

Comparação entre os Modelos Digitais de Terreno gerados por Radar em Banda P e LiDAR na Amazônia, um estudo de caso no Amapá (Brasil).

Comparison between Digital Terrain Models generated by P-Band Radar and LiDAR in the Amazon, a case study in Amapá (Brazil).

Carlos Rodrigo Tanajura Caldeira¹; Mhamad El Hage²; Mayara Cobacho Ortega Caldeira³; Eric Bastos Gorgens⁴; Jean Pierre Henry Balbaud Ometto⁵; Laurent Polidori⁶

¹ Universidade Federal do Pará (UFPA), St 01, Augusto Correa, Belém – PA, Brasil. Email: carlos.caldeira@ufpa.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7102-7735>

² Lebanese University, Geospatial Studies Laboratory, Tripoli, Lebanon. Email: mhamad.elhage@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8379-5600>

³ Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), Belém – PA, Brasil. Email: mayarac.caldeira@ufra.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2427-9363>

⁴ Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. Departamento de Engenharia Florestal. Diamantina/MG, Brasil. Email: eric.gorgens@ufvjm.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2517-0279>

⁵ Coordenação Geral de Ciências da Terra, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos/SP, Brasil. Email: jean.ometto@inpe.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4221-1039>

⁶ Centre d'Études Spatiales de la Biosphère (CESBIO), Toulouse, France. Email: laurent.polidori@ufpa.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6220-9561>

Resumo: O Modelo Digital de Terreno (MDT) é um importante produto usado em geociências, mas sua extração em áreas florestais densas ainda é um desafio. Uma das grandes dificuldades na extração de um MDT via sensores remotos é em áreas florestais densas, pois nestas áreas as informações geradas ficam degradadas, já que as técnicas mais utilizadas só conseguem medir a elevação do dossel e não do terreno, limitando a cartografia em áreas como a Amazônia. A técnica mais adequada para extração de um MDT é o LiDAR (*Light Detection And Ranging*) aerotransportado, porém há limitações de prazo e custo para grandes áreas. As ondas de radar de Banda P têm uma grande capacidade de penetração através da vegetação densa, tornando-a uma ferramenta promissora para modelagem digital do terreno em áreas florestais. Essa técnica foi usada para a última atualização da cartografia do estado do Amapá (Brasil). Este artigo tem como objetivo avaliar a qualidade geral de um MDT produzido usando interferometria radar de Banda P aerotransportado em relação a dados LiDAR (usados como referência) em 4 regiões do estado do Amapá, utilizando vários critérios. Além da comparação visual que confirma a semelhança geral dos dois produtos, foi avaliada a diferença em termos de elevação e declividade, com um erro médio em sua elevação de -0,52 m, enquanto possui um desvio padrão e RMSE médio abaixo de 3 metros, com uma diferença na declividade de aproximadamente -4° e um desvio padrão e RMSE médio de 4,74° e 6,14°, respectivamente. Este estudo fornece uma estimativa da precisão do MDT radar de Banda P, tanto em termos de elevação quanto de declividade, que são variáveis essenciais para caracterizar as formas do relevo.

Palavras-chave: Modelos Digitais de Elevação; Qualidade; Precisão; Radar; LiDAR.

Abstract: The Digital Terrain Model (DTM) is an important product used in geosciences, but its extraction in dense forest areas is still a challenge. One of the major difficulties in extracting a DTM via remote sensors is in dense forest areas, as the generated information becomes degraded due to the fact that the most commonly used techniques can only measure canopy elevation and not terrain elevation, limiting cartography in areas such as the Amazon. The most appropriate technique for extracting a DTM is airborne LiDAR (*Light Detection And Ranging*), but there are limitations of time and cost for large areas. P-band radar waves have a great capacity for penetrating through dense vegetation, making it a promising tool for digital terrain modeling in forested areas. This technique was used for the latest update of the cartography of the Amapá state (Brazil). This article aims to evaluate the overall quality of a DTM produced using airborne P-band radar interferometry in relation to LiDAR data (used as a reference) in 4 regions of the Amapá state, using various criteria. In addition to the visual comparison confirming the general similarity of the two products, the difference in terms of elevation and slope was evaluated, with an average error in elevation of -0.52 m, while having a standard deviation and average RMSE below 3 meters, with a difference in slope of approximately -4° and a standard deviation and average RMSE of 4.74° and 6.14°, respectively. This study provides an estimate of the accuracy of P-band radar DTM, both in terms of elevation and slope, which are essential variables for characterizing landforms.

Keywords: Digital Elevation Models; Quality; Precision; Radar; LiDAR.

1. Introdução

O mapeamento da superfície do terreno em áreas florestais é uma necessidade para as geociências. A obtenção de bons modelos digitais de terreno é fundamental para compreender o impacto de eventos naturais, para o planejamento de rotas de transporte e a identificação de áreas propícias para a construção de infraestruturas. Isso se torna ainda mais relevante nas complexas regiões de floresta tropical. Além de abrigar os principais repositórios da diversidade vegetal (FOODY, 2003 e THOMAS et al., 2004) e desempenhar um papel importante no ciclo global do carbono e nas mudanças climáticas (DIAZ et al., 2009), as florestas tropicais são também fontes essenciais de recursos naturais para as populações locais.

Na Amazônia, há uma baixa disponibilidade de cartas em grandes escalas, e as que existem necessitam de atualização. O Sensoriamento Remoto e a Fotogrametria são alternativas para obtenção de informações desses ambientes. Segundo Crosseto e Aragues (2000), a Fotogrametria possui técnicas já consolidadas e largamente utilizadas em várias aplicações de mapeamento. Todavia, para o mapeamento de áreas florestais densas, como na Amazônia, tais técnicas tornam-se pouco eficazes, pois os alvos imageados da superfície terrestre têm que estar diretamente no campo visual da câmara aérea, não podendo haver interferência de obstáculos superficiais, tais como interferências atmosféricas, cobertura de nuvens ou cobertura vegetal. Muitos países da região equatorial, assim como a Amazônia, apresentam um baixo índice de informação sobre os recursos naturais, com cobertura de nuvens quase perene ao longo do ano. Na Amazônia, ainda podemos incluir a presença de fumaça, o que limita a disponibilidade de dados ópticos adicionais (PARADELLA et al., 2001).

