A análise estatística em fase concomitante consiste em uma análise binária (para à par) das amostras de altitude e uma avaliação médias.

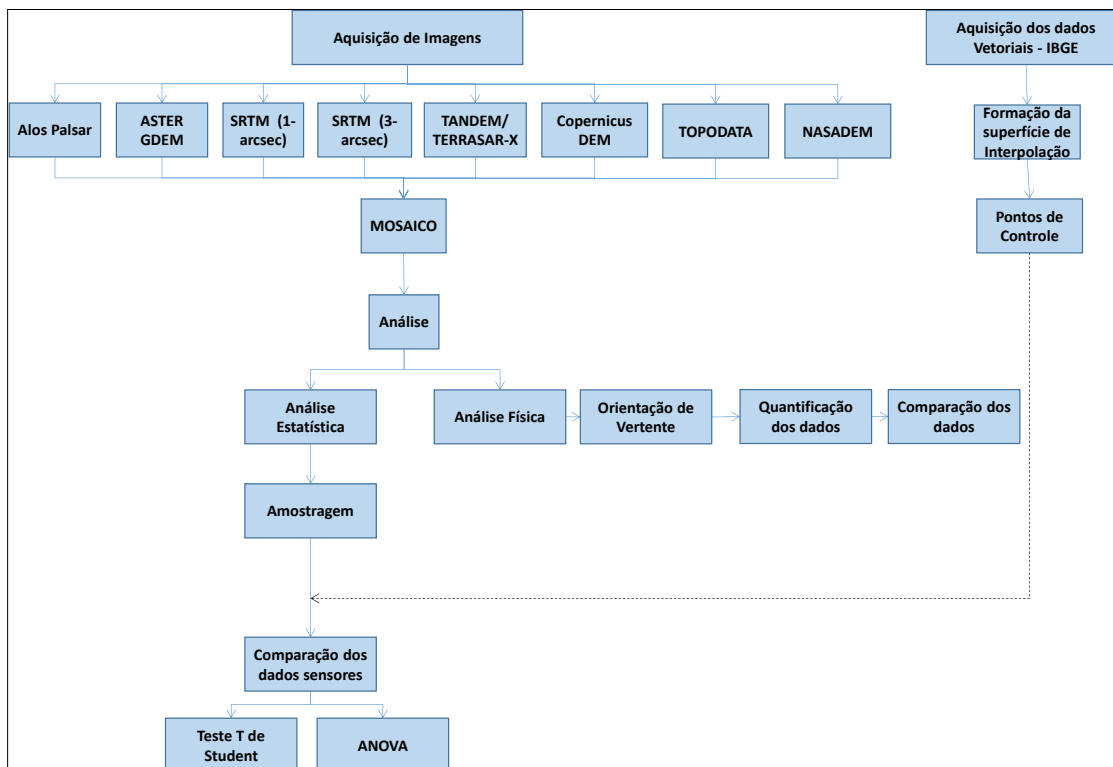


Figura 2. Metodologia de Comparação de dados Altimetria, matricial e estatística.

As etapas para obtenção dos MDEs provenientes dos sensores SRTM, COPERNICUS DEM, ALOS, TOPODATA, NASADEM, TERRASAR-X e ASTER, basicamente dividiu-se em: Download dos dados dos MDEs para a área de interesse; Pré-processamento dos dados; Validação da acurácia altimétrica dos MDE de interesse

Os dados do SRTM 3 tratados pela The CGIAR Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI, 2008) para preenchimento dos gaps de informações os “buracos sem dados”, e o ASTER GLOBAL DEM 2 (Esse produto foi criado com o processamento de 1,3 milhões de arquivos de cenas ASTER, o qual é um sensor a bordo do satélite Terra, com capacidade de operar no modo estereoscópico com as bandas 3N (Nadir) e 3B (Backward), obtendo dados de elevação da superfície) foram obtidos na página do USGS (<http://earthexplorer.usgs.gov/>), enquanto o SRTM 3, NASADEM foi obtido do <https://search.earthdata.nasa.gov/search>. Os dados ALOS PALSAR serão obtidos na página Alaska Satellite Facility (<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>). Tandem/ Terrasar-X da página <https://download.geoservice.dlr.de/TDM90/>. E as imagens interpoladas do TOPODATA do endereço <http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/>. Em comparação com o tratamento de dados Tandem/TerraSar-X, foram obtidas imagens provenientes do Catálogo Panda de acesso à dados do Componente Espacial Copernicus, permitindo consultas de dados DEM e uma ampla visão de subprodutos de dados CDS (Coordinated Data Access System) e EO (Earth Observation) e CCM (Copernicus Contribution Mission) provenientes do endereço: <https://panda.copernicus.eu/> com as imagens formadas em um mosaico, escolhidas pelo traçado de um polígono cujo fechamento perpassava os limites do município de São Carlos.

O MDE do Projeto TOPODATA (INPE, 2009), modelo resultante do processamento do MDE do SRTM original, buscou incluir informações onde antes existia ausência de dados. Além disso, a resolução espacial original do SRTM, que é de 90 metros foi reamostrada para 30 metros, a partir de interpolação.

A tabela 1 abaixo sintetiza as características mais relevantes dos MDEs que serão estudados neste trabalho.

Tabela 1 - Modelos Digitais de Elevação em estudo.

MODELO	RESOLUÇÃO ESPECIAL	MÉTODO DE AQUISIÇÃO
SRTM - 1	90 metros	RADAR

SRTM-3	30 metros	RADAR
NASADEM	30 metros	RADAR
ASTER GDEM2	30 metros	Imagens ortoretificadas
ALOS PALSAR	12,5 metros	RADAR
TERRASAR - X	90 metros	RADAR
COPERNICUS DEM	90 metros	RADAR
TOPODATA	30 metros	RADAR

O pré-processamento dos dados, tratará da preparação da base de dados raster a partir da aplicação de ferramentas de geoprocessamento no QGIS. Nesta preparação será realizada: construção de possíveis mosaicos para formação do MDE do município de São Carlos; recorte dos dados para a região geográfica de interesse; compatibilização dos dados para um sistema geodésico de comum.

O processamento dos MDEs com as fontes do SRTM, ASTER, TOPODATA, COPERNICUS DEM e Alos Palsar serão obtidos no QGIS versão 2.18 com auxílio da aplicação TAUDEM.

A comparação dos dados físicos foi realizado por uma base de cartas vetoriais do IBGE para a região de São Carlos, que permita um adensamento geométrico, capaz de fornecer dados por intermédio de interpolação IDW com ponderação do inverso das distâncias (considerando os pontos mais próximos os mais similares). Geradora a camada de formato raster, utilizou-se a aplicação pont sampling tools do QGIS, pela camada vetorial em formato ponto.

Os arquivos vetoriais provenientes do IBGE em escala de 50.000 estão disponíveis no formato de vetores consolidados em ferramentas CAD, para tanto, necessitou-se converter de dgn para shapefile (MicroStation® para ESRI®), na aplicação OSGeo4W, personalizou-se um novo Sistema de Coordenadas em função da SRC Córrego Alegre 23S e alterar a unidade de metro para km, coincidindo as curvas de nível limite municipal de São Carlos (das cartas Hipsométricas disponíveis no IBGE, de Ibaté, Descalvado, São Carlos, Corumbataí, Porto Pulador, Ribeirão Bonito e Luis Antônio).

