

Comparação de produtos altimétricos dos sensores Palsar/Alos e Lidar, a partir do modelo Sinmap

Comparison of altimetric products of Palsar/Alos and Lidar sensors from the Sinmap model

Comparación de productos altimétricos de los sensores Palsar/Alos y Lidar, a partir del modelo Sinmap

Recebido: 13/12/2020 | Revisado: 16/12/2020 | Aceito: 18/12/2020 | Publicado: 23/12/2020

Robson Rodrigues Quina

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7966-2717>

Secretaria Estadual da Educação do Espírito Santo, Brasil

E-mail: robquina@hotmail.com

Rômulo Montan Costa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7993-4302>

Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil

E-mail: romulocosta.ufjf@hotmail.com

Fabio de Oliveira Sanches

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5629-8350>

Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil

E-mail: fsanches73@gmail.com

Francisco Carlos Moreira Gomes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9074-1811>

Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil

E-mail: franciscocarlosmoreiragomes@gmail.com

Ricardo Tavares Zaidan

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5033-993X>

Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil

E-mail: ricardo.zaidan@ufjf.edu.br

Resumo

O estudo tem como principal objetivo analisar e mensurar a distribuição de Índices de Estabilidade a Escorregamentos, a partir da aplicação do modelo SINMAP, mediante o uso de dois produtos altimétricos: um proveniente do sensor PALSAR/ALOS e outro originado do

sensor LIDAR, em uma mesma área de estudo. Buscou-se avaliar se o produto do sensor PALSAR, apresenta uma resposta satisfatória e aceitável para a aplicação em modelos de predição de escorregamentos, em localidades que não possuam base de dados, carentes de informações. Foi constatado que apesar do produto PALSAR, não apresentar a mesma acurácia e detalhamento do LIDAR, ambos possuem diversas similaridades. Contudo, a avaliação da homogeneidade de dados por meio da aplicação do Coeficiente e Determinação (R^2) e do Coeficiente de Correlação de Pearson (r), bem como dos erros por meio do Erro Médio Absoluto (EMA), Erro Médio Relativo (EMR) e a Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM), demonstraram que ambos os produtos apresentam forte similaridade. Contudo, considerou-se que o MDE existente no PALSAR/ALOS, apresenta resultados aceitáveis e convincentes de serem aplicados na identificação de áreas susceptíveis a escorregamentos, em locais que não dispõe de uma base de dados.

Palavras-chave: Modelagem; MDE; Escorregamentos.

Abstract

The main objective of the study is to analyze and measure the distribution of the Sliding Stability Indices, applying the SINMAP model, using two altimetry products: One from the PALSAR / ALOS sensor and the other from the LIDAR sensor, in the same study area. We sought to evaluate whether the PALSAR sensor product presents a satisfactory and acceptable response for its application in landslide prediction models, in locations that do not have a database, lacking information. It was found that despite the PALSAR product, it does not present the same precision and detail as the LIDAR results, both have several similarities. However, the evaluation of the homogeneity of the data by applying the Coefficient and Determination (R^2) and the Pearson Correlation Coefficient (r), as well as the errors using the Mean Absolute Error (EMA), Relative Mean Error (EMR) and the mean square error (REQM), showed that both products show strong similarity. However, it was considered that the existing DEM in PALSAR / ALOS presents acceptable and convincing results to be applied in the identification of areas susceptible to landslides, in places that do not have a detailed database.

Keywords: Modeling; DEM; Landslides.

Resumen

El objetivo principal del estudio es analizar y medir la distribución de los Índices de Estabilidad de Deslizamiento, aplicando el modelo SINMAP, utilizando dos productos

altimétricos: Uno proveniente del sensor PALSAR / ALOS y otro originario del sensor LIDAR, en una misma área de estudio. Se buscó evaluar si el producto del sensor PALSAR, presenta una respuesta satisfactoria y aceptable para su aplicación en modelos de predicción de deslizamientos, en localizaciones que no cuentan con base de datos, carentes de información. Se encontró que a pesar del producto PALSAR, no presenta la misma precisión y detalle que los resultados del LIDAR, ambos tienen varias similitudes. Sin embargo, la evaluación de la homogeneidad de los datos mediante la aplicación del Coeficiente y Determinación (R^2) y el Coeficiente de Correlación de Pearson (r), así como los errores mediante el Error Absoluto Medio (EMA), Error Medio Relativo (EMR) y el error cuadrático medio (REQM), demostraron que ambos productos muestran una fuerte similitud. Sin embargo, se consideró que el MDE existente en PALSAR / ALOS, presenta resultados aceptables y convincentes para ser aplicados en la identificación de áreas susceptibles a deslizamientos, en lugares que no cuentan con base de datos detallado.

Palabras clave: Modelado; MDE; Deslizamientos.

1. Introdução

Existem, na natureza, vários tipos de movimentos de massa que se diferenciam a partir de condições físicas do local (Varnes, 1984). Os tipos e as classificações intrínsecas a esses fenômenos variam, segundo Selby (1993), conforme o material, modo de deformação, geometria da massa, conteúdo de água, velocidade e mecanismo do movimento.

No meio tropical, tal fenômeno se manifesta, principalmente, sob a forma de escorregamentos, os quais, quase sempre, se transformam em acidentes de grandes proporções, ocasionando a perda de inúmeras vidas humanas, além de grandes prejuízos econômicos (Nunes, 2015). Esses processos podem acontecer de forma natural ou induzida pelo homem.

Contudo, quando são caracterizados como eventos que trazem algum risco, relacionam-se principalmente a ocupação irregular de encostas (Fernandes & Amaral, 1996), com a retirada da cobertura vegetal e com a inserção de cortes de taludes sem a técnica apropriada para a implantação de moradias e de estradas.

Tais condições propiciam o surgimento de cenários que comprometem a qualidade de vida da população, ou seja, cenários marcados por riscos iminentes para os grandes centros urbanos, e também para cidades de pequeno e médio porte (Carvalho & Galvão, 2006).

Assim, conforme aponta Ahrendt (2005), verifica-se a necessidade de se adotar ações

intensas voltadas ao reconhecimento e ao entendimento dos mecanismos de instabilização nas áreas afetadas ou não por estes processos, e assim, diagnosticar os problemas existentes para que os mesmos possam ser evitados ou minimizados a partir da previsão de sua ocorrência.

Dentro desse contexto, diversos métodos que visam avaliar e identificar as áreas de ocorrência dos eventos relacionados à deflagração de escorregamentos têm sido desenvolvidos (Nery, 2011). Dentre eles, destacam-se aqueles correlacionados à utilização de modelos matemáticos e estatísticos, consolidados sobre bases físicas, estruturados por modelos hidrológicos e de estabilidade de encostas (Fernandes et al., 2001) que, em associação com o Geoprocessamento (Zaidan, 2017), constituem-se como um meio viável para previsão e redução das situações negativas geradas por estes processos.

No caso do Brasil, a tecnologia de modelagem de predição de escorregamentos com bases físicas tem sido amplamente utilizada. Porém, esbarra-se na indisponibilidade de bases topográficas com detalhe espacial necessário a esses modelos e sua possível aplicação em municípios menores, onde não há o arrecadamento tributário suficiente para cobrir os gastos com aerolevantamentos, por exemplo.

Em face ao exposto, o presente trabalho objetiva comparar, através da aplicação do modelo de predição de escorregamentos SINMAP, o produto altimétrico de um sensor gratuito que possui uma maior cobertura no território brasileiro, o sensor PALSAR (componente do satélite ALOS) com o produto altimétrico do sensor aerofotogramétrico contratado, o LIDAR, buscando assim aferir a qualidade dos resultados gerados pelo produto altimétrico do sensor PALSAR, e verificar se apresentam uma resposta satisfatória para a identificação de áreas que possuem probabilidade à ocorrência de escorregamentos, como uma possível solução de baixo custo para esses municípios.

Nesse sentido, o estudo se justifica em virtude da carência de dados topográficos com alta resolução na maioria dos municípios brasileiros, para a realização de trabalhos que visam identificar áreas propensas à ocorrência de escorregamentos.

