

Correções atmosféricas em imagem hiperespectral (HICO) para fins de monitoramento da qualidade da água

Carlos Alberto Sampaio de Araújo¹
Igor Ogashawara²
Marcelo Pedroso Curtarelli¹
Joaquim Antônio Dionísio Leão¹
João Antônio Lorenzetti¹
José Luiz Stech¹
Fernanda Garcia Sampaio³

¹Divisão de Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - DSR/INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{carlos, mpedroso, loren, stech}@dsr.inpe.br ; joaquim@dpi.inpe.br

²Department of Earth Sciences, Indiana University - Purdue University Indianapolis
723 W. Michigan Street, SL118 -- 46202 -Indianapolis, IN, USA.
igoroga@gmail.com

³Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA Meio Ambiente
Caixa Postal 69 - 13820-000 - Jaguariúna - SP, Brasil
fernanda.sampaio@embrapa.br

Abstract. The remote sensing reflectance of water (R_{rs}) is a well-known optical property used to retrieve water quality parameters and its accurate estimation is fundamental for the application of algorithms developed for this purpose. The Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean (HICO), the first spaceborne hyperspectral sensor specifically designed for the coastal ocean and inland waters, generates images over the 400-900 nm range, with a ground sample distance of ~90m and a high signal-to-noise ratio. Despite this characteristics, atmospheric correction remains an issue for convert top-of-atmosphere radiances (L_{TOA}) to R_{rs} . In this work we applied three different methodologies of atmospheric correction of a HICO image from Furnas reservoir, located on Minas Gerais state, in order to compare the results with *in situ* R_{rs} retrieved from radiometric measurements. The methods were a) ENVI[®] FLAASH based on radiative transfer code (RTC) MODTRAN 4; b) Tafkaa implementation of RTC 6S and; c) a dark object subtraction (DOS). The spectra comparison and statistical parameters allowed a discussion in terms of possibilities and limitations of each method. DOS returned the best results, with a mean coefficient of determination of 0,90 and a mean root mean square error of 0,00078 sr⁻¹.

Keywords: hyperspectral remote sensing, atmospheric correction, water quality monitoring, hydroelectric reservoirs, sensoriamento remoto hiperespectral, correção atmosférica, reservatórios de hidrelétricas, HICO

1. Introdução

A reflectância de sensoriamento remoto espectral da água ($R_{rs}(\lambda)$) na região do visível provê informações qualitativas e quantitativas sobre os componentes opticamente ativos presentes nos sistemas aquáticos, sendo, portanto, uma importante propriedade óptica utilizada no monitoramento de parâmetros de qualidade da água nestes sistemas.

Na classificação de tipos de água quanto aos seus constituintes opticamente ativos de Morel e Prieur (1977), em águas do tipo 2, onde as propriedades óticas são determinadas pela combinação entre clorofila *a* (chl-*a*) sedimentos em suspensão (TSS) e matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM), a aplicação de algoritmos consagrados em águas do tipo 1 (onde as propriedades óticas covariam com a chl-*a*), são limitadas. Portanto, o desenvolvimento de algoritmos regionais e/ou desenvolvidos especificamente para situações onde há a dominância de um tipo dos componentes são requeridos.

Neste contexto a utilização de sensores com alta resolução espectral na região do visível é vantajosa, uma vez que possibilita a exploração de regiões específicas do espectro eletromagnético com intuito de extrair as informações desejadas do corpo d'água em estudo. O sensor "*Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean*" (HICO, Lucke et al., 2011) a bordo da Estação Espacial Internacional, é o primeiro sensor hiperespectral orbital projetado

especificamente para o sensoriamento remoto de águas em regiões costeiras e interiores, com 87 bandas no intervalo de 400 a 900 nm e resolução espacial aproximada de 90m.

Embora as características do HICO sejam bastante favoráveis à estimativa de parâmetros de qualidade da água, diversas etapas de processamento se fazem necessárias no intuito de converter os dados de radiância no topo da atmosfera (L_{TOA}) em parâmetros geofísicos desejados, e não há na literatura um consenso na metodologia a ser utilizada (Amin et al., 2014; Garcia et al., 2014; Keith et al., 2014; Ryan et al. 2014).

