

PROPOSTA DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO INTEGRADO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS CONTINENTAIS COM IMAGENS DE SATÉLITES: MAPAQUALI

Felipe de Lucia Lobo^{1,2}, Claudio Clemente Faria Barbosa¹, Lino Sander de Carvalho¹, Felipe Menino Carlos¹, Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo¹, Edson Freire da Silva¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), LabISA, Av. dos Astronautas, 1.758, São José dos Campos - SP, 12227-010, {felipe.loba, claudio.barbosa, evlyn.novo}@inpe.br, lino.sander@gmail.com, felipe.carlos@fatec.sp.gov.br; edson.freirefs@gmail.com; ²Instituto Tecnológico da Vale (ITV), R. Boaventura da Silva, 955 - Belém - PA, 66055-090.

RESUMO

Devido à crise da quantidade e qualidade da água que se observa em várias regiões do mundo, inclusive no Brasil, o monitoramento das águas continentais por imagens de satélite de média/alta resolução torna-se fundamental para a melhoria da gestão qualidade da água em rios, açudes e reservatórios. Nesse sentido, este trabalho resume os avanços realizados para a criação de um sistema integrado de monitoramento da qualidade da água por imagens de satélite (MAPAQUALI). Esse sistema integra dois Banco de Dados (um de imagens corrigidas e outro de dados limnológicos, $n = 1402$) para gerar algoritmos e índices que recuperem informações sobre componentes da água e gere mapas informativos (LaISA/INPE). Como exemplo de aplicação, mostramos uma série temporal de florações de cianobactérias no Rio Tapajós. As áreas de florações atingiram até 250 km² em Junho de 2017, e foram mais frequentes durante os períodos de seca e cheia.

Palavras-chave — qualidade da água, monitoramento, banco de dados, cianobactérias, Sentinel-2.

ABSTRACT

Due to the crisis in the quantity and quality of water observed in several regions of the world, including in Brazil, the monitoring of continental waters by medium / high resolution satellite images becomes fundamental for the improvement of water quality management in rivers and reservoirs. In this sense, this work summarizes the progress made towards the creation of an integrated water quality monitoring system by satellite images (MAPAQUALI). This system integrates two databases (one of corrected satellite images and another of limnologic data, $n = 1402$) to generate algorithms and indexes that retrieve information about water components and generate informative maps (LabISA / INPE). As an example of application, we show a time-series of cyanobacteria bloom in the Tapajós River (Brazil). Bloom areas reached up to 250 km² in June 2017, and were more frequent during drought and flooding periods.

Keywords — water quality, monitoring system, Database and Sentinel-2

1. INTRODUÇÃO

Devido à crise da quantidade e qualidade da água que se observa em várias regiões do mundo, inclusive no Brasil, tanto em grandes metrópoles (SP) como na região amazônica, o monitoramento das águas continentais, essenciais ao abastecimento público e à provisão de serviços ecossistêmicos essenciais à vida torna-se imperativo. Atualmente, as informações sobre qualidade da água resumem, muitas vezes, a pontos de monitoramento localizados e amostrados com baixa frequência e representatividade espacial. Apesar de sua enorme contribuição para o entendimento da qualidade da água e de ser indispensável aos processos de validação e calibração de produtos de sensoriamento remoto, o monitoramento *in situ* não fornece visão sinóptica dos processos limnológicos e biogeoquímicos que ocorrem em rios e lagos que condicionam a qualidade da água.

Como anteriormente mencionado, esses dados *in situ* dão suporte à construção de algoritmos que utilizam imagens de satélite para recuperar informações sobre concentração de sedimentos e clorofila-a (chl-a). Diversos estudos localizados e regionais tem sido desenvolvidos em reservatórios (cascata do rio Tietê, Itaipu, Tucuruí, entre outros [1]) e rios (Amazonas, Tapajós, Madeira, etc). Recentemente, a Agência Nacional das Águas (ANA) desenvolveu o projeto HidroSat que utiliza de modelos calibrados por [2] para estimar TSS em rios da Amazônia. No entanto, as estimativas são, até o momento, baseadas em dados MODIS e restrita aos pontos que foram amostrados para a construção do modelo, sendo bastante limitadas à aplicação em sistêmicas lóxicos (rios), subestimando, as concentrações em lagos de várzea, sujeitos a processos de ressuspensão que provocam concentrações muita acima das que são observadas nos canais principais e também limitadas a rios com dimensões compatíveis à resolução do sensor [3].