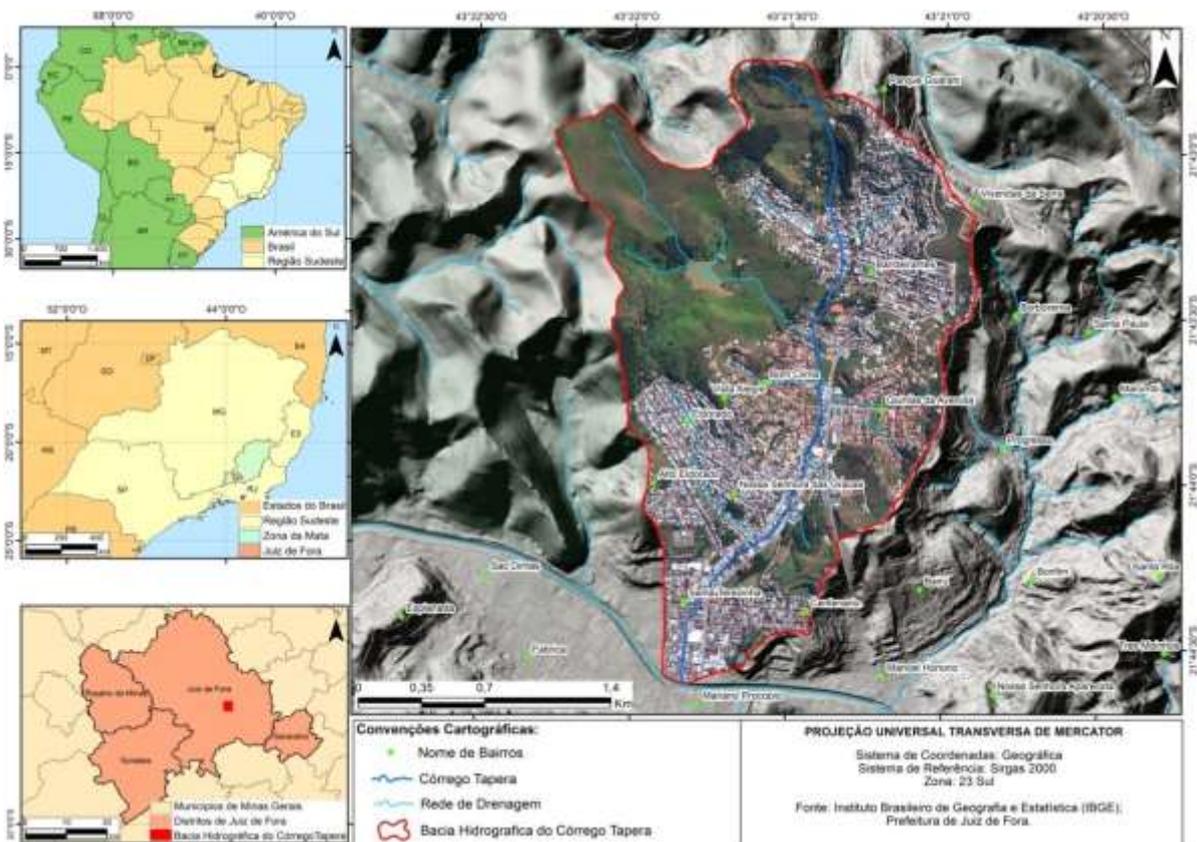
Daí o interesse em avaliar produtos gratuitos, pois existindo a viabilidade para sua utilização, os mesmos podem vir a suprir de maneira satisfatória os “vazios cartográficos” existentes em termos de levantamentos topográficos, haja vista que, os custos dos levantamentos aerofotogramétricos, como por exemplo, a tecnologia LIDAR, é ainda inacessível, sobretudo, para os municípios de pequeno e médio porte.

1.1 Área de Estudo

Para o desenvolvimento deste trabalho, se fez necessário a escolha de um local onde fosse possível comparar, conforme fora mencionado anteriormente, os produtos dos sensores PALSAR e LIDAR.

Nesse sentido, foi então selecionada a Bacia Hidrográfica do Córrego Tapera (BHCT), a qual se encontra situada na cidade de Juiz de Fora, localizada a sudeste do Estado de Minas Gerais, na Mesorregião Geográfica da Zona da Mata Mineira, região da Mantiqueira Setentrional (Figura 1).

Figura 1 – Bacia Hidrográfica do Córrego Tapera, em Juiz de Fora-MG: no âmbito regional e local, 2016.



Fonte: Costa (2016).

No âmbito local, a referida bacia que, ocupa uma área de 4,94 km², encontra-se posicionada na Região Nordeste de Juiz de Fora, caracterizando-se como uma das 156 sub-bacias hidrográficas (Pjf, 2004) responsáveis por drenarem a área urbana desta cidade. O Córrego Tapera tem sua foz na margem esquerda do rio Paraibuna (Médio Paraibuna), o qual

partilha do sistema hidrográfico capitaneado pelo rio Paraíba do Sul, principal rio da Região Hidrográfica Atlântico Sudeste (Empresa de Pesquisa Energética (EPE) /Sondotécnica, 2007; Costa, 2016).

A escolha da bacia supracitada se justifica em virtude da disponibilidade de dados que fornecem aporte analógico e digital, necessários à elaboração de cenários que possibilitem comparar e validar os resultados gerados pelo MDE`s provenientes dos sensores PALSAR e LIDAR. Além disso, destaca-se também a presença de trabalhos já desenvolvidos para tal localidade e bacias vizinhas, os quais discutem a temática referente à probabilidade de risco a ocorrência de escorregamentos (Costa, 2016; Fernandes, 2016a; Pechincha & Zaidan, 2016; Menon-Júnior e Zaidan, 2016; Fernandes et al., 2016).

2. Materiais e Metodologia

Em síntese, a pesquisa desenvolvida nesse trabalho se estruturou metodologicamente como uma pesquisa laboratorial baseada em dados coletados de pesquisa em campo, estruturados sobre o método quali-quantitativo, onde os resultados de comparação dos produtos altimétricos foram complementados e corroborados mediante uma análise estatística (Pereira et al, 2018).

Em laboratório foram feitos os ensaios e avaliações dos MDE`s provenientes dos sensores PALSAR e LIDAR, com a integralização de dados e informações coletadas em campo, para o preenchimento de atributos, elaboração de mapas e análise dos resultados.

2.1 Sobre os sensores: PALSAR e LIDAR.

O sensor PALSAR é um dos três sensores presentes no satélite ALOS (*Advanced Earth Observation Satellite*), lançado em 24/01/2006, pela *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA). Considerado um satélite de alta resolução para o fomento de pesquisas e aplicações na área de sensoriamento remoto, possui, para boa parte da superfície terrestre, uma gama de produtos de acesso livre.

O satélite ALOS orbitou até o ano de 2011 coletando dados da superfície terrestre. Segundo Barros et al. (2009) os dados foram gerados por sistema vinculado ao próprio satélite, que permitia a geração de imagens com alta qualidade geométrica sem a necessidade de uso de pontos de controle medidos no terreno.

O satélite ALOS é composto por três sensores: O PRISM (*Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping*); AVNIR-2 (*Advanced Visible and Near-Infrared Radiometer – Type 2*); e o PALSAR (*Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar*) e suas especificidades estão descritas em IBGE (2006), IBGE (2008), Jaxa (2008).

O sensor PALSAR é um instrumento totalmente polarimétrico, operando em quatro modos diferentes: 1) com polarização simples FBS (*Fine Beam Single polarization: HH ou VV*); 2) polarização dupla FBD (*Fine Beam Dual polarization: HH + HV ou VV + VH*); 3) polarização completa POL (HH + HV + VH + VV) e; 4) modo *ScanSAR*, com polarização única (HH ou VV; 3/4/5-beam) (Jaxa 2008; Oliveira, 2017).

O Modelo Digital de Elevação (MDE) disponibilizado pelo sensor PALSAR, constitui-se através de um processo de correção radiométrica e geométrica das imagens SAR, as quais são pré-processadas pela *Alaska Satellite Facility (ASF)* para um formato matricial (GeoTIFF) (Jaxa, 2008; Laurencelle et al., 2015).