Para a obtenção dos componentes opticamente ativos em sistemas aquáticos é necessário o cálculo da R_{rs} , que é obtida por meio de algoritmos para a correção atmosférica. A R_{rs} é então utilizada como dado de entrada na maioria dos algoritmos para monitoramento da qualidade da água.

O presente estudo teve como objetivo avaliar três diferentes métodos de correção atmosférica de uma imagem HICO de uma parte do reservatório de Furnas, localizada na região de Guapé (MG). A avaliação foi conduzida por meio de comparações com os espectros coletados *in situ* com radiômetros. As potencialidades e limitações de cada método são discutidas e a quantificação dos resultados ocorreram por meio de análises estatísticas.

2. Área de Estudo

A área de estudo compreende o braço norte do reservatório da Usina Hidrelétrica de Furnas (Figura 1), formado principalmente pelo Rio Grande. Os pontos onde foram feitas as coletas de dados de campo se deram principalmente em proximidades do município de Guapé (MG), onde está sendo executado o "Projeto Furnas - Desenvolvimento de Sistema de Monitoramento para Gestão Ambiental da Aquicultura no Reservatório de Furnas – MG", cujo objetivo geral é desenvolver um modelo para monitoramento e avaliação de impactos na criação de peixes em tanques-rede e também a adoção de boas praticas de manejo (BPM) para gestão ambiental de parques aquícolas (Embrapa, 2014).

O presente estudo representa os primeiros passos na tentativa de estabelecer modelos de obtenção de parâmetros de qualidade da água por sensoriamento remoto para fins de monitoramento ambiental da aquíicultura, realizado no contexto do Projeto Furnas.

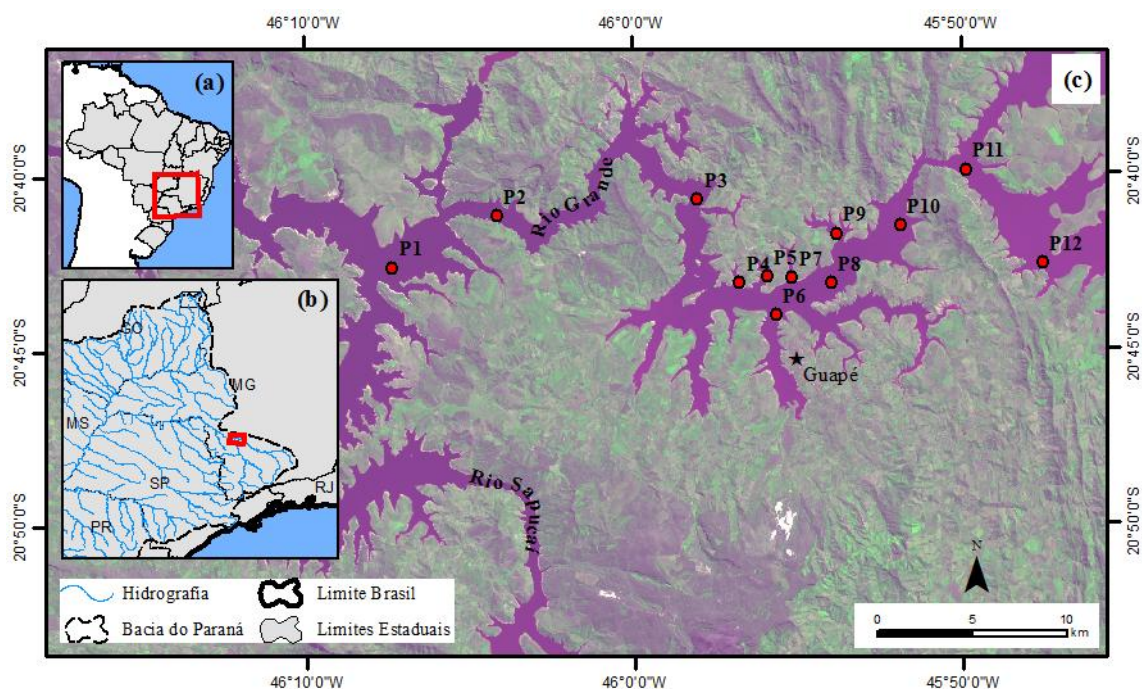


Figura 1 – Localização do reservatório da Usina Hidrelétrica de Furnas na América do Sul (a), no Estado de Minas Gerais (b) e composição colorida (R3G5B2) de uma imagem OLI adquirida em 03/08/2014 (c). As áreas demarcadas apresentam a localização dos 12 pontos de coleta em campanha realizada no período 29-31/07/2014.

