

Engenharia Sanitaria e Ambiental



Este é um artigo publicado em acesso aberto sob uma licença Creative Commons.

Fonte: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522016000200357&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 3 jan. 2018.

REFERÊNCIA

MACHADO, Marília Teresinha de Sousa; BAPTISTA, Gustavo Macedo de Mello. Sensoriamento remoto como ferramenta de monitoramento da qualidade da água do Lago Paranoá (DF). **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 2, p. 357-365, abr./jun. 2016. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522016000200357&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 3 jan. 2018. Epub June 20, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522016141970>.

Sensoriamento remoto como ferramenta de monitoramento da qualidade da água do Lago Paranoá (DF)

Remote sensing as a tool for monitoring Paranoá Lake's water quality (Brasília, Brazil)

Marilia Teresinha de Sousa Machado¹, Gustavo Macedo de Mello Baptista²

RESUMO

Este trabalho testou uma metodologia baseada no sensoriamento remoto para estimar o estado trófico de um reservatório urbano (Lago Paranoá) em Brasília (Brasil), com vistas ao monitoramento da qualidade da água. Quatro fases limnológicas do Lago Paranoá foram analisadas a partir da eutrofização do reservatório como resultado do excessivo aporte de esgotos domésticos. Dados de fósforo total, clorofila-*a*, transparência da água e imagens processadas do LANDSAT TM 5 foram utilizados para estimar do estado trófico. Esses dados foram correlacionados com dados limnológicos e os mapas quantificaram as variáveis para todo o espelho d'água. Com o uso do Índice de Estado Trófico de Carlson, novos mapas foram gerados, estimando o estado trófico do Lago Paranoá para cada fase limnológica analisada. O método e as estimativas testadas mostraram-se adequados para o monitoramento da qualidade da água, pois refletem as mudanças que a água do reservatório experimentou após a eutrofização.

Palavras-chave: estado trófico; monitoramento limnológico; eutrofização.

ABSTRACT

This study has tested a remote sensing method for evaluating the trophic level of an urban reservoir (Paranoá Lake) in Brasilia City (Brazil) aiming at water quality monitoring. Four limnological periods of Paranoá Lake were analyzed after the reservoir-undergone eutrophication as a result of excessive domestic sewage discharge. Data on total phosphorus, chlorophyll-*a*, water transparency and processed Landsat TM 5 images were used to assess reservoir trophic levels. These data were correlated to limnological data, and maps containing parameter values for the reservoir were produced. By using the Carlson's Trophic State Index, new maps were produced by means of assessing the trophic state of Paranoá Lake for each analyzed limnological period. The tested method and proceedings have shown to be appropriate for water quality monitoring, since they reproduced the changes that water reservoir experienced after eutrophication.

Keywords: trophic state; limnological monitoring; eutrophication.

INTRODUÇÃO

O crescimento da demanda por energia tem incentivado a construção de reservatórios para a acumulação de água para fins hidrelétricos. Contudo, esses reservatórios se prestam não somente à geração de energia, mas também para outros fins como o abastecimento, a pesca e a recreação. Dependendo da origem e do tipo de reservatório e do fim a que se destina, o monitoramento da qualidade de suas águas tem um inestimável papel do ponto de vista sanitário, bem como no que se refere à sua vida útil. Vários fatores podem minimizar a utilização e a vida útil de um reservatório (BUFON; LANDIM; MELO, 2009;

FERREIRA; LOPES; ARAÚJO, 2012) e eles geram sedimentos que alteram, de modo específico, as propriedades ópticas da água (SAUSEN & PEREIRA, 1986).

A qualidade da água de reservatórios é tradicionalmente monitorada e avaliada com base na coleta de dados limnológicos (CUNHA *et al.*, 2013). Os reservatórios podem ser classificados segundo o grau de trofia ou com base nas manifestações ecológicas das cargas de nutrientes como estímulo aos produtores primários (TUNDISI, 2001). Com a finalidade de classificar as águas de lagos e reservatórios quanto ao grau de trofia, Carlson (1977) desenvolveu o Índice de Estado Trófico

Trabalho realizado na Universidade Católica de Brasília (UCB) - Brasília (DF), Brasil.

¹Doutoranda em Desenvolvimento Sustentável, Centro de Desenvolvimento Sustentável da Universidade de Brasília (UnB) - Brasília (DF), Brasil.