Os vetores provenientes do Banco de dados do IBGE precisaram ser tratados por inconsistências: (i) curvas de nível segmentadas; (ii) bordas das cartas Ibaté, Descalvado, São Carlos, Corumbataí, Porto Pulador, Ribeirão Bonito e Luis Antônio não estavam no mesmo fuso, logo, foi necessária a reprojeção para Sistema Real de Coordenadas no Fuso 23 do Hemisfério Sul; (iii) perda de atributos das altitudes das curvas de nível, etapa que pode ser corrigida pelas ferramentas provenientes da Diretoria de Serviços Geográfico do Exército Brasileiro (DSG tools), com a aplicação Linha Cotadora, estabelecendo-se uma ordem de edição (ascendente ou descendente) com equidistância, de 20 metros (distância para as curvas de nível na escala de 50.000) , etapa foi fundamental para evitar acúmulo de erros da citada interpolação IDW.

Do mosaico formado pelos MDEs, SRTM, ALOS, TOPODATA, TERRASAR-X, COPERNICUS DEM e ASTER gerou-se com interpolação bilinear uma camada amostral gerada pelos vetores obtidos do IBGE, camada coincidente para que assim, os valores resultantes de altitude possam ser comparadas, para cada mosaico a camada amostral foi a mesma, tanto em número quanto posição geográfica.

O Modelo Digital de Elevação (MDE) gerado a partir dos dados dos diversos sensores SRTM, ASTER, TOPODATA, COPERNICUS DEM e Alos Palsar. Em que foi determinado recorte de camada em limite municipal de São Carlos. Os dados SRTM foram tratados com a aplicação TAUDEM do QGIS. O tratamento consistiu a princípio preencher as depressões e picos do MDE destoantes, que poderiam implicar na indicação da interrupção do fluxo d' água.

A aplicação TAUDEM foi capaz de gerar a partir dos dados matriciais de altimetria dos sensores SRTM, ASTER, TOPODATA, COPERNICUS DEM e Alos Palsar, subprodutos como mapa de declividade, orientação de vertente, mapa hipsométrico, mapa sombreado, delimitação de bacias hidrográficas, lineamento das redes de drenagem e curvas de nível.

Os valores das tangentes podem ser obtidos simplesmente, o processo ocorre por intermédio da inclinação média entre a célula central e as 8 células circundantes. Assim, devem ser utilizadas apenas as tangentes positivas, ou seja, que representem ângulos entre a célula central e as células de menor cota, situação tendencial que demonstra para que direção o fluxo se moverá.

O cálculo da malha de elevação de áreas planas pode ser considerada por intermédio da adoção das primeiras células analisadas na malha, algoritmos realizam o cálculo no sentido horário, de forma sucessiva e quando compartilham o valor da referida inclinação, o fluxo pode ser considerado com o fluxo adotado em células sucessoras. Ou seja, de acordo com os métodos de cálculo, ocorre a condução do fluxo para fora das zonas de maior elevação, seguindo a direção que elas determinam.

Inicialmente delimitando a extensão original das áreas planas e determinando limites, eliminando células espúrias favorece a aplicação do algoritmo, reduzindo o tempo de aplicação de cálculo.

No estudo, foram adotadas imagens onde as aplicações, com algoritmos numéricos de varredura, geraram codificação de fluxo assimilando-o à movimentação d'água em 8 diferentes direções, sendo que a codificação ocorre através dos dados de altimetria em que o fluxo de direcionamento são representados os pixels com maiores valores para os menores. No fim da etapa, ocorreu a identificação dos divisores de águas em que é possível definir a área de contribuição e a formação dos leitos fluviais. Assim, se um pixel central estiver cercado por pixels de maior altitude, a água permaneceria sem fluxo. Situação que também pode ser considerado uma inconsistência são os pixels circundados por pixels mais baixos provocam erros nos algoritmos do TAUDEM, pixels espúrios ou que constata com pixels vizinhos são consideradas discrepantes (anomalias), seja ela um ponto baixo ou alto e devem ser preenchidas para geração da linha de fluxo Direção de Fluxo é determinada normalmente por um algoritmo, o Deterministic 8 (D8) que considera a inclinação mais íngreme para linha de fluxo, assim, a delimitação de uma bacia hidrográfica é realizada pelo processamento de uma grade de pixels com a função de direção de fluxo seguida de acúmulo de fluxo.

Utilizando a aplicação point sampling tool, coletou-se do MDE informações Altimétricas para as diversas camadas rasterizadas obtidas de programas espaciais como o SRTM, ALOS, TOPODATA, TERRASAR-X, COPERNICUS DEM e ASTER, com diferentes resoluções espaciais 12,5, 30 e 90 m.

Assim, utilizando a equação (1) de cada sistema de aquisição de dados nos fornece uma análise visual da posição, dispersão, simetria, caudas e valores discrepantes (outliers) do conjunto de dados, que foram muito bem representados por um diagrama de caixas.

Por fim, como o grau de comparação altimétrica baseou-se em um conjunto de sete diferentes sensores orbitais, SRTM, ALOS, TOPODATA, TERRASAR-X, COPERNICUS DEM e ASTER, analisou-se estatisticamente os dados obtidos de altitude por meio da análise de variância (ANOVA) e com o teste T de Student aplicados a uma distribuição bi-caudal com nível de significância de 5%. Optou-se pela análise devido à origem amostral das altitudes obtidas no IBGE, apurou-se o binômio dos pares sensores (par à par) os dados de altimetria para verificar suas consistências posto que as altitudes obtidas do IBGE passaram por transformações vetoriais que podem atribuir erros aumentando grau de inconsistência, além do que os dados do IBGE são provenientes de Modelos Numéricos do Terreno (MNT) e passam por técnicas comuns às descritas nesta metodologia.

RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

O teste T de Tukey é um teste rigoroso de comparação rigoroso de média mais utilizado para comparar todo e qualquer contraste entre duas médias de tratamentos. Contudo, quando o experimento tem um número elevado de tratamentos, não é aconselhável o seu uso. O teste T é mais exato quando o número de repetições das médias dos tratamentos avaliados é igual.

A partir taxa de erro para os conjuntos em teste de 0,05 que o teste de Tukey determinou quais valores altimétricos são estatisticamente próximos. Em geral, na análise dos dados do processo todos os valores de, ou seja, a significância do resultado das análises mostrou-se verdadeira, ou seja, superior ao nível de significância de 5%. Destarte, os resultados da correlação deveriam apresentar 90%, indicando uma boa correlação entre os dados altimétricos obtidos das fontes de dados Alos Palsar, NASA DEM, TOPODATA, SRTM, COPERNICUS DEM, TERRASAR-X e ASTER.

A distribuição dos valores dados Alos Palsar, NASA DEM, TOPODATA, SRTM, COPERNICUS DEM, TERRASAR-X e ASTER obtidos dos 365 Pontos de Controle (PCs) oriundos do point sampling tools foram estatisticamente analisados, a discrepância, obtidos pela distribuição gráfica comparativa da posição amostral (figura 03) demonstra que os valores amostrais, representados pelo percentual do primeiro, segundo e terceiro quartil, correspondente a respectivamente a 25, 50 e 75 da amostragem não apresentam diferença considerável.

A dispersão dos dados, calculada pela diferença entre o terceiro e o primeiro quartil, que trazem a variabilidade de dados que não sofrem variabilidade dos dados discrepantes (outliers) demonstra que não há variação considerável entre os dados sensores.