2. Materiais e Métodos

2.1 Dados *in situ* e imagem HICO

A coleta de dados de campo foi realizada entre os dias 29 e 31/07/2014 para a obtenção de dados radiométricos simultaneamente a um imageamento pré-agendado do HICO para o dia 30/07/2014. No entanto, no horário desta passagem (~ 12:00h GMT) o céu estava parcialmente encoberto por nuvens, impossibilitando o imageamento de maior parte da área de estudo. Por estas razões optamos pela utilização de uma imagem HICO datada de 11/08/2014 (~17:00h GMT), totalmente livre de nuvens na cena (Figura 2c). No total foram amostrados 12 pontos.

Os dados radiométricos foram coletados por 6 sensores da marca TriOS® (Rastede, Alemanha) modelo Ramses, tendo a configuração apresentada na Tabela 1 e o esquema de montagem mostrado nas Figuras 2a,b.

Tabela 1. Configuração dos sensores radiométricos utilizados. Entre parênteses, "ar" e "água" denotam medidas feitas fora e dentro da água, respectivamente

Grandeza	Símbolo	Unidade
Irradiância (ar)	E_s	$\text{mWm}^{-2}\text{nm}^{-1}$
Irradiância descendente (água)	E_d	$\text{mWm}^{-2}\text{nm}^{-1}$
Irradiância ascendente (água)	E_u	$\text{mWm}^{-2}\text{nm}^{-1}$
Radiância difusa (ar)	L_{sky}	$\text{mWm}^{-2}\text{nm}^{-1}\text{sr}^{-1}$
Radiância total emergente (ar)	L_t	$\text{mWm}^{-2}\text{nm}^{-1}\text{sr}^{-1}$
Radiância ascendente (água)	L_u	$\text{mWm}^{-2}\text{nm}^{-1}\text{sr}^{-1}$

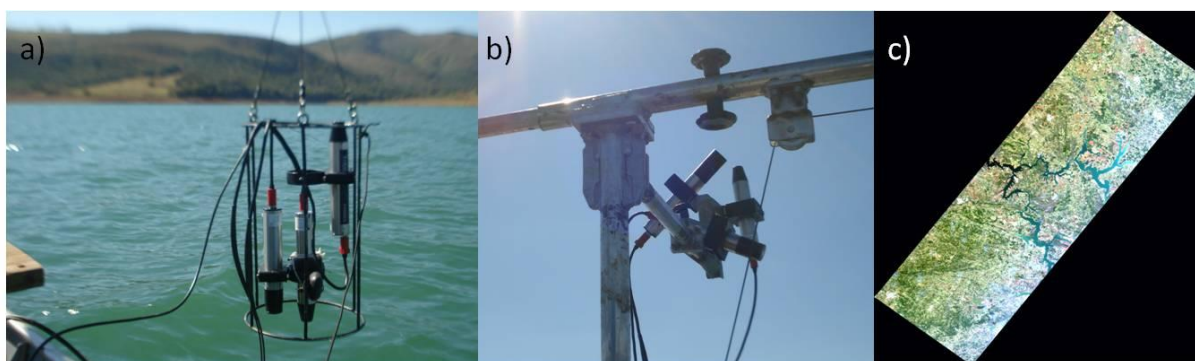


Figura 2 – Sensores TriOS® Ramses em estrutura que permite a amostragem em vários níveis de profundidade ao longo da coluna d'água (a) e em estrutura fixa no barco (b) para medidas de fora da água. Imagem HICO de 11/08/2014 utilizada no presente estudo (c).

Adicionalmente aos dados radiométricos também foram coletados dados de temperatura, condutividade, pressão, oxigênio dissolvido e turbidez através de uma sonda multiparamétrica YSI® (Yellow Springs, USA), modelo 6600 V2-4, bem como amostras de água de subsuperfície (~0,5m) para obtenção, em laboratório, da concentração de chl-*a* e coeficientes de absorção de chl-*a*, CDOM e partículas não algais. Este conjunto de dados dará suporte para as análises de correlação entre estes parâmetros e as propriedades óticas aparentes obtidas através dos dados radiométricos.