As imagens de RADAR (*Radio Detection And Ranging*), tanto aerotransportadas quanto orbitais, podem superar problemas como a atmosfera, que limita as imagens ópticas. Ambas ajudam a analisar a vegetação por seus componentes estruturais por não serem afetadas pela atmosfera (WOODHOUSE, 2005). Dentro das microondas, os diferentes comprimentos de onda do radar são ordenados em bandas, representadas pelas letras K, X, C, S, L e P, e possuem variação média de 1 a 75 cm (LOPES; LIMA, 2009).

Os sensores mais utilizados para a extração de Modelos Digitais de Elevação (MDE) usam um comprimento de onda curto, são sensíveis ao dossel e não ao terreno, semelhantes nesse sentido à Fotogrametria. Segundo Polidori et al. (2022), o grande problema desses dados é que a maioria dos MDT são, na verdade, MDS (Modelo Digital de Superfície, que se trata da representação dos dosséis em aglomerados de árvores) e, na maioria das aplicações desses modelos, os autores os utilizam como se fossem MDT.

Uma das técnicas mais precisas para a extração de um MDT é o LiDAR (*Light Detection And Ranging*), principalmente em áreas florestais onde o acesso via terreno é complexo. Porém, tal técnica ainda possui desafios logísticos para cobrir áreas extensas, o que causa custos elevados e prazos extensos. Outra alternativa é a tecnologia de interferometria radar da Banda P (HOFMANN et al., 1999). O grande comprimento de onda da Banda P, além de atravessar as nuvens, também consegue atravessar uma grande quantidade de vegetação, podendo atingir o solo da floresta (DUTRA et al., 2002). Atualmente, há apenas dados aerotransportados de radar na Banda P, não havendo dados orbitais. Há uma previsão de que um sensor radar na Banda P seja lançado com a missão Biomass da Agência Espacial Europeia (ESA) em 2024. A missão consistirá em uma plataforma de satélite de baixa órbita (LEO - *Low Earth Orbit*), com o objetivo de fornecer mapas globais da quantidade de carbono armazenada nas florestas do mundo (LE TOAN et al., 2011).

Como qualquer outro produto, a capacidade de um MDT atender aos requisitos do usuário é caracterizada por vários critérios de qualidade. Uma vez determinadas as características gerais do MDT (resolução, cobertura espacial, etc.), os principais requisitos dizem respeito à qualidade dos próprios dados, muitas vezes definida em termos de precisão absoluta ou precisão relativa da elevação (VIEL e MENDES JUNIOR, 2020; SIMÕES et al., 2021; CAPOANE, 2022; GOMES et al., 2022; MALINDI e ODERA, 2022)). Ainda se espera dos modelos digitais o respeito da geomorfologia relativo à precisão dos derivados da elevação, como declividade, aspecto, curvatura, dentre outros (POLIDORI e EL HAGE, 2020; CAPOANE, 2022; COLARES et al., 2022; EL HAGE et al., 2022). Os critérios de qualidade indicam que o modelo deve estar o mais próximo possível da posição do terreno real e que deve se parecer o máximo possível com o terreno real.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo comparar a elevação e declividade de Modelos Digitais de Terreno, extraídos por RADAR em Banda P e dados LiDAR em 4 regiões do estado do Amapá, no Norte do Brasil.

2. Materiais e Métodos

Área de estudo

A área de estudo é composta por quatro amostras que representam as regiões Norte, Sul, Oeste e Central do estado do Amapá, no Norte do Brasil (Figura 1). Essas amostras foram escolhidas por representarem a diversidade de paisagens do

estado do Amapá, na parte do Escudo das Guianas. Cada amostra possui aproximadamente 6 km². Nessas áreas, foram realizadas análises e medições sobre os dados altimétricos produzidos pelos sensores LiDAR (considerados como referência) e radar da Banda P. É uma paisagem típica da Amazônia com relevo acidentado, rede hidrográfica muito densa e cobertura florestal densa.

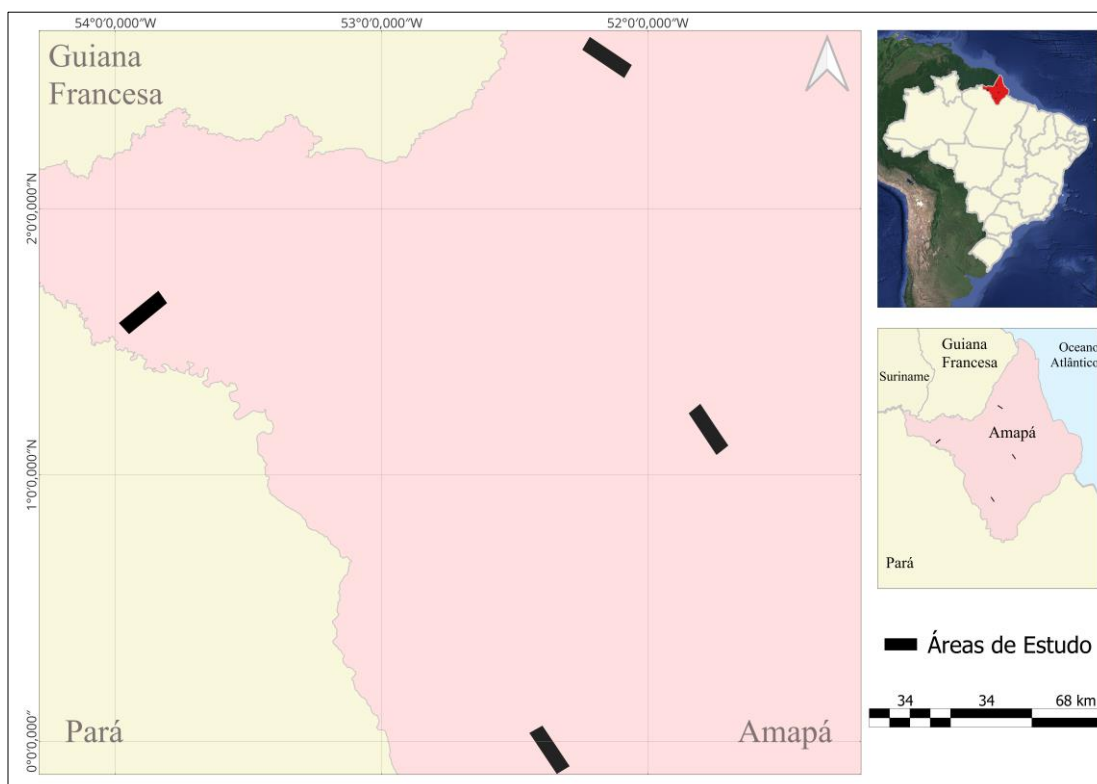


Figura 1– Área de estudo

Fonte: Autores (2022)

MDT LiDAR

Os MDT LiDAR, utilizados como referência, foram coletados entre 2016 e 2018 por meio das missões aéreas do projeto Estimativa de Biomassa da Amazônia EBA, conduzidas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e financiadas pelo Fundo Amazônia. A campanha LiDAR foi realizada com um sensor Trimble Harrier 68i (Trimble; Sunnyvale, CA) a bordo de uma aeronave Cessna. As precisões horizontal e vertical foram controladas para garantir valores inferiores a 1 m e 0,5 m, respectivamente. Ao todo, foram coletados 906 transectos, alguns dos quais foram intencionalmente sobrepostos com parcelas de campo conhecidas para permitir a calibração do modelo (GORGENS et al., 2019 e GORGENS et al., 2020).