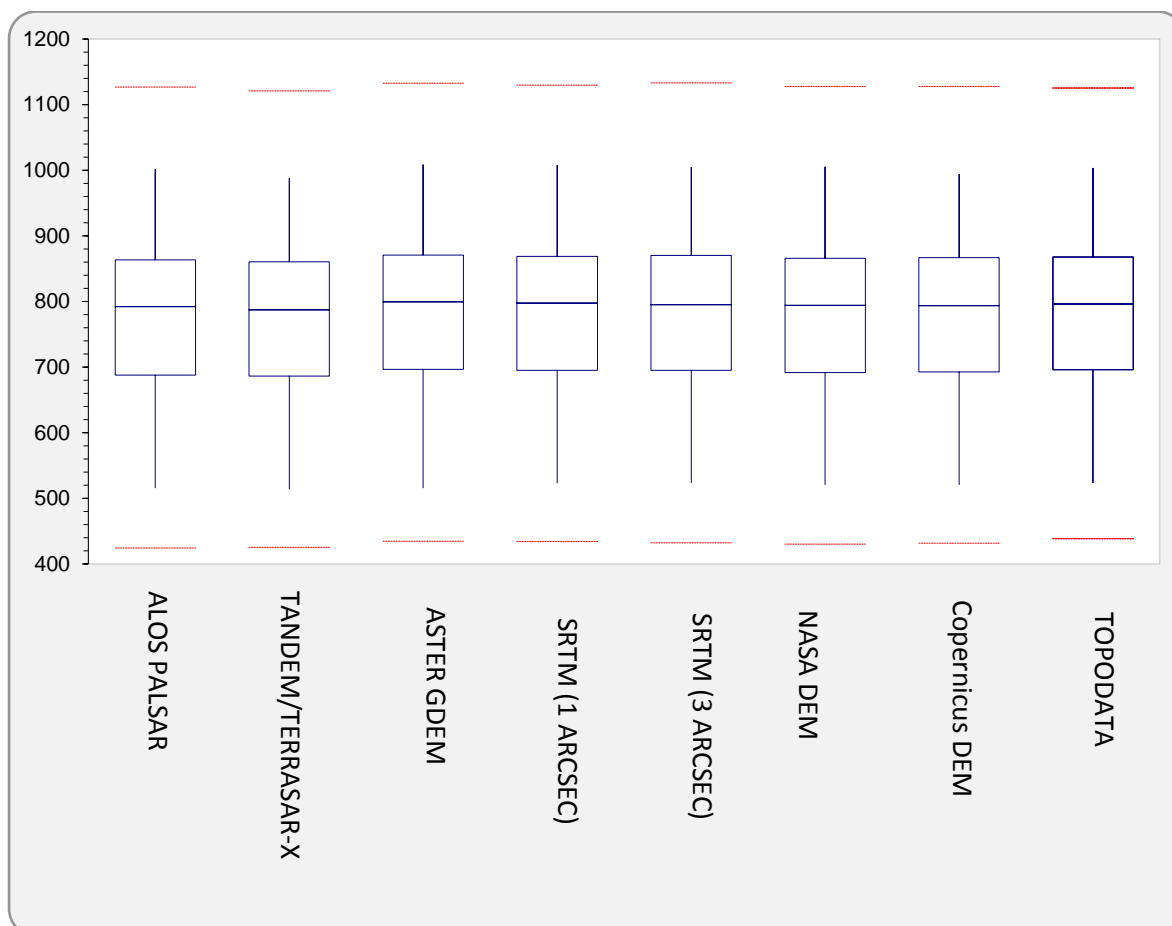


Figura 3. Análise de dispersão de dados sensores e outliers dados Alos Palsar, NASA DEM, TOPODATA, SRTM, COPERNICUS DEM, TERRASAR-X e ASTER.

Nos testes T de Student e Análise de Variância (ANOVA) com um nível de significância de 5%, tanto a avaliação par à par como na ANOVA, a comparação de dados altimétricos demonstrou-se com boa correspondência e para estes níveis de significância todas foram aceitas. Conforme os resultados do teste Binário (tabela 02) os dados provenientes do Sensor TANDEM apresentaram as mais baixas correlações, em contrapartida as melhores correlações ficaram com os dados da missão SRTM.

Tabela 2. Análise Binária, melhores correlações entre as altimetrias

Par sensor analisado	Correlação com teste T de Significância
TOPODATAXSRTM30	0,949707
NASADEMXCOPERNICUS	0,948365
NASADEMXSRTM90	0,921437
SRTM30XASTER	0,912894
TOPODATAXSRTM90	0,88877
COPERNICUSXSRTM90	0,87003
ASTERXTOPODATA	0,862797
SRTM30XSRTM90	0,839507
TOPODATAXNASADEM	0,811506
SRTM30XNASADEM	0,763522
COPERNICUSXTOPODATA	0,761269

Par sensor analisado	Correlação com teste T de Significância
ASTERXSRTM90	0,754789
ALOSXCOPERNICUS	0,720735
COPERNICUSXSRTM30	0,714256
ALOSXTANDEM	0,689449
ASTERXNASADEM	0,681284
ALOSXNASDEM	0,673538
ASTERXCOPERNICUS	0,633865
ALOSXSRTM90	0,603052
ALOSXTOPODATA	0,509248
ALOSXSRTM30	0,470777
COPERNICUSXTANDEM	0,447532
NASADEMXTANDEM	0,410658
ALOSXASTER	0,405764
SRTM90XTANDEM	0,356539
TOPODATAXTANDEM	0,287912
SRTM30XTANDEM	0,261411
ASTERXTANDEM	0,217205

Comparando subprodutos do MDE com as curvas de nível do IBGE Chagas et al (2010) apresentaram uma boa concordância com os MDEs ASTER e SRTM, no entanto, com os dados de altimetria do Sistema que é referência nacional, o IBGE em cartas de escala de 1:50.000 é muito baixa.

Em uma avaliação de Modelos Digitais de Elevação para delimitação de Bacias Hidrográficas dos sensores ASTER, SRTM e ALOS PALSAR por intermédio da aplicação de modelos estatísticos, tendo como Referência Pontos de Controle, Duarte et al (2019) ressalta que os erros de SRTM apresentaram de maior escala, por outro lado, no sistema ASTER constatou-se a presença de pixels espúrios ou nulos, e, dentre os erros os sensores ALOS PALSAR apresentaram os menores erros.

Por outro lado Braz, Xavier e Garcia (2018) em uma análise visual de subprodutos do MDE dos sensores SRTM (banda C e X), TopoData e ASTER GDEM, o sensor SRTM-X apresentou melhor definição das formações geomorfológicas com menor quantidade de ruído, quando comparado com o sensor ASTER GDEM.