Em cada ponto amostrado foram coletados uma sequência de medidas em diversas profundidades (superfície, subsuperfície, 1m, 2m, etc.) de cada parâmetro (Tabela 1). Para cada profundidade cada sensor foi programado para amostrar 12 vezes. O processamento dos dados radiométricos obtidos em campo se deu através de rotinas elaboradas no *software* Matlab®, seguindo os procedimentos descritos em Mueller et al. (2003). Em resumo, todos os dados foram normalizados considerando a primeira medida de E_s de cada ponto. Em seguida,

o conjunto de cada 12 medidas foi selecionada através da mediana para cada comprimento de onda, considerando-se de 400 a 700 nm (região da radiação fotossinteticamente ativa - PAR).

Para obtenção da $R_{rs}(\lambda)$ utilizou-se a seguinte relação (Mobley, 1999):

$$R_{rs} = \frac{L_w}{E_d} \quad (1)$$

onde L_w é a radiação emergente da água, obtida por:

$$L_w = L_t - L_r \quad (2)$$

$$L_r = \rho L_{sky} \quad (3)$$

sendo L_r parte de L_{sky} que é refletida na superfície da água em direção ao sensor e ρ é o fator de reflectância, aqui assumida como igual a 0,0028 (Mobley, 1999).

A $R_{rs}(\lambda)$ resultante dos cálculos, em unidades de sr^{-1} , foi utilizada como "verdade de campo" para efeitos comparativos das imagens corrigidas do HICO.

2.2 Correções atmosféricas

As imagens HICO são disponibilizadas no padrão L1B correspondente a L_{TOA} , em $\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}\text{sr}^{-1}$, com um fator multiplicativo de 50. Foram realizadas três correções atmosféricas distintas na imagem HICO.

A primeira correção foi realizada através do software ENVI[®], utilizando o *Fast-Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes* (FLAASH), que resulta em uma imagem corrigida para reflectância de superfície (ρ_w). O FLAASH serve como uma interface de usuário para o código de transferência radioativa MODTRAN 4 (*Moderate spectral resolution atmospheric TRANsmittance*). Os parâmetros de entrada para esta correção incluíram as informações de geometria de aquisição, coordenadas e data, disponíveis no cabeçalho da imagem, e os modelos de atmosfera e aerossol escolhidos foram o tropical e o rural, respectivamente. A banda de absorção de água escolhida foi a centrada em 820 nm. Maiores detalhes dos parâmetros a serem inseridos no FLAASH são explicados em ENVI (2009). Para conversão dos dados de ρ_w utilizou-se as seguintes equações, seguindo os procedimentos descritos em Hu et al. (2004):

$$R_{rs} = \frac{\rho_w}{\pi/t_o} \quad (4)$$

onde t_o é a transmitância difusa, obtida por:

$$t_o = \exp\left(\frac{-0.5\tau_r}{\cos\theta}\right) \quad (5)$$

$$\tau_r = (-0.0888^{-4.15+0.2\lambda})(1 - \exp(-0.1188H - 0.01H^2)) \quad (6)$$

onde τ_r é a profundidade ótica Rayleigh (adimensional), θ é o ângulo zenital solar (em graus) e H é a altitude (em km). Estas informações também estão disponíveis no cabeçalho da cena HICO.

A segunda correção se refere à implementação do algoritmo Tafkaa (Gao et al., 2000) no modelo de transferência radioativa 6S (*Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum*). Esta correção foi realizada pela Universidade do Oregon (OSU) após solicitação e disponibilizada no site do HICO no formato L2A, neste caso os valores dos *pixels* já são convertidos em R_{rs} .