As nuvens de pontos foram produzidas garantindo uma densidade mínima de 4 pontos/m², campo de visão de 45°, altitude de voo de 600 m e largura do transecto no solo de aproximadamente 494 m. O sistema de projeção utilizado foi o *Universal Transverse Mercator* (UTM), zona 22 N com o datum SIRGAS 2000 (GORGENS et al., 2019 e GORGENS et al., 2020). Os pontos que representam o solo, com densidade muito menor que 4 pontos/m² devido à densa cobertura vegetal, foram classificados e interpolados em uma Rede Irregular Triangular (TIN) (Figura 2). O MDT final foi reamostrado para uma grade raster de 5 m, a fim de ser compatível com os dados radar.

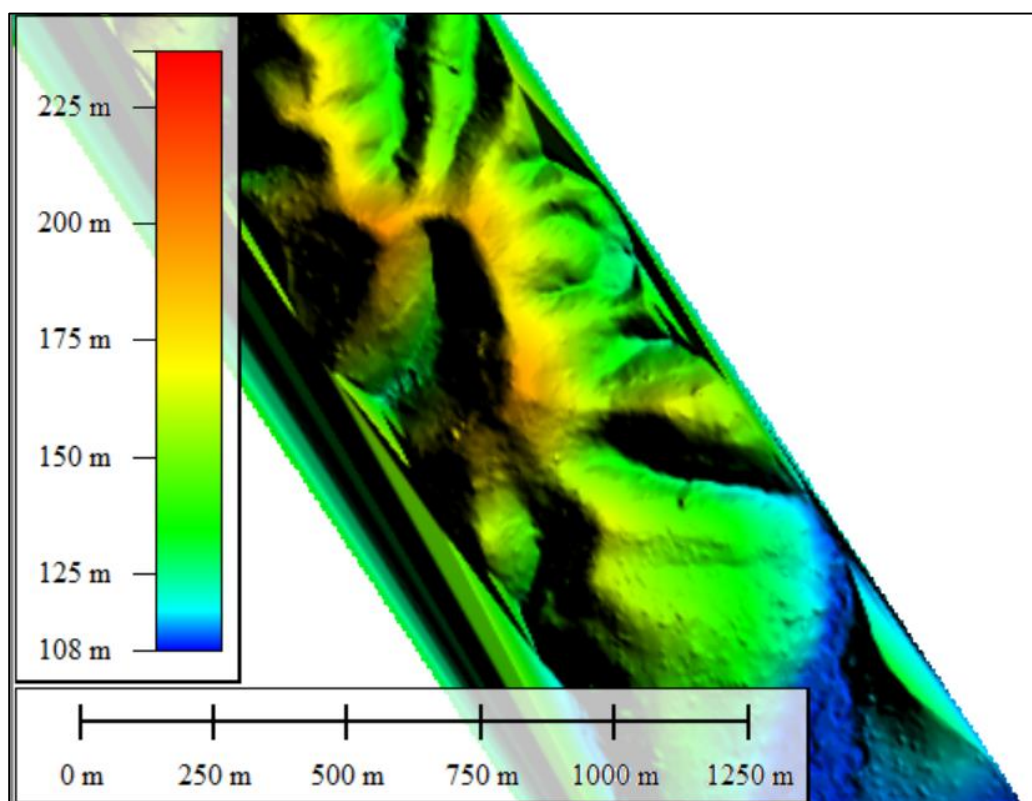


Figura 2 – Exemplo da visualização de um MDT LiDAR, interpolado por uma TIN da área Central de estudo.

Fonte: Autores (2022)

O processo de criação do MDT a partir de dados LiDAR demanda dois processos sequenciais de filtragem e interpolação. O processo de filtragem pode ser influenciado por fatores como densidade de pontos, declividade da área, ângulo de escaneamento, altitude do voo e pelo próprio algoritmo. Já o processo de interpolação é especialmente impactado pela densidade de retornos filtrados como pertencentes ao terreno. Assim, em áreas florestais, o erro de posição aumenta ligeiramente e erros de forma são criados devido ao efeito de interpolação em distâncias maiores, como mostrado na Figura 2 no caso da interpolação TIN, o que pode influenciar nos resultados da avaliação da precisão da declividade (EL HAGE et al., 2022). Apesar desses artefatos, a alta precisão geral do MDT LiDAR nos permite considerá-lo como uma referência para validar o MDT gerado pela Banda P. As campanhas radar e LiDAR ocorreram em datas diferentes, mas não houve qualquer alteração na paisagem do relevo.

MDT Banda P

Os dados de radar foram coletados por meio de uma parceria entre o Governo do Estado do Amapá (Secretaria de Estado do Planejamento (SEPLAN) e Secretaria de Estado do Meio Ambiente (SEMA)) e o Exército Brasileiro (Diretoria de Serviço Geográfico, Centro de Imagens e Informações Geográficas do Exército (CIGEx) e 4ª Divisão de Levantamento (4ª DL)). O objetivo principal foi a geração da Base Cartográfica Digital Contínua do Amapá (BCDCA), adquirida através de sistemas de radar de Abertura Sintética interferométrica aerotransportados.

Nesta campanha, foram gerados dados para interferometria em Banda P e Banda X, tendo sido produzidos Modelos Digitais de Terreno e de Superfície, respectivamente. Precedendo os voos, foram instalados refletores de canto em vários pontos para assegurar a adequada correção dos MDEs. As imagens SAR possuem um sistema de projeção UTM, zona 22 N com o datum SIRGAS 2000. Ambas as imagens estão no formato ".TIF" com resolução espacial de 5 m e radiométrica de 32 bits. O voo foi realizado com uma aeronave bimotor, com altura de voo entre 5.790 e 7.620 m e velocidade média de 360 km/h.