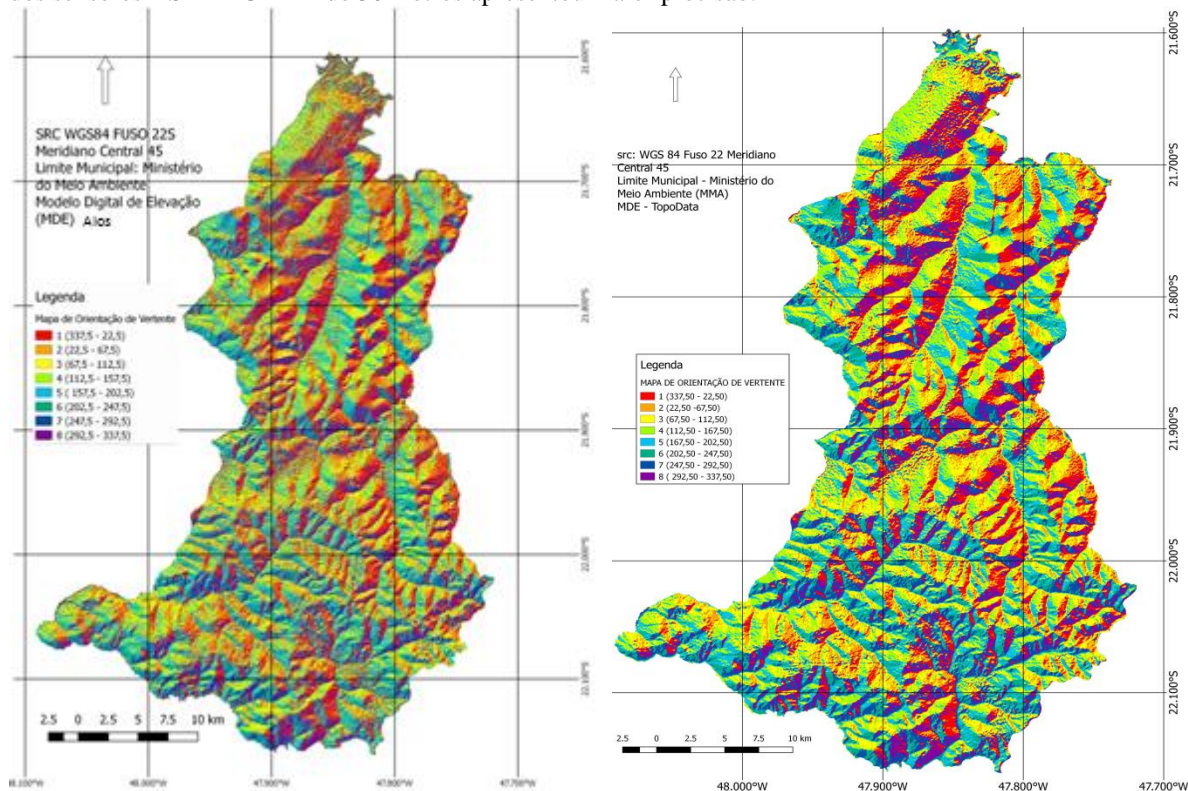
O MDE é um subproduto que permite a elaboração de uma série de produtos cartográficos para análise do meio físico, como mapa de declividade, orientação de vertente, mapa hipsométrico, mapa sombreado, delimitação de bacias hidrográficas, lineamento das redes de drenagem e curvas de nível.

Os resultados serão analisados em cada fonte (Alos Palsar, NASA DEM, TOPODATA, SRTM, COPERNICUS DEM, TERRASAR-X e ASTER), conforme o método proposto, de modo que seja possível apontar o MDE mais preciso para viabilizar a referida produção cartográfica, auxiliando ao mesmo tempo, o diagnóstico ambiental com planejamento sustentável dos recursos no município de São Carlos.

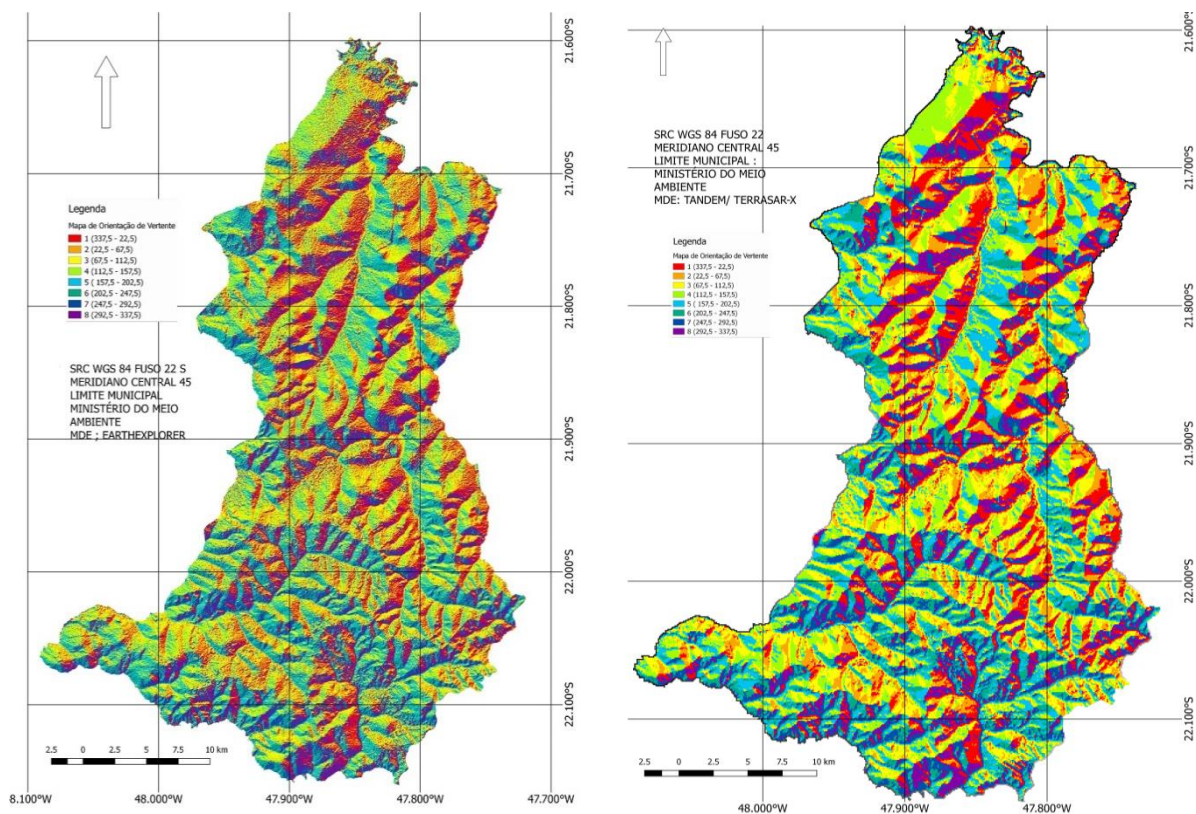
A quantificação da classificação apresentada para mapas de Orientação de Vertente classificados em oito classes: Norte ($0^\circ - 22,5^\circ$; $337,5^\circ - 360^\circ$), nordeste ($22,5^\circ - 67,5^\circ$), leste ($67,5^\circ - 112,5^\circ$), sudeste ($112,5^\circ - 157,5^\circ$), sul ($157,5^\circ - 202,5^\circ$), sudoeste ($202,5^\circ - 247,5^\circ$), oeste ($247,5^\circ - 292,5^\circ$), noroeste ($292,5^\circ - 337,5^\circ$) (figuras 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 e 11). Para dar maior representatividade para a coleta de dados, cuidado foi tomado para se estabelecer um elo visual no intuito de trazer equivalência de linguagens, assim, a paleta de cores adotada para Orientação de Vertente (figuras 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 e 21) foram os mesmos utilizados para representação gráfica.

