



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**CLASSIFICAÇÃO CONTÍNUA FUZZY NA ANÁLISE
DE FLORAÇÕES DE ALGAS NO RESERVATÓRIO DE IBITINGA-SP:**
Estudo de caso utilizando Sensoriamento Remoto
e Computação em Nuvem (Google Earth Engine)

Fellipe Lousada Pegolo

Monografia apresentada como requisito
para aprovação na disciplina de
Introdução ao Geoprocessamento
ministrada pelo PhD. Antônio Miguel
Vieira Monteiro.

INPE
São José dos Campos
2021

RESUMO

Este trabalho objetiva descrever a variabilidade espaço-temporal do fenômeno de floração de algas no reservatório de Ibitinga-SP utilizando o método de análise estrutural de geoprocessamento denominada "Classificação Fuzzy Contínua".

A análise em questão foi realizada utilizando dados de sensoriamento remoto orbital de reflectância de superfície, dos sensores TM/Landsat-5 (1990 - 2000 - 2005) e OLI/Landsat-8 (2020) por meio da plataforma Google Earth Engine, nos períodos históricos de ocorrência de altos níveis tróficos (Agosto, Setembro e Outubro) que contribuem para os "Blooms", florações de algas de verão.

Foram também utilizados dados obtidos in situ relacionados às concentrações de clorofila-a, que é um indicador da presença de algas, além daqueles associados às medidas radiométricas (espectrorradiômetro) de campo, das águas do reservatório de Ibitinga-SP.

A partir das imagens satelitais foram extraídos os NDCI's, índice apropriado para o mapeamento de florações de algas, os quais posteriormente foram modelados pela Função de Pertinência Fuzzy do tipo linear, com base nos dados in situ e nos NDCI's simulados para Landsat 5 e 8. A análise Fuzzy facilita as detecções espaço-temporais dos eventos de florações de algas, visto que discretiza oportunamente a relevância do estado trófico hídrico em relação à ocorrência e não ocorrência de florações de algas.

A partir das médias das Funções de Pertinência Fuzzy dos anos (1990-2000-2005-2020) foram extraídas importantes informações qualitativas espaciais de recorrência destes eventos biológicos.

Palavras-chave: Fuzzy - Florações - Algas - Ibitinga-SP.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Conseqüências das florações de algas.....	4
Figura 2. OMT-G	6
Figura 3. Localização do Reservatório de Ibitinga-SP.....	7
Figura 4. Expansão canavieira na UGRHI 13	8
Figura 5. Função de Pertinência Fuzzy	10
Figura 6. Regressão Linear	11
Figura 7. Principais diferença entre os sensores no cálculo NDCI 10	11
Figura 8. Análise espaço-temporal NDCI e Fuzzy (1990 - 2000)	12
Figura 9. Análise espaço-temporal NDCI e Fuzzy (2005 - 2020)	13
Figura 10. Análise espaço-temporal média Fuzzy	14

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	4
2 MATERIAIS E MÉTODOS	5
2.1 Área de Estudo	6
2.2 Análise Espaço-temporal	7
2.3 Comportamento Espectral das Águas Interiores	8
2.4 Função de Pertinência Contínua Fuzzy	9
3 RESULTADOS	11
4 DISCUSSÕES	15
5 CONCLUSÕES	15
REFERÊNCIAS	16

1 INTRODUÇÃO

As florações de algas “tóxicas e não tóxicas” em reservatórios aquáticos apresenta alto risco ao meio biótico e abiótico, uma vez que, o crescimento exagerado desses organismos aumenta significativamente a turbidez hídrica, que por sua vez, afeta nos processos fotossintéticos fornecedores de oxigênio para a vida aquática. Além disso, as algas podem vir a produzir cianotoxinas (neurotoxinas, hepatotoxinas e dermatotoxinas); e por consequência contaminar os corpos hídricos, o solo, a vegetação, e causar doenças (leves, moderadas e graves) nos seres humanos e animais (STROMING, 2020).

Este fenômeno acontece, tanto em águas doces quanto em águas salobras (processos de eutrofização), geralmente sob os seguintes fatores: águas quentes e estagnadas de baixa profundidade, com elevada exposição à luz solar, e altos teores de nutrientes (nitrogênio e fósforo); oriundos de águas residuais industriais, urbanas e agrícolas. São inúmeros os corpos hídricos que reúnem tais condições, e no período que compreende, o fim do inverno e chegada da primavera, os eventos de floração de cianobactérias “algas” se tornam mais frequentes (Figura 1), envolvem também impactos de mortandade de toneladas de peixes, prejuízos para os setores de piscicultura e turismo, por motivo das águas contaminadas, com coloração verde e forte mau cheiro (CETESB, 2019).

Figura 1 - Consequências das florações de algas



Fonte: LabISA

A inteligência espacial auxilia no gerenciamento de riscos de reservatórios aquáticos, uma vez que a maioria das cianobactérias são constituídas de pigmentos proteicos, excelentes indicadores espectrais de florações de cianobactérias por meio de técnicas de sensoriamento remoto, como por exemplo o NDCI - Índice de Clorofila da Diferença Normalizada. Uma vez instalada a floração, são necessários meses para revertê-la, além dos prejuízos ambientais e sanitários, existem aqueles ligados aos tratamentos complementares de água, a fim de remover as possíveis cianotoxinas, e àqueles das atividades de uso direto e/ou indireto do reservatório (CHORUS; BARTRAM, 1999).

