AVALIAÇÃO DE ABORDAGEM PARA *DOWNSCALE* DE TEMPERATURA DE BRILHO DE IMAGENS MODIS E SENSIBILIDADE DA JANELA DE MOVIMENTO: APLICAÇÃO EM SISTEMA ESTUARINO LAGUNAR TROPICAL

Augusto Hugo Farias da Cunha[1], *Matheus Henrique Tavares*[2], *Brunna Mariane Neri Donato Moura*[3], *Anderson Ruhoff*[2], *Carlos Ruberto Fragoso Jr.*[3], *David da Motta Marques*[2],

[1]Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, *hf.cunha@yahoo.com*, [2]Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, [3]Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Alagoas, Maceió/AL

RESUMO

Dados de sensores a bordo de satélites fornecem complemento ao monitoramento da temperatura superficial de lagos e reservatórios. Para minimizar a questão do *trade-off* entre resolução de imagens, algoritmos de fusão de imagens podem ser utilizados para aumentar a resolução temporal de imagens com maior resolução espacial. Neste trabalho, aplicamos o algoritmo de *downscaling* SADFAT em imagens de temperatura de brilho do sensor MODIS para resolução espacial do Landsat 7 ETM+ para um estuário tropical, avaliando a sua sensibilidade ao tamanho da janela de movimento. Se observou bom desempenho do algoritmo, com resultados similares aos encontrados na literatura, comparados à temperatura de superfície. Houve melhoria dos resultados com aumento do tamanho da janela de movimento, encontrando valor de REQM de 1,18°C para a janela com 48x48 pixels. Esta ferramenta se mostrou promissora para melhorar a resolução de dados de temperatura temperatura de superfície para regiões onde o produto MOD11 não está disponível.

Palavras-chave – *Downscaling*, SADFAT, temperatura de brilho, janela de movimento.

ABSTRACT

Satellite sensors provide data to complement the monitoring of the surface temperature of lakes and reservoirs. In order to minimise the trade-off between the resolution of images, algorithms for fusion of images can be used to enhance the temporal resolution of images with higher spatial resolution. In this work, we applied the SADFAT algorithm to sensor MODIS' brightness temperature images to downscale them to the spatial resolution of Landsat 7 ETM+ for a estuary in Northeast Brazil, assessing its sensibility to the moving window size. The algorithm showed good performance, with results similar to other studies in the literature, when compared to the surface temperature. The results improved with the increase of the moving window size, with values of RMSE of 1,18°C found for the window with 48x48 pixels. This approach provide a tool to increase the surface temperature data in regions where the product MOD11 is not available.

Key words – *Downscaling, SADFAT, brightness temperature, moving window.*

1. INTRODUÇÃO

A temperatura da água é uma variável central na qualidade da água de lagos e reservatórios, regulando vários processos físicos, químicos e biológicos [1]. Por isso, a sua avaliação é essencial para entender o funcionamento e a estrutura destes ecossistemas. Dados de sensores a bordo de satélites têm sido crescentemente uma fonte de dados destes corpos d'água, servindo como complemento ao monitoramento desta variável, dando informação espacializada da temperatura de superfície e contando com longas séries temporais, a depender do sensor utilizado [2, 3].

Na escolha do sensor correto para se estimar a temperatura de superfície de lagos e reservatórios, uma questão importante é o *trade-off* entre a resolução espacial/temporal. Sensores com maior resolução espacial tendem a ter menor resolução temporal, e por isso para corpos d'água menores é possível se obter imagens com uma frequência menor. Nesse sentido, dois dos sensores mais utilizados para estimativas de temperatura superficial de lagos são os sensores MODIS, a bordo dos satélites Terra e Aqua, e o sensor Landsat 7 ETM+ [4–7]. As imagens Landsat 7 ETM+ possuem resolução temporal de 16 dias, e resolução espacial de 30 m para todas as bandas, exceto a banda termal, que tem resolução espacial de 100 m. Já as imagens termais MODIS, com suas bandas termais 31 e 32, possuem resolução de 1000 m e são diárias.