O terceiro procedimento utilizado foi a aproximação de subtração do objeto escuro (DOS) para remoção dos efeitos atmosféricos (Chavez, 1988; Tufillaro et al., 2011). Nesta correção o procedimento de correção seguiu aquele descrito em Keith et al. (2014), onde a imagem primeiramente é corrigida dos efeitos de *glint*, seguido da escolha de um alvo na cena onde considera-se que a água seja o mais "clara" possível, isto é, com o menor número de

constituintes ópticamente ativos possíveis, e este é considerado então o objeto escuro. Subtrai-se então o espectro deste *pixel* do restante da cena, e o espectro residual é então tido como corrigido dos efeitos da atmosfera, equivalente a L_w . Esta radiância residual é então convertida para reflectância de superfície através da seguinte equação (Hu et al., 2004):

$$\rho_w = \frac{\pi L_w}{F_0 \cos \theta} \quad (7)$$

onde F_0 é a irradiância solar (em $\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$, obtida no cabeçalho da imagem). Para a conversão subsequente em R_{rs} foram utilizadas as equações 4, 5 e 6.

Para cada imagem corrigida foram extraídos os espectros de cada ponto onde houve a amostragem em campo, para que dessa forma fosse possível realizar a comparação com os espectros obtidos *in situ*.

3. Resultados e Discussão

Os espectros de R_{rs} obtidos *in situ* e aqueles resultantes dos três diferentes procedimentos de correção atmosférica são apresentados na Figura 3, bem como o espectro de L_{TOA} , para comparação.

Os espectros dos pontos nas imagens corrigidas evidenciaram feições que não eram observáveis no espectro de L_{TOA} , e, de modo geral, as formas dos espectros seguiram o padrão de R_{rs} obtidos *in situ*. Adicionalmente, a ordem de magnitude dos dados de R_{rs} resultantes das correções atmosféricas apresentou-se com escalas comparativas na maior parte dos pontos amostrados, sendo as exceções mais evidentes os pontos P1 e P2. As formas dos espectros obtidos tanto *in situ* como nas correções apresentaram características de água ópticamente complexas, conforme exemplos na literatura.

No primeiro dia da campanha de campo onde foram amostrados os pontos P1, P2 e P3, as condições do céu não estavam as mais adequadas para coleta de dados radiométricos, com nuvens intermitentes ao longo de todo o período de coleta. Tal fato pode explicar parcialmente as diferenças de magnitude entre os espectros de campo e os das imagens corrigidas desses três pontos.

Os espectros obtidos pela correção do FLAASH apresentaram feições não compatíveis com os espectros *in situ* na região compreendida aproximadamente entre 400 e 480 nm. Estas feições “estranhas” são comuns em todos os pontos e possui relação inversa ao espectro de L_{TOA} . Devido a esta anomalia, tal correção pode ter impacto negativo em modelos de obtenção de CDOM, os quais utilizam bandas nessa região do espectro em seus algoritmos. Cabe ressaltar que este erro pode ter sido induzido pelos parâmetros de entrada no FLAASH, ou mesmo pela falta de informações necessárias para melhor iniciá-lo, como bandas que detectam nuvens *cirrus* e bandas que são utilizadas para estimar a visibilidade da cena.

Os modelos de transferência radioativa implementados no FLAASH e no Tafkaa utilizam diversas bandas maiores que 900 nm para estimar parâmetros chave da atmosfera os quais são necessários à correção, entretanto as imagens HICO não possuem bandas no infravermelho de ondas curtas e mesmo no infravermelho próximo (>900 nm), limitando a aplicação desses algoritmos (Garcia et al., 2014).

Tanto os espectros das correções do FLAASH como o do Tafkaa apresentaram leves correções superestimadas na região do infravermelho próximo acima de aproximadamente 720 nm, comparativamente com os espectros obtidos *in situ*. Esta superestimação pode interferir em algoritmos utilizados na obtenção de TSS, os quais comumente utilizam essa região do espectro em suas fórmulas.

Em termos de forma a correção utilizando a aproximação do DOS foi a que mais se aproximou dos espectros *in situ*. Devido a este tipo de correção não utilizar nenhum tipo de informação de geometria de visada e também não utilizar o ângulo zenital/azimutal solar, uma

correção dos efeitos de *glint* (que pode ser entendido como a reflexão especular da luz na água em direção ao sensor) foi aplicada, conforme sugere Keith et al. (2014). Neste trabalho os autores utilizaram, após a correção do *glint*, um pixel de referência de água mais oceânica como “objeto escuro”, no intuito de corrigirem águas estuarinas. Tal fato também é uma limitação quando se trata de águas interiores, pois em uma mesma cena não há águas que possam ser consideradas como “objeto escuro”. No entanto, escolhemos testar este método através da escolha de um pixel próximo a barragem, onde o reservatório atinge as maiores profundidades e as águas são notadamente mais “claras”.