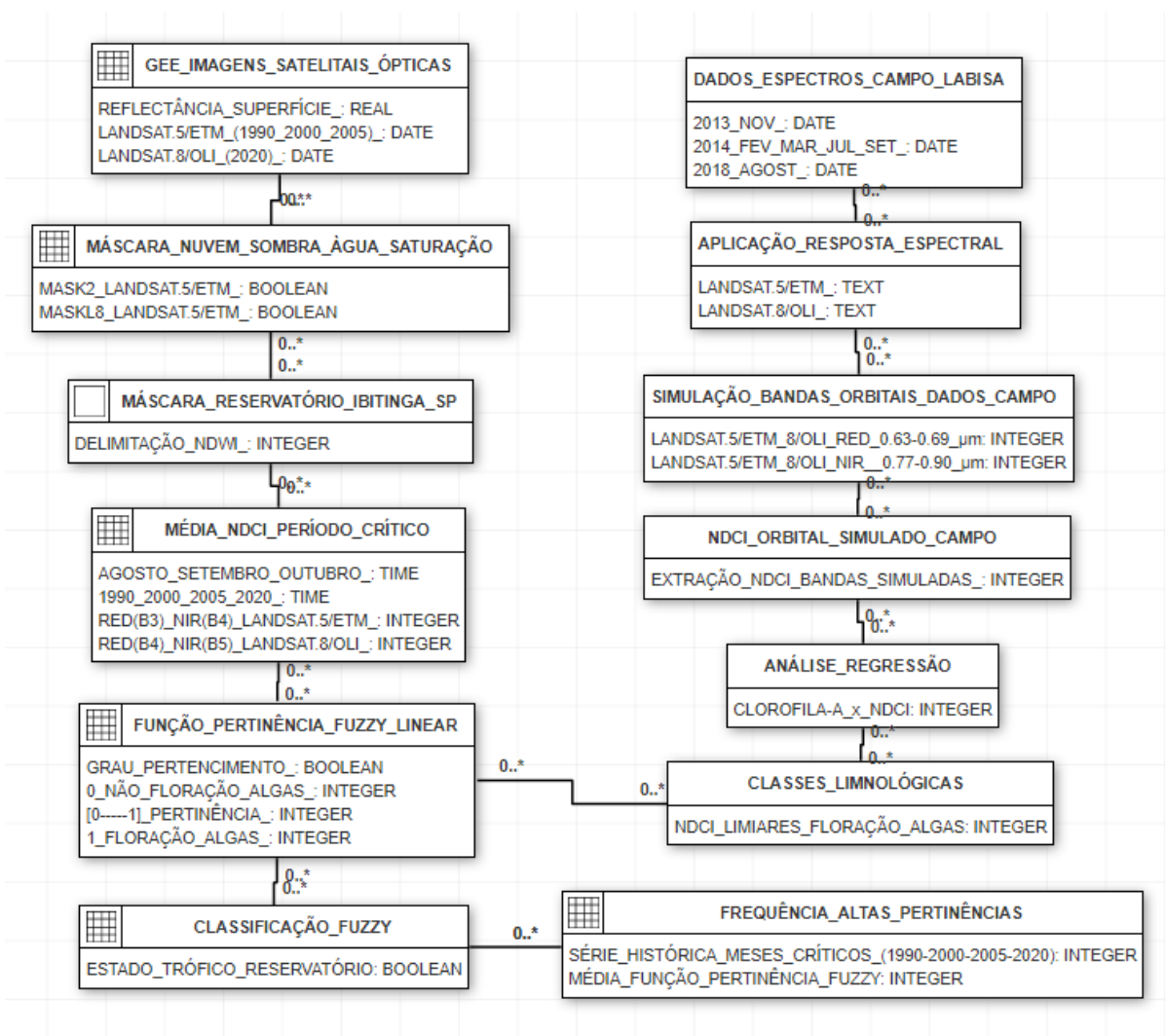
Entende-se por Sensoriamento Remoto, o conjunto de informações extraídas de um alvo por meio da detecção e medida das variações que o objeto impõe sobre o meio circundante, sejam elas de caráter eletromagnético, acústico ou potencial: das quais, podem contribuir para o monitoramento dos recursos naturais terrestres e extraterrestres; envolvendo os meios atmosférico, terrestre e oceânico. A assinatura espectral da água é em função da sua composição, e das condições de aquisição de dados, (atmosféricas, turbulência das águas, geometrias posicionais sensor/fonte eletromagnética e dentre outros parâmetros). A luz refletida obtida por meio da interpretação espectral permite inferir sobre o estado físico-químico e biológico, bem como sobre a área e a profundidade dos sistemas aquáticos (LORENZETTI, 2015).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A análise espaço-temporal das Florações de Algas no Reservatório de Ibitinga-SP foi realizada a partir de dados de sensoriamento remoto orbital de reflectância de superfície, dos sensores TM/Landsat-5 (1990 - 2000 - 2005) e OLI/Landsat-8 (2020) por meio da plataforma Google Earth Engine (GEE), de acordo com o fluxograma abaixo (Figura 2).

