

## Fusão de imagens multissensor para a identificação de feições erosivas no município de Bauru/SP

### RESUMO

Devido à precisão e confiabilidade dos produtos obtidos a partir do Sensoriamento Remoto, algumas técnicas de processamento de imagens orbitais têm sido utilizadas para identificar e monitorar processos erosivos. A detecção de feições erosivas requer propriedades espectrais (cores) e características geométricas (formas/padrões), ambas contidas nas imagens. Portanto, técnicas de fusão representam uma importante ferramenta, pois combinam, em um só produto sintético, a resolução espectral de uma cena e a melhor resolução espacial de outra, as quais podem pertencer a sensores diferentes. Assim, o objetivo deste trabalho foi identificar a ocorrência de processos erosivos no município de Bauru/SP, usando imagens sintéticas provenientes da fusão entre imagens multiespectrais do LANDSAT 8/OLI e a banda pancromática do CBERS 4/PAN, cujas resoluções espaciais são 30 metros e 5 metros, respectivamente. Foram testadas as técnicas IHS, *Brovey*, Análise por Componentes Principais (ACP) e *Gram-Schmidt (GS)*, cujos resultados foram avaliados quanto à capacidade de transferência de detalhes de uma cena à outra, bem como a fidelidade espectral dos produtos gerados em relação às imagens originais. Baseando-se nos resultados obtidos, recomenda-se a utilização das técnicas Análise por Componentes Principais (ACP) e *Gram-Schmidt (GS)* para integrar as imagens, visando ao reconhecimento de feições erosivas na área de estudo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Processos Erosivos. Fusão de Imagens. LANDSAT 8/OLI. CBERS 4/PAN.

**Richard Fonseca Francisco**

[richard.fonseca@unesp.br](mailto:richard.fonseca@unesp.br)

[orcid.org/0000-0003-1488-2422](https://orcid.org/0000-0003-1488-2422)

Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Unesp), Rio Claro, São Paulo, Brasil.

**Antonio Celso de Oliveira Braga**

[oliveira.braga@unesp.br](mailto:oliveira.braga@unesp.br)

[orcid.org/0000-0003-3162-7589](https://orcid.org/0000-0003-3162-7589)

Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Unesp), Rio Claro, São Paulo, Brasil.

## INTRODUÇÃO

No município de Bauru/SP, os primeiros registros da ocorrência de processos erosivos são antigos e datam da década de 1960, cuja identificação ocorreu por meio da análise de fotografias aéreas dos locais mais atingidos (IPT, 1991). A gênese desse processo no município não se relaciona somente ao afloramento dos arenitos das formações Marília e Adamantina, as quais originam solos extremamente friáveis em decorrência do intemperismo físico-químico provocado pelas chuvas, como também resultam de ações antrópicas que aceleram e agravam consideravelmente a erosão (IPT, 1994).

Nas últimas décadas, houve um aumento significativo do número de conjuntos habitacionais e loteamentos implantados em locais inadequados em Bauru/SP, com obras de infraestrutura de drenagem pluvial e viária mal planejadas, ou até mesmo, ausentes em alguns locais, o que aumentou a ocorrência de ravinas e voçorocas de grandes proporções, sobretudo em áreas urbanas do município (THOMAZINI; CUNHA, 2012; CAMPOS; RODRIGUES, 2014).

Sem dúvida alguma, a existência de feições erosivas oferece riscos à população, além de restringir a própria dinâmica do processo de expansão urbana, pois há inutilização de extensas áreas pela perda de grandes volumes de solo e, conseqüentemente, assoreamento de cursos d'água e reservatórios que são essenciais ao abastecimento público de água (IWASA; FENDRICH, 1998; TUCCI, 2008). Por isso, é imprescindível a identificação e monitoramento da evolução de processos erosivos, sendo de responsabilidade do Poder Público a adoção de medidas preventivas e estruturais para seu controle.

Nesse contexto, produtos de sensoriamento remoto têm desempenhado um papel importante, visto que imagens orbitais fornecem informações sobre a cobertura vegetal e uso do solo, discriminando alvos de interesse em resoluções espectrais, espaciais e temporais variadas, que é uma condição necessária à detecção e acompanhando multitemporal de processos erosivos.

Chang e Bai (2018) destacaram que é sempre difícil para um sistema sensor detectar uma imagem que apresente, simultaneamente, alta resolução espacial, espectral e temporal, o que limita significativamente a ampla utilização e análise robusta de fontes de dados valiosas a várias aplicações, especialmente em relação à observação de fenômenos ambientais que exigem tal condição.

Na prática, a utilização de apenas um tipo de dado detectado remotamente pode não atender a todos os requisitos necessários para monitorar eficazmente as mudanças no ambiente terrestre. Por exemplo, alguns sensores de satélite fornecem imagens multiespectrais direcionadas à identificação de feições de interesse através de atributos espectrais das imagens, ao invés da informação espacial. Por outro lado, outros sensores geram imagens pancromáticas com alta resolução para detectar feições utilizando as características espaciais dos dados, em detrimento de seus atributos espectrais (WANG et al., 2005; CHEN et al., 2008).

Por exemplo, o sensor OLI (*Operational Land Imager*) a bordo do satélite LANDSAT 8 detecta remotamente imagens com riqueza espectral e radiométrica, cuja resolução espacial é de 30 metros (bandas espectrais) e 15 metros (banda pancromática), permitindo uma maior distinção de alvos na superfície terrestre. Todavia, o sensor PAN (Câmera Pancromática e Multiespectral) do satélite CBERS 4 gera cenas com menor resolução espectral e radiométrica, quando comparadas

àquelas obtidas pelo LANDSAT 8/OLI. Em contrapartida, as imagens captadas pela câmera PAN são de alta resolução espacial (5 metros), o que possibilita um monitoramento mais detalhado do ambiente, como por exemplo, a identificação de escorregamentos e processos erosivos em áreas urbanas.