O principal produto altimétrico a ser investigado neste trabalho, é o resultado da polarização FBD do sensor PALSAR, no formato grid contendo uma resolução espacial de 12,5 metros (4look), previamente processadas e disponíveis para *download* (Jaxa, 2008).

O sensor supracitado se caracteriza como imageador ativo de alta frequência por micro-ondas, ou seja, possibilita a aquisição de dados topográficos reais de grande parte da superfície terrestre¹ (ver Mapa de Cobertura do ALOS PALSAR), sem que haja interferências de nuvens, uma vez que possui facilidade em ultrapassar o dossel vegetal (Oliveira, 2017).

Em função do custo-benefício das imagens do ALOS para a geração de Modelos Digitais de Elevação, esse produto pode ser de grande valia para a geração e para o preenchimento de lacunas referente à elaboração de produtos cartográficos para áreas onde as bases de dados apresentam-se escassas (Barros et al, 2009).

A aquisição das imagens do ALOS ocorreu por meio do sítio eletrônico: <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>, o qual encontra-se vinculado ao geoportal da *Alaska Satellite Facility (UAF/NASA)*.

Já o produto do sensor LIDAR, corresponde a um Mapeamento Digital contratado pela Prefeitura de Juiz de Fora, executado pela empresa ESTEIO S/A, entre os meses de junho a setembro de 2007, através de cobertura aerofotogramétrica digital e perfilamento a *LASER*

¹ Site com os Mapas de Cobertura do ALOS PALSAR: <https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/alos-palsar/alos-palsar-coverage-maps/>

aerotransportado. O referido Levantamento Aerofotogramétrico recobre todo o município de Juiz de Fora, contemplando assim sua área urbana e também a zona rural.

Pelo fato do perfilamento a *LASER* aerotransportado contar com uma tecnologia óptica de detecção remota que mede propriedades da luz refletida, este ficou denominado de LIDAR (da sigla inglesa *Light Detection And Ranging*).

Tal perfilamento foi utilizado por meio do sensor *LASER LEICA ALS-50 PHASE II* de 150 khz, composto por um scanner a *LASER* infravermelho, um sistema de referência inercial (IMU) e um receptor GPS (Pjf, 2007).

Diante da nuvem de pontos resultantes do processamento a *LASER*, gerou-se, a priori, um MDS (Modelo Digital da Superfície), o qual abrange a totalidade de pontos levantados, inclusive com os objetos constantes na superfície do terreno. Após ser submetido a filtros para depuração, foi extraído do arquivo matricial supracitado, um MDE (Modelo Digital de Elevação), o qual abrange um conjunto de pontos que caracterizam a superfície, excluindo os pontos situados em outras feições como edificações, vegetação, dentre outros (Pjf, 2007).

Com o MDT definido, geraram-se automaticamente as curvas de nível com equidistância de 1 (um) metro para toda área urbana de Juiz de Fora, as quais foram utilizadas como base comparativa para a verificação da qualidade do produto proveniente do sensor PALSAR e, por conseguinte, de sua acurácia para áreas carentes de dados topográficos.

A partir dos sensores PALSAR e LIDAR, foram gerados os MDE's utilizados no processo de calibração e aplicação do modelo SINMAP, bem como no processo de comparação de matrizes.

2.2 Modelo SINMAP

Segundo informações contidas no site (<http://hydrology.usu.edu/sinmap/>), o modelo SINMAP (*Stability Index Mapping*), desenvolvido por Pack et al. (1998) se caracteriza como um modelo estocástico para mapeamento de índices de estabilidade em encostas, o qual se fundamenta no conceito de modelo hidrológico de estado uniforme (*steady-state*) e no modelo de vertente infinita. Sua classificação de probabilidade à ocorrência de escorregamentos se baseia na variação espacial da declividade e do índice geomorfológico, associados a parâmetros climáticos e pedológicos (Pack et al., 2005).

O referido modelo, concebido através do módulo 2.0, possui interface direta com o software *ArcGis*, ambiente onde realizou-se a programação do mesmo (Pechincha & Zaidan, 2016). O resultado e a espacialização do Índice de Estabilidade (do inglês *Stability Indice* -

SI) são previstos para cada célula (pixel) presente nos dados matriciais. O SI é definido como a probabilidade de uma região ser considerada estável ou não. Tal índice é assumido mediante a distribuição uniforme dos parâmetros sobre os intervalos de certeza definidos. Na maioria dos casos os valores do índice de estabilidade variam de 0 a 1, onde 0 é considerado muito instável e 1 menos instável (Michel, 2011; Michel, Kobiyama & Goerl, 2012).

2.3 Tratamento dos Modelos Digitais de Elevação (MDE's)

Para realizar a aplicação do modelo SINMAP, e conseqüentemente ter uma avaliação confiável de seus resultados, fez-se necessário criar dois MDE's, um proveniente do sensor LIDAR e outro do sensor PALSAR, com a mesma resolução espacial, procedimento este que possibilitou quantificar os pixels dos produtos gerados pela aplicação do modelo, para ambos.

Para tanto, realizou-se uma interpolação das curvas de nível com equidistância de 1m do LIDAR, onde foi adotado como resolução espacial de saída o valor de 12,5 metros. Neste caso, utilizou-se a ferramenta "*Topo to Raster*" presente no *software ArcGis* e disponível: "*ArcToolBox -> Spatial Analyst Tools -> Interpolation*". Observa-se que a escolha da resolução de saída baseou-se na resolução do MDE proveniente do sensor PALSAR.

Com a equiparação da resolução espacial de ambos os MDE's, realizou-se então, o procedimento de refinamento do georreferenciamento do MDE proveniente do sensor PALSAR. Com o auxílio da rede de drenagem, topos de morros, limite da BHCT e do arruamento e estradas vicinais, foram inseridos pontos de controle, os quais propiciaram estabelecer o ajuste e a sobreposição entre os MDE's da área estudada.

Após esses procedimentos, realizou-se o recorte em cada um dos MDEs, utilizando como referência o limite da bacia hidrográfica estudada, extraindo assim o mesmo número de colunas, linhas e pixels para ambos. Tal técnica foi aplicada no intuito de se estabelecer uma semelhança na quantidade de pixels entre os ambos os arquivos matriciais, para a posterior alimentação do modelo.

2.4 Entrada de dados no modelo SINMAP

Como o interesse aqui se fundamenta na comparação dos dois produtos altimétricos distintos, baseando-se na aplicação do modelo SINMAP para mapeamento de índices de estabilidade em encostas na BHCT, adotou-se, no processo de calibração e aplicação do modelo SINMAP, os mesmos parâmetros correlacionados aos aspectos pedológicos e climatológicos, conforme se pode visualizar na Tabela 1.

Tabela 1 – Bacia Hidrográfica do Córrego Tapera: Parâmetros de entrada para simulação do modelo SINMAP.

| Parâmetros do SINMAP | Valores | | Referências Utilizadas |
|---|--------------------|--------|--|
| Linha de umidade do AS Plot (%) | 20 | | Costa (2016) |
| Número de Pontos no AS Plot (%) | 1000 | | Costa (2016) |
| Densidade da Água (Kg/m ³) | 1000 | | Constante Universal |
| Ângulo de Atrito Interno do Solo (°) | Mínimo | Máximo | Fonseca <i>et al.</i> (2016) |
| | 29 | 33 | |
| C = Coesão Admissional (CXbd) | Mínimo | Máximo | Fonseca <i>et al.</i> (2016) |
| | 0,143 | 0,714 | |
| C = Coesão Admissional (LVAd) | Mínimo | Máximo | Rocha <i>et al.</i> (2002) apud Pechincha & Zaidan (2016) |
| | 0,54 | 0,57 | |
| ps = densidade do solo (kg/m ³) | 1400 (Valor Médio) | | Fonseca <i>et al.</i> (2016); Rocha <i>et al.</i> (2002) apud Pechincha & Zaidan (2016); Silva (2013) |
| g = aceleração da gravidade | 9,81 | | Constante Universal |
| T/R (m) (CXbd) | Mínimo | Máximo | Fonseca <i>et al.</i> (2016); INMET (2014) |
| | 1,5 | 350 | |
| T/R (m) (LVAd) | Mínimo | Máximo | Pechincha (2014); INMET (2013) |
| | 52 | 303 | |

Fonte: adaptado de Costa (2016).