²Doutor em Geologia pela Universidade de Brasília (UnB). Professor do Instituto de Geociências da UnB - Brasília (DF), Brasil.

Endereço para correspondência: Gustavo Macedo de Mello Baptista - Campus Darcy Ribeiro - Asa Norte - Caixa Postal 4465 - 70910-900 - Brasília (DF), Brasil - E-mail: gmbaptista@unb.br

Recebido: 02/12/14 - **Aceito:** 11/09/15 - **Reg. ABES:** 141970

(IET). Ele facilita a tomada de decisões de agentes e a comunicação com o público em geral sobre o estado em que se encontram tais sistemas (VENTURA, 2013).

Recentemente, Cunha, Calijuri e Lamparelli (2013) ajustaram um índice, baseado na lógica do IET de Carlson (1977) para ambientes tropicais e subtropicais, porém, como o objetivo deste estudo é avaliar a potencialidade de dados de sensoriamento remoto para a espacialização de classes de trofia, optou-se pela utilização do índice de Carlson (1977), já bastante testado e validado em diversos contextos climáticos e correlacionado com dados do sistema Landsat (WALDRON; STEEVES; FINN, 2001).

Com a classificação trófica, os lagos e reservatórios são divididos em uma série de classes denominadas de estados tróficos. Os sistemas tradicionais dividem-se em três classes: oligotrófico, mesotrófico e eutrófico (MARGALEF, 1992). Outros sistemas incluem ainda classes como ultraoligotrófico e hipereutrófico (VOLLENWEIDER, 1976; CARLSON, 1977). Esses modelos simplificados são baseados principalmente nos teores de nitrogênio, fósforo, clorofila-*a* e na medida de transparência da água pelo Disco de Secchi.

O monitoramento da qualidade da água em reservatórios serve para verificar a sua situação e os seus problemas emergentes, bem como para definir planos, prioridades e programas para o gerenciamento da qualidade da água e avaliar a efetividade das medidas tomadas (BARTRAM & BALLANCE, 1996; ANGELINI; BINI; STARLING, 2008; BUZELLI & CUNHA-SANTINO, 2013; CUNHA *et al.*, 2013).

A eutrofização de águas interiores é considerada um dos maiores problemas ambientais atuais, em escala mundial (TUNDISI, 2001). A eutrofização de um corpo hídrico ocorre com o aumento da concentração de nutrientes, especialmente fósforo e nitrogênio (ESTEVES, 2011). Quando ocorre de forma natural é um processo lento; quando ocorre de forma artificial é um fenômeno acelerado (ANDERSON; GLIBERT; BURKHOLDER, 2002). A eutrofização artificial ocorre, principalmente, pela ação dos efluentes domésticos, industriais e agropastoris (ESTEVES, 2011).

A eutrofização deve ser objeto de crescente ação preventiva e de controle (BRASIL, 1997). Existe, portanto, a necessidade de se ter meios de avaliar alterações nos níveis tróficos de reservatórios. A determinação do estado trófico de um reservatório por meio de coleta de dados e da análise dos dados laboratoriais demanda muito tempo. Técnicas convencionais de avaliação serão, em médio prazo, de difícil aplicação, dada a grande área conjunta ocupada pelos reservatórios em território brasileiro (NOVO & TUNDISI, 1988). Estudos têm demonstrado que o sensoriamento remoto pode ser usado tanto na estimativa de parâmetros individuais de qualidade da água (VENTURA, 2013) quanto na determinação do seu estado trófico (SAUSEN & PEREIRA, 1986; SHEELA *et al.*, 2011). Eles já relataram a aplicabilidade das bandas TM1, TM2, TM3 e TM4 em estudos

de parâmetros ambientais em ambientes aquáticos (LILLESAND *et al.*, 1983; NOVO & TUNDISI, 1988; MITTENZWEY; GITELSON; KONDRATIEV, 1992; CHENG & LEI, 2001; WALDRON; STEEVES; FINN, 2001).

Diante desse cenário, o sensoriamento remoto surge como uma possível forma de complementação dos programas de monitoramento usuais, preenchendo lacunas temporais e espaciais (RITCHIE; ZIMBA; EVERIT, 2003; BUKATA, 2005). A partir do desenvolvimento de sensores multiespectrais, como o LANDSAT TM, e de novas tecnologias para o processamento e análise de dados fornecidos pelos sensores dos satélites, surgiu uma nova fonte potencial para a análise quantitativa e qualitativa de dados ambientais.