O índice espectral NDCI, idealizado pela diferença entre a absorção na região do vermelho no espectro visível e do espalhamento da radiação pelas células do fitoplâncton no rededge. Tendo em vista que, ambos os sensores (TM e OLI) não contam com a banda do rededge, fez-se uso da nir, infravermelho próximo (faixa espectral mais larga que abrange o rededge); portanto o "NDCI" deste estudo se reduz ao índice vegetal NDVI, (Normalized Difference Vegetation Index).

Figura 2 - OMT-G



Fonte: Produção do Autor

2.1 Área de Estudo

O território em análise (Figura 3) compreende toda a extensão do Reservatório da Usina Hidrelétrica de Ibitinga-SP (Coordenadas: 21° 45' 29" S e 48° 59' 29" O), localizado na mesorregião de Araraquara-SP. O reservatório da usina integra a importante hidrovia Tietê-Paraná, que atravessa o Estado de São Paulo; recebendo águas predominantemente dos rios Jacaré-Pepira e Jacaré-Guaçu, proveniente da cidade de Ibitinga - SP (GUIMARÃES et al., 1998).

Figura 3. Localização do Reservatório de Ibitinga-SP



Fonte: Produção do Autor

Este sistema de barramento criado em 1969, conta com a potência instalada média de 13149 MW, vazão média de 525 m³/s e profundidade aproximada de 9 metros. Devido à sua grande extensão territorial e tempo de residência (12 - 43) dias, verifica-se grande variabilidade espaço-temporal das propriedades físico-químicas e biológicas, (chl-a ~ 3-1000 mg/m³) (LONDE et al., 2016).

2.2 Análise Espaço-temporal

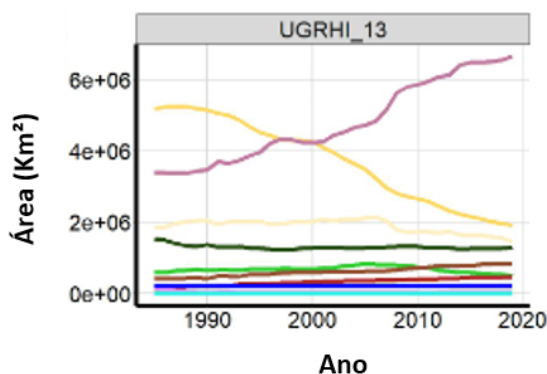
Dentre os fatores ambientais que controlam as propriedades ópticas dos sistemas hídricos, os que exercem maior influência sobre as características limnológicas são: topografia, vegetação, solos, rochas, drenagem, temperatura e precipitação; além dos aspectos antrópicos do uso e da ocupação territorial, como por exemplo, agricultura, indústrias e centros urbanos (BARBOSA, 2019).

Os reservatórios de Ibitinga, Bariri e Lobo estão inseridos na Bacia Hidrográfica do Tietê - Jacaré, (UGRHI 13 - Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos), composta pelos rios: Tietê, Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira. A área de drenagem desta Bacia é de aproximadamente 11.780 Km², e sua população na ordem dos 1,5 milhões de habitantes, distribuída pelas regiões de Bauru, São Carlos, Araraquara e Jaú (SIGRH, 2021).

A construção dos reservatórios possibilitaram o desenvolvimento agroindustrial local (açúcar, álcool, cítricos, papel, bebida, calçados e produção metais), setores com altas demandas hídricas (IBGE, 2021); e que exercem forte pressão sobre os recursos ambientais, trazendo eventualmente impactos negativos quali-quantitativos à natureza nos níveis atmosféricos, terrestres e principalmente hídricos.

Segundo Petri (2021), a expansão histórica da atividade sucroalcooleira na UGRHI 13 apresentou forte crescimento em meados de 2000, quando as áreas canavieiras superaram as áreas de pastagem (Figura 3). O uso indiscriminado de fertilizantes e defensivos agrícolas em áreas próximas aos cursos d'água, assim como as destinações criminosas de efluentes industriais e urbanos, contribuem para a ocorrência de florações de algas.

Figura 4. Expansão canvieira na UGRHI 13



Fonte: PETRI, 2021

2.3 Comportamento Espectral das Águas Interiores

A água (H₂O) no seu estado líquido límpido apresenta baixa reflectância (~10%) para o intervalo espectral da região do visível (0,38 - 0,70 μm), e alta absorção para o infravermelho, faixa acima de 0,7 μm. Porém devido às diferentes concentrações de substâncias orgânicas e inorgânicas (componentes opticamente ativos) este comportamento espectral pode ser alterado. Quanto mais pura for a água, menor será a sua reflectância, isso se deve à sua alta transmitância associada, e ao seu baixo coeficiente de espalhamento. Corpos hídricos profundos de baixa concentração de materiais suspensos e

dissolvidos (oligotróficos) são escuros, em razão do intenso processo de atenuação da luz no meio aquoso, não havendo portanto sinal de retorno. Já para águas de maior concentração de partículas orgânicas observa-se a redução da reflectância da faixa espectral do azul (BARBOSA, 2019).