Como se observa na descrição dos parâmetros apresentados e na descrição de seu trabalho, Costa (2016) definiu os mesmos de acordo com dois tipos de solos diferentes, Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (LVAd) e Cambissolo Háplico Tb Distrófico latossólico (CXbd), os quais segundo o autor, predominam nas encostas presentes na BHCT.

Com a entrada dos parâmetros topográficos no modelo SINMAP, um proveniente do sensor LIDAR e o outro do sensor PALSAR, correlacionados aos parâmetros pedológicos e climáticos expostos na Tabela 1, foram gerados 3 (três) produtos cartográficos, sendo eles: Saturação do Solo, Declividade e Estabilidade de Encosta.

2.5 Análise Estatística dos dados

Ao fim, tanto os MDE's quanto os demais produtos gerados na execução do modelo, informações armazenadas no software de geoprocessamento, bem como as representações gráficas de estruturas de dados matriciais passaram por um tratamento especial para que pudessem ser manipulados e tratados a partir de parâmetros estatísticos.

Dessa forma, através do software de programação *MathLab-R2015a*, empreendeu-se o processo de conversão de todos os materiais gráficos gerados pelo modelo como estrutura de dados matriciais, para matrizes simples com valores numéricos, no qual a posição e área na célula a_{ij} da matriz dos produtos gerados através do sensor LIDAR, correspondessem a mesma área e posição dos dados obtidos pelo instrumento PALSAR na célula de posição a_{ij} .

Para verificar essa semelhança (homogeneidade) na quantidade de pixels entre ambos os produtos buscou-se aplicar um conjunto de técnicas estatísticas para validação dos dados do PALSAR. Inicialmente, o resultado dos dados do PALSAR foi comparado com os dados do LIDAR por meio da aplicação dos Coeficientes de determinação (R^2) e de Correlação de Pearson (r).

O Coeficiente de Determinação (Equação 1) consiste na razão entre a soma de quadrados da regressão e a soma de quadrados total, variando entre 0 (zero) e 1 (um). Quanto mais próximo a 1, mais explicativo é o modelo e melhor é o ajuste dos dados (Spiegel, 1993).

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \right)^2 \quad (1)$$

O Coeficiente da Correlação de Pearson (Equação 2) é usado para analisar o desempenho dos métodos de interpolação, caracterizando-se por Muito Forte (r entre 0,90 e 1,0), Forte (r entre 0,70 a 0,89), Moderado (r entre 0,50 até 0,69) e Fraco (r entre 0,30 e 0,49) e Desprezível (r entre 0 e 0,29).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

Tanto na Equação 1 como na Equação 2, n é o número de observações, x_i e y_i correspondem aos valores de ambos os conjuntos de dados (PALSAR e LIDAR) e, \bar{x} e \bar{y} suas respectivas médias.

O passo seguinte consistiu em aplicar estatísticas de erro usadas para representar as diferenças entre os valores estimados para o PALSAR a partir do LIDAR. Foram aplicados o Erro Médio Absoluto (EMA), o Erro Relativo Médio (ERM) e a Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) de acordo com Hallak & Pereira Filho (2011) e Saraiva et al. (2017).

O EMA (Equação 3) consiste na diferença entre o valor observado (LIDAR) e o valor estimado (PALSAR), indicando que, quanto menor for o seu valor (valor de EMA), mais próximo o valor estimado é o valor observado.

$$EMA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \quad (3)$$

Na Equação 3, n consiste no número de amostras, x_i o valor do estimador (PALSAR) e \bar{x} a média dos valores de todas as amostras (LIDAR).

O ERM (Equação 4) indica a magnitude média do erro estimado com os melhores valores, aqueles mais próximos de zero (0). Na Equação 4, n corresponde ao número de amostras, x_i é o valor fornecido pelo estimador (PALSAR) para a i-ésima amostra, \bar{x} é a média dos valores de todas as amostras estimadas (PALSAR), e \dot{x}_i é o valor correto que deve ser fornecido pelo classificador (LIDAR), para a amostra em questão.

$$ERM = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \dot{x}_i|}{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|} \quad (4)$$

Por fim, o REQM (Equação 5) avalia o grau de espalhamento dos dados estimados (PALSAR) comparados aos dados do classificador (LIDAR), onde n corresponde ao número de amostras, x_i é o valor fornecido pelo estimador (PALSAR) e \bar{x} a média dos valores de toda as amostras do classificador (LIDAR).

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

3. Resultados e Discussões

Inicialmente são apresentados dois mapas referentes às áreas de saturação do solo (Figura 2) e as classes de declividade (Figura 3), criados pelo modelo para a bacia hidrográfica. O primeiro mapa busca representar a relação existente entre a água que adentra ao sistema sob a forma de recarga (precipitação) e a água que deixa tal sistema por meio da

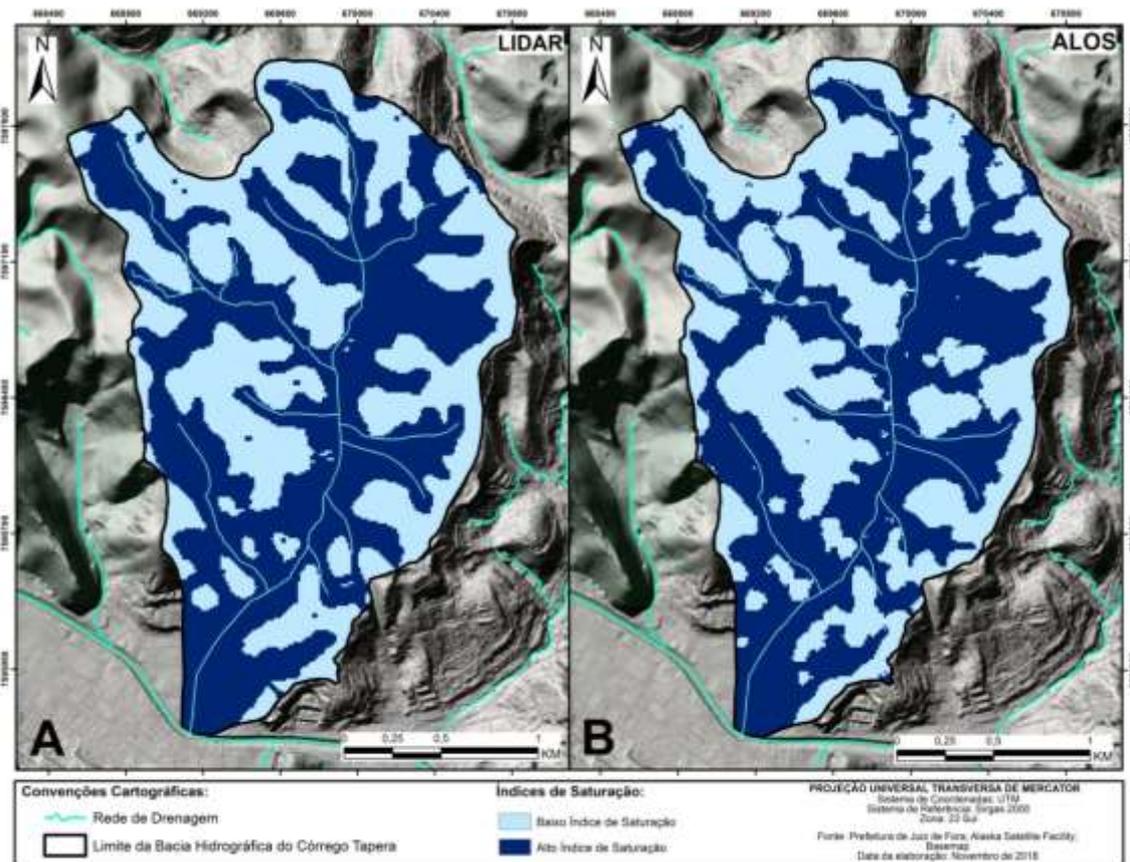
camada saturada do solo. Já o segundo, referente às classes de declividade, representa a inclinação da superfície da área estudada, sendo essas expressas em porcentagem (%).