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo propor um sistema de monitoramento integrado da qualidade da água de sistemas aquáticos continentais com imagens de satélites para gerar séries históricas de mapas que mostrem a distribuição espacial de produtos, tais como, TSS (ISS), chl-a, florações de algas (em especial cianobactérias), CDOM

(matéria orgânica dissolvida), macrófitas aquáticas nos principais rios, lagos e reservatórios do território brasileiro.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A construção desse sistema de monitoramento (Figura 1) consiste em alimentar dois bancos de dados (BD), um BD de imagens de satélites de alta/média resolução (até 60 m) corrigidas e um outro BD de dados ópticos e limnológicos coletados em campanhas de campo e devidamente processados. A partir desses conjuntos de dados, diversos modelos/algoritmos serão aplicados para estimar a concentração de parâmetros da qualidade da água, bem como a presença de florações. Esses algoritmos são calibrados e validados com dados de campo e aplicados nas imagens, para as quais também são validados. Em seguida, esse algoritmos são aplicados em séries históricas de imagens de satélite, como Sentinel-2,3, CBERS-4 e família Landsat para se gerar os produtos de qualidade da água. A última etapa desse monitoramento consiste em disponibilizar os mapas e séries históricas dos produtos gerados na página do LabISA/INPE (www.dpi.inpe.br/labisa) de modo a fomentar as pesquisas investigativas sobre os processos biogeoquímicos, limnológicos, ecológicos e socio-ambientais que envolvem os sistemas aquáticos continentais.

Apesar de algumas imagens de livre acesso atualmente disponíveis nas principais plataformas (earthexplorer.usgs.gov and scihub.copernicus.eu/) apresentarem correção atmosférica, como o produto *surface reflectance* Landsat, nem todos os sensores possuem esse tipo de correção, como Sentinel-2 e 3. Além disso, o uso de imagens de satélite para recuperar informações sobre a qualidade da água exige que o sinal radiométrico medido pelo sensor seja corrigido para os diversos efeitos atmosféricos, tais como adjacentes [4], reflexão especular na superfície da água (*glint*), bem como, a delimitação dos corpos d'água com precisão. Para isso está sendo desenvolvida no LabISA uma interface em plataforma Python para a correção automática das imagens em um linha de processamento digital de imagens (Figura 1) com aplicação em sistemas aquáticos, com a precisão de correção que esses sistemas requerem. As principais etapas de correção são: atmosférica – Py6s; correção de nuvem/sombra – Fmask; adjacente – *Linear Spectral Unmixing*; máscara terra/água utilizando o mNDWI (versão modificada do Normalized Difference Water Index); e também correção do efeito especular (*sun glint*) pela subtração da banda SWIR (1600 ou 2200 nm) das demais bandas do visível e infra-vermelho próximo. O outro BD chave para a operacionalização desse sistema de monitoramento é a compilação de dados limnológicos (chl-a, TSS, ISS, CDOM, temperatura, turbidez) e dados radiométricos também medidos em campo para a construção de algoritmos preditivos, sejam eles empíricos ou semi-analíticos (que dependem de propriedades ópticas inerentes, como coeficientes de absorção total e retro-espalhamento). Diversos esforços de pesquisadores no Brasil e no mundo tem sido feito para testar diferentes algoritmos locais, regionais e globais [5]. Em nosso grupo de estudo investigações para a calibração/validação de algoritmos aplicados às águas amazônicas e reservatórios para estimativa de TSS e chl-a, por exemplo, tem sido feitas nos últimos 10 anos [6]. Nesse trabalho, daremos o exemplo do monitoramento de florações de cianobactérias (ou blooms) no rio Tapajós (no estado do Pará) utilizando série histórica de imagens Sentinel-2 (2015 a 2018). O índice Normalized Difference Chlorophyll-a Index - NDCI ((b705-b665)/(b705+b665)), [7]) foi calibrado/validado com dados radiométricos e chl-a medidos em campo durante 4 campanhas realizadas no rio Tapajós e lagos adjacentes em um total de 50 pontos, dos quais 2/3 foram utilizado para a calibração e 1/3 para validação em simulações Monte Carlo (Matlab). A correção das imagens Sentinel adquiridas concomitantes a 4 campanhas de campo também foram validadas com dados radiométricos.