Comparação entre os MDT

Para avaliar a qualidade de um MDT, existem muitos critérios possíveis (POLIDORI e EL HAGE, 2020), porém neste trabalho foram considerados os critérios relacionados à precisão da altitude (avaliação da posição) e à precisão da declividade (avaliação do respeito às formas), denominados de método de validação externa (EL HAGE et al., 2022). Foram utilizados dados de referência externos para avaliar a posição do terreno modelado e a precisão da forma. A precisão de um MDT é avaliada de forma clássica pela caracterização da distribuição estatística da diferença entre as elevações do MDT gerado pela Banda P e do MDT gerado pelo LiDAR, utilizando-se indicadores como média, desvio padrão e erro médio quadrático (*Root Mean Square Error - RMSE*). O erro presente na elevação é uma combinação de erros grosseiros, sistemáticos e aleatórios e geralmente é considerado normalmente distribuído. A fim de caracterizar tal distribuição, foram gerados histogramas para cada MDT e para cada área de estudo.

Posteriormente, gerou-se a diferença de elevação e da declividade entre os MDT, para que a partir das diferenças possam ser realizadas as análises pontuais. Para a geração da declividade, utilizou-se o software Arcgis 10.5 no módulo Arcmap com a ferramenta Slope, calculada em graus decimais. Em toda análise entre objetos diferentes, há um certo percentual que é considerado outlier, ou seja, pontos em que estão com erros muito elevados. Esses erros são baseados em outros estudos similares por outros autores que utilizam a mesma técnica. Neste trabalho, utilizou-se um limiar de 10% de outliers dos maiores erros apresentados da diferença entre as altitudes e declividade, o que significa que os maiores erros presentes em nosso modelo, tanto positivo quanto negativo, foram retirados da amostra.

Após o cálculo da diferença das elevações e da declividade entre os MDT e a retirada da amostra dos maiores erros, calculou-se a média, desvio padrão e RMSE para as duas variáveis em cada área de estudo. Por fim, gerou-se a média e o desvio padrão de todas as áreas, representando um erro médio da região de estudo. O valor obtido caracteriza a qualidade da elevação, mas não revela necessariamente a incerteza da forma. As diferentes análises poderão mostrar se os dados altimétricos produzidos necessitam de correções antes de serem utilizados em outras aplicações que derivam dados de MDT.

3. Resultados e discussão

As análises geradas pela comparação dos MDT (Banda P e LiDAR), forneceram estimativas de qualidade referente a elevação e a declividade do terreno, em todas as áreas de estudo. Visualmente é possível perceber que o modelo digital de terreno obtido pelo LiDAR foi muito semelhante ao modelo obtido pelo radar (Figura 4). Tal semelhança é confirmada com a comparação entre os histogramas de elevações (Figura 5).

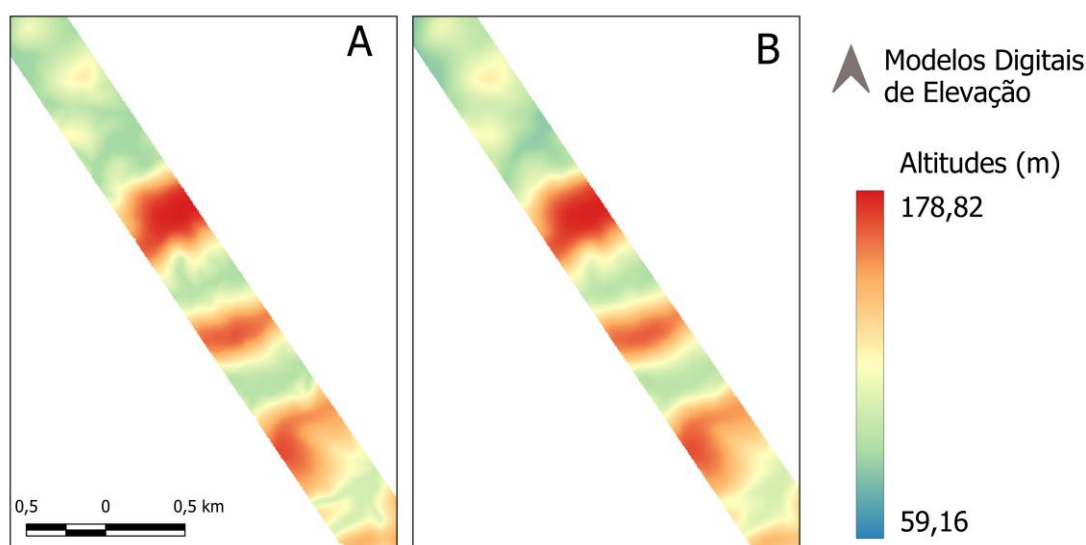


Figura 4 – Exemplo da visualização de um MDT LiDAR (a) e um MDT Banda P (b).

Fonte: Autores (2022)