A discussão relativa ao mapa de saturação se faz oportuna, pois áreas de saturação estão diretamente relacionadas aos modelos hidrológicos de estado uniforme (*steady state*). Neste, a recarga de um dado solo, se dá pela variação espacial da umidade presente (altura da coluna d'água) durante o período chuvoso. A capacidade de saturação de um dado solo está relacionada à sua porosidade, taxa de percolação e profundidade, as quais dependem da declividade, comprimento da encosta e áreas de contribuição de fluxo da água (Michel, 2011, p.32).

Assim, áreas com menores índices de saturação (áreas em azul claro), na maioria das vezes correspondem às encostas convexas e locais de alta declividade, já áreas com maiores saturações coincidem com encostas côncavas e áreas mais planas (áreas em azul escuro).

Ao comparar os índices de saturação resultantes do modelo SINMAP é possível destacar que o produto do sensor PALSAR (Figura 2B), apresenta uma área relativa aos altos índices de saturação (regiões planas), maior do que a área presente no produto do sensor LIDAR (Figura 2A). Para o fator saturação, observou-se que o sensor PALSAR se comportou como sendo mais generalista na definição das classes do que o sensor LIDAR, muito pelo fato, deste segundo ser proveniente de um produto de maior detalhamento.

Figura 2 – Bacia Hidrográfica do Córrego Tapera: comparativo do fator Saturação, entre sensores LIDAR (A) e PALSAR (B), 2018.



Fonte: Autores (2018).

Já a declividade é considerada um dos principais fatores em estudos que visam à identificação de áreas de risco a movimentos de massa (Michel, 2011; Da Silva et al., 2012).

Souza, et al. (2017), colocam que a declividade se comporta como uma forma de representar quantitativamente o comportamento espacial do relevo, tendo sua aplicabilidade voltada não somente para o planejamento e gestão de espaços urbanos e rurais, como também, para o cumprimento das legislações ambientais e para avaliar a eficiência de intervenções humanas no ambiente.

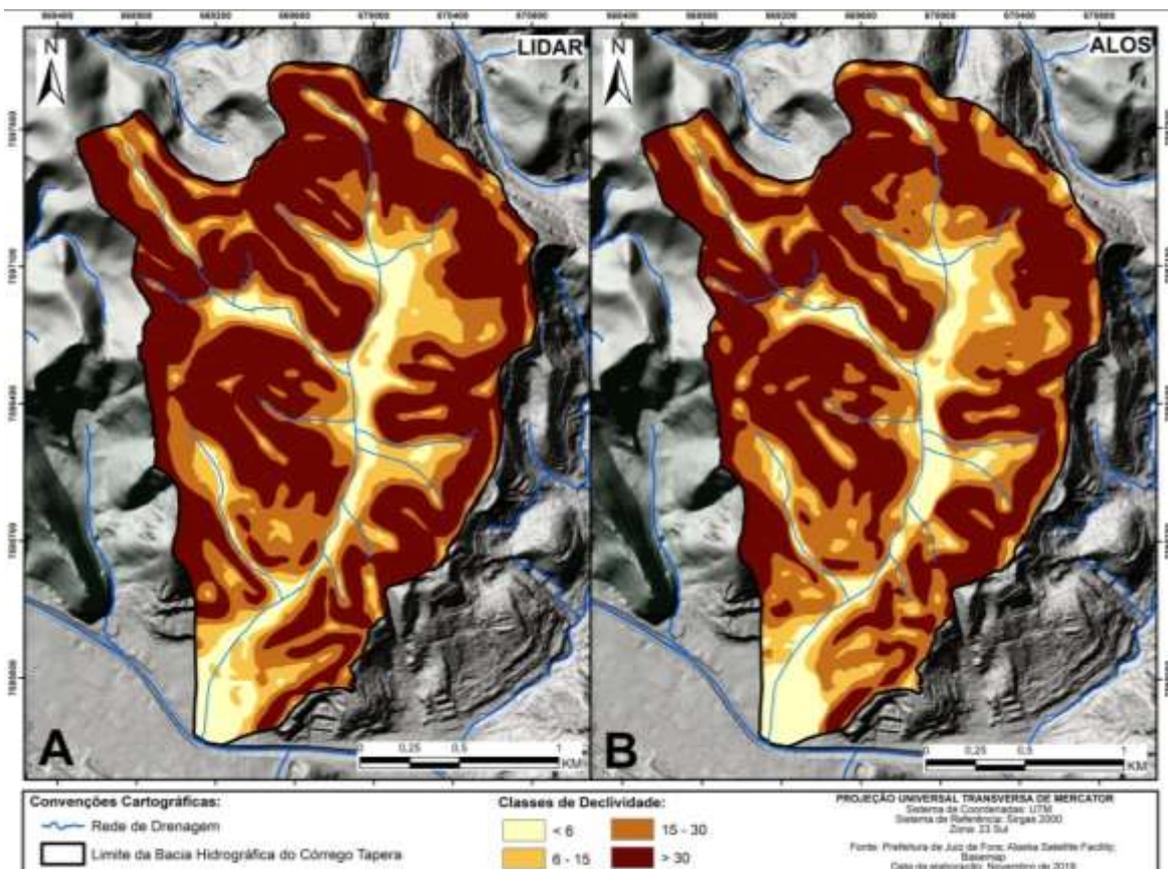
No Brasil, existem leis relativas ao uso e parcelamento do solo em áreas urbanas, que mediante suas normatizações, adotam a declividade como um parâmetro inibidor à ocupação e uso da terra. Por exemplo, a Lei nº. 6.766/79, em seu primeiro capítulo, parágrafo único, inciso III, deixa claro que não pode ser permitido o parcelamento do solo urbano, “em terreno com declividade igual ou superior a 30% (trinta por cento), salvo se atendidas exigências específicas das autoridades competentes”.

Tomando como base a declividade, observa-se que as áreas consideradas restritas ao parcelamento para uso e ocupação humana, possuem uma normatização específica, como é o caso da Lei 6766/79, podendo ainda ser acrescida de leis específicas definidas e estabelecidas de acordo com as características físicas e naturais existentes em cada localidade.

No âmbito em que se encontra a Bacia Hidrográfica do Córrego Tapera, a Lei Municipal de Juiz de Fora nº 6908/86 define, dentre outras normatizações, que o parcelamento deve ser limitado a “terrenos com declividade igual ou superior a 30% (trinta por cento), salvo se atendidas as exigências específicas formuladas pela Prefeitura.”, seguindo neste caso o que já é estipulado na Lei 6766/79.

Diante disso, fez-se uma delimitação das áreas mais críticas relativas ao parcelamento do solo, acima de 30% de declividade, como estabelece a legislação vigente. Como resultado deste parcelamento é aceitável dizer que o resultado proveniente do sensor PALSAR (Figura 3B) apresenta forte semelhança com as mesmas classes presentes no LIDAR (Figura 3A).

Figura 3 – Bacia Hidrográfica do Córrego Tapera: comparativo do fator Declividade (%), entre sensores LIDAR (A) e PALSAR (B).