A alta concentração de partículas inorgânicas na água acarreta em alterações espectrais inversas àquelas registradas pelas orgânicas, senso assim, em geral quão maior for o teor inorgânico, maior será a reflexão registrada (BARBOSA, 2005). Dentre os principais elementos opticamente ativos na água, destacam-se: fitoplânctons, zooplânctons e bacterioplâncton, assim como os materiais orgânicos, inorgânicos e sintéticos. As altas concentrações de fitoplânctons (florações superficiais) estão associadas à presença de clorofila, a qual, por sua vez, promove o aumento da reflectância da água no visível, e sobretudo no infravermelho próximo (LONDE, 2006). Em síntese, a água pura aparece predominantemente em azul, enquanto que para altas concentrações de clorofila, externaliza-se em tons esverdeados, altos teores orgânicos (escura) e inorgânicas (clara) (LORENZETTI, 2015).

O Índice de clorofila de diferença normalizada (NDCI) é utilizado para estimar a concentração de clorofila-a (chl-a) em corpos d'água, através de dados de sensoriamento remoto de reflectância de superfície. Paralelo à sua obtenção remota são necessárias as etapas de calibração e de validação que contam com o NDCI (simulado) derivado do conjunto de dados de campo (espectrômetro).

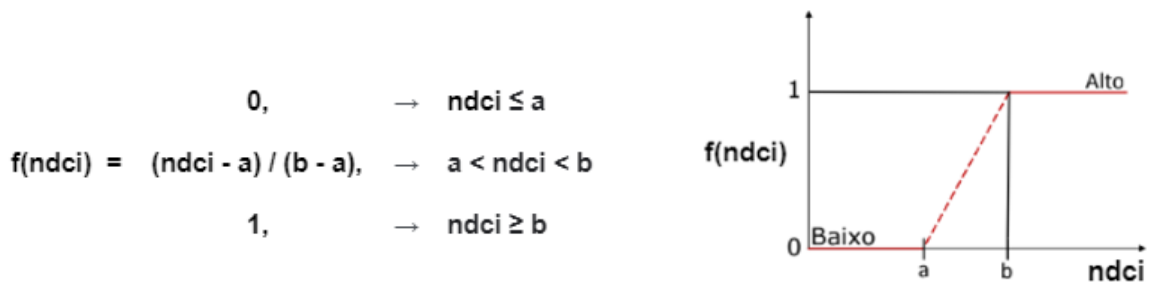
Anteriormente, idealizado pelo sensor MERIS (MEdium Resolution Imaging Spectrometer), o índice $NDCI = (rededge - red) / ((rededge - red) + red)$, pode ser usado com sucesso para monitorar a presença de (chl-a) em águas costeiras e estuarinas interiores (MISHRA, 2011). Este trabalho, porém, utilizou os sensores sensores (TM e OLI) desprovidos da banda (redege), sendo substituída portanto pela nir (infravermelho próximo, que a contempla).

2.4 Função de Pertinência Contínua Fuzzy

A Lógica Fuzzy é uma técnica de inferência que associa uma função de pertinência aos seus elementos (Figura 5), indicando em que medida o elemento faz parte desse conjunto (Lotfi A. Zadeh, 2013). Ela é extremamente útil em situações que existam grandes variações quali-quantitativas dos elementos, e também, quando ocorre considerável inexatidão dos valores mensurados, devido principalmente à limitações tecnológicas, logísticas e financeiras; como por exemplo, o monitoramento de floração de algas em reservatórios.

A forma de função de pertinência empregada $f(\text{ndci})$ para avaliar este fenômeno foi a linear (contínua), que atribui o valor 0 para os valores de NDCI's menores ou iguais ao limiar inferior (**a**), 1 para NDCI's maiores ou iguais ao limiar superior (**b**), e valores intermediários entre 0 e 1 para os índices de clorofila-a fora dos intervalos (**a**) e (**b**).

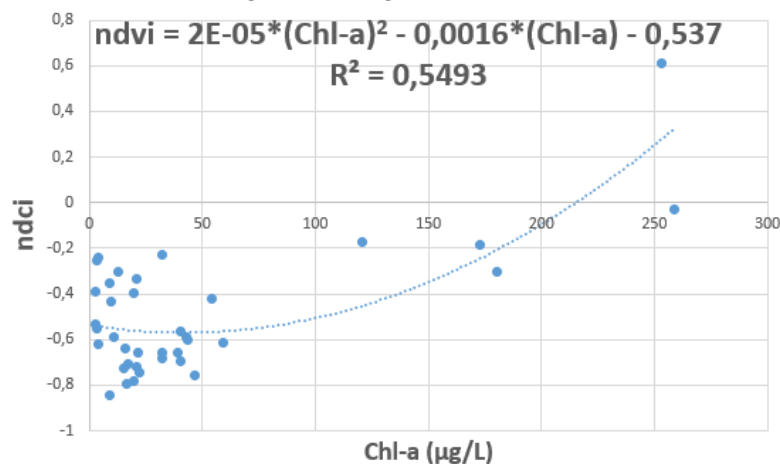
Figura 5. Função de Pertinência Fuzzy



Fonte: Produção do Autor

Os limiares $a = -0.3$ e $b = 0.1$ foram estabelecidos empiricamente, já que, a modelagem matemática da função utilizando o método de Mobley (2015), para o cálculo do **ndci** (NDCI simulado, Landsat 5 e 8), e posterior regressão linear deste índice simulado versus a correspondente concentração espacial de clorofila-a não trouxeram resultados satisfatórios, próximos a ($R^2 = 0,5493$). Tomando as classes limnológicas do trabalho da autora Cairo (2020), também realizado no reservatório de Ibitinga-SP, OligoMeso ($\text{chl-a} \leq 11.03 \text{ mg/m}^3$) e Hiper ($\text{chl-a} > 69.05 \text{ mg/m}^3$), como balizadores tróficos, respectivamente para obter **a** e **b** do Landsat 5 e 8 chega-se a resultados incongruentes, ($-0,55$) tanto para **a** quanto para **b**.

Figura 6. Regressão Linear



Fonte: Produção do Autor

Dentre os fatores que corroboram para a insuficiência correlativa descrita acima, destacam-se a reduzida quantidade de dados de campo (37 pontos de amostragem), distribuídos espaço-temporalmente ao longo do reservatório de Ibitinga-SP nos anos de 2013, 2014 e 2018. Porém os aspectos determinantes, devem-se sobretudo à ausência da banda rededge (pico de fluorescência de clorofila) nos sensores TM e OLI, à baixa resolução espectral e radiométrica dos sensor TM (8 bits), e também às diferenças espectrais na banda red (Figura 7), quando comparados com os sensores ópticos MSI/Sentinel-2 e MERIS/ENVISAT, que são mais adequados para o monitoramento quantitativo das florações de algas (CAIRO, 2020).

Figura 7. Principais diferença entre os sensores no cálculo NDCI

Sensor	Res. espacial	Res. radiométrica	Número Bandas	Res. temporal	Red (μm)	Red edge (μm)	NIR (μm)
TM	30 m	8 bits	7	16 dias	0.630 - 0.690	-	0.760 - 0.900
OLI	30 m	12 bits	9	16 dias	0.630 - 0.680	-	0.845 - 0.885
MERIS	300 m	12 bits	15	35 dias	0.655 - 0.675	0.737 - 0.788	-
MSI	10 m	12 bits	10	5 dias	0.633 - 0.695	0.689 - 0.719	-

Fonte: Produção do Autor (ESA e NASA 2021)

3 RESULTADOS

Apesar dos limiares $a = -0.3$ e $b = 1$ da função de pertinência terem sido definidos empiricamente, de modo a ressaltar as diferentes classes tróficas, devido a dificuldade de se estabelecer uma boa relação em função das grosseiras resoluções/características radiométricas e espectrais dos sensores TM/Landsat-5 e OLI/Landsat-8, foi possível extrair importantes informações qualitativas sobre as florações de algas.

De acordo com as (Figuras 8, 9 e 10), são nítidos alguns aspectos:

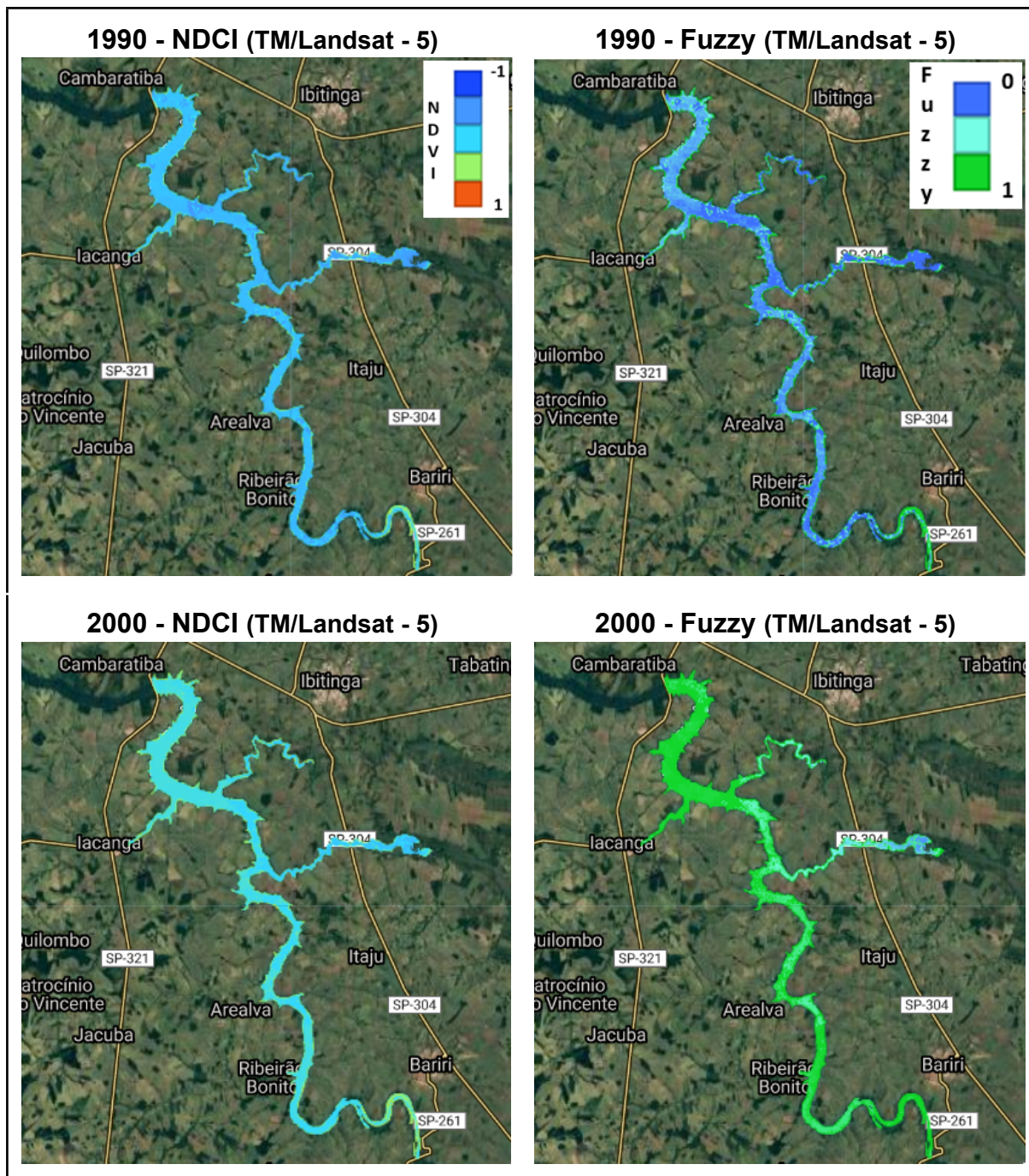
- Degradação da qualidade hídrica ao longo dos 20 anos (agronegócio, cana-de-açúcar)
- Maiores concentrações de NDCI nas margens e nas proximidades das cidades
- O Rio Jacaré-Guaçu apresenta alta pertinência na floração de algas
- Possibilidade do script indicar fontes de poluição hídrica
- A média Fuzzy (1990, 2000, 2005 e 2020) indica a alta recorrência de estados tróficos relacionados à degradação hídrica, fator que favorece as florações de algas no verão

Scripts: Landsat - 5 e Landsat - 8

<https://code.earthengine.google.com/?scriptPath=users%2Ffelousadapegolo%2FNDVI%3AFPFL5>

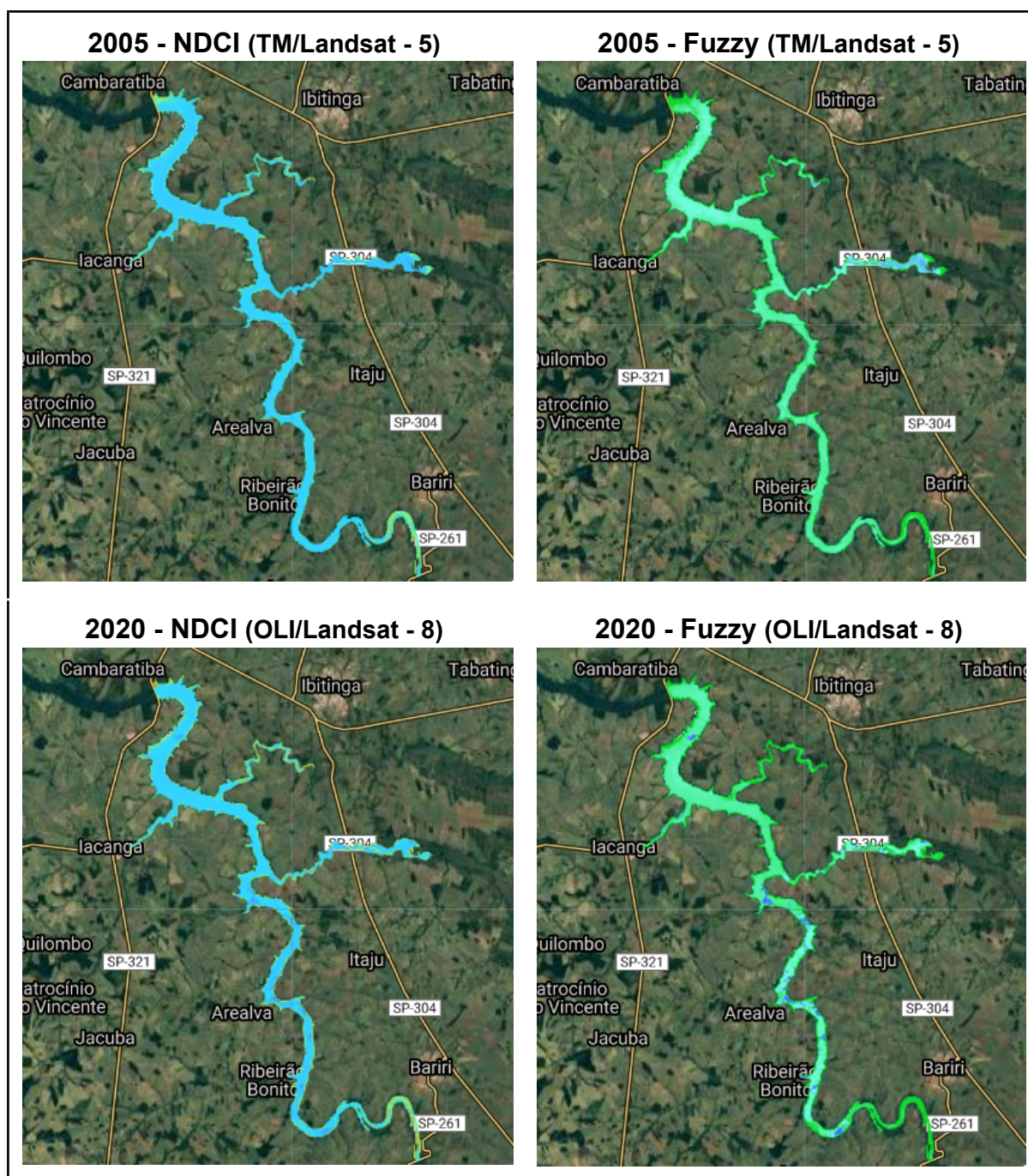
<https://code.earthengine.google.com/?scriptPath=users%2Ffelousadapegolo%2FNDVI%3AFPFL8>

Figura 8. Análise espaço-temporal NDCI e Fuzzy (1990 - 2000)



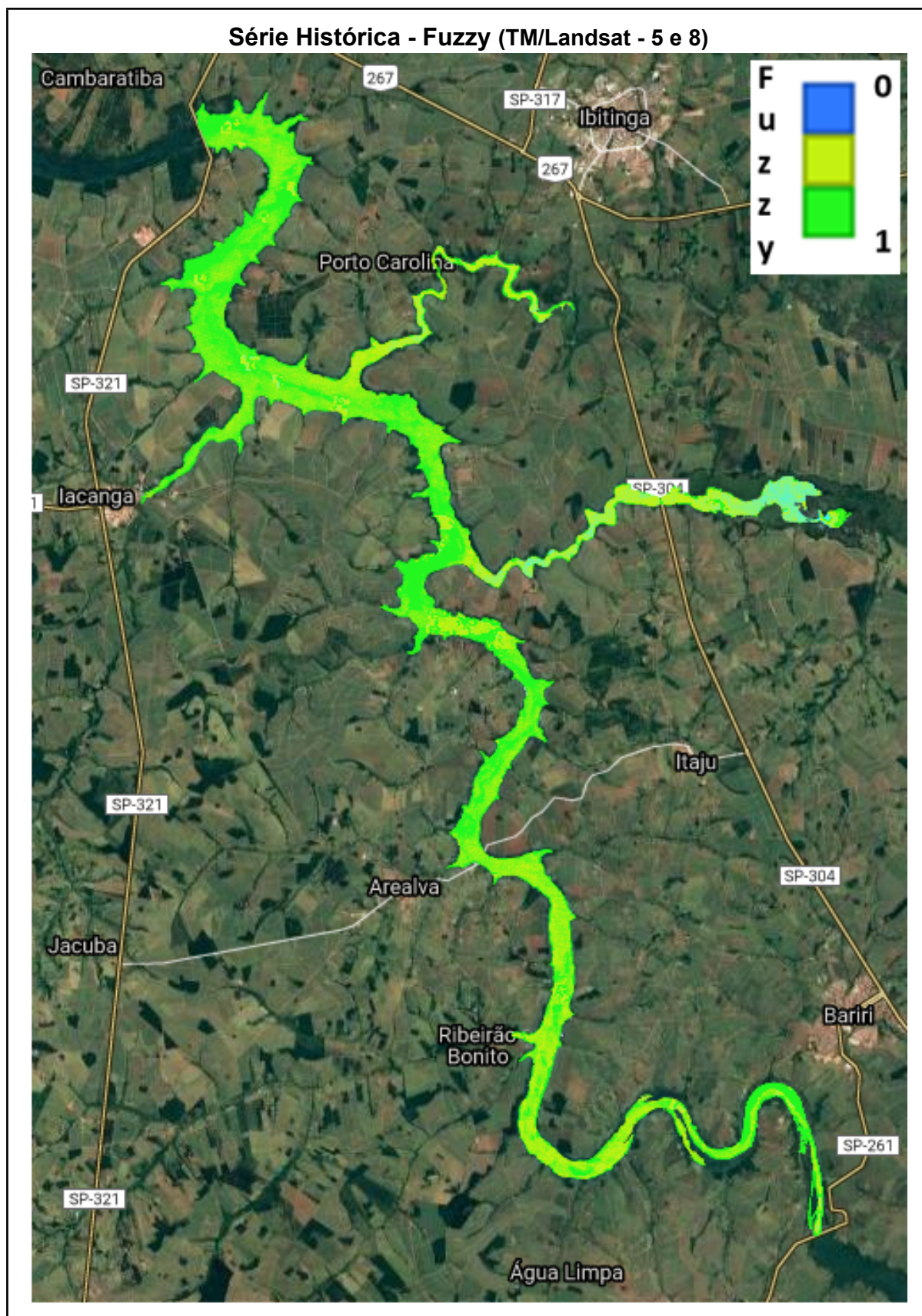
Fonte: Produção do Autor

Figura 9. Análise espaço-temporal NDCI e Fuzzy (2005 - 2020)



Fonte: Produção do Autor

Figura 10. Análise espaço-temporal média Fuzzy (1990, 2000, 2005 e 2020)



Fonte: Produção do Autor

4 DISCUSSÕES

Já que os limiares foram definidos empiricamente, a alteração desses parâmetros poderia trazer diferentes resultados, uma vez que não foi realizada a análise de sensibilidade. Essa abordagem simplista de monitoramento hídrico a partir de imagens de satélite, teve o intuito de priorizar análises qualitativas ágeis, ao invés de métodos estatisticamente mais sofisticados e precisos, que envolvam maior quantidade de amostras no espaço e no tempo, bem como sensores radio e espectralmente mais apropriados para esta finalidade.

Há um volume crescente de pesquisas sobre o aprimoramento de algoritmos para detecção de clorofila e sedimentos suspensos em águas opticamente complexas, e há também uma série de projetos de pesquisa em andamento com foco no monitoramento da qualidade da água a partir de imagens de satélite em escala local ou global (MAPAQUALI).

É claro que tal sistema não pode ser desenvolvido globalmente, mas, felizmente, ao trazer as imagens de satélite para mais perto dos usuários interessados na qualidade da água, podemos encorajar as autoridades nacionais e regionais de recursos hídricos a investirem em tal infraestrutura.

5 CONCLUSÕES

Mesmo com as limitações citadas, os scripts Fuzzy no GEE (Landsat 5 e 8) são importantes ferramentas que podem ser utilizadas por órgãos ambientais para gerar alertas de contaminação hídrica. Além disso, podem contribuir em perícias que envolvam degradação ambiental desde o ano de 1985; e servirem como balizadores para Planos e Políticas Públicas relacionadas ao uso e ocupação territorial nas margens de cursos d'água.

Embora as ferramentas não quantifiquem os parâmetros de qualidade da água de modo adequado, elas oferecem agilidade nas visualizações qualitativas satisfatórias, contribuindo para o monitoramento da qualidade da água em larga escala espaço-temporal; e ajudando na obtenção de interpolações e regressões mais precisas (monitoramento in situ), proporcionando também informações complementares no contexto de estudos de ecologia aquática, hidrologia e geomorfologia.

A análise Fuzzy facilita as detecções espaço-temporais dos eventos de florações de algas, visto que discretiza oportunamente a relevância do estado trófico hídrico em relação à ocorrência e não ocorrência de florações de algas.

REFERÊNCIAS

CAIRO, C.; BARBOSA, C.; LOBO, F.; NOVO, E.; CARLOS, F.; MACIEL, D.; FLORES JÚNIOR, R.; SILVA, E.; CURTARELLI, V. Hybrid chlorophyll-a algorithm for assessing trophic states of a tropical brazilian reservoir based on MSI/Sentinel-2 data. *Remote Sensing*, v. 12, n. 40, 2020.

CHORUS, I.; BARTRAM, J. Toxic cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, monitoring, and management. [S.l.]: Taylor & Francis, 1999.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. Resumo executivo: relatório de qualidade das águas interiores no Estado de São Paulo – 2018. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2019/07/Resumo-Executivo-Relat%C3%B3rio-de-Qualidade-das-%C3%81guas-Interiores-no-Estado-de-S%C3%A3o-Paulo-2018.pdf>>. Acesso em: 06 jun. 2021.

ESA. Agência Espacial Europeia 2021. Disponível em: <http://www.esa.int/>. Acesso em: 10 jun. 2021.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades. 2021. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados.html?view=municipio>> Acesso em: 06 jun. 2021.

LabISA. Laboratório de Instrumentação de Sistemas Aquáticos. 2021. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/labisa/>>. Acesso em: 06 jun. 2021.

LONDE, L. R.; NOVO, E. M. L. M.; BARBOSA, C.; ARAUJO, C. A. S. Water residence time affecting phytoplankton blooms: study case in Ibitinga Reservoir (São Paulo, Brazil) using Landsat/TM images. *Brazilian Journal of Biology*, n. 76, p. 664–672, 2016.

LORENZETTI, J. A. Princípios Físicos de Sensoriamento Remoto. São Paulo: Blucher, 2015. 292 p.

MAPAQUALI. Sistema modular para monitoramento contínuo da qualidade de águas interiores por satélite. 2019

MISHRA, Sachidananda; MISHRA, Deepak R.. Normalized difference chlorophyll index: a novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. *Remote Sensing Of Environment*, [S.L.], v. 117, p. 394-406, fev. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.016>.

MOBLEY, C. D. Polarized reflectance and transmittance properties of windblown sea surfaces. *Applied Optics*, v. 54, n. 15, p. 4828-4849, 2015.

NASA. Agência Espacial Americana. Disponível em: <https://www.nasa.gov/>. Acesso em: 06 jun. 2021

PETRI, C. A influência da expansão agrícola no aumento da ocorrência de floração de algas no reservatório de Ibitinga-SP entre 1985 - 2011 https://github.com/CaioPetri/SER347-1/blob/master/Trabalho_ser_347.ipynb

SIGRH. Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo. 2021. Disponível em: <http://www.sigrh.sp.gov.br/cbhtj/apresentacao>. Acesso em: 06 jun. 2021.

STROMING, Signe; ROBERTSON, Molly; MABEE, Bethany; KUWAYAMA, Yusuke; SCHAEFFER, Blake. Quantifying the Human Health Benefits of Using Satellite Information to Detect Cyanobacterial Harmful Algal Blooms and Manage Recreational Advisories in U.S. Lakes. *Geohealth*, [S.L.], v. 4, n. 9, p. 327-345, 25 ago. 2020. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2020gh000254>.

ZADEH, L. A. Sets fuzzy. *Information and Control*, v. 8, p. 338-353, 1965.