Os Modelos Digitais de Elevação apresentam diversas aplicações no ramo das geomorfologias. Entretanto, é muito importante avaliar as vantagens e as limitações de cada, buscando-se os melhores resultados conforme estudo realizado. Em um estudo de análise de risco por deslizamento Meena e Nachappa (2019) utilizando três

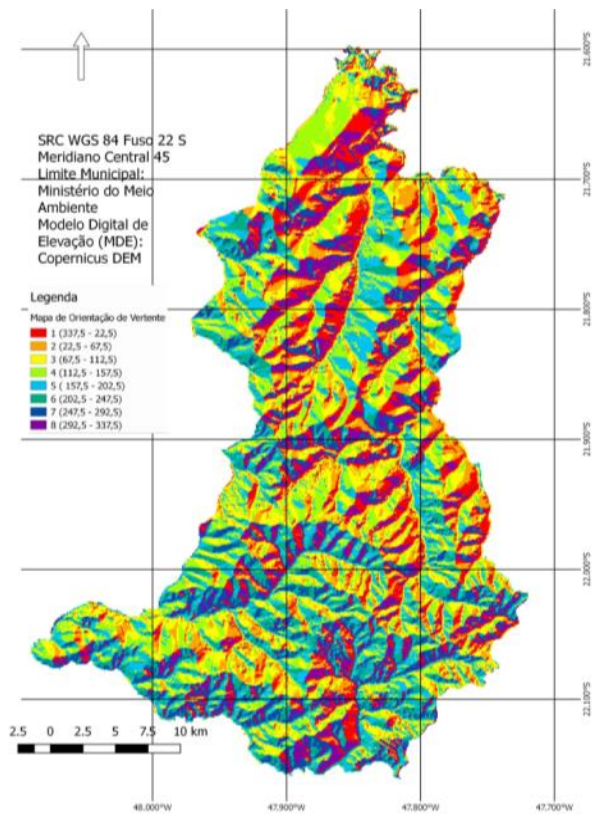
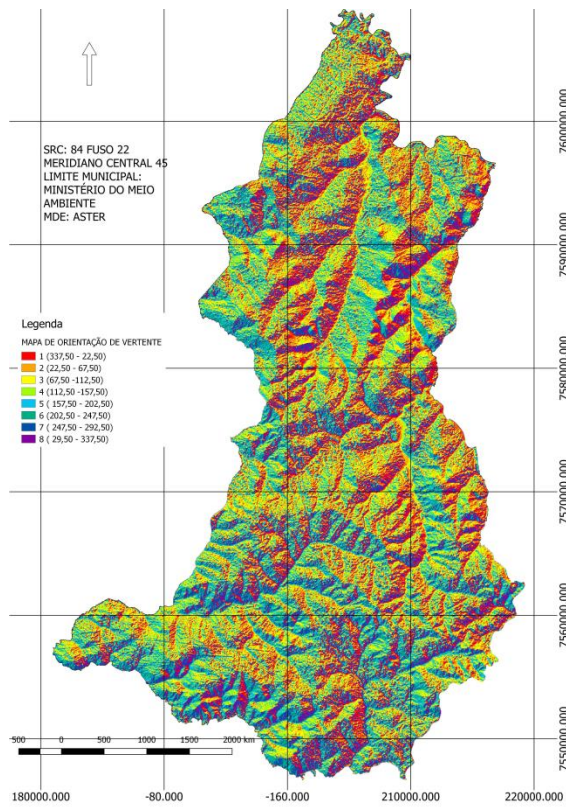
fontes sensores SRTM, ALOS PALSAR e ASTER GDEM, diferentemente do que já foi apresentado, os dados dos sensores ASTER GDEM de 30 metros apresentou maior precisão.



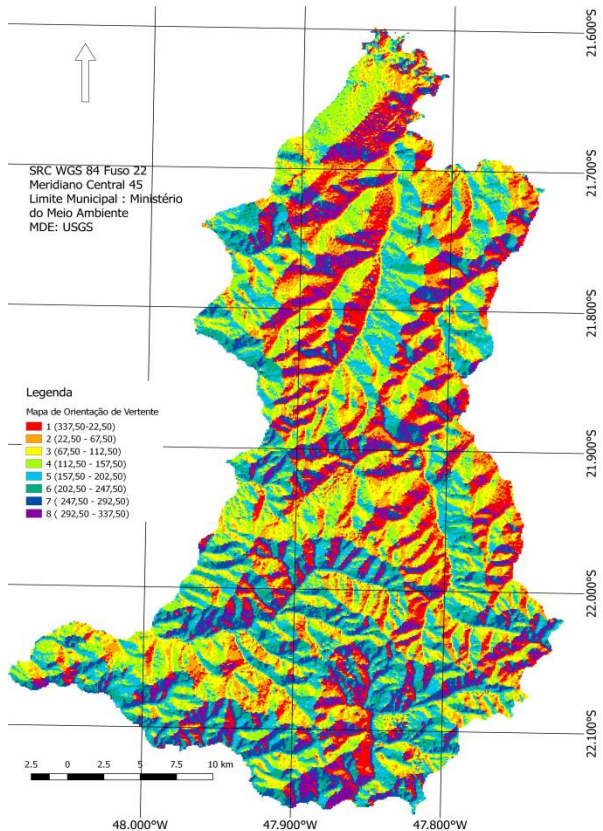
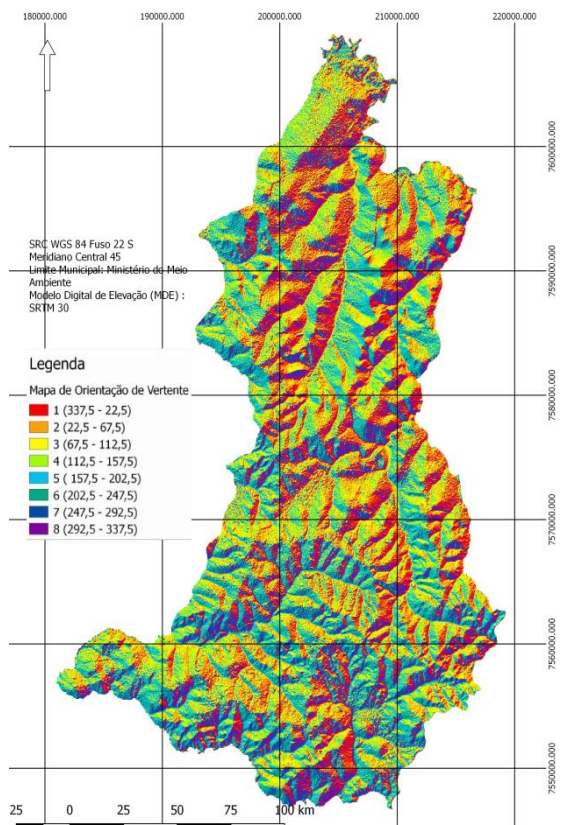
Figuras 4 e 5. Mapa de Orientação de Vertente e área Sensor Alos/Palsar e TOPODATA



Figuras 6 e 7. Mapa de Orientação de Vertente e área Sensor NASADEM e TANDEM/TERRASAR-X



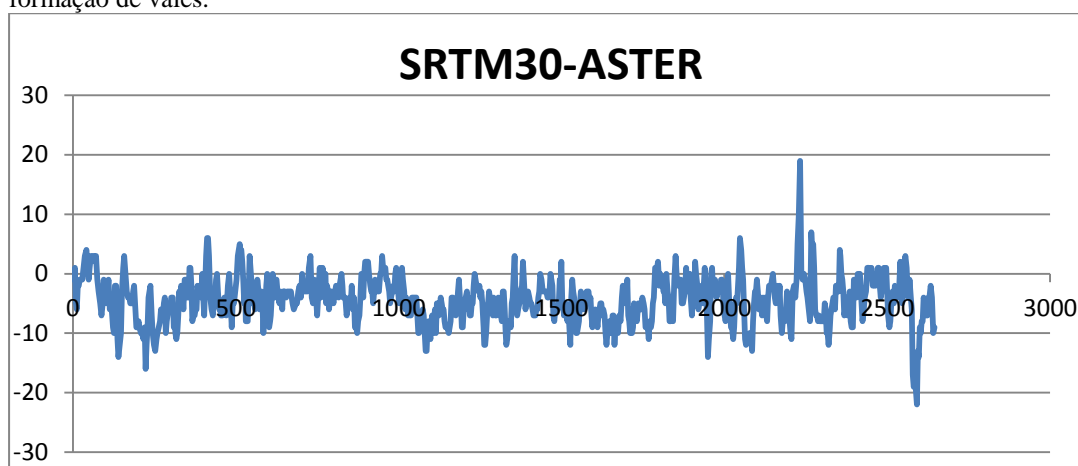
Figuras 8 e 9. Mapa de Orientação de Vertente e área Sensor ASTER GDEM e Copernicus DEM