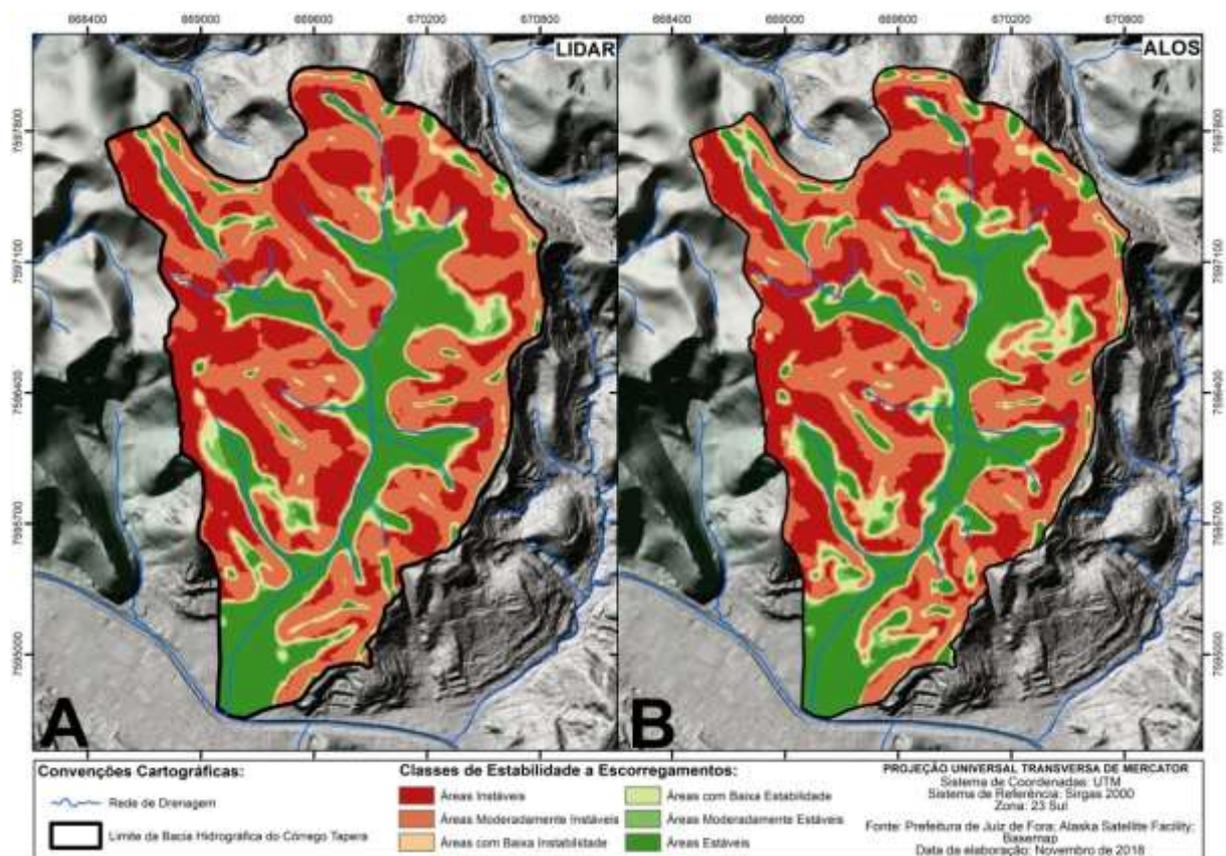
Fonte: Autores (2018).

Observa-se que mesmo não apresentando o mesmo nível de detalhe e continuidade das classes presentes nos dados do LIDAR, o resultado obtido a partir do sensor PALSAR, do satélite ALOS, demonstra produtos muito semelhantes. Tal constatação se dá mediante a observação da disposição das classes presentes em ambos os mapas, tomando como pontos de referências os topos de morros, as linhas de drenagens e as encostas.

Verifica-se a presença de baixos valores de declividade tanto nas áreas de planície, quanto em topos de morros planos em ambos os produtos. Outra área ao qual se destaca uma similaridade entre o LIDAR e o ALOS são as vertentes presentes na bacia estudada, onde é possível destacar as maiores classes de declividade (acima de 30%).

O passo seguinte foi a apresentação do resultado gerado pelo modelo SINMAP referente à distribuição probabilística de áreas instáveis geradas pela combinação dos fatores topográfico, geomorfológico, pedológico e climático. O resultado encontra-se espacializado na Figura 4, com a especificação das classes de estabilidade propostas pelo modelo, Tabela 2.

Figura 4 – Bacia Hidrográfica do Córrego Tapera: Mapa de Estabilidade de Encosta, 2018.



Fonte: Autores (2018).

Tabela 2 – Bacia Hidrográfica do Córrego Tapera: Classes dos índices de Estabilidade de Encostas.

| Condição | Classe | Estado Previsto | Possível influência de fatores |
|------------------------------|---------------|------------------------------|--|
| SI > 1,5 | 1 | Área Estável | Significantes fatores desestabilizadores são necessários para a instabilidade. |
| 1,5 > SI > 1,25 | 2 | Área Moderadamente Estável | Moderados fatores desestabilizadores são necessários para a instabilidade. |
| 1,25 > SI > 1,0 | 3 | Área com Baixa Estabilidade | Menores fatores desestabilizadores são necessários para a instabilidade. |
| 1,0 > SI > 0,5 | 4 | Área com Baixa Instabilidade | Fatores desestabilizadores não são necessários para a instabilidade. |
| 0,5 > SI > 0,0 | 5 | Área Moderadamente Instável | Fatores estabilizadores podem ser responsáveis pela estabilidade. |
| 0,0 = SI | 6 | Área Instável | Fatores estabilizadores são exigidos para a estabilidade. |

Fonte: Nery (2011) adaptado de Pack et al. (1998).

Observa-se que em ambos os produtos expostos existe uma similaridade expressiva na ocorrência e distribuição das classes de estabilidade presentes tanto no LIDAR, quanto no PALSAR. Destacam-se que as áreas consideradas instáveis apresentam uma conexão direta com os locais de maior declividade e as áreas consideradas estáveis apresentam uma relação direta com as classes de menores declividades (Figura 3), em ambos os produtos analisados.

A conformidade entre as classes de estabilidades presentes na comparação dos mapas da Figura 4 é considerada bem semelhante principalmente nas áreas consideradas mais instáveis, com destaque para áreas côncavas e onde o mapa de declividade apontou para inclinações acima dos 30%.

Observa-se tal similaridade na distribuição das classes de estabilidade de encostas ao longo da bacia estudada. Visualmente nota-se que ambos os produtos altimétricos, ao serem aplicados em um ambiente que contém a mesma morfologia geográfica, apresentam uma resposta convincente no ordenamento e localização das classes de estabilidade oferecidas pelo modelo utilizado para esse estudo.

Com intuito de quantificar e mensurar os resultados representados por meio dos mapas elaborou-se então uma tabela com a distribuição quantitativa dos pixels existentes para cada uma das classes de declividades, e também para cada uma das classes de estabilidade geradas

pelo modelo SINMAP, mediante aos MDE's provenientes do sensor LIDAR e PALSAR (Tabela 3). Na Tabela 3 encontram-se paralelamente estabelecidos a quantidade de pixels presentes em ambos os produtos estudados.

Tabela 3 – Bacia Hidrográfica do Córrego Tapera: Quantitativo de pixels referente a cada uma das classes presentes nos mapas de declividade e de estabilidade de encosta.

| Classes de Declividade | LIDAR | PALSAR |
|--------------------------------|--------------|---------------|
| < 6% | 2444 | 2565 |
| 6 – 15% | 3744 | 3015 |
| 15 – 30% | 6652 | 6875 |
| > 30% | 18166 | 18551 |
| Classes de Estabilidade | LIDAR | PALSAR |
| Áreas Instáveis | 10709 | 10505 |
| Áreas Moderadamente Instáveis | 9668 | 8903 |
| Áreas com Baixa Instabilidade | 836 | 1066 |
| Áreas com Baixa Estabilidade | 2020 | 2449 |
| Áreas Moderadamente Estáveis | 1397 | 1495 |
| Áreas Estáveis | 6376 | 6588 |

Fonte: Autores (2018).

Pode-se inferir que mediante a comparação entre o número de pixels existentes em cada produto analisado, a maior quantidade encontra-se definida pelas classes de declividade acima de 30%, seguida da classe de 15-30%. Referente as classes de estabilidade se destacam as áreas consideradas “instáveis” e “moderadamente instáveis”, seguidas pelas “áreas estáveis”, como sendo as maiores concentrações de pixels em ambos os produtos analisados.

Ao analisar as informações da Tabela 3 como um todo, sem dar ênfase às classes com maior quantidade de pixels, nota-se que existiu um comportamento aproximado do somatório de células existentes para todas as classes de ambos os produtos estudados.