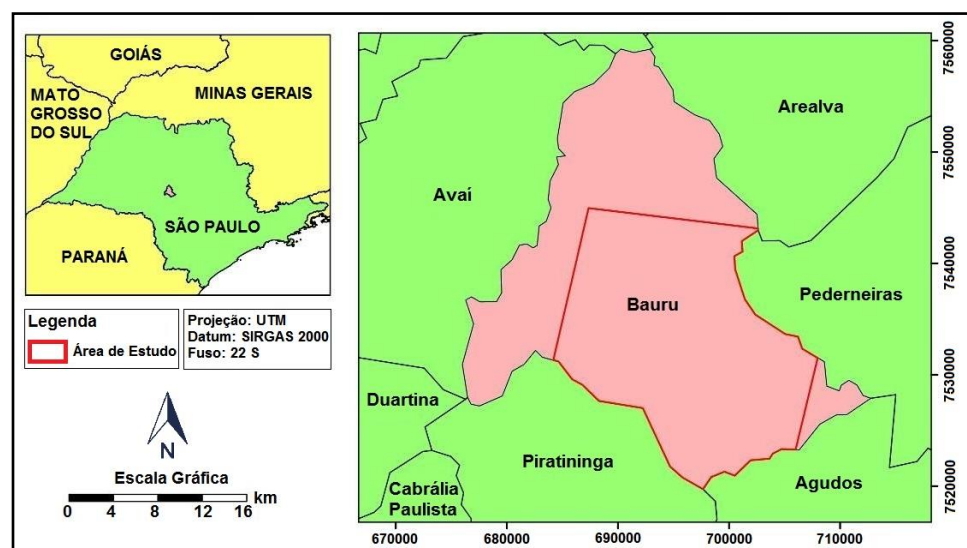
Para superar tal restrição, diversos trabalhos têm sido desenvolvidos para integrar dados orbitais com diferentes resoluções espaciais, radiométricas, espectrais e temporais, testando, inclusive, a viabilidade da fusão de imagens multissensor, podendo ser mencionados os trabalhos de Emelyanova et al. (2013), Xu, Zhang e Li (2014), Vivone et al. (2015), Wang, Wenzhong e Atkinson (2016), Wang et al. (2017), Kaplan e Avdan (2018), Li et al. (2019), Rumora et al. (2019) e Souza e Rodrigues (2020).

Mediante o exposto, o objetivo deste trabalho foi realizar a fusão multissensor de imagens dos satélites LANDSAT 8/OLI e CBERS 4/PAN. Para tanto, foram utilizados os seguintes métodos de fusão: IHS, *Brovey*, *Gram-Schmidt* (GS) e Análise por Componentes Principais (ACP), cujos produtos sintéticos foram avaliados quanto a sua aplicabilidade na identificação de feições erosivas no município de Bauru/SP.

## AQUISIÇÃO DOS DADOS

Foi selecionada a cena pancromática do CBERS 4/PAN com órbita 157 e ponto 125, de 08 de maio de 2020, abrangendo a área urbana e parte da área rural do município de Bauru/SP (INPE, 2020a). As imagens multiespectrais do satélite LANDSAT 8/OLI foram escolhidas considerando a mesma época em que a cena PAN foi obtida, a fim de manter condições atmosféricas e de iluminação semelhantes. As cenas OLI são ortorretificadas e georreferenciadas, com órbita 221 e ponto 75, as quais foram detectadas em 27 de abril de 2020 (USGS, 2020). A Figura 1 apresenta a área de estudo delimitada para a realização dos testes de fusão entre as imagens.