Para estudos em lagos e reservatórios de pequeno porte (com área superficial de até 5 km^2, por exemplo), é possível utilizar apenas o sensor Landsat para este monitoramento da temperatura. No entanto, apenas cerca de 25 imagens para o corpo d'água estão disponíveis por ano, a depender ainda da cobertura de nuvens na região. Para aumentar a quantidade de imagens disponíveis, é possível utilizar técnicas de fusão de imagens para aumentar a resolução de imagens MODIS com este intuito. O *downscaling* de imagens MODIS a partir de imagens Landsat foi proposto por Gao e colaboradores [8], e recentemente atualizado por Weng e colaboradores [9] com foco em imagens de temperatura de superfície destes dois sensores. Partindo do pressuposto de que há consistência na reflectância e radiância de superfície captada pelos dois sensores, a técnica de *downscaling* permite aumentar a resolução das imagens MODIS para imagens Landsat, tomando como base um par de imagens Landsat e um par de imagens MODIS em datas coincidentes, para se

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

obter então imagens de temperatura de superfície, em dias entre estes dois pares de imagens, com resolução espacial de 30 m como produto final.

Contudo, ainda há limitação quanto a obtenção de dados do produto de temperatura de superfície continental (MOD11). Em regiões estuarinas, a salinidade da água, em função da troca de água com o mar, pode levar a identificar a região como não continental. Para estas regiões, o *downscaling* de temperatura pode ser realizado por outra abordagem, aplicando o método ao produto de radiância de superfície, sendo possível posteriormente a conversão de temperatura de brilho para temperatura de superfície por algoritmos desenvolvidos para este fim [6, 10, 11]. Dada a maior facilidade de comparação de fusão de imagens de temperatura de brilho do que de radiância, e por haver uma relação direta entre estas duas variáveis, optou-se por realizar o *downscale* da temperatura de brilho. Além disso, o algoritmo de *downscale* é realizado para os pixels dentro de uma janela, denominada janela de movimento, e esta janela tem sido escolhida de forma subjetiva nos trabalhos com os algoritmos de *downscale* [12]. Desta forma, a sensibilidade do algoritmo a esta janela ainda precisa ser melhor avaliada. O objetivo deste trabalho é avaliar a precisão do *downscaling* da temperatura de brilho, aplicando o algoritmo SADFAT [9], utilizando imagens Landsat 7 ETM+ e MODIS como base, e avaliar a sensibilidade do algoritmo ao tamanho da janela de movimento.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

O estudo foi realizado na laguna Mundaú, na cidade de Maceió, Alagoas 1. A lagoa está inserida no Complexo Lagunar Mundaú-Manguaba, que abrange uma área de cerca de 24 km^2 e possui profundidade média de 1,5 m. Esta laguna recebe o aporte da bacia hidrográfica do Rio Mundaú, com uma área de contribuição de 4128 km^2, e é bastante afetada pela urbanização na região, visto que o processo de ocupação à margem da lagoa ocorreu de forma desordenada.

2.2. Algoritmo de *downscaling* das imagens MODIS

A técnica de *downscaling* utilizada foi o algoritmo SADFAT (*Spatio-temporal Adaptive Data Fusion Algorithm for Temperature mapping*), desenvolvida por Weng e colaboradores [9] a partir dos trabalhos de Gao e colaboradores [8] e Zhu e colaboradores [13]. Estas técnicas se baseiam no princípio de que as imagens MODIS e Landsat tem valores consistentes de reflectância e radiância captados, em função da qualidade de seus sensores, similaridade entre as bandas, e da proximidade de imageamento no tempo (em geral, uma diferença de 15 a 30 minutos entre as imagens). Este algoritmo é realizado pixel a pixel, todos com o tamanho do pixel da imagem fina (imagem Landsat), e baseado em duas datas, aqui denominadas de t_1 e t_3, com imagens Landsat e MODIS na mesma data como base. O *downscaling* é, então, realizado para todas as imagens MODIS entre estas duas datas, denominadas aqui de t_2.