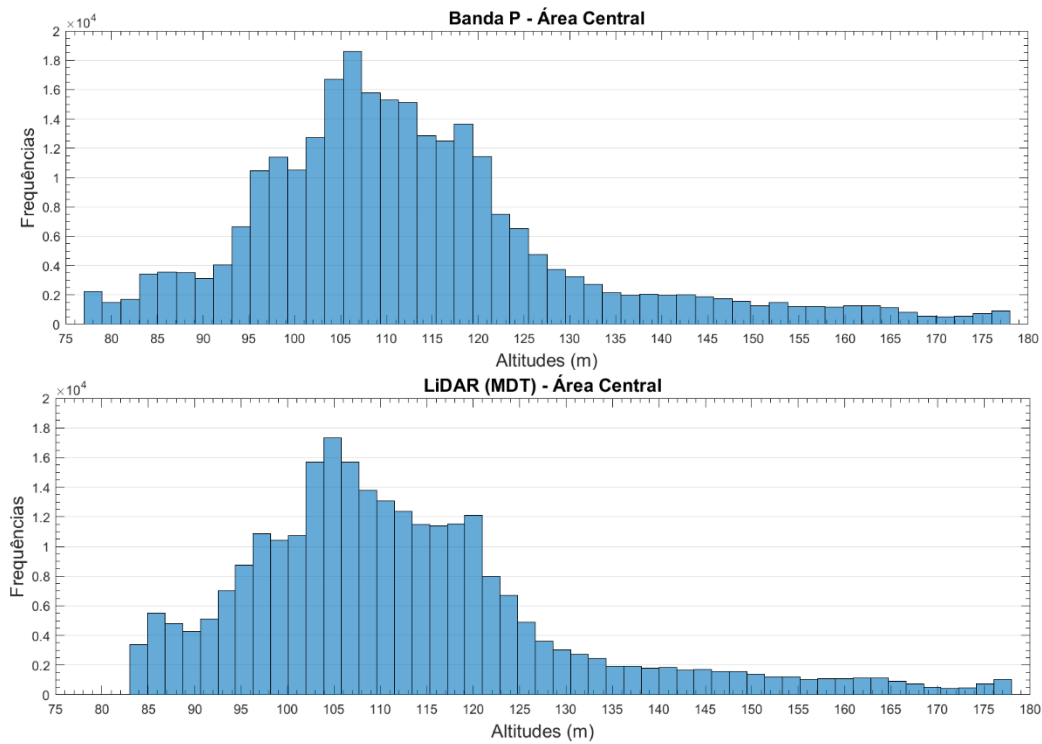


Figura 4 – Histogramas dos MDT gerados pela Banda P e LiDAR, respectivamente, da área de estudo central.
Fonte: Autores (2022)

O histograma das diferenças (Figura 5), para todas as regiões de estudo, tem um comportamento gaussiano, tanto para as elevações quanto para declividade, e os dados estatísticos são representados pelas Figuras 6 e 7.

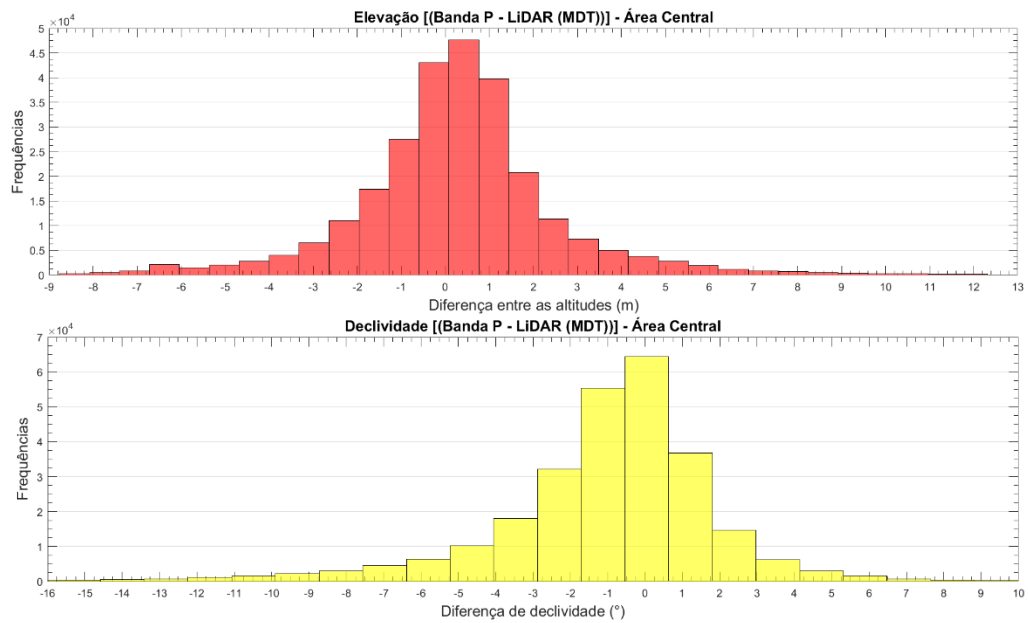


Figura 5 – Histogramas da diferença das elevações e declividade entre os MDT da Banda P e LiDAR da região central, respectivamente.
Fonte: Autores (2022)

Percebe-se que o valor médio entre a diferença das elevações tem uma variação entre 0,20 m e -1,18 m entre as 4 regiões. Porém mesmo considerando o de maior valor de diferença entre as elevações nota-se que este erro é relativamente baixo, ficando abaixo dos 2 m de erro, enquanto o desvio padrão é abaixo dos 4 metros, muito devido à precisão dos dados interferométricos da Banda P (Figura 6). A diferença entre os desvios padrão das áreas Norte, Sul e Oeste em relação a área Central justifica-se, pois, são áreas com uma vegetação muito densa fazendo com que os pontos LiDAR que tocaram no chão estão em uma porcentagem menor que da área Central. Entretanto, mesmo com um desvio padrão não uniforme entre as áreas, percebe-se o grande potencial dos dados por radar de Banda P em termos de precisão absoluta de elevação.

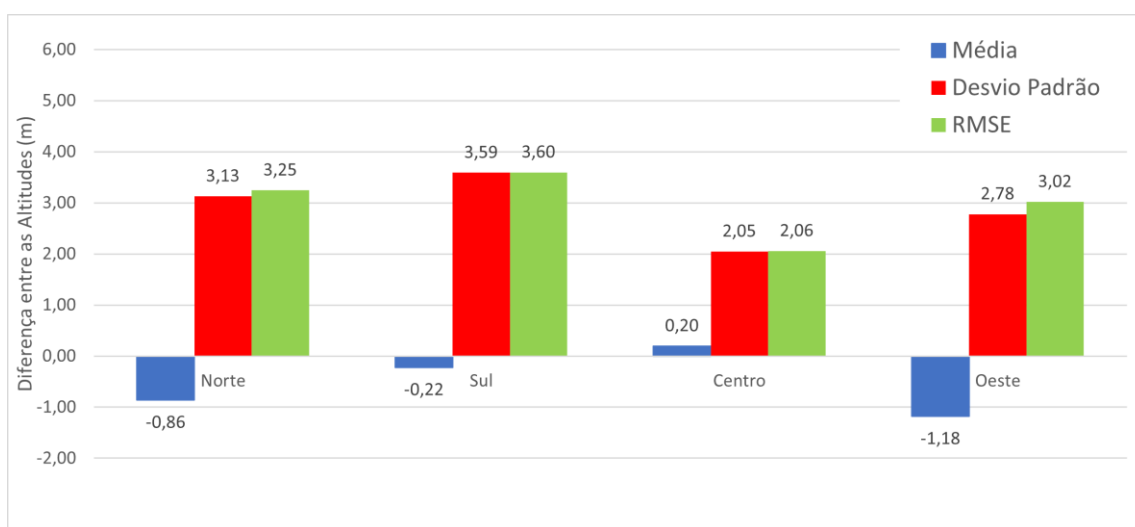


Figura 6 – Estatística da diferença de elevação entre as quatro áreas de estudo.
Fonte: Autores (2022)

Os resultados obtidos através da diferença entre a declividade das quatro áreas de estudo mostram que os valores da média (viés) têm uma variação entre -1° e -5° acompanhado do desvio padrão e RMSE (Figura 7), mostrando que os dados estão com bastante correlação tanto na elevação quanto na declividade.