Figura 1 – Localização da área de estudo

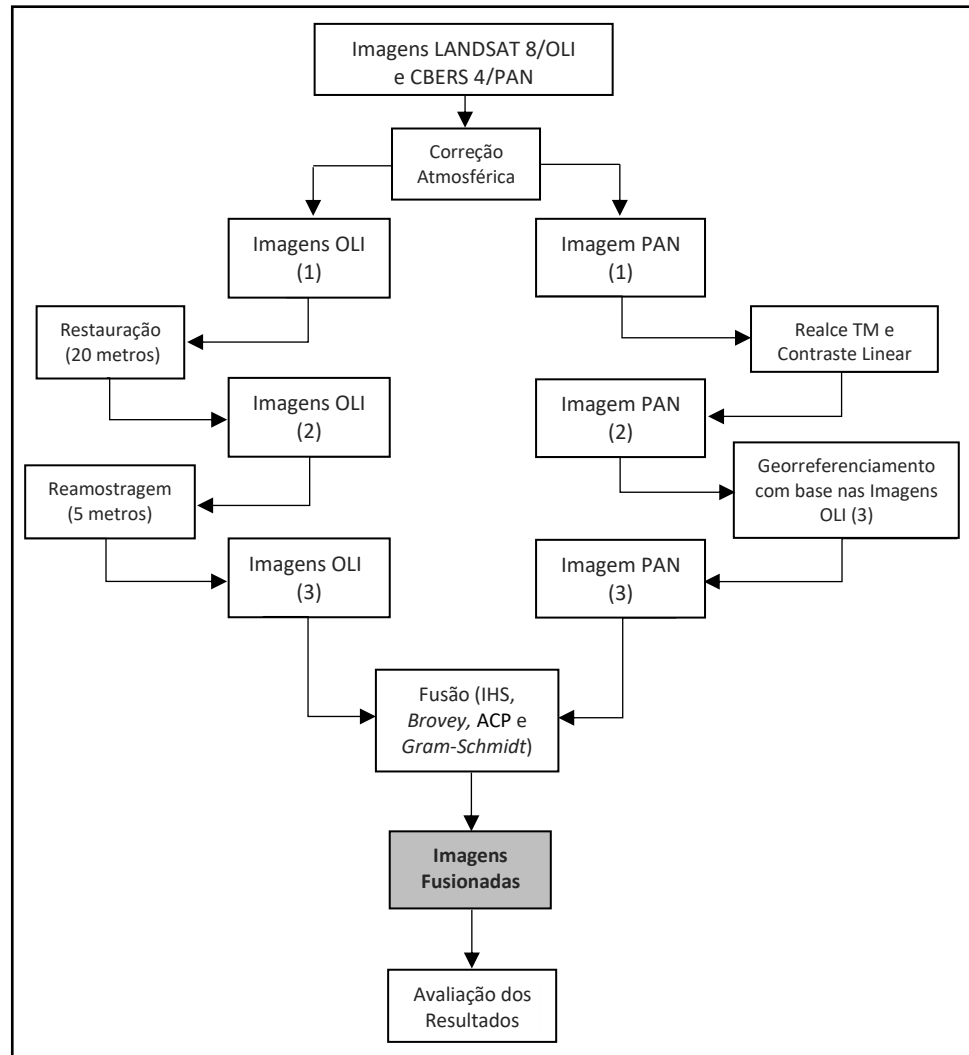


Fonte: Autoria própria (2020).

## MÉTODOS

O fluxograma da Figura 2 sintetiza o desenvolvimento da pesquisa, apresentando as etapas de trabalho detalhadas a seguir.

Figura 2 – Diagrama das etapas de trabalho



Fonte: Autoria própria (2020).

## PRÉ-PROCESSAMENTO DAS IMAGENS

No processamento das imagens, foram utilizados os softwares ENVI 5.2 (EXELIS, 2015), SPRING 5.5.6 (INPE, 2019) e ArcGIS 10.3 (ESRI, 2014). Primeiramente, as imagens do LANDSAT 8/OLI e a banda pancromática do CBERS 4/PAN, todas em formato *geotiff*, foram importadas para o ENVI para serem submetidas ao processo de correção atmosférica, a qual visa minimizar o efeito da interferência provocada pelo espalhamento da radiação eletromagnética pela atmosfera (BARBOSA; NOVO; MARTINS, 2019).

Neste caso, a correção atmosférica é necessária, por se tratar de fusão envolvendo imagens obtidas em datas diferentes. Para a correção atmosférica,

utilizou-se a subtração do pixel escuro ou *Dark Object Subtraction (DOS)*, proposta por Chavez (1988). Esta técnica é de simples aplicação e consiste em estimar a interferência atmosférica diretamente a partir dos números digitais contidos na própria imagem, como sombras absolutas e corpos d'água límpidos, desprezando a absorção atmosférica.

No SPRING, foi aplicado o filtro *Realce TM* a cena pancromática do sensor PAN, que é um filtro desenvolvido para compensar distorções radiométricas do sensor e realçar características da imagem (INPE, 2020b). Em seguida, foi utilizada uma função linear para o ajuste de contraste. É importante destacar que estas duas operações melhoram a discriminação dos alvos, facilitando a aquisição de pontos de controle para a correção geométrica entre as cenas OLI e PAN.

Na sequência, as bandas espectrais do sensor OLI resultantes da correção atmosférica foram importadas para o SPRING, para terem seus pixels restaurados para 20 metros de resolução espacial. A restauração é uma técnica de correção radiométrica, cujo objetivo é corrigir as distorções inseridas pelo sensor óptico no processo de geração das imagens digitais, resultando em novas imagens realçadas (FONSECA, 1988).

No *software* ENVI, estas imagens OLI foram reamostradas para 5 metros, mesma resolução espacial da imagem PAN, procedimento que em conjunto com a restauração, visa amenizar o RMS (Erro Médio Quadrático) no momento do georreferenciamento da cena pancromática do sensor PAN, com relação às bandas espectrais do sensor OLI. Esta etapa foi executada por intermédio da ferramenta de georreferenciamento manual do ArcGIS 10.3. Ao todo, foram coletados 75 pontos de controle, bem distribuídos ao longo da imagem.

## FUSÃO DE IMAGENS

Após os procedimentos destinados ao pré-processamento das imagens, foram testadas as técnicas IHS, *Brovey*, *Gram-Schmidt* (GS) e Análise por Componentes Principais (ACP) para a fusão entre a cena do CBERS 4/PAN e as imagens do LANDSAT 8/OLI, cujos algoritmos foram processados no *software* ENVI.

Para a aplicação das técnicas *IHS* e *Brovey*, foi empregada a composição colorida 6R5G4B das bandas do sensor OLI, visto que tal combinação entre as bandas possibilita uma boa distinção entre vegetação e solo exposto, elevando a capacidade de identificação visual e delimitação do contorno das feições erosivas em áreas urbanas e rurais.

Nas técnicas *Gram-Schmidt* (GS) e Análise por Componentes Principais (ACP), não há limitações quanto ao número de bandas utilizadas, diferindo da fusão *IHS* e *Brovey*, as quais se restringem à utilização de apenas três bandas no processo de fusão. Desta forma, todas as bandas do sensor OLI foram usadas nos métodos GS e ACP, exceto a banda na faixa do infravermelho termal. Para comparar os produtos da fusão GS e ACP com aqueles resultantes das técnicas *IHS* e *Brovey*, também foi elaborada a composição falsa-cor 6R5G4B.