No que se refere à classe considerada mais tênue para a ocorrência de escorregamentos, acima de 30% de declividade, como apontado pela legislação, a diferença não passou dos 400 pixels, em um total aproximado de 18 mil, fato esse que deve ser levado em consideração. Outro quantitativo que deve ser apresentado está no somatório de pixels das áreas consideradas instáveis, onde somente 204 pixels foi a diferença encontrada no produto

gerado pelo LIDAR do produto gerado pelo sensor PALSAR, em um total de aproximadamente 10 mil células.

Já as maiores diferenças encontradas estão na classe de declividade de 6-15% e na classe de estabilidade “moderadamente instáveis”, com aproximadamente 700 pixels de diferença nos dois.

Corroborando com as análises visuais, os resultados dos testes estatísticos comprovam a similaridade entre os dados PALSAR e LIDAR, como pode ser observados na Tabela 4.

Tabela 4 – Bacia Hidrográfica do Córrego Tapera: Resumo as técnicas de avaliação estatística entre os dados PALSAR e LIDAR.

| Metodologia | Parâmetros Estatísticos | | | | |
|-------------|-------------------------|------|------|------|------|
| | R ² | r | EMA | ERM | REQM |
| PALSAR | | | | | |
| x | 0,95 | 0,98 | 0,00 | 0,19 | 0,02 |
| LIDAR | | | | | |

Fonte: Autores (2018).

Os elevados resultados a partir da aplicação do Coeficiente de Determinação (95%) e do Coeficiente de Correlação de Pearson (98%) para a comparação entre o conjunto dos pixels de ambos os produtos demonstram elevada similaridade, corroborando com as observações efetuadas a partir dos resultados gráficos nos mapas, podendo ser classificadas como Muito Forte.

A avaliação dos erros sistemáticos entre ambos os conjuntos de pixels, também, mostrou resultados concordantes.

Em termos estatísticos, a média dos erros individuais é o primeiro passo para a distribuição das diferenças entre os conjuntos de dados (Hallak & Pereira Filho, 2011). Erros individuais positivos e negativos de mesma magnitude se cancelam no somatório. O EMA contorna esse problema por ser menos afetado por valores anormalmente extremos (*outliers*). Dessa forma, resultados do EMA próximos a zero (0) são considerados como condição perfeita.

Da mesma forma, para o ERM, assim como para o REQM, o valor zero (0) indica a relação perfeita, pois, à medida que esse valor aumenta, acentuam-se as diferenças entre os resultados dos modelos.

Sendo assim, a análise do conjunto e valores dispersivos dos pixels entre PALSAR e LIDAR, a partir da avaliação dos erros, e dos baixos valores encontrados para esses parâmetros (Tabela 4), indicam que o grau de espalhamento desses valores foi, praticamente, nulo. Tais resultados reforçam as considerações de que ambos os produtos analisados apresentam forte similaridade.

Tal constatação nos leva a acreditar que o produto do sensor PALSAR, quando relacionados com as outras variáveis de entradas necessárias para o desenvolvimento do modelo, apresentou resultados convincentes quando comparado, quantitativamente e estatisticamente, aos resultados apresentados pelo sensor LIDAR.

4. Considerações Finais

Nos resultados encontrados a partir da comparação entre os produtos do sensor PALSAR e do sensor LIDAR, é possível afirmar que o segundo apresenta um maior detalhamento quando comparado ao primeiro. Tal fato ficou evidente em todos os produtos gerados pelo modelo SINMAP.

Tal resposta já era esperada, porém, os produtos elaborados a partir do MDE do sensor PALSAR, apesar de não ter a mesma definição que o MDE do LIDAR, apresentaram uma boa resposta e semelhança entre seus resultados, com uma espacialização análoga entre as classes dos mapas de Saturação, Declividade e de Estabilidade de Encosta.

No mapa de Estabilidade, a semelhança entre os produtos foi a mais evidente dentre os outros. Todas as áreas identificadas no sensor LIDAR encontram-se presentes no resultado do sensor PALSAR, com diferenças observadas apenas na junção de algumas classes do mesmo, devido ao seu menor detalhamento.

Diante dos resultados gerados a partir da análise estatística, a avaliação de semelhança entre os dados por meio do Coeficiente de Determinação (R^2) e do Coeficiente de Correlação de Pearson (r), bem como dos erros por meio do Erro Médio Absoluto (EMA), Erro Médio Relativo (EMR) e a Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM), demonstrou que ambos os produtos apresentam forte similaridade.

Sendo assim, conclui-se que os resultados encontrados são aceitáveis, e que tal metodologia, com o auxílio do MDE PALSAR, pode ser aplicada para a identificação de áreas de risco a escorregamentos em locais onde não exista uma base de dados topográficos detalhada.

Como sugestão para trabalhos futuros, é possível apontar a aplicação de tal metodologia para se realizar uma análise voltada para a investigação e identificação de áreas de riscos, envolvendo não só escorregamento, mas qualquer outro tipo de movimento de massa, em localidades onde não tenha uma base de dados topográficos com detalhe e que sofre historicamente com a ocorrência de tais fenômenos. Fazendo assim uma comparação com o mapa de risco gerado pela aplicação da metodologia desenvolvida nesse trabalho, com a catalogação e inventário de movimentos de massa pretéritos, buscando assim um parâmetro para a predição de eventos futuros.

Agradecimentos

Ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da UFJF por ter possibilitado o desenvolvimento da pesquisa e a CAPES pela concessão da bolsa de Mestrado, os quais proporcionaram o desenvolvimento e exposição deste trabalho.

Referências

Ahrendt, A. (2005). *Movimentos de massa gravitacionais-proposta de um sistema de previsão: aplicação na área urbana de Campos do Jordão-SP*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

Barra Rocha, C. H., Vasconcelos, D., Souza, L.V., Silveira, F. J., Machado, M. M. M. & Almeida, L. L. (2017). Comparação de Modelos Digitais de Elevação Obtidos a Partir de Diferentes Bases de Dados - Curvas de Nível e Pontos Cotados IBGE, LIDAR, SRTM E ALOS. *XXVII Congresso Brasileiro De Cartografia*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Recuperado em 04 setembro, 2018, de <http://www.cartografia.org.br/cbc/2017/trabalhos/6/722.html>.

Barros, R. S., Coelho, A. L., Oliveira, L. F., Melo, M. F. & Correia, J. D. (2009). Avaliação Geométrica de Imagens ALOS/PRISM Níveis 1B2G e 1B2R Ortoretificada – estudo de caso: Itaguaí, RJ. In: *Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR)*. Artigos, p. 1243-1250. CD-ROM, On-line. ISBN 978-85-17-00044-7. INPE - São José dos Campos, SP, Brasil. Recuperado de <http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.19.47/doc/173-1738.pdf>

Baum, R., Savage, W., & Godt, J. (2002). TRIGRS – a fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope stability analysis, *US Geological Survey Open-file Report*, 424, 61.

Carvalho, C. S., & Galvão, T. (2006). *Prevenção de Riscos de Deslizamentos em Encostas: Guia para Elaboração de Políticas Municipais* (pp. 301-310). Brasília: Ministério das Cidades; Cities Alliance.

Costa, R. M. (2016). *Avaliação de Probabilidade e Risco à Ocorrência de Escorregamentos na Bacia Hidrográfica do Córrego Tapera, Juiz de Fora-MG*. Trabalho de Conclusão de Curso (monografia). Universidade Federal de Juiz de Fora, Instituto de Ciências Humanas, Juiz de Fora, MG, Brasil.

Da Silva, J. P., Da Silveira, C. T., & Fiori, A. P. (2012). Aplicação de dois métodos físico-matemáticos para avaliação do índice de estabilidade das vertentes da Bacia do Rio Ribeirão/Paranaguá-PR. *Revista Geonorte*, 3(5), 1291-1302.

EPE (Empresa De Pesquisa Energética)/Sondotécnica. (2007). *Avaliação ambiental integrada dos aproveitamentos hidroelétricos da bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul*.

Fernandes, N. F. & Amaral, C. P. (1996). Movimentos de Massa: Uma Abordagem Geológico Geomorfológica. In A. J. T. Guerra E S. B. Cunha (Eds.) *Geomorfologia e Meio Ambiente* (pp. 123-194). Rio de Janeiro: Editora Bertrand.