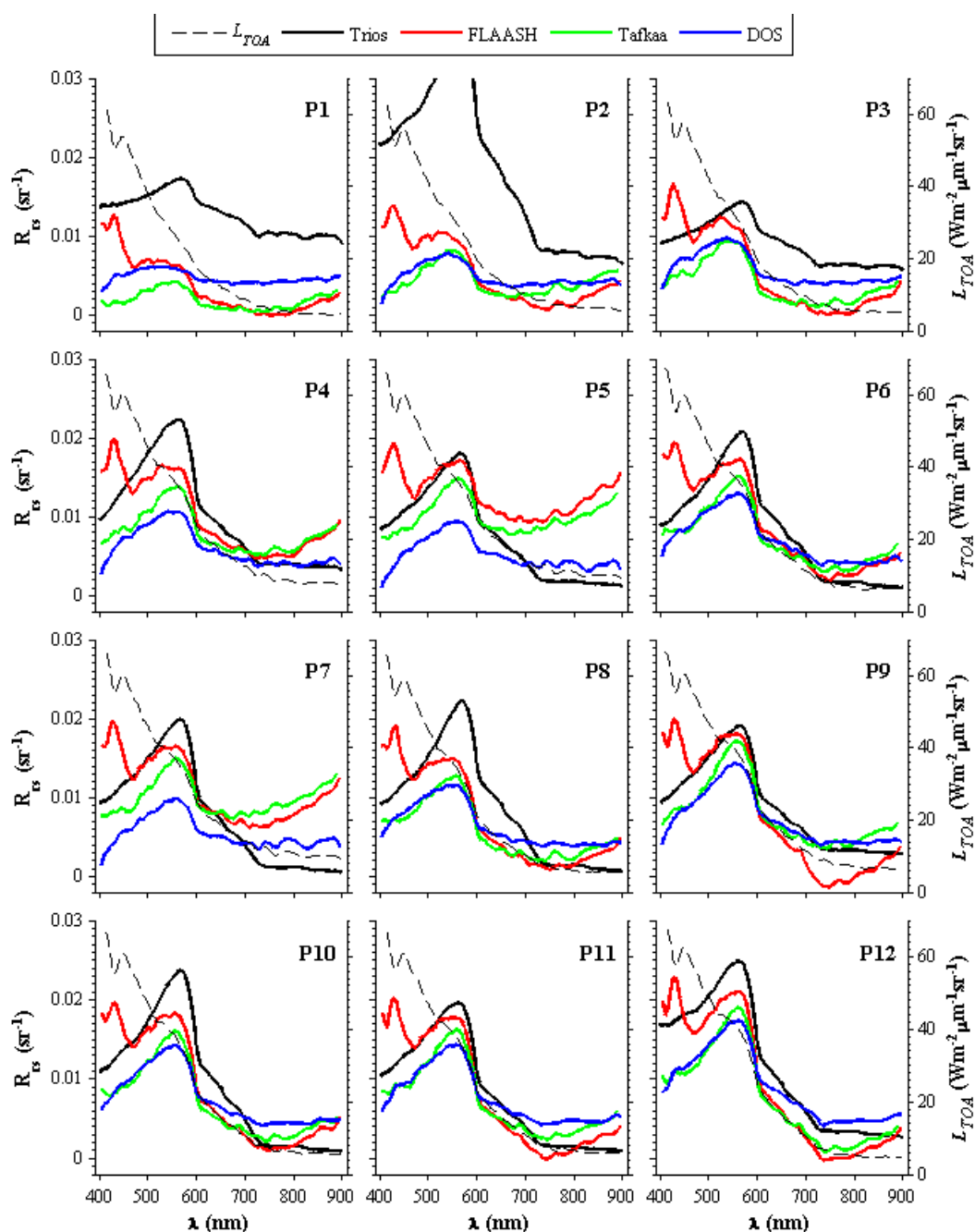


Figura 3 – Espectros de L_{TOA} e R_{rs} obtidos *in situ* e da imagem HICO após correções.