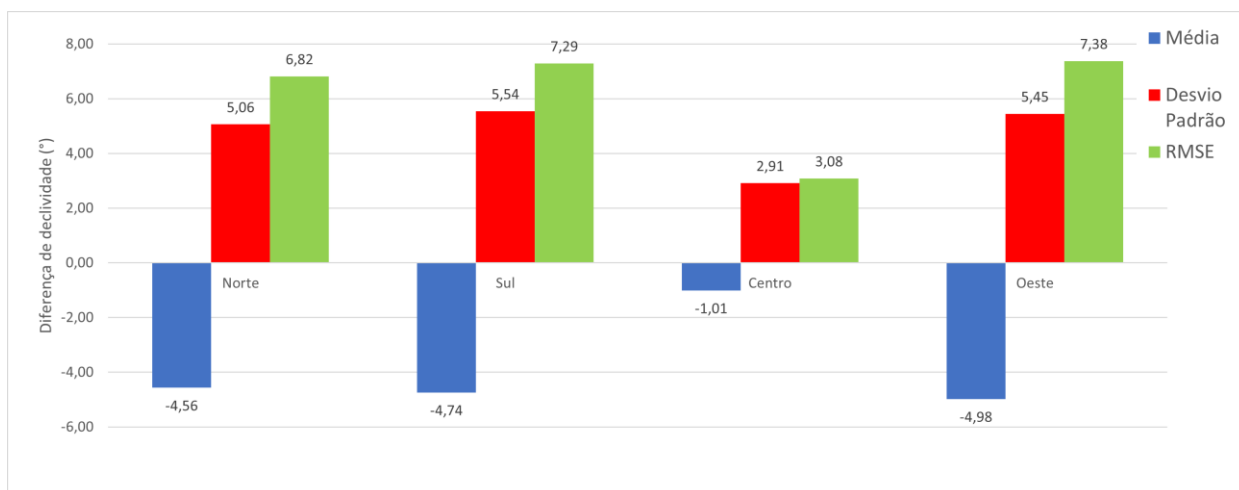


Figura 7 – Estatística da diferença da declividade entre as quatro áreas de estudo.
Fonte: Autores (2022)

De forma a comparar a forma do terreno nos dois MDT, gerou-se um perfil altimétrico de parte dos modelos. Nota-se na Figura 8 a grande proximidade entre os modelos em sua forma, porém também se percebem alguns micros relevos presentes no MDT gerado pelo LiDAR, que podem ocasionar poucos erros em sua declividade. Tais erros não inviabilizam a utilização do MDT LiDAR como referência pois nas estatísticas apresentadas nos gráficos anteriores mostra o grande potencial de seus dados.

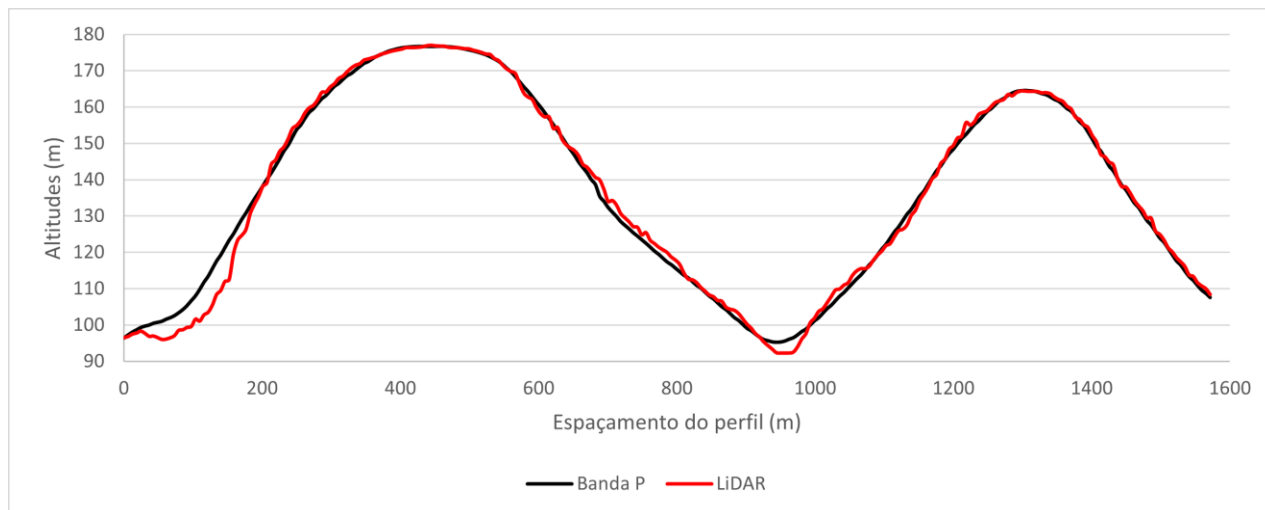


Figura 8 – Perfil de parte do terreno da área Central, representando o MDT da Banda P e LiDAR.
 Fonte: Autores (2022)

Para uma análise média da região de estudo pode-se verificar os dados estatísticos da Figura 9 (Média, Desvio Padrão e RMSE). Novamente nota-se um baixo valor médio entre a diferença das elevações, com um valor abaixo de 1 metro e desvio padrão e RMSE abaixo dos 3 m, mostrando a alta correlação entre os dois MDTs analisados, mostrando que a Banda P possui um alto potencial relacionado à precisão absoluta de sua elevação.