Figuras 10 e 11. Mapa de Orientação de Vertente e área Sensor da missão espacial SRTM 30 e 90

O uso de diferentes DEMs no processo de delimitação de bacias hidrográficas geram incertezas que são transferidas diretamente para os resultados da modelagem hidrológica e de qualquer subproduto, como o estudo de erosão, esquemas de restauração em bacias hidrológicas e outros estudos hidrológicos que dependem da área de drenagem. Portanto, os erros na delimitação da bacia hidrográfica, deveriam ser quantificados quanto à incerteza admitida, testando os resultados derivados de um DEM com resultados derivados de outro DEM (KEYS E BAADE, 2019).

Alguns erros na detecção podem estar relacionados à aquisição e dos Satélites de Abertura Sintética, pode existir certa predilação dos sensores conforme a geometria e orientação, Solberg, Astrup e Weydahl (2013) indicaram em um estudo de diminuição da altura de superfície de dossel arbóreo com a análise combinada de Modelos oriundos do SRTM e TANDEM-X podem mudar na obtenção do Modelo de Superfície, conforme a predominância de aquisições SRTM, devido a orientação do ônibus Espacial Endeavour que estava voltado para o Norte, em comparação o TANDEM-X estava voltado para Leste. Situação mais evidente em relevos montanhosos, o que pode ser comprovado na operação matricial de subtração, que pode ser mais evidenciado pelo Binômio ASTER-SRTM (figura 12), do traçado do talvegue de maior extensão de São Carlos (da nascente à foz) (fig 13) os outliers ocorrem em formações de relevo abruptas, relevos de montanhas ou na formação de vales.



Figuras 12. Operação Matricial de Subtração dos MDEs formados pelo binário ASTER-SRTM



Figuras 13. Traçado do talvegue de maior extensão de São Carlos (da nascente à foz)

Paradella, Mura e Gama (2021) explicam o funcionamento de Radares de Abertura Sintética e seus usos de deformações dos terrenos (microtopografia e macrotopografia) e salienta que o imageamento por Sistemas de radares em razão de operar em visada lateral e com fonte de emissão e recepção no mesmo alinhamento apresentam distorções geométricas únicas justificando a ocorrência do deslocamentos para as fontes sensoras com a maior resolução espacial (ALOS PALSAR e NASADEM) e tornam legítimas afirmações dos efeitos da distorção, como o encurtamento de rampa, inversão de relevo e sombra de radar, situação que pode ser sanada com a visada e imageamento em NADIR oposto para diminuir efeitos.

Miliarensis (2008) obteve mapa de Orientação de Vertente de dados de fonte do Sensor SRTM e estabelece uma relação de domínio de uso e ocupação do solo estabelecendo que a neve, floresta, zonas arbustivas e grama possuíam diferenças na elevação conforme a altura média de elevação, assim, ressalta-se que estes tipos de sensores possuem diferenças significativas, na ordem de metros e que não podem garantir a precisão centimétrica ou milimétrica que certas obras de saneamento necessitam. Do estudo, nota-se a subestimação dos dados altimétricos e o aumento nas vertentes, no sentido horário respectivamente. SE, S, SW, W e NW das quatro classes citadas.

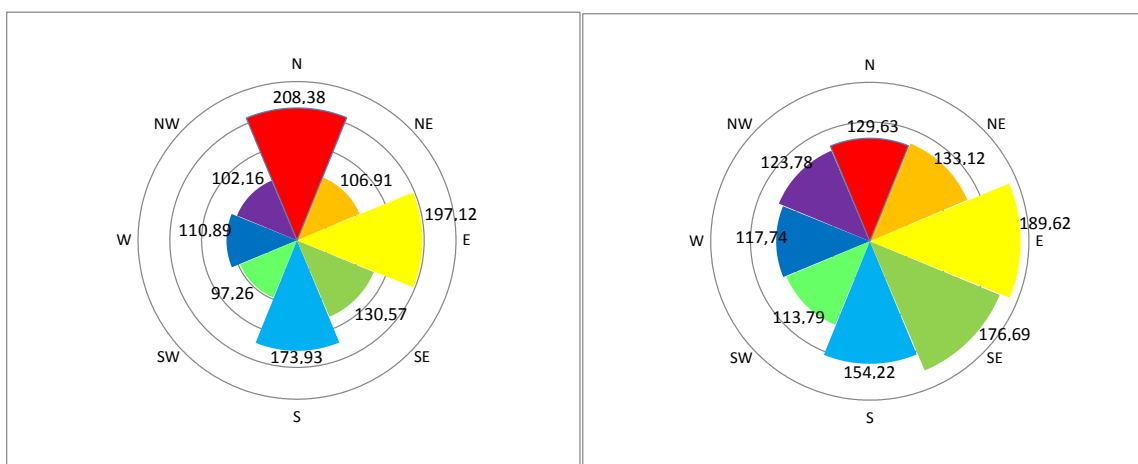


Figura 14 e 15. Relação de Orientação de Vertente e área Sensor Alos/Palsar e TOPODATA

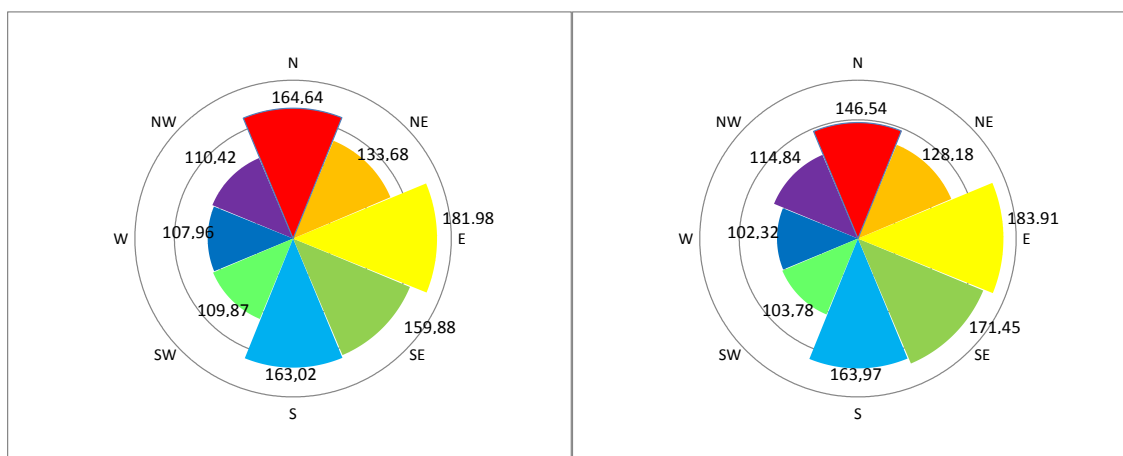


Figura 16 e 17. Relação de Orientação de Vertente e área Sensor SRTM (1 arcsec) e (3-arcsec)