Fernandes, N. F., Guimaraes, R. F., Gomes, R. A. T., Vieira, B.C., Montgomery, D. R. & Greenberg, H. (2001). Condicionantes Geomorfológicos dos Deslizamentos nas Encostas: Teoria, Evidências de Campo e Aplicação de Modelo de Previsão de Áreas Susceptíveis. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 2(1), 51-71.

Fernandes, B. J. (2016a) *Diagnóstico ambiental com ênfase na ocorrência de escorregamentos na Bacia Hidrográfica do Córrego Tapera, Juiz de Fora-MG*. Dissertação (mestrado acadêmico). Universidade Federal de Juiz de Fora, Instituto de Ciências Humanas. Pós-Graduação em Geografia, Juiz de Fora, MG, Brasil.

Fernandes, N. F. (2016b) Modelagem em Geografia Física: Teoria, Potencialidades e Desafios. *Espaço Aberto, PPGG - UFRJ*, 6(1), 209-247.

Fernandes, B. D. J., Costa, R. M. & Zaidan, R. T. (2016). Evolução do Crescimento Urbano na Bacia Hidrográfica do Córrego Tapera (Juiz de Fora-Mg) e sua Correlação com a Legislação para o Uso e Ocupação do Solo. *Revista Formação (ONLINE)*, 4(23), 91-106.

Fitz, P. R. (2018). *Geoprocessamento sem complicação*. São Paulo: Editora Oficina de textos, 2018.

Guimarães, R. F et al (2008). Movimentos de Massa. In: Florenzano, T. G. (Org.) *Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais* (pp. 159-184). São Paulo: Oficina de Textos.

Hallak, R., & Pereira Filho, A. (2011) Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na Região Metropolitana de São Paulo com o Modelo ARPS: sensibilidade a variações como os esquemas de advecção e assimilação de dados. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 26(4), 591-608.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2006). *IBGE como Sub-nó de distribuição de Imagens do Satélite*. Brasília, DF: IBGE. Recuperado de https://www.ibge.gov.br/confest_e_confefe/pesquisa_trabalhos/CD/palestras/574-1.pdf

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2008). *ALOS características e aplicações*. Brasília, DF: IBGE. Recuperado de https://www.ibge.gov.br/confest_e_confefe/pesquisa_trabalhos/CD/palestras/574-1.pdf

Jaxa, J. A. E. A. (2008). *ALOS Data Users Handbook*. [S.l.]: Japan Aerospace Exploration Agency. Recuperado de http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/doc/fdata/ALOS_HB_RevC_EN.pdf

Laurencelle, J., Logan, T. & Gens, R. (2015). *ASF Radiometrically Terrain Corrected ALOS PALSAR products*. ASF-Alaska Satellite Facility, 1(1), 12. Recuperado de <https://www.asf.alaska.edu/sar-data/palsar/terrain-corrected-rtc/>

Lei n. 6766, de 19 de dezembro de 1979. (1979). Dispõe sobre o parcelamento do solo para fins urbanos. Brasília, DF: Série Documentos Sociais.

Menon-Júnior, W. & Zaidan, R. T. (2016). Conflitos de Uso e Ocupação da Terra na Bacia Hidrográfica do Córrego do Yung (Juiz de Fora - MG) Com a Legislação de Parcelamento do Solo e Sua Evolução Entre os Anos 1968 e 2010. *Revista Formação*, 3(23), 217-247.

Michel, G. P. (2011). *Estudo de Escorregamentos na Bacia do Rio da Cunha, Rio dos Cedros/SC, com modelos SHALSTAB E SINMAP*. Trabalho de Conclusão de Curso (monografia), Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.

Michel, G. P., Kobiyama, M. & Goerl, R. F. (2012). Análise comparativa entre os modelos Shalstab e Sinmap na identificação de áreas susceptíveis a escorregamentos translacionais. *Anais do Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos: artigos selecionados*. Porto Alegre, RS, Brasil. Recuperado de <http://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/ENES161.pdf>

Montgomery, D. R. & Dietrich, W. E. (1994) A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, 30(4), 1153-1171.

Nery, T. D. (2011). *Avaliação da Suscetibilidade a Escorregamentos Translacionais Rasos na Bacia da Ultrafértil, Serra do Mar (SP)*. Dissertação (mestrado em Geografia Física) Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

Nunes, L. H. (2015). *Urbanização e desastres naturais*. São Paulo: Editora Oficina de Textos.

Oliveira, H. P. V. (2017). *Tutorial para obtenção, correções e interpolação (opcional) do Modelo Digital de Elevação (sensor PALSAR) do Satélite ALOS-1 de 2006 a 2011*. Recuperado de <https://pt.scribd.com/document/352325754/TutorialMDE-ALOS-1-Huascar-Vidal-v1>

Pack, R. T., Tarboton, D. G. & Goodwin, C. N. (1998). Terrain Stability Mapping with SINMAP, technical description and users guide for version 1.00. Report Number 4114-0, Terratech Consulting Ltd., Salmon Arm, B.C. Canada (www.tclbc.com).

Pack, R. T., Tarboton D. G., Goodwin C. N., & Prasad, A. (2005). *A stability index approach to terrain stability hazard mapping, SINMAP user's manual*.

Pechincha, M. G. H. & Zaidan, R. T. (2016) Risco a ocorrência de movimentos de massa e seu potencial na análise da qualidade ambiental. *Revista de Geografia-PPGEO-UFJF*, 2(2).

Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J. & Shitsuka, R. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. 1ª ed. Santa Maria, RS: UFSM, NTE, Brasil. Recuperado de https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/15824/Lic_Computacao_Metodologia-Pesquisa-Cientifica.pdf?sequence=1

Prefeitura de Juiz de Fora - PJF. (2004). *Plano diretor de Desenvolvimento Urbano*. 1ª Edição. Juiz de Fora: Concorde. 580p.

Prefeitura de Juiz de Fora - PJF. (2007). *Sistema de Informações Geográficas de Juiz de Fora*. Juiz de Fora: Secretaria de Planejamento e Gestão – SEPLAG, MG, Brasil. Recuperado de <https://www.pjf.mg.gov.br/secretarias/seplag/geoprocessamento/cobertura.php>

Saraiva, G. S., Bonomo, R. & Souza, J. M. (2017). Avaliação de interpoladores geoestatísticos e determinísticos da evapotranspiração de referência diária para o estado do Espírito Santo. *Revista Agro@mbiente On-line*, 11(1), 21-30.

Selby, M. J. (1993). *Hillslope Materials and Processes*. (2ª ed.). New York: Oxford University Press.

Souza, S. O., Folharini, S. O., Salgado, G. P. L. & Oliveira, R. C. (2017). Uso de imagens ALOS-PALSAR para mapeamento da declividade do litoral norte paulista. In: Seminário Nacional de Gestão Sustentável de Ecossistemas Aquáticos: gestão ecossistêmica de zonas costeiras no Brasil. *Anais do Seminário Nacional de Gestão Sustentável de Ecossistemas*

Aquáticos: gestão ecossistêmica de zonas costeiras no Brasil. Cabo Frio, RJ, Brasil. pp. 77-84.

Spiegel, M. R. (1993) *Estatística*. (3a ed.). São Paulo: Pearson Makron Books/McGraw-Hill do Brasil.

Tominaga, L. K. (2007). *Avaliação de Metodologias de Análise de Risco a Escorregamentos: Aplicação de um Ensaio em Ubatuba, SP*. Tese de Doutorado, Departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

Varnes, D. J. (1984) Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. United Nations Educational. *Scientific and Cultural Organization*. Recuperado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0006/000630/063038EB.pdf>

Zaidan, R. T. (2006) *Riscos de Escorregamentos numa Bacia de Drenagem Urbana no Município de Juiz de Fora – MG*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Zaidan, R. T. (2017). Geoprocessamento Conceitos e Definições. *Revista de Geografia – PPGeo - UFJF*, 7(2), 195-201.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Robson Rodrigues Quina – 30%

Rômulo Montan Costa – 20%

Fabio Sanches – 20%

Francisco Carlos Moreira Gomes – 15%

Ricardo Tavares Zaidan – 15%