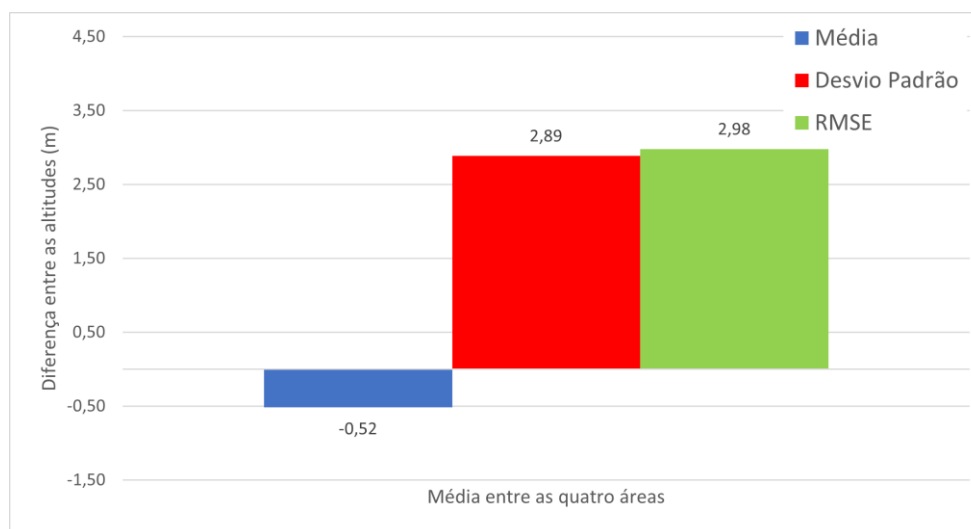


Figura 9 – Média de diferença em elevação entre as quatro áreas de estudo.
 Fonte: Autoria própria (2022)

Quando a declividade média é analisada, percebe-se na Figura 10 que a diferença média da declividade para as 4 regiões é de aproximadamente -4° , sugerindo que a interferometria radar de Banda P subestima as declividades, resultando, portanto, em um relevo mais liso, de forma suavizada, como também ilustrado na Figura 8, com um desvio padrão médio de $4,74^\circ$ e um RMSE médio de $6,14^\circ$. Os resultados da declividade possuem um valor mais elevado pela alta sensibilidade dos dados LiDAR na geração de seus dados, onde percebem-se pequenos micros relevos, não sabendo se realmente pertencem ao terreno ou são pequenos fragmentos de vegetação que ficaram no modelo no momento da filtragem, podendo interferir na declividade do terreno, ocasionando então o viés negativo. Esses valores são indicativos da precisão da declividade, critério de qualidade essencial para aplicação como análise geomorfológica ou extração automática da rede de drenagens.

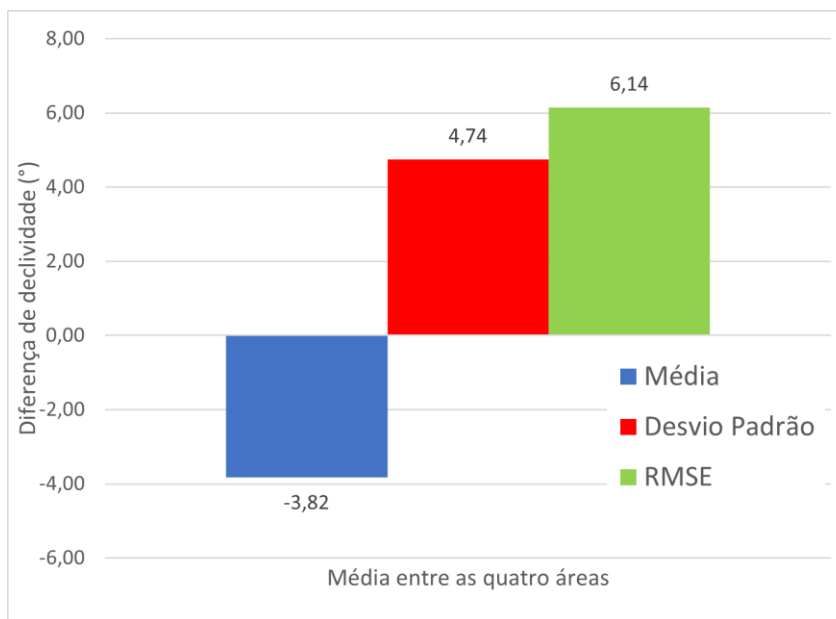


Figura 10 – Média de diferença em declividade entre as quatro áreas de estudo.
Fonte: Autores (2022)

Apesar destas limitações, este estudo serve de base para trabalhos futuros em áreas mais extensas e incluindo a detecção de inconsistências morfológicas nos MDT obtidos por interferometria radar de Banda P, com foco em configurações mais diversas, especialmente em termos de topografia do terreno, cobertura vegetal ou parâmetros de aquisição.

Este estudo confirma o grande potencial da utilização do Modelo Digital de Terreno gerado pelo radar em Banda P substituindo os Modelos Digitais de Terreno globais disponíveis de forma gratuita que representam um Modelo Digital de Superfície ao invés de um Modelo Digital de Terreno e, portanto, pouco adequados para áreas de florestas densas, como na Amazônia, assim como na geomorfologia, hidrologia e outras áreas das geociências.

4. Conclusão

A qualidade de um Modelo Digital de Terreno (MDT) é crucial para diversas aplicações, como modelagem hidrológica, planejamento urbano, análise de deslizamentos de terra e estudos de mudanças climáticas. É necessário analisar cuidadosamente todas as etapas do processo de geração do MDT, desde a coleta dos dados até a interpolação e reamostragem, levando em consideração a influência local da cobertura e declividade do terreno.

Uma das formas de avaliar a qualidade de um MDT é compará-lo com um produto de referência, neste caso o LiDAR foi utilizado por ser um dos produtos com melhores resultados em áreas com coberturas densas, porém em grandes extensões torna-se inviável. Nesse sentido, os dados radar da Banda P surgem como uma alternativa promissora para a representação da topografia do terreno em áreas de floresta de grandes extensões, como é o caso da Amazônia.

Foi realizada uma avaliação de precisão do MDT gerado pela Banda P em comparação com um levantamento LiDAR de referência. Os resultados mostraram um viés (erro médio) muito pequeno na elevação do MDT da Banda P, além de

um desvio padrão e RMSE médio abaixo de 3 metros deixando os resultados compatíveis com a PEC classe A na escala de 1:25.000. Em relação à declividade, foi observada uma diferença média de -4° com um desvio padrão e RMSE médio de $4,74^\circ$ e $6,14^\circ$, respectivamente.

Esses resultados indicam que os dados radar da Banda P possuem um alto potencial para representar com precisão a topografia do terreno sob florestas. Isso é especialmente relevante para estudos e aplicações em áreas de floresta tropical, onde a densidade de vegetação pode dificultar a obtenção de dados precisos através de técnicas como LiDAR. No entanto, é importante destacar que a qualidade dos dados radar da Banda P pode variar dependendo de vários fatores. Além disso, é necessário utilizar metodologias adequadas para a interpolação e reamostragem dos dados, a fim de evitar artefatos e erros no MDT final.