O método de fusão *IHS* é bastante utilizado devido à simples aplicação e eficiência. Esta técnica consiste em transformar o espaço de cores RGB - Red (Vermelho), Green (Verde) e Blue (Azul) - no sistema IHS - Intensity (Intensidade), Hue (Matiz) e Saturation (Saturação), substituindo a componente I (intensidade)

pela banda pancromática de maior resolução espacial, no momento da reversão do espaço *IHS* para o espaço de cores *RGB*. Com isso, obtém-se uma imagem sintética que combina a melhor resolução espacial da pancromática com as propriedades espectrais das imagens originais (CARPER; LILLESAND; KIEFER, 1990; TU et al., 2001).

A transformação *Brovey* ou “normalização de cores” é um método de fusão de imagens baseado numa operação aritmética aplicada pixel a pixel, multiplicando-se cada uma das três bandas espectrais pela imagem pancromática de maior resolução espacial. Por fim, normalizam-se os valores resultantes, cujo produto final é uma imagem com pixels nas dimensões da imagem de maior resolução (CHAVEZ; SIDES; ANDERSON, 1991; BOVOLO et al., 2010).

Segundo Chavez e Kwarteng (1989), a fusão pelo método da Análise por Componentes Principais (ACP) é composta por quatro etapas:

- a) Primeiramente é efetuada uma transformação RGB – Componentes Principais nas *n* bandas originais, obtendo-se *n* novas imagens que contêm informação não correlacionada entre si. A CP1 conterá a informação comum a todas as *n* bandas originais, a segunda CP irá conter a feição espectral mais significativa do conjunto e, assim sucessivamente, até que a última CP apresente a informação restante (CRÓSTA, 1992);
- b) Com base em parâmetros estatísticos (média e variância) das CP, aplica-se uma função de transferência de contraste na banda pancromática, de maneira a ter o mesmo contraste que a CP1. Além disso, a banda pancromática é reamostrada para adequar-se à primeira componente principal, de modo a impedir as distorções na informação espectral (GARRASTAZÚ et al., 2009);
- c) Substitui-se a CP1 pela banda pancromática contrastada e reamostrada, que assume seu lugar no conjunto de CP;
- d) Aplica-se uma transformação inversa no conjunto (CP mais banda pancromática), para retorná-las ao espaço RGB, no qual todas as bandas híbridas possuem a resolução espacial da banda de maior resolução espacial.

A técnica de fusão *Gram-Schmidt* (GS), analogamente ao da Análise por Componentes Principais (ACP), é uma operação baseada na rotação e translação de vetores para torná-los ortogonais. O processo inicia-se com a simulação de uma banda pancromática, a partir das bandas multiespectrais de baixa resolução espacial (AIAZZI et al., 2006).

Em seguida, aplica-se uma transformação de *Gram-Schmidt* à banda pancromática simulada e às imagens multiespectrais, na qual a pancromática simulada é empregada como primeira banda (COSTA et al., 2011; LABEN e BOWER, 2000). Então, a primeira banda *Gram-Schmidt* é trocada pela banda pancromática de alta resolução e uma transformação inversa é aplicada para formar a imagem sintética de saída (MENESES; ALMEIDA, 2012).

Neste trabalho, a técnica de fusão GS foi testada com base na biblioteca de dados radiométricos do LANDSAT 8, utilizando a resposta do sensor para estimar a configuração da banda pancromática. Disponível no ENVI, este recurso fornece resultados ainda mais acurados e, por esta razão, em grande parte dos casos o

método *Gram-Schmidt* é mais preciso do que o método da Análise por Componentes Principais (AIAZZI et al., 2009).

Os métodos de fusão foram avaliados tanto qualitativamente, no âmbito visual/perceptivo, quanto quantitativamente, por meio da construção de matrizes de correlação linear envolvendo as imagens fusionadas, a banda pancromática e as cenas multiespectrais após o pré-processamento, utilizando o *software* ENVI.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Considerando que bons resultados no processo de fusão entre imagens multissensor dependem de um ajuste perfeito entre as cenas, obteve-se êxito na etapa de georreferenciamento da imagem CBERS 4/PAN baseado nas cenas LANDSAT 8/OLI, com um RMS de 1,087 (0,43 pixel), utilizando-se polinômio de 1º grau. Crósta (1992) recomenda que a margem de erro recomendável não exceda 1 pixel.

A avaliação visual das imagens fusionadas indicou que, em termos geométricos, ou seja, a capacidade de transferência de detalhes da imagem PAN para as bandas espectrais OLI, todas as técnicas de fusão aplicadas produziram resultados satisfatórios.

No âmbito espectral, a fusão por *IHS* não foi tão satisfatória, pois a imagem obtida apresentou distorções devido a cores muito vibrantes e excesso de brilho. As características do produto resultante dificultaram a distinção entre as feições erosivas e pavimentos da área urbana, constituídos de materiais com alta reflectância na composição 6R5G4B.

A fusão por normalização de cores (*Brovey*) produziu uma imagem sintética com cores ligeiramente mais equilibradas, no entanto, com pouco brilho, mesmo após a aplicação de contraste linear, resultado que também restringiu a definição de áreas onde ocorrem processos erosivos.