Para uma análise mais quantitativa dos resultados foram calculados os coeficientes de determinação (R^2) e o erro quadrático médio (RMSE) entre um ajuste linear das curvas obtidas pelas correções atmosféricas e a curva dos espectros *in situ*, para todos os pontos. Estes valores são apresentados nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2. Coeficiente de determinação (R^2) entre curva de R_{rs} obtida *in situ* e curvas obtidas pelos modelos de correção atmosférica para cada ponto.

Correção	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
FLAASH	0,48	0,62	0,56	0,70	0,43	0,75	0,59	0,64	0,84	0,81	0,86	0,94
Tafkaa	0,40	0,35	0,70	0,78	0,24	0,89	0,25	0,80	0,90	0,91	0,92	0,97
DOS	0,48	0,60	0,75	0,95	0,77	0,96	0,76	0,87	0,95	0,95	0,95	0,96

Tabela 3. Erro quadrático médio (RMSE) entre curva de R_{rs} obtida *in situ* e curvas obtidas pelos modelos de correção atmosférica para cada ponto. Os valores, em unidades de sr^{-1} , estão multiplicados por 10^3 para uma melhor visualização.

Correção	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
FLAASH	2,51	2,45	3,36	2,56	2,09	2,93	2,53	3,53	2,95	2,97	2,60	2,02
Tafkaa	0,89	1,41	1,45	1,20	1,80	1,19	1,85	1,53	1,29	1,28	1,18	1,00
DOS	0,53	0,86	0,99	0,53	0,94	0,61	0,95	0,98	0,71	0,78	0,71	0,82

Serão desconsiderados na discussão a seguir os pontos P1, P2 e P3 pelos motivos citados anteriormente.

A correção que obteve o melhor desempenho analisando os dados de R^2 e RMSE foi aquela que utilizou o DOS, com valores, em média, de 0,90 e $0,00078 sr^{-1}$, respectivamente. Já as correções pelo Tafkaa e FLAASH obtiveram médias de R^2 de 0,73 e 0,74, enquanto que os valores de RMSE foram de 0,00137 e $0,00269 sr^{-1}$, respectivamente.

O melhor desempenho do método utilizando o DOS com relação aos demais métodos pode ser parcialmente atribuída pelos problemas inerentes a falta de informações necessárias para iniciar os modelos de transferência radioativa do MODTRAN e 6S. Este melhor resultado utilizando o DOS corrobora com a avaliação feita por Keith *et al.* (2014).

4. Conclusões

Neste trabalho foi utilizada a cena de uma passagem do sensor hiperespectral HICO para avaliação de três métodos distintos de correção atmosférica tendo como alvo o braço norte do Reservatório de Furnas (MG) utilizando, para tanto, uma base de dados radiométricos coletados *in situ*. Até o nosso conhecimento, este é o primeiro esforço na tentativa de utilizar imagens HICO em conjunto com dados *in situ* para fins de monitoramento de águas interiores no Brasil.

Infelizmente o imageamento programado para a data cujo trabalho de campo também havia sido programado não obteve sucesso, com nuvens na maior parte da área estudada. Sendo assim, foi utilizada uma imagem datada de 10 dias após a campanha. Tal fato deve ser levado em consideração nas análises quantitativas realizadas, pois não necessariamente as condições da água quando das coletas de campo podem refletir as condições da água quando do imageamento.

O método que melhor representou os espectros obtidos em campo foi aquele utilizando o DOS, com os maiores valores de R^2 e menores RMSE, apesar de utilizar um conceito muito simplificado com relação aos demais, que utilizam códigos de transferência radioativa.

Para trabalhos futuros está sendo estudada a incorporação de dados MODIS nas regiões do infravermelho de ondas curtas e próximo junto com as bandas do HICO, de modo a suprir a deficiência de bandas deste sensor e que são de fundamental importância para os modelos de correção atmosférica que utilizam os códigos de transferência radioativa.

Em função do número crescente de pisciculturas em tanques rede em reservatórios nacionais, o estabelecimento de metodologias que permitam e facilitem o monitoramento ambiental por sensoriamento remoto destes empreendimentos é de grande valia tanto para o setor aquícola quanto para o uso múltiplo das águas.