Os dados de sensoriamento remoto podem ser utilizados como entrada no modelo, permitindo a estimativa do estado trófico dos reservatórios. A existência de uma série histórica do sistema LANDSAT TM desde 1973 e dos dados limnológicos do Lago Paranoá, coletados em campo pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB) desde 1976, permite uma avaliação dos diferentes níveis de trofia apresentados pelo lago ao longo do tempo.

As alterações na qualidade da água do reservatório no que toca às concentrações de clorofila-*a* e, de fósforo total e à profundidade do Disco de Secchi refletem as variações de estado trófico no Lago Paranoá, que podem ser detectadas por meio de dados de sensoriamento remoto. A partir dessa hipótese, este trabalho empírico pretende testar uma metodologia que demonstre como os dados LANDSAT TM podem ser utilizados para estimar a qualidade da água e o estado trófico do Lago Paranoá em Brasília, Distrito Federal, de forma a auxiliar no seu programa de monitoramento. A interpretação dos resultados foi realizada em função das amplitudes dos resultados obtidos e em função do índice de Estado Trófico de Carlson (CHENG & LEI, 2001).

Área de estudo

A bacia do Lago Paranoá (Figura 1) está localizada na região central do Distrito Federal, Brasil. Tem uma área aproximada de 1.034,07 km², correspondendo a cerca de 18% do seu território, e está integralmente localizada em seu interior. A sub-bacia do Lago Paranoá ocupa uma área de 288,69 km², funcionando como bacia de captação dos principais cursos d'água que drenam o sítio urbano da cidade de Brasília.

O Lago Paranoá está situado a uma altitude de 1.000 metros, que corresponde à cota de alagamento. É um lago urbano artificial formado a partir do fechamento da barragem do Rio Paranoá, em 1959, represando águas do Riacho Fundo e do Ribeirão do Gama, ao Sul e do Ribeirão do Torto e do Córrego Bananal, ao Norte.

O reservatório, criado com os objetivos principais de propiciar recreação e paisagismo (ROCHA, 1994), é especialmente suscetível

ao problema da eutrofização, porque é o corpo receptor dos efluentes domésticos de uma população de aproximadamente um milhão de pessoas residentes na bacia (IBGE, 2010). Essa população vive em 374.733 domicílios, dos quais 85% têm o seu esgoto recolhido e tratado em estações antes de ser despejado no lago (CODEPLAN, 2011). Além disso, ações antrópicas vêm resultando em vários materiais que são carreados para o lago, como lixo urbano, restos de materiais de construção, partículas de asfalto liberadas das estradas, materiais orgânicos de fazendas e matas, agrotóxicos das áreas cultivadas e partículas de solo exposto e livre das estradas não pavimentadas (FRANZ *et al.*, 2014).

METODOLOGIA

Estudos anteriores apresentaram métodos para a estimativa do estado trófico de ambientes lênticos a partir da utilização de índices de estado trófico (CAESB/PNUD, 1987; BRONDI, 1994; CESP, 1996; FELIZATTO *et al.*, 1999; CHENG & LEI, 2001) e a partir do uso do sensoriamento

remoto (LILLESAND *et al.*, 1983; CHENG & LEI, 2001; WALDRON; STEEVES; FINN, 2001).

O Lago Paranoá teve o seu estado trófico estimado pelo índice de Vollenweider (CAESB/PNUD, 1987) e pela metodologia de CEPIS (FELIZATTO *et al.*, 1999). Como contribuição adicional aos estudos anteriores sobre o Lago Paranoá, além das estimativas de estado trófico, este trabalho empírico pretende avançar no aspecto metodológico por meio do uso da técnica de sensoriamento remoto para a estimativa desse estado trófico, nos quatro períodos limnológicos do lago. Esses períodos são fases diferenciadas e bem definidas que vão desde a construção do reservatório, passando pelo processo de eutrofização; eles cobrem desde a década de 1960 até o início dos anos 1990 e o recente e contínuo processo de oligotrofização, datado de 2001 (STARLING; PEREIRA; ANGELINI, 2002).

Foram utilizados o Índice de Carlson (CARLSON, 1977) e quatro cenas LANDSAT TM 5. O Índice de Estado Trófico de Carlson (Carlson TSI) converte dados de valores de desaparecimento do Disco de Secchi,