Em resumo, os resultados da avaliação de precisão mostram que os dados radar da Banda P são uma opção promissora para a representação da topografia do terreno em áreas de floresta tropical, complementando ou substituindo em algumas situações as técnicas tradicionais como LiDAR. No entanto, é necessário continuar aprimorando e validando esses dados em diferentes cenários e condições.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Secretaria de Meio Ambiente – SEMA/AP pela disponibilização, de forma gratuita, dos dados altimétricos da área de estudo, da Banda P. Os dados LiDAR foram financiados pelo Fundo Amazônia, e disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Eric Bastos Gorgens é apoiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES; Finance Code 001) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Processo 403297/2016-8 e 301661/2019-7).

Referências

- CAPOANE, V. Sensibilidade geomorfológica da drenagem e da superfície do terreno à fonte e à resolução espacial de modelos digitais de superfície e elevação. *GeoTextos*, 18(1). 2022. <https://doi.org/10.9771/geo.v18i1.48267>
- COLARES, I. S.; FERREIRA JUNIOR, J. C.; RODRIGUES, L. de S.; MAIA, S. A.; WACHHOLZ, F. Suscetibilidade Do Solo À Erosão Na Bacia Hidrográfica Do Rio Taramã-Açu (Amazonas – Brasil). *Caminhos de Geografia*, Uberlândia, MG, v. 23, n. 89, p. 367–389, 2022. DOI: 10.14393/RCG238960655.
- CROSETTO, M.; ARAGUES, F. P. Radargrammetry and SAR interferometry for DEM generation: validation and data fusion. *Anais SAR workshop: CEOS Committee on Earth Observation Satellites*. Toulouse: 2000
- DÍAZ, S.; HECTOR, A.; WARDLE, D.A. Biodiversity in forest carbon sequestration initiatives: not just a side benefit. *Curr. Opin. Environ. Sustain* 1: 55–60. 2009.
- DUTRA, L. V. *et al.* Assessment of digital elevation models obtained in Brazilian Amazon based on P and X band airborne interferometric data. *Anais International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. 2002
- EL HAGE, M.; VILLARD, L.; HUANG, Y.; FERRO-FAMIL, L.; KOLECK, T.; LE TOAN, T.; POLIDORI, L. Multicriteria Accuracy Assessment of Digital Elevation Models (DEMs) Produced by Airborne P-Band Polarimetric SAR Tomography in Tropical Rainforests. *Remote Sens.* 14, 4173, 2022. <https://doi.org/10.3390/rs14174173>
- FOODY, G. M. Remote sensing of tropical forest environments: towards the monitoring of environmental resources for sustainable development. *International Journal of Remote Sensing* 24: 4035–4046. 2003.
- GORGENS, E. B.; MOTTA, A. Z.; ASSIS, M.; NUNES, M. H.; JACKSON, T.; COOMES, D.; OMETTO, J. P. The giant trees of the Amazon basin. *Frontiers. Ecology and the Environment*, 17(7), 373–374. 2019.
- GORGENS, E. B.; NUNES, M. H.; JACKSON, T.; COOMES, D.; KELLER, M.; REIS, C. R.; OMETTO, J. P. Resource availability and disturbance shape maximum tree height across the Amazon. *Global Change Biology*. 2020. doi:10.1111/gcb.15423

- GOMES, F. C. M.; ZAIDAN, R. T.; ROCHA, C. H. B. Análise comparativa entre a aplicação de métodos de interpolação, para a geração de modelos digitais de elevação. *Revista Brasileira de Geografia Física*, [S.l.], v. 15, n. 5, p. 2448-2462, 2022.
- HOFMANN, C. *et al.* Multipath P-Band Interferometry – First Results. *Anais Canadian Symposium on Remote Sensing. Ontário, Canadá: 1999.*
- LE TOAN, T.; QUEGAN, S.; DAVIDSON, M.W.J.; BALZTER, H.; PAILLOU, P.; PLUMMER, S.; *et al.* The BIOMASS mission: mapping global forest biomass to better understand the terrestrial carbon cycle. *Remote Sensing of Environment*, 115: 2850-2860. 2011.
- LOPES, G. DE O.; LIMA, C. A. Características e aplicações das imagens SAR na identificação de alvos na Região Amazônica. *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Natal: INPE, abr. 2009
- MALINDI, M.; ODERA, P. A. A new digital elevation model over South Africa based on ground and satellite data. *Boletim de Ciências Geodésicas [online]*. 2022, v. 28, n. 03
- PARADELLA, W. R. *et al.* A Geração de Modelos Digitais de Elevação pela Estereoscopia de Radar: Conhecimento Atual e Resultados com Imagens RADARSAT-1 na Amazônia. *Anais X Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Foz do Iguaçu: 2001
- POLIDORI, L.; EL HAGE, M.; VALERIANO, M. D. M. Digital elevation model validation with no ground control: application to the topodata dem in Brazil. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 20, n. 2, p. 467–479, 2014.
- POLIDORI, L.; EL HAGE, M. Digital Elevation Model Quality Assessment Methods: A Critical Review. *Remote Sensing*. 2020, Vol. 12, Page 3522, v. 12, n. 21, p. 3522, 27 out. 2020
- POLIDORI, L. *et al.* Digital elevation modeling through forests: the challenge of the Amazon. *Acta Amazonica*, v. 52, n. 1, p. 69–80, 17 mar. 2022.
- SIMÕES, P. S.; GUIMARÃES, U. S.; CALDEIRA, C. R. T. Avaliação da Acurácia Vertical de MDEs de Fonte Aberta na Região Amazônica a Partir de Dados LIDAR. *Revista Brasileira de Geografia Física*, [S.l.], v. 14, n. 5, p. 2806-2821, set. 2021.
- TEIXEIRA, S. G. *Radar de abertura sintética aplicado ao mapeamento e reconhecimento de zonas úmidas costeiras*. Tese (Doutorado)—Belém: Universidade Federal do Pará, 9 dez. 2011.
- THOMAS, C.; CAMERON, A.; GREEN, R. *et al.* Extinction risk from climate change. *Nature* 427, 145–148 (2004). <https://doi.org/10.1038/nature02121>
- VIEL, J. A.; ROSA, K. K. da.; MENDES JUNIOR, C. W. Avaliação da Acurácia Vertical dos Modelos Digitais de Elevação SRTM, ALOS World 3D e ASTER GDEM: Um Estudo de Caso no Vale dos Vinhedos, RS – Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, [S.l.], v. 13, n. 5, p. 2255-2268, jul. 2020.
- WOODHOUSE, I. H. *Introduction to Microwave Remote Sensing*. 1st. ed. London, UK: Taylor & Francis, 2005.