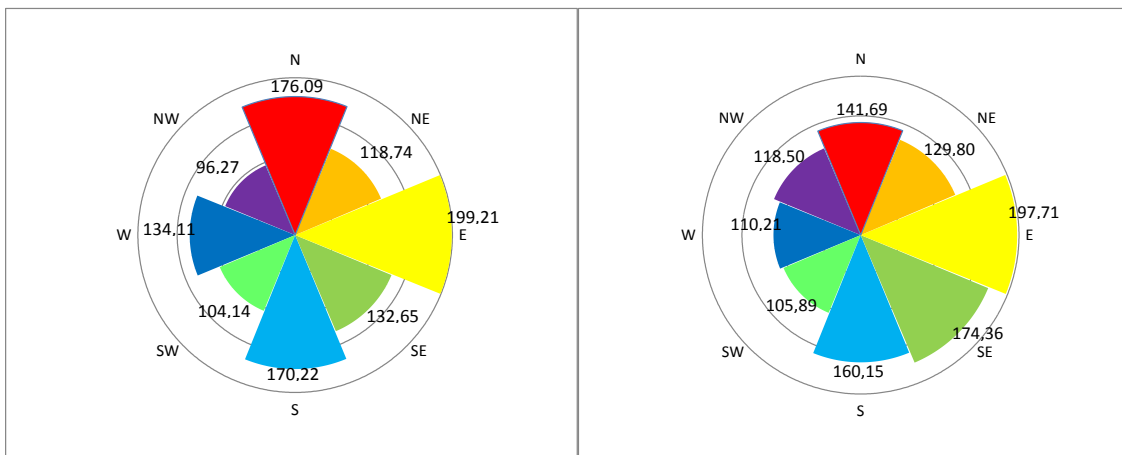


Figura 18 e 19. Relação de Orientação de Vertente e área Sensor ASTER GDEM e Copernicus DEM

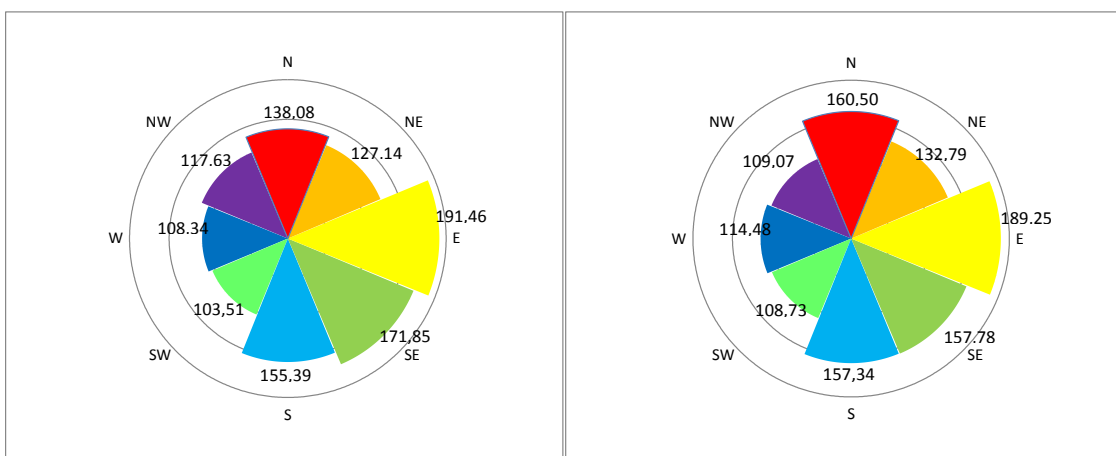


Figura 20 e 21. Relação de Orientação de Vertente e área Sensor TANDEM/TERRASAR-X e NASADEM

CONCLUSÕES

Tanto a análise de variância quanto a física dos subprodutos e estudo de dispersão e assimetria pela plotagem do diagrama de extremos e quartis demonstram que a hipótese de desigualdade entre os valores altimétricos é rejeitada. Contudo, as operações matriciais apontam diferenças entre os binômios formados da comparação de pares sensores.

O estudo de dispersão indica que os valores de altimetria estatisticamente não são desiguais, por outro lado, a Análise de variância com os testes de significância $p > 0,05$, indica que não se pode confirmar que as médias amostrais sejam também não sejam desiguais. Considera-se neste aspecto, o tamanho amostral dos pontos de controle pode ser não suficiente para detectar hipótese. Com a Análise de Variância que não acusou diferenças significativas, conclui-se apenas que não houve evidência suficientemente forte para provar que essas diferenças são significativas numericamente

A maior semelhança entre os valores são da comparação entre os instrumentos SRTM, TopoData e NASADEM e maior disparidade entre SRTM ASTER GDEM. Neste aspecto é importante reafirmar que os dados altimétricos disponíveis para download de TopoData são provenientes de dados oriundos da interpolação de dados da missão SRTM 90, sendo que o testes de comparação de cada um binômio estatístico ou matricial não possuem diferenças significativas.

Conclui-se neste trabalho que a melhor escolha entre os Binômios dos sensores são os dados provenientes do NASADEM, tanto pela sua melhor resolução espacial (com exceção de ALOS Palsar), quanto pelo resultado proveniente da análise quantitativa e visual dos subprodutos dos MDEs, como a Orientação de Vertentes.

A revisão de literatura de estudos comparativos de MDEs demonstram que ao afirmar o melhor produto a cada trabalho, autores manifestam predileção por um sistema que apresentou resultados coerentes conforme as finalidades dos dados e das necessidades de cada um e do local aplicado. Há predileção pelos dados de SRTM por sua distribuição gratuita e cobertura global. Depois nota-se certo favoritismo para os dados de ALOS PALSAR por sua melhor resolução espacial, no entanto, neste último sensor não foi possível observar eficiência na acurácia posicional, fato observado mais uma vez no binômio da análise matricial.

Quanto às comparações visuais e a estatística descritiva dos instrumentos, concluímos a pertinência quanto à similaridade entre SRTM 30, TopoData e NASADEM, e a maior diferença entre ASTER GDEM e TANDEM/TERRASAR-X. Acredita-se que a maior diferença ocorreu devido ao processo de constituição do MDE e principalmente pela resolução espacial de cada instrumento.

Para posteriores trabalhos, recomenda-se a realização de diferentes testes, para diferentes regiões. Cabe ressaltar ademais, que, os resultados (e o p-valor) podem ser influenciados pela quantidade de amostras, que em outros estudos pode/deve ser diversificada da quantidade utilizada. O presente trabalho serviu para direcionar os procedimentos metodológicos para futuros estudos analíticos desta natureza e contribuir para nortear novos caminhos de exploração de valores altimétricos de MDEs e por conseguinte realizar as melhores escolhas para os projetos básicos de saneamento básico.