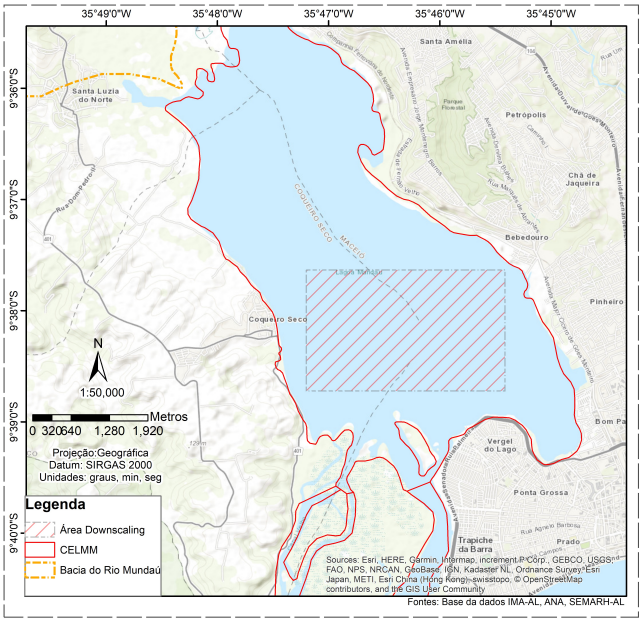


Figura 1: Localização da laguna Mundaú, indicando a localização da boia de monitoramento instalada na laguna e o retângulo utilizado para o *downscaling*.

Para cada pixel é utilizada uma janela, denominada janela de movimento, em que os demais pixels da imagem fina são classificados em similares e não-similares ao pixel central, baseado na correlação entre eles, para também classificar os pixels da imagem grosseira (imagem MODIS) em homogêneos e heterogêneos. O tamanho padrão desta janela de movimento é de 24 pixels por 24 pixels, mas outros tamanhos de janela também foram testados aqui neste trabalho, como detalhado na seção 2.4. A partir desta similaridade entre os pixels com o pixel central, são calculados o peso normalizado, em função da distância de cada pixel ao pixel central e da correlação, um coeficiente de conversão, em função da relação entre os pixels da imagem fina e da imagem grosseira, e um peso temporal, em função da mudança do valor de cada pixel da imagem grosseira na janela de movimento entre t_2 e as datas base (t_1 e t_3). Para maior detalhamento da rotina, favor verificar os trabalhos de [9] e [13].

2.3. Imagens utilizadas

Para utilizar algoritmo de *downscaling*, foram necessários os dados de radiância da banda do infravermelho termal, para transformação em temperatura de brilho, e das bandas do vermelho e infravermelho próximo, que são usadas no algoritmo para avaliar o uso do solo e auxiliar na seleção dos pixels similares. Foram utilizadas as bandas 3 (vermelho), 4 (infravermelho próximo) e 6_2 (infravermelho termal) do Landsat 7 ETM+, e do MODIS, a média das bandas 31 e 32 do produto MODTBGA (bandas de radiância no infravermelho termal), e as bandas 1 e 2 do produto MOD09GA (vermelho e infravermelho próximo). Foram utilizadas imagens de 7 datas diferentes, entre abril e novembro de 2017, com intervalo de um mês entre elas.