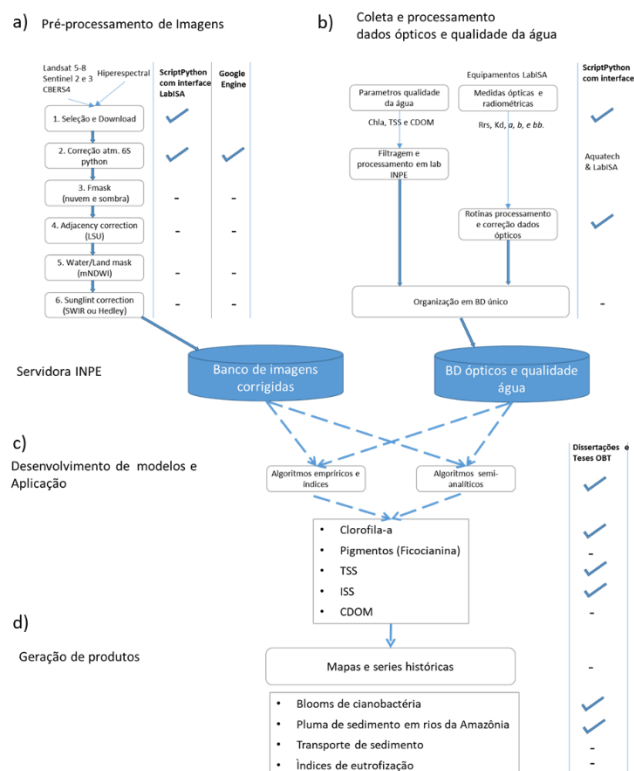


Figura 1. Sistema de monitoramento da qualidade da água a partir de um BD de imagens corrigidas (a) e BD ópticos e limnológicos medidos em campo (b). Desenvolvimento de modelos de qualidade da água (c) e geração de produtos (d).

3. RESULTADOS

3.1. Banco de dados de imagens

Diversas imagens de diferentes sensores que tiveram aquisição, no momento ou próxima a data de coleta em campo. Até hoje foram realizadas mais de 20 campanhas de

campo em diversos ambientes aquáticos variando de lagos, rios, e reservatórios distribuídos principalmente na Bacia Amazônica e reservatório do Sudeste e Nordeste. Além de imagens dos sensores mais tradicionais (Landsat e Sentinel), o BD conta com imagens de alta resolução espacial (RapidEye) e espectral (HICO, MERIS e outros). Essas imagens estão sendo corrigidas para os efeitos atmosféricos, adjacente, e reflexão especular (Figura 2) e adicionadas ao BD imagens corrigidas em uma servidora de dados do LabISA (Figura 1).

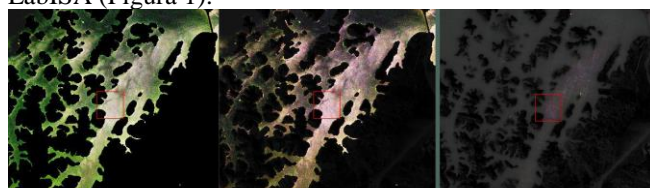


Figura 2. Exemplo de processamento de imagens Sentinel-2 (22MFA) de 20/07/2017. a) imagem com correção atm 6S; b) com correção adjacente por LSU; c) remoção da reflexão especular (*deglint*) pelo método SWIR.

3.2 Banco de dados ópticos e limnológicos

Como resultados dessas campanhas mencionadas, um total de 1402 pontos amostrais que incluem, não necessariamente em todos os pontos, dados radiométricos, ópticos, limnológicos e dados físico-químicos, que estão resumidos na Tabela 1.

3.3 Exemplo de Aplicação

Para o exemplo de monitoramento de cianobactérias no rio Tapajós entre 2015 e 2017 utilizando imagens Sentinel-2 e o NDCI, a Figura 3 mostra a série temporal da extensão das florações em função do tempo, bem como, a hidrógrafa do mesmo período. A maior extensão registrada de quase 250 km² em 9 de junho de 2017, período correspondente à cheia do rio.

De acordo com a Figura 3, os eventos de florações ocorrem principalmente nos períodos de água mais estável (menor velocidade da água e turbulência), tanto nos períodos de cheia (Junho 2017) como de seca (fim de 2015). Por outro lado, o gráfico indica que as florações diminuem no período de vazante quando a velocidade da água aumenta e carrega as florações rio abaixo (Agosto 2017). Atualmente, estão sendo realizadas investigações sobre os fatores bio-físicos e hidrodinâmicos que controlam a ocorrência e extensão de florações de cianobactérias nos principais rios de água clara da Amazônia, incluindo o rio Tapajós.