Agradecimentos

O primeiro autor e M.P.C. agradecem ao CNPq pela concessão de bolsa PCI (proc. 302538/2014-3) e de doutorado (proc. 161233/2013-9), respectivamente. Os autores agradecem ao grupo do Projeto HICO na Universidade do Oregon e do *Naval Research Laboratory* pela aquisição, processamento e distribuição da imagem L1B utilizada nesse estudo e, em especial, a Jasmine Nahomiak pelo processamento da imagem para L2A. Os autores também são gratos ao Projeto Furnas, através da Embrapa Meio Ambiente e Ministério da Pesca e Aquicultura, o qual forneceu as condições para campanha de campo.

Referências bibliográficas

- Amin, R.; Lewis, D.; Gould, R.W.; Hou, W.; Lawson, A.; Ondrusek, M.; Arnone, R. Assessing the application of cloud-shadow atmospheric correction algorithm on HICO. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 52, n. 5, p. 2646-2653, 2014.
- Chavez, 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.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). **Projeto Furnas: desenvolvimento de sistema de monitoramento para gestão ambiental da Aquicultura no reservatório de Furnas: suporte para a consolidação de indicadores para o plano de monitoramento e gestão ambiental da aquicultura: relatório II: atividades 2013**. Jaguaruna: Embrapa Meio Ambiente; Brasília: Ministério da Pesca e Aquicultura, 2014. 221 p.
- ENVI. **Atmospheric Correction Module: QUAC and FLAASH User's Guide**. ITT Visual Information Solutions. 2009. 44 p.
- Gao, B.; Montes, M.J.; Ahmad, Z.; Davis, C.O. Atmospheric correction algorithm for hyperspectral remote sensing of ocean color from space. **Applied Optics**, v. 39, n. 6, p. 887-896, 2000.
- Garcia, R.A.; Fearn, P.R.C.S.; McKinna, L.I.W. Detecting trend and seasonal changes in bathymetry derived from HICO imagery: A case study of Shark Bay, Western Australia. **Remote Sensing of Environment**, V. 147, p. 186-205, 2014.
- Hu, C.; Chen, Z.; Clayton, T.D.; Swarzenski, P.; Brock, J.C.; Muller-Karger, F. Assessment of Estuarine Water-Quality Indicators Using MODIS Medium-Resolution Bands: Initial Results From Tampa Bay, FL. **Remote Sensing of Environment**, v. 93, p. 423-441, 2004.
- Keith, D.J.; Schaeffer, B.A.; Lunetta, R.S.; Gould Jr., R.W.; Rocha, K.; Cobb, D.J. Remote sensing of selected water-quality indicators with the hyperspectral imager for the coastal ocean (HICO) sensor. **International Journal of Remote Sensing**, v. 35, n. 9, p. 2927-2962, 2014.
- Lucke, R.L.; Corson, M.; McGlothlin, N.R.; Butcher, S.D.; Wood, D.L.; Korwan, D.R.; Li, R.R.; Snyder, W.A.; Davis, C.O.; D.T. Chen. Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean: instrument description and first images. **Applied Optics**, v. 50, n. 11, p. 1501-1516, 2011.
- Mobley, C.D. Estimation of Remote-Sensing Reflectance From Above-Surface Measurements. **Applied Optics**, v. 38, p. 7442-7455, 1999.
- Morel, A.; Prieur, L. Analysis of the Variations in Ocean Color. **Limnology and Oceanography**, v. 22, p. 709-722, 1977.
- Mueller, J.L.; Pietras, C.; Hooker, S.B.; Austin, R.W.; Miller, M.; Knobelspiesse, K.D.; et al. Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation: Revision 4. Instrument specifications characterization and calibration. **NASA Tech. Memo.**, vol. 2003, n. 21621. Greenbelt, MD: National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center, 2003.
- Ryan, J.P.; Davis, C.O.; Tufillaro, N.B.; Kudela, R.M.; Gao, B.C. Application of the Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean to Phytoplankton Ecology Studies in Monterey Bay, CA, USA. **Remote Sensing**, v. 6, n. 2, p. 1007-1025, 2014.
- Tufillaro, N.; Davis, C.O.; Jones, K.B. Indicators of Plume Constituents From HICO. **Proceedings of ocean optics XX**, Anchorage, AK, September 27-October 1. 2011.