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

2.4. Procedimento de processamento

Há um pré-processamento que precisa ser feito para construir as imagens (composição das 3 bandas) que são entrada para o algoritmo de *downscale*. Inicialmente, é feito um *resample* das imagens MODIS para uma resolução de 960 m, de forma a conter pixels inteiros das imagens Landsat. Em seguida, as imagens MODIS e Landsat foram recortadas para a área de interesse (vista na Figura 1), e é feita *(i)* a conversão para temperatura de brilho, invertendo a equação da Lei de Planck, conforme Chander e colaboradores [14]; *(ii)* a conversão das bandas de infravermelho e vermelho para reflectância, conforme Chander e colaboradores [14] para as imagens Landsat, e utilizando o fator de escala de cada banda para as imagens MODIS; e *(iii)* a retirada dos pixels de qualidade baixa, baseado na banda de qualidade para o Landsat, e no produto de máscara de nuvens MOD35 para imagens MODIS. Então, foi feito um novo *resample* das imagens MODIS, para 30 m, de forma às imagens MODIS e Landsat conterem o mesmo número de pixels, para serem comparáveis entre si. Por último, foi feita uma composição de imagens, utilizando as 3 bandas, para cada data, que são os arquivos de entrada para o algoritmo SADFAT. O algoritmo foi, então, rodado para 4 tamanhos de janela de movimento, todas quadradas, com tamanho de 6, 12, 24 e 48 pixels.

Para verificar a qualidade do *downscaling*, foi considerada, para cada análise, uma imagem de intervalo Landsat para ser comparada com a imagem resultado do *downscale*, isto é, entre as datas base (t_1 e t_3), há um imagem Landsat em t_2, e o *downscale* feito para a imagem MODIS nesta mesma data (t_2). Para fazer esta comparação entre a imagem Landsat e a imagem MODIS após o *downscale*, foram utilizadas como métricas o viés, a raiz do erro quadrático médio (REQM) e o ERGAS (síntese do erro relativo adimensional global), uma medida de qualidade da fusão de imagens que varia de 0 a $+\infty$, em que 0 representa uma fusão perfeita [15].

3. RESULTADOS

Em uma análise do comportamento médio do método, entre as 7 imagens analisadas, se observou, para todos os tamanhos de janela de movimento, um bom resultado no *downscale*, com REQM máximo de 1,39ºC e mínimo de 1,18ºC (Tabela 1). Os valores de ERGAS também refletem este bom ajuste entre as imagens de *downscale* e as imagens Landsat, com valor de máximo de 0,186, bem próximos a zero. Também se nota um viés próximo a zero, com uma leve tendência à superestimação da temperatura de brilho na laguna no processo de *downscale*.

Tabela 1: Média das Métricas calculadas entre as 7 imagens Landsat de temperatura de brilho e a imagem MODIS após o *downscale* para cada tamanho da janela de movimento.

Tamanho da janela	Viés (ºC)	REQM (ºC)	ERGAS
6x6	0,232	1,39	0,186
12x12	0,215	1,34	0,182
24x24	0,196	1,27	0,179
48x48	0,170	1,18	0,177

Na Figura 2, vemos dois exemplos do *downscale* realizado, um com resultado bastante bom, e outro com maior variabilidade nas estimativas. Se observa viés elevado na imagem do dia 26/04, chegando a mais de 4ºC em algumas regiões da imagem. Contudo, nas duas imagens, observa-se que na maior parte dos pixels o viés está próximo a zero. A diferença entre pixels válidos das imagens ocorre devido às etapas de processamento, que incorpora as falhas de todas as imagens utilizadas, sendo a imagem do viés incorpora ainda as falhas da imagem Landsat da data alvo, utilizada para comparação com a imagem resultante do *downscale*.