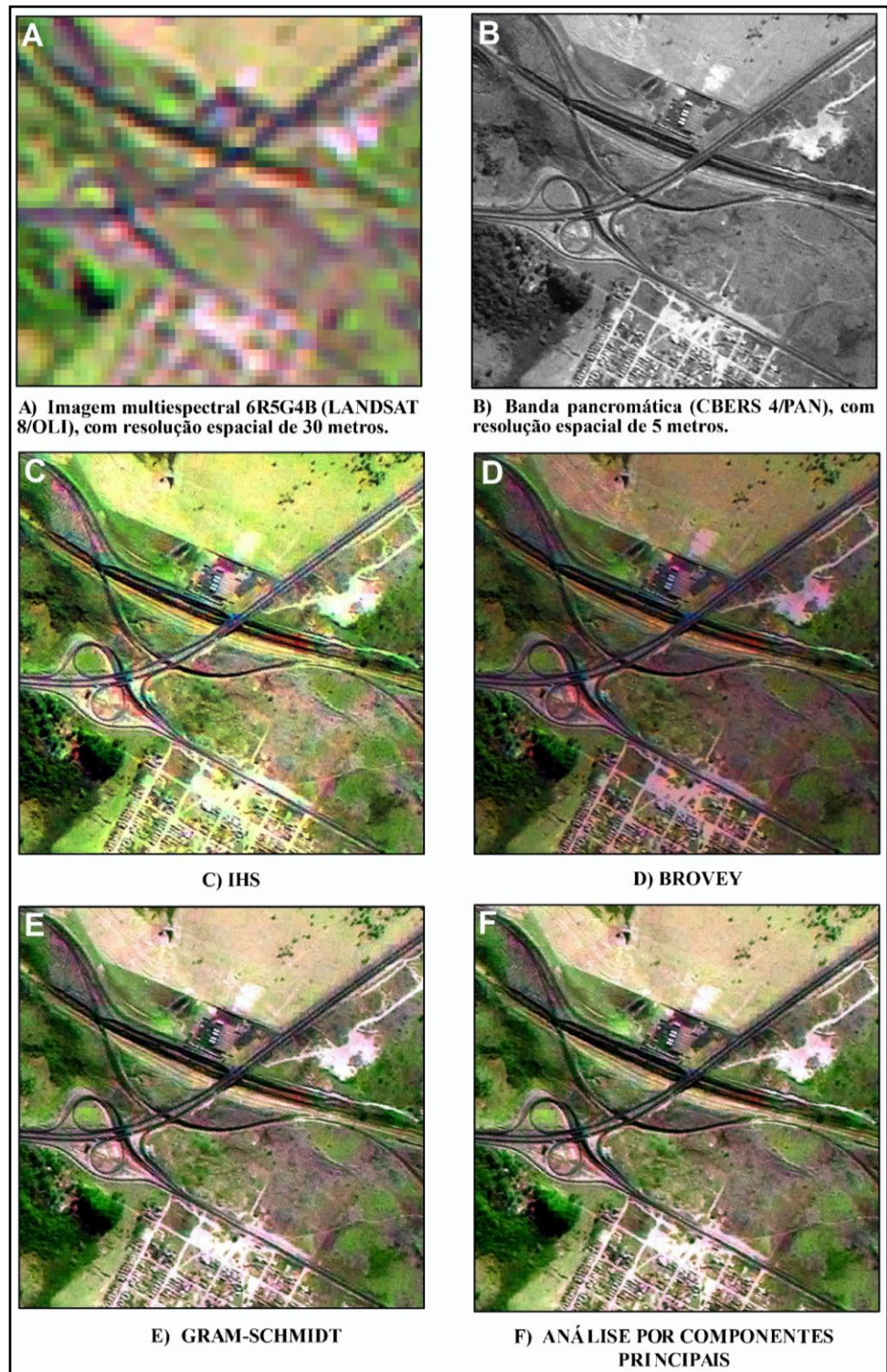
As imagens produzidas pelas técnicas *Gram-Schmidt* (GS) e Análise por Componentes Principais (ACP) foram as que mais preservaram as características espectrais das imagens OLI originais e, portanto, foram consideradas mais eficientes na identificação de processos erosivos na área urbana e rural do município de Bauru/SP. Meneses e Almeida (2012) ressaltam que o método de fusão mais eficiente é aquele que, além de preservar as cores das imagens originais, é capaz de transferir a informação espacial de alta frequência da imagem de alta resolução espacial para as cenas originais.

Contudo, uma comparação entre estes dois métodos indica que a imagem obtida com fusão GS é levemente superior ao produto gerado pela fusão ACP, produzindo cores e contraste mais equilibrados, devido à utilização de dados radiométricos específicos para o LANDSAT 8/OLI.

A Figura 3 apresenta os resultados dos testes de fusão para uma porção da área urbana do município de Bauru/SP. A partir da observação das imagens, é possível identificar a ocorrência de ravinas em arruamentos do bairro, além de uma voçoroca próxima a uma via de acesso.



Figura 3 – Comparação entre as técnicas de fusão – área urbana



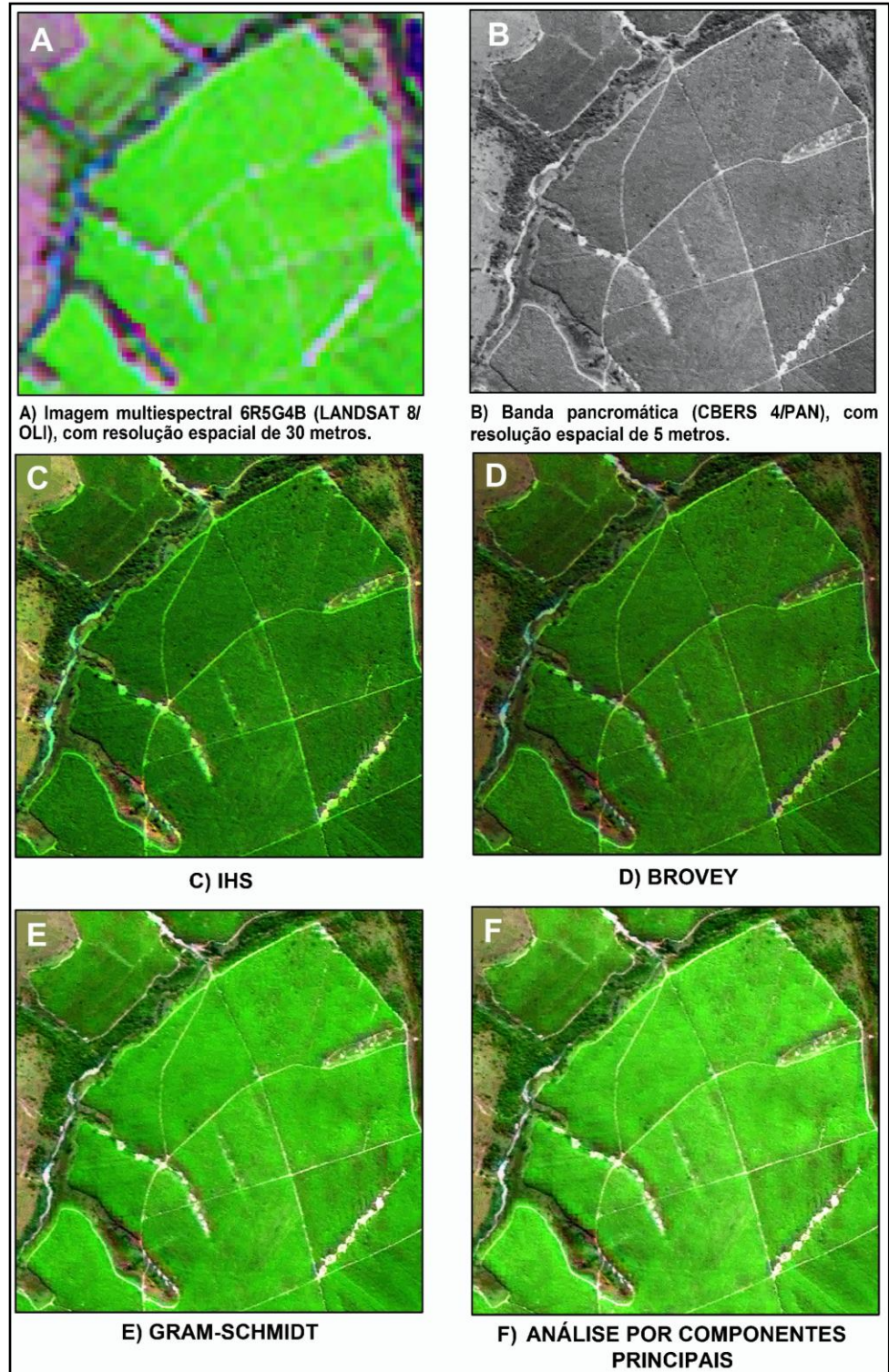
Fonte: Autoria própria (2020).

A Figura 4 mostra as imagens obtidas com as técnicas de fusão para uma subárea rural, sendo possível notar a existência de feições erosivas lineares que ocorrem em um talhão de reflorestamento de eucalipto. Além disso, é perceptível o acúmulo de sedimentos nas margens dos cursos d'água, que são provenientes



dos processos erosivos do entorno, indicando a possibilidade de estágio inicial de assoreamento.

Figura 4 – Comparação entre as técnicas de fusão – área rural



Fonte: Autoria própria (2020).

Em relação à fidelidade espectral, a Tabela 1 indica elevados valores de correlação linear média entre as imagens resultantes das técnicas de fusão *GS* e *ACP*, sendo iguais a 0,91 e 0,90, respectivamente. O método *IHS* apresentou o pior resultado, em termos de fidelidade espectral, com uma correlação linear média de 0,37 entre as bandas originais e as fusionadas.

Tabela 1 – Valores médios de correlação linear entre as imagens multiespectrais e as imagens fusionadas, para as bandas 6, 5 e 4

Técnicas de Fusão	Correlação Linear Média
IHS	0,37
Brovey	0,85
ACP	0,90
GS	0,91

Fonte: Autoria própria (2020).

A Tabela 2 corrobora o fato de que todas as técnicas empregadas resultaram em imagens fusionadas altamente correlacionáveis à banda pancromática, indicando adição de informação espacial de alta frequência às imagens do LANDSAT 8/OLI pré-processadas.

Tabela 2 – Valores médios de correlação linear entre a imagem pancromática e as bandas fusionadas 6, 5 e 4

Técnicas de Fusão	Correlação Linear Média
IHS	0,78
Brovey	0,90
ACP	0,97
GS	0,98

Fonte: Autoria própria (2020).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que todos os métodos de fusão empregados foram satisfatórios, no quesito transferência de detalhes da cena pancromática para as imagens multiespectrais com menor resolução espacial. Sugere-se que estes produtos sejam utilizados em mapeamentos cuja escala de trabalho não exceda 1:25.000, preservando a capacidade de identificação e nitidez de feições erosivas. A escala indicada é compatível com as bases cartográficas do Instituto Geográfico e Cartográfico (IGC) e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), ambas disponíveis para o município de Bauru/SP.

Por essa razão, estas imagens poderão ser integradas ao banco de dados georreferenciados da Secretaria Municipal de Meio Ambiente de Bauru (SEMMA), a fim de subsidiar a elaboração e implementação do novo Plano Diretor do município, cuja elaboração se encontra em amplo processo de discussão com os diversos setores sociais interessados.

Em função da alta correlação linear entre as imagens fusionadas e os dados de originais, recomenda-se a utilização dos métodos *Gram-Schmidt* (GS) e Análise por Componentes Principais (ACP), para a integração da resolução espectral e radiométrica das imagens LANDSAT 8/OLI com a resolução espacial da banda pancromática do CBERS 4/PAN.

# Multisensor image fusion to identify erosive features in city of Bauru/SP

## ABSTRACT

Due to the accuracy and reliability of the obtained products from Remote Sensing, some processing techniques of orbital images have been employed to identify and monitor erosive processes. Erosive features detection requires spectral properties (colors) and geometric characteristics (shapes/patterns), both contained in the images. Therefore, fusion techniques represent an important tool, because they combine, in only synthetic product, the spectral resolution of a scene and the best spatial resolution of another, which may belong to different sensors. Thus, the aim of this study was to identify the erosive processes occurrence in Bauru/SP, using synthetic images obtained from the fusion between LANDSAT 8/OLI multispectral images and the CBERS 4/PAN panchromatic band, whose spatial resolutions are 30 meters and 5 meters, respectively. IHS, Brovey, Principal Component Analysis (PCA) and Gram-Schmidt (GS) techniques were tested, whose results were evaluated for the ability to transfer details from one scene to another, as well as the spectral fidelity of generated products in relation to original images. Based on the achieved results, it's recommended to use Principal Component Analysis (PCA) and Gram-Schmidt (GS) techniques to integrate the images, aiming at the recognition of erosive features in the study area.

**KEYWORDS:** Erosive Processes. Image Fusion. LANDSAT 8/OLI. CBERS 4/PAN.

## REFERÊNCIAS

AIAZZI, B.; BARONTI, S.; SELVA, M.; ALPARONE, L. Enhanced Gram-Schmidt spectral sharpening based on multivariate regression of MS and pan data. In: **IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing**, p. 3806–3809, 2006.

AIAZZI, B.; BARONTI, S.; LOTTI, F.; SELVA, M. A comparison between global and context-adaptive pansharpening of multispectral images. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 6, p. 302–306, 2009.

BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. M.; MARTINS, V. S. **Introdução ao Sensoriamento Remoto de Sistemas Aquáticos: princípios e aplicações**. 1ª edição. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos. 161p. 2019.

BOVOLO, F.; BRUZZONE, L.; CAPOBIANCO, L.; GARZELLI, A.; MARCHESI, S.; NENCINI, F. Analysis of the effects of pansharpening in change detection on VHR images. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 7, p. 53–57, 2010.

CAMPOS, C. J. M. de; RODRIGUES, R. A. Estudo da erodibilidade do solo de um processo erosivo no município de Bauru/SP. In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEÓGRAFOS, 7., Vitória. **Anais [...]** Vitória: VII CGB, 2014.

CARPER, W. J.; LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. The use of intensity-hue-saturation transformations for merging SPOT panchromatic and multispectral image data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 56, n. 4, p. 459-467, 1990.

CHANG, N.; BAI, K. **Multisensor data fusion and machine learning for environmental remote sensing**. Boca Raton: CRC Press, 2018. 529 p. <https://doi.org/10.1201/9781315154602>

CHAVEZ, J. P. S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 24, p. 459-479, 1988. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90019-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90019-3)

CHAVEZ, P. S.; KWARTENG, A. Y. Extracting spectral contrast in Landsat thematic mapper image data using selective principal component analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 55, p. 339–348, 1989.

CHAVEZ, J. P. S.; SIDES, S. C.; ANDERSON, J. A. Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data Landsat TM and SPOT Panchromatic. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 57, p. 295 - 303, 1991.

CHEN, S.; SU, H.; ZHANG, R.; TIAN, J.; YANG, L. The tradeoff analysis for remote sensing image fusion using expanded spectral angle mapper. *Sensors*, v. 8, p. 520–528, 2008. <https://doi.org/10.3390/s8010520>

COSTA, N. R.; MARQUES, M. L.; ROSSI, E.; FERREIRA, M. V.; POLIZEL, S. P. Aplicação e avaliação de técnicas de fusão em imagens Ikonos e GeoEye. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 15. 2011, Curitiba. *Anais [...]* São José dos Campos: INPE, 2011. Artigos, p. 7761.

CRÓSTA, A. P. Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto. Campinas: UNICAMP, 1992, 170p.

EMELYANOVA, I. V.; MCVICAR, T. R.; VAN NIEL, T. G.; LI, L. T.; VAN DIJK, A. I. J. M. Assessing the accuracy of blending Landsat–MODIS surface reflectances in two landscapes with contrasting spatial and temporal dynamics: a framework for algorithm selection. *Remote Sensing Environmental*, v. 133, p. 193–209, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.02.007>

ESRI - ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **ArcGIS professional GIS for the desktop**, versão 10.3. *Software*. 2014.

EXELIS - VISUAL INFORMATION SOLUTIONS. **ENVI**, versão 5.2. *Software*. 2015.

FONSECA, L. M. G. **Restauração e interpolação de imagens do satélite LANDSAT por meio de técnicas de projeto de filtros FIR**. 1988. 148 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, 1988.

GARRASTAZÚ, M. C.; LUZ, J. da; ROSOT, M. A. D.; OLIVEIRA, Y. M. M. de. Técnicas de fusão aplicadas a imagens do satélite ALOS. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 14. 2009, Natal. *Anais [...]* São José dos Campos: INPE, 2009. Artigos, p. 6959-6965.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **SPRING (Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas)**, versão 5.5.6. *Software*. 2019.

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Catálogo de imagens orbitais digitais do satélite CBERS 4**. Divisão de Geração de Imagens (DGI), 2020a. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/catalogo/>>. Acesso em: 10 abr. 2020.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Manuais do SPRING: tutorial de geoprocessamento**. São José dos Campos: INPE, 2020b.



IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Prevenção de erosão urbana e conservação de recursos hídricos: projeto piloto de Bauru e rio Batalha (1ª fase).** São Paulo: IPT, 1991.

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Plano de obras de contenção das erosões urbanas do município de Bauru, SP: aplicação da carta geotécnica (2º fase).** São Paulo: IPT, 1994. 301 p.

IWASA, O. Y.; FENDRICH, R. Controle da erosão urbana. In: OLIVEIRA, A. M. dos S.; BRITO, S. N. A. de (Eds.). **Geologia da engenharia.** São Paulo: ABGE/IPT, 1998. cap. 16, p. 271-281.

KAPLAN, G. J.; AVDAN, U. Sentinel-2 Pan Sharpening - Comparative Analysis. **Proceedings**, v. 2, n. 7, 2018. <https://doi.org/10.3390/ecrs-2-05158>

LABEN, C. A.; BROWER, B. V. **Process for enhancing the spatial resolution of multispectral imagery using pan-sharpening.** United States Eastman Kodak Company (Rochester, NY), US Patent 6011875, p. 1–9, 2000.

LI, W.; JIANG, J.; GUO, T.; ZHOU, M.; TANG, Y.; WANG, Y.; ZHANG, Y.; CHENG, T.; ZHU, Y.; CAO, W.; YAO, X. Generating Red-Edge Images at 3M Spatial Resolution by Fusing Sentinel-2 and Planet Satellite Products. **Remote Sensing**, v. 11, n. 12, 2019. <https://doi.org/doi:10.3390/rs11121422>

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. (org.) **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto.** Brasília: Universidade de Brasília - UnB, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, 2012.

RUMORA, L.; GAŠPAROVIĆ, M.; MILER, M.; MEDAK, D. Quality assessment of fusing Sentinel-2 and WorldView-4 imagery on Sentinel-2 spectral band values: a case study of Zagreb, Croatia. **International Journal of Image and Data Fusion**, v. 11, n. 1, p. 77-96, 2019. <https://doi.org/10.1080/19479832.2019.1683624>

SOUZA, S. V. de; RODRIGUES, S. W. P. Dados multi-sensores para reconhecimento e mapeamento de ambientes sedimentares na planície do rio Amazonas. **Geociências**, v. 39, n. 2, p. 425-436, 2020.

THOMAZINI, L. S.; CUNHA, C. M. L. Análise do relevo da bacia do córrego Castelo (BAURU – SP): a influência da urbanização nos processos erosivos. **Caminhos da Geografia**, v. 13, n. 42, p. 169–189, 2012.

TU, T.; SU, S.; SHYU, H.; HUANG, P. S. Efficient intensity-hue-saturation-based image fusion with saturation compensation. **Optical Engineering**, v. 40, n. 5, p. 720-728, 2001. <https://doi.org/10.1117/1.1355956>

TUCCI, C. E. M. Águas urbanas. **Estudos Avançados**, v. 22, p. 97-112, 2008.

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Earth Explorer**: catálogo de imagens orbitais digitais do satélite LANDSAT 8/OLI. 2020. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 07 abr. 2020.

VIVONE, G.; ALPARONE, L.; CHANUSSOT, J.; MURA, M. D.; GARZELLI, A.; LICCIARDI, G.; RESTAINO, R.; WALD, L. A critical comparison among pansharpening algorithms. **IEEE International Geoscience and Remote Sensing**, v. 53, n. 5, p. 2565-2586, 2015. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2361734>

WANG, Z.; ZIOU, D.; ARMENAKIS, C.; LI, D.; LI, Q. A comparative analysis of image fusion methods. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 43, n. 6, p. 1391-1402, 2005. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.846874>

WANG, Q.; WENZHONG, S.; ATKINSON, P. M. Area-to-point regression kriging for pan-sharpening. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 114, p. 151-165, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.02.006>

WANG, Q.; BLACKBURN, G. A.; ONOJEGHUO, A. O.; DASH, J.; ZHOU, L.; ZHANG, Y.; ATKINSON, P. M. Fusion of Landsat 8 OLI and Sentinel-2 MSI Data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 55, p. 3885-3899, 2017. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2683444>

XU, Q.; ZHANG, Y.; LI, B. Recent advances in pansharpening and key problems in applications. **International Journal of Image and Data Fusion**, v. 5, n. 3, p. 175-195, 2014. <http://dx.doi.org/10.1080/19479832.2014.889227>

**Recebido:** 07 ago. 2020

**Aprovado:** 11 nov. 2020

**DOI:** 10.3895/rbgeo.v9n1.12967

**Como citar:** FRANCISCO, R. F.; BRAGA, A. C. O. Fusão de imagens multissensor para a identificação de feições erosivas no município de Bauru/SP. **R. bras. Geom.**, Curitiba, v. 9, n. 1, p. 021-035, jan./mar. 2021. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo>>. Acesso em: XXX.

**Correspondência:**

Richard Fonseca Francisco

Avenida Helvino de Moraes, 1385, CEP 12070-450, Taubaté, São Paulo, Brasil.

**Direito autoral:** Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