4. DISCUSSÃO

Atualmente, o monitoramento oficial executada por gestores de reservatórios e rios no Brasil ainda não inclui dados de sensoriamento remoto, como mapas e séries temporais. No entanto, com a crescente demanda de informações sobre a qualidade da água no tempo e espaço, a utilização de

Tabela 1: Parâmetros radiométricos, ópticos e limnológicos que constituem a BD (N = 1402) que está sendo alimentada.

	Parâmetro	Símbolo	Unidade
Radiométricos	Reflectância de Sensoriamento Remoto	R_{rs}	sr^{-1}
	Reflectância de Irradiancia	R	-
	Coefficiente de atenuação difusa	K_d	m^{-1}
Dados Ópticos	Coefficiente de absorção total	a	m^{-1}
	Coefficiente de atenuação total	c	m^{-1}
	Retro-espalhamento	b_b	m^{-1}
	Coefficiente de absorção por matéria org. Dissolvida	a_{CDOM}	m^{-1}
	Material Total em Suspensão	MTS	$mg.l^{-1}$
Dados Limnológicos	Material Inorg. em Suspensão	MIS	$mg.l^{-1}$
	Carbono Total	CT	$mg.l^{-1}$
	Carbono Inorg. Total	CIT	$mg.l^{-1}$
	Clorofila-a	$Chl-a$	$\mu g.l^{-1}$
	Feofitina	$Feof.$	$\mu g.l^{-1}$
	Temperatura	$Temp.$	Celsius
	Profundidade de Secchi	$Secchi$	m

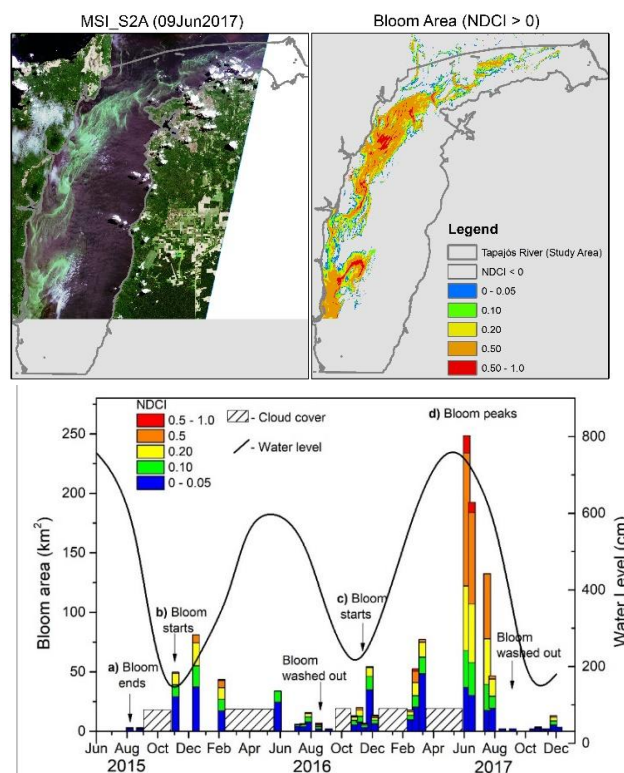


Figura 3. Mapeamento de florações de cianobactérias no rio Tapajós utilizando NDCI extraído de imagens Sentinel-2 entre 2015 e 2017.

ferramentas de sensoriamento remoto se torna imprescindível para a aprimorar o monitoramento e a gestão dos recursos hídricos, em especial, em águas continentais.

O advento de novos sensores com bandas localizadas na região do red-edge (Família Sentinel 2 e 3) ampliou a capacidade de identificação de florações de cianobactérias, principalmente em estágios iniciais. Além disso, técnicas aplicadas em rios Amazônicos mostram a capacidade da utilização de dados históricos da família Landsat (desde 1973) para o monitoramento sistemático da pluma de sedimento no alto Rio Tapajós causada por mineração de ouro ao longo de seus tributários. Várias outras informações sobre qualidade da água capazes de serem recuperadas por imagens e publicadas como produtos (mapas).

Recentemente, diversas tentativas de utilizar as ferramentas de geoprocessamento e SR para mapear rios e lagos ao redor do mundo tem sido geradas utilizando séries dos sensores MODIS [2], Landsat [5], entre outros [8]. Algumas propostas se limitam aos pontos de coleta outras se limitam pelos sensores utilizados. O sistema de monitoramento integrado que estamos propondo pretende espacializar as informações e produtos gerados (mapas), bem como integrar na BD imagens de diferentes sensores.

Para isso, a rotina de correção atmosférica py6S já implementada em modo interface para o usuário comum, está sendo adaptada para os principais sensores atualmente disponíveis (Landsat OLI, Sentinel 2 e 3, CBERS4 [9]). O mesmo se aplica as demais correções, como efeito adjacente e *sunlint*.

O grande diferencial desse sistema é sobretudo a organização do BD ópticos e limnológicos os quais estão sendo utilizados para o desenvolvimento de algoritmos empíricos e semi-analíticos. O alto número de amostras em diversos ambientes aquáticos, bem como a ampla variação de dados limnológicos permitem a calibração/validação de produtos gerados em diversos sistemas aquáticos e respondendo à diferentes demandas. Estamos no momento desenvolvendo várias das ferramentas necessárias à construção do sistema MAPAQUALI, e também, identificando possíveis parceiros e gestores de recursos hídricos que tenham interesse em colaborar para a construção desse sistema que está sendo criado, e/ou usufruir das informações, mapas e produtos publicados.

5. CONCLUSÕES

Na tentativa de atender a demanda da sociedade e de gestores de recursos hídricos para o aperfeiçoamento do monitoramento da qualidade da água, propomos a elaboração de um sistema de monitoramento integrado entre imagens de satélites e dados limnológicos que totalizam mais de 1400 pontos amostrais coletados em diversos ambientes aquáticos. A grande variabilidade desses dados permitirá o desenvolvimento de diversos algoritmos desenvolvidos para ambientes específicos, faixas de concentração variadas e até algoritmos de aplicação regional ou continental para gerar

produtos mapas de parametros de qualidade da água, tais como, chl-a, florações de cianobactérias, macrófitas aquáticas, sedimento em suspensão entre outros.

Financiamento CAPES/ITV 88887.1412452017-00, CNPq 150835/2015-9 e 304568/2014-7, e Fundo Amazonia/BNDES (INPE1).

6. REFERÊNCIAS

- [1] C. Barbosa *et al.*, “Brazilian inland water bio-optical dataset to support carbon budget studies in reservoirs as well as anthropogenic impacts in Amazon floodplain lakes: Preliminary results,” *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.*, vol. 40, no. 7W3, pp. 1439–1446, 2015.
- [2] R. Espinoza Villar *et al.*, “The integration of field measurements and satellite observations to determine river solid loads in poorly monitored basins,” *J. Hydrol.*, vol. 444–445, pp. 221–228, Jun. 2012.
- [3] E. M. L. de Moraes Novo, C. C. de Farias Barbosa, R. M. Freitas, Y. E. Shimabukuro, J. M. Melack, and W. P. Filho, “Seasonal changes in chlorophyll distributions in Amazon floodplain lakes derived from MODIS images,” *Limnology*, vol. 7, no. 3, pp. 153–161, 2006.
- [4] V. S. Martins, C. C. F. Barbosa, L. A. S. de Carvalho, D. S. F. Jorge, F. L. Lobo, and E. M. L. de Moraes Novo, “Assessment of atmospheric correction methods for sentinel-2 MSI images applied to Amazon floodplain lakes,” *Remote Sens.*, vol. 9, no. 4, 2017.
- [5] N. Pahlevan, S. Balasubramanian, S. Sarkar, and B. Franz, “Toward Long-Term Aquatic Science Products from Heritage Landsat Missions,” *Remote Sens.*, vol. 10, no. 9, 2018.
- [6] F. Watanabe *et al.*, “Remote Sensing of the Chlorophyll-a Based on OLI/Landsat-8 and MSI/Sentinel-2A (Barra Bonita reservoir, Brazil),” *An Acad Bras Cienc Annals Brazilian Acad. Sci.*, pp. 1–14, 2017.
- [7] S. Mishra and D. R. Mishra, “Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 117, pp. 394–406, 2012.
- [8] J. M. Clark *et al.*, “Satellite monitoring of cyanobacterial harmful algal bloom frequency in recreational waters and drinking water sources,” *Ecol. Indic.*, vol. 80, no. May, pp. 84–95, 2017.
- [9] V. S. Martins *et al.*, “Continental-scale surface reflectance product from CBERS-4 MUX data: Assessment of atmospheric correction method using coincident Landsat observations,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 218, pp. 55–68, Dec. 2018.