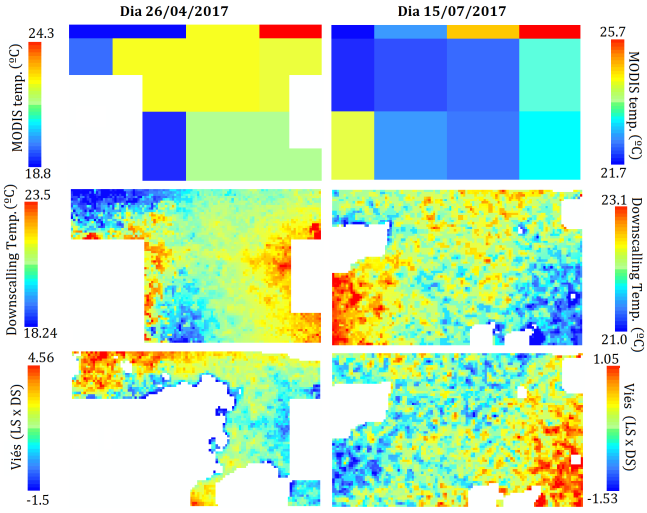


Figura 2: Exemplos do downscale realizado para a temperatura de brilho para a janela de movimento de 24 pixels. De cima para baixo: MODIS original, MODIS *downscaled*, e viés entre o *downscale* (DS) e Landsat (LS) em uma data coincidente.

4. DISCUSSÃO

Este é o primeiro trabalho que aborda o downscaling da temperatura de brilho derivado da radiância de superfície. Quando comparado com trabalhos que realizaram *downscale* da temperatura de superfície, os resultados obtidos estão similares com o que se encontra na literatura [9, 16]. Um erro médio na faixa de 1,25ºC a 2,03ºC [9] e valores de ERGAS próximos a 2 [16] foram observados para *downscale* de temperatura de superfície, valores consideravelmente maiores do que os vistos aqui, embora, em seus trabalhos, tenham sido consideradas cenas inteiras, e não apenas recortes da imagem como neste trabalho.

As falhas são um fator limitante no processo de *downscale*: as falhas presentes nos dois pares de imagens Landsat e MODIS nas datas base, e as falhas na imagem MODIS, da data alvo, foram ser transmitidas ao produto final, por causa da comparação pixel a pixel do algoritmo (Figura 2). Foi observado que, onde há falhas nas imagens, a tendência é a diminuição da precisão do algoritmo. Um dos fatores que podem ter contribuído para esta pior performance do algoritmo é a baixa quantidade de pixels válidos na janela de movimento. Além disso, possíveis erros dos sensores podem ter influenciado as estimativas na vizinhança de pixels com falhas. Desta forma, na imagem em que há mais falhas, o viés entre a imagem do *downscale* e a imagem Landsat é maior, e na imagem com poucas falhas, os valores de viés

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

são consideravelmente menor.

O aumento do tamanho da janela tem um grande efeito na melhora do *downscale*. Isto deve ocorrer porque, quando há mais pixels na janela de movimento, há uma maior informação para a conversão dos pixels, o que causa uma uniformização dos valores de temperatura de brilho para valores próximos aos valores médios da imagem Landsat (observado pelos menores valores de erro máximo em cada data), contribuindo para a redução do erro. Além disso, o maior número de pixels na janela pode ser útil para ajudar na conversão dos pixels próximos aos pixels com falha. Poucos trabalhos tratam da influência do tamanho da janela de movimento na qualidade do *downscale*. De fato, como ressaltou o trabalho de Ping e colaboradores [12], o tamanho da janela de movimento é muitas vezes escolhida de forma subjetiva. Os autores propuseram um algoritmo para determinar o tamanho ótimo da janela de janela de movimento, de forma a minimizar o erro do *downscale* no algoritmo de Gao e colaboradores [8]. Apesar dos resultados mostrarem que houve melhoria na performance do algoritmo com esta escolha automática do tamanho da janela, os autores não discutiram se, em geral, foi um aumento ou redução da janela que causou esta melhoria, e se isso foi constante em toda a imagem.

Dada a limitação da disponibilidade de imagens MODIS de temperatura superficial em regiões estuarinas, a abordagem proposta aqui se mostrou promissora para superar tal limitação para geração de imagens diárias de temperatura de superfície. O resultado final da temperatura, após a conversão da radiância de superfície, não foi testada neste trabalho, e por isso recomenda-se estudos testando a precisão de algoritmos para estimar a temperatura de superfície de imagens Landsat 7 ETM+ para estes produtos de *downscale*, de forma a validar esta abordagem.