As características locais, tais como: formações abruptas no terreno, cobertura vegetal nativa densa não contribuem para a extração de atributos altimétricos e locais com boa precisão na área de estudo, pois tais características cooperam para uma maior incidência de erros, invariavelmente do método de aquisição de imagens que em que cada MDE e seus subprodutos foram, por conseguinte obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABRAHÃO, Nagib. Aplicações GIS para empresas de Saneamento Básico. São Paulo: Abes, 2020. 441 p
2. AVALIAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO EXTRAÍDOS DE IMAGEM ALOS/PRISM E COMPARAÇÃO COM OS MODELOS DISPONIBILIZADOS GRATUITAMENTE NA WEB. Mato Grosso do Sul: Geociências, v. 31, n. 4, 2012. Mensal. Disponível em: <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/GEOSP/article/view/7222>. Acesso em: 01 out. 2020.
3. AVALIAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO PARA APLICAÇÃO EM UM MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS. Campina Grande, Agriambi, v. 14, n. 2, 28 ago. 2009. Mensal. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662010000200014. Acesso em: 01 out. 2019
4. BRASIL. Congresso. Senado. Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. 1. ed. Brasília, DF: Casa Civil, 20 jun. 1984. Disponível em: http://legislacao.planalto.gov.br/legisla/legislacao.nsf/Viw_Identificacao/DEC%2089.817-1984?OpenDocument. Acesso em: 01 out. 2019
5. BRAZ, Adalto Moreira. Análise da diferença entredados altimétricos em uma bacia hidrográfica através da comparação entre modelos digitais de elevação. Ateliê Geográfico, Goiânia, v. 12, n. 1, p. 71-96, abr. 2018. Mensal. Disponível em: <https://www.revistas.ufg.br/atelie/article/view/41467/25976>. Acesso em: 05 dez. 2020.
6. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Análise Morfométrica de Bacia Hidrográfica – Subsídio à Gestão Territorial Estudo de caso no Alto e Médio Mamanguape. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2012. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/84896/1/0000010346-BPD-Analise-morfometrica.pdf>. Acesso em: 01 out. 2019
7. INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). TopoData: banco de dados geomorfométricos do brasil. Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil. 2008. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/index.php>. Acesso em: 01 fev. 2021.

8. Management. International Journal Of Environmental Research And Public Health, [S.L.], v. 16, n. 21, p. 4245-4266, 1 nov. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph16214245>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1660-4601/16/21/4245/htm>. Acesso em: 24 set. 2020
9. MILIARESIS, George C. The Landcover Impact on the Aspect/Slope Accuracy Dependence of the SRTM-1 Elevation Data for the Humboldt Range. Sensors. Rion, p. 3134-3149. 15 maio 2008. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27879870/>. Acesso em: 05 dez. 2020
10. CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DE MONITORAMENTO POR SATÉLITE (Campinas). Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA).TERRA:TERRA – Earth Observing System (EOS). 2013. Disponível em: <https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/sat/conteudo/missao_terra.html>. Acesso em: 01 out. 2019
11. DUARTE, Miqueias L. et al. Evaluation of digital elevation models in the delimitation of hydrographic basins in the south of Amazonas region. Journal Of Hyperspectral Remote Sensing. Sorocaba, p. 99-107. 8 maio 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/340242485_Avaliacao_de_Modelos_Digitais_de_Elevacao_na_delimitacao_de_bacias_hidrograficas_na_regiao_Sul_do_Amazonas. Acesso em: 05 dez. 2020
12. EGG, Giovanni Chagas; GRIPP JUNIOR, Joel; MEDEIROS, Nilcilene das Graças. GERAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE SUPERFÍCIE COMPOSTOS UTILIZANDO IMAGENS DO SENSOR PRISM/ALOS. Revista Brasileira de Cartografia, Viçosa, v. 5, n. 65, p. 951-966, 2013. Mensal. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/download/43873/23137/0>. Acesso em: 01 out. 2020.
13. FERRERO, Victor Olaya. Hidrología Computacional y Modelos Digitales del Terreno. -: -, 2004. 1 v.
14. KEYS, Laura; BAADE, Jussi. Uncertainty in Catchment Delineations as a Result of Digital Elevation Model Choice. Hydrology. Jena, p. 1-22. 31 jan. 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2306-5338/6/1/13/htm>. Acesso em: 05 dez. 2020
15. LITTIDEJ, Patiwat; BUASRI, Nuchanat. Built-Up Growth Impacts on Digital Elevation Model and Flood Risk Susceptibility Prediction in Muaeng District, Nakhon Ratchasima (Thailand). Water, [S.L.], v. 11, n. 7, p. 1496-1525, 18 jul. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w11071496>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/7/1496>. Acesso em: 24 set. 2020.
16. MENDONÇA JÚNIOR, Marcis Gualberto; ISSMAEL, Linda Soraya. Mito: Precisão e exatidão são sinônimos. x Fato: É importante entender os significados dos termos que relacionam os conceitos físicos e estatísticos com a mensuração em geoinformação. In: LUIZ UGEDA (São Paulo). Ordem dos Advogados do Brasil. Geodireito - Mitos e Fatos. São Paulo: Instituto Geodireito, 2020. p. 1-134.
17. Oliveira, P. T. S. Caracterização morfométrica de bacias hidrográficas através de dados SRTM. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Campina Grande. 2009. 819 à 825 Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662010000800005>. Acesso em: 01 out. 2019.
18. PARADELLA, Waldir Renato; MURA, José Claudio; GAMA, Fabio Funlan. Monitoramento DInSAR para mineração e geotecnia. São Paulo: Oficina dos Textos, 2021. 160 p.
19. POMPERMAYER, R; C. MODELAGEM HIDROLÓGICA TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO APLICADAS AO MODELO SCS – SOIL CONSERVATION SERVICE – CURVE NUMBER. 2013. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/IGCM-9QEM87>>. Acesso em: 1 jun. 2018.
20. PRECISÃO ALTIMÉTRICA DE MODELO DIGITAL DO TERRENO SOB A VEGETAÇÃO OBTIDO POR INTERFEROMETRIA DE RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA DE BANDA P. Rio de Janeiro:

- Bradar Aerolevanteamento, v. 61, n. 2, 01 dez. 2016. Semestral. Disponível em: <<https://rbg.ibge.gov.br/index.php/rbg/article/view/97/51>>. Acesso em: 01 out. 2019
21. SOLBERG, Svein; ASTRUP, Rasmus; WEYDAHL, Dan. Detection of Forest Clear-Cuts with Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) and Tandem-X InSAR Data. *Remote Sensing*, [S.L.], v. 5, n. 11, p. 5449-5462, 24 out. 2013. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs5115449>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/5/11/5449>. Acesso em: 15 dez. 2020
 22. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. Fundamentos do processamento interferométrico de dados de radar de abertura sintética. Natal: Inpe, 2009. 8 p. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v30n1/a05v30n1>>. Acesso em: 01 out. 2019
 23. TREVISAN, Diego Peruchi; MOSCHINI, Luiz Eduardo. DETERMINAÇÃO DA FRAGILIDADE AMBIENTAL DO MUNICÍPIO DE SÃO CARLOS, SÃO PAULO, BRASIL. *Geografia Ensino & Pesquisa*, [S.L.], v. 20, n. 3, p. 159-167, 29 dez. 2016. Universidad Federal de Santa Maria. <http://dx.doi.org/10.5902/2236499421915>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/312070404_Determination_of_areas_with_environmental_fragility_of_the_city_Sao_Carlos_Sao_Paulo_Brazil. Acesso em: 06 mar. 2021
 24. YE, Xuchun; GUO, Qiang; ZHANG, Zengxin; XU, Chongyu. Assessing Hydrological and Sedimentation Effects from Bottom Topography Change in a Complex River–Lake System of Poyang Lake, China. *Water*, [S.L.], v. 11, n. 7, p. 1489-1502, 18 jul. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w11071489>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/7/1489/htm>. Acesso em: 24 set. 2020.
 25. ZHANG, W.; MONTGOMERY, D. R. Digital Elevation Model Grid Size, Landscape Representation, and Hydrologic Simulations. *Water Resources Research*, v. 30, n. 4, p. 1019-1028, apr. 1994