5. CONCLUSÕES

A técnica de *downscaling*, utilizando o algoritmo SADFAT [9], de imagens de temperatura de brilho do produto MODIS MODTBGA a partir de imagens Landsat 7 ETM+ se mostrou uma boa ferramenta para aumentar a resolução temporal de imagens Landsat, mesmo para regiões em que o produto MOD11 não está disponível. Ressalta-se que o aumento do tamanho da janela de movimento melhorou a qualidade do *downscale*, com valor da REQM de 1,18°C para uma janela de 48x48 pixels. Recomendamos trabalhos analisando a precisão de algoritmos de estimativa da temperatura superficial de imagens Landsat 7 ETM+ aplicados a imagens resultantes do *downscale* aplicado aqui.

6. REFERÊNCIAS

[1] HORNE, A. J.; GOLDMAN, C. R. *Limnology*. [S.l.]: McGraw-Hill New York, 594 pp., 1994.

[2] KAY, J. E. et al. Accuracy of lake and stream temperatures estimated from thermal infrared images. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, v. 41, n. 5, p. 1161–1175, 2005.

[3] HANDCOCK, R. et al. Accuracy and uncertainty of thermal-infrared remote sensing of stream temperatures at multiple spatial scales. *Remote Sensing of Environment*, v. 100, n. 4, p. 427–440, 2006.

[4] WLOCZYK, C. et al. Sea and lake surface temperature retrieval from Landsat thermal data in Northern Germany. *International Journal of Remote Sensing*, v. 27, n. 12, p. 2489–2502, 2006.

[5] CROSMAN, E. T.; HOREL, J. D. MODIS-derived surface temperature of the Great Salt Lake. *Remote Sensing of Environment*, v. 113, n. 1, p. 73–81, 2009.

[6] LAMARO, A. A. et al. Water surface temperature estimation from Landsat 7 ETM+ thermal infrared data using the generalized single-channel method: Case study of Embalse del Río Tercero (Córdoba, Argentina). *Advances in Space Research*, v. 51, n. 3, p. 492–500, 2013.

[7] PRATS, J. et al. LakeSST: Lake skin surface temperature in French inland water bodies for 1999–2016 from Landsat archives. *Earth System Science Data*, v. 10, n. 2, p. 727–743, 2018.

[8] GAO, F. et al. On the blending of the Landsat and MODIS surface reflectance: predicting daily Landsat surface reflectance. *IEEE Transactions on Geoscience*, v. 44, n. 8, p. 2207–2218, 2006.

[9] WENG, Q.; FU, P.; GAO, F. Generating daily land surface temperature at Landsat resolution by fusing Landsat and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, v. 145, p. 55–67, 2014.

[10] SIMON, R.; TORMOS, T.; DANIS, P.-A. Retrieving water surface temperature from archive LANDSAT thermal infrared data: Application of the mono-channel atmospheric correction algorithm over two freshwater reservoirs. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 30, p. 247–250, 2014.

[11] ALLAN, M. G. et al. Spatial heterogeneity in geothermally-influenced lakes derived from atmospherically corrected Landsat thermal imagery and three-dimensional hydrodynamic modelling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 50, p. 106–116, 2016.

[12] PING, B.; MENG, Y.; SU, F. An enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model based on optimal window. In: IEEE. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2017 IEEE International*. [S.l.], 2017. p. 3377–3380.

[13] ZHU, X. et al. An enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model for complex heterogeneous regions. *Remote Sensing of Environment*, v. 114, p. 2610–2623, 2010.

[14] CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; HELDER, D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, v. 113, p. 893–903, 2009.

[15] WALD, L. Quality of high resolution synthesized images: Is there a simple criterion? In: SEE/URISCA. *Terceira conferência Fusion of Earth Data: merging point measurements, raster maps and remotely sensed images*. [S.l.], 2000. p. 99–103.

[16] ZURITA-MILLA, R.; CLEVERS, J. G. P. W.; SCHAEPMAN, M. E. Unmixing-based Landsat TM and MERIS FR data fusion. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, v. 5, n. 3, p. 453–457, 2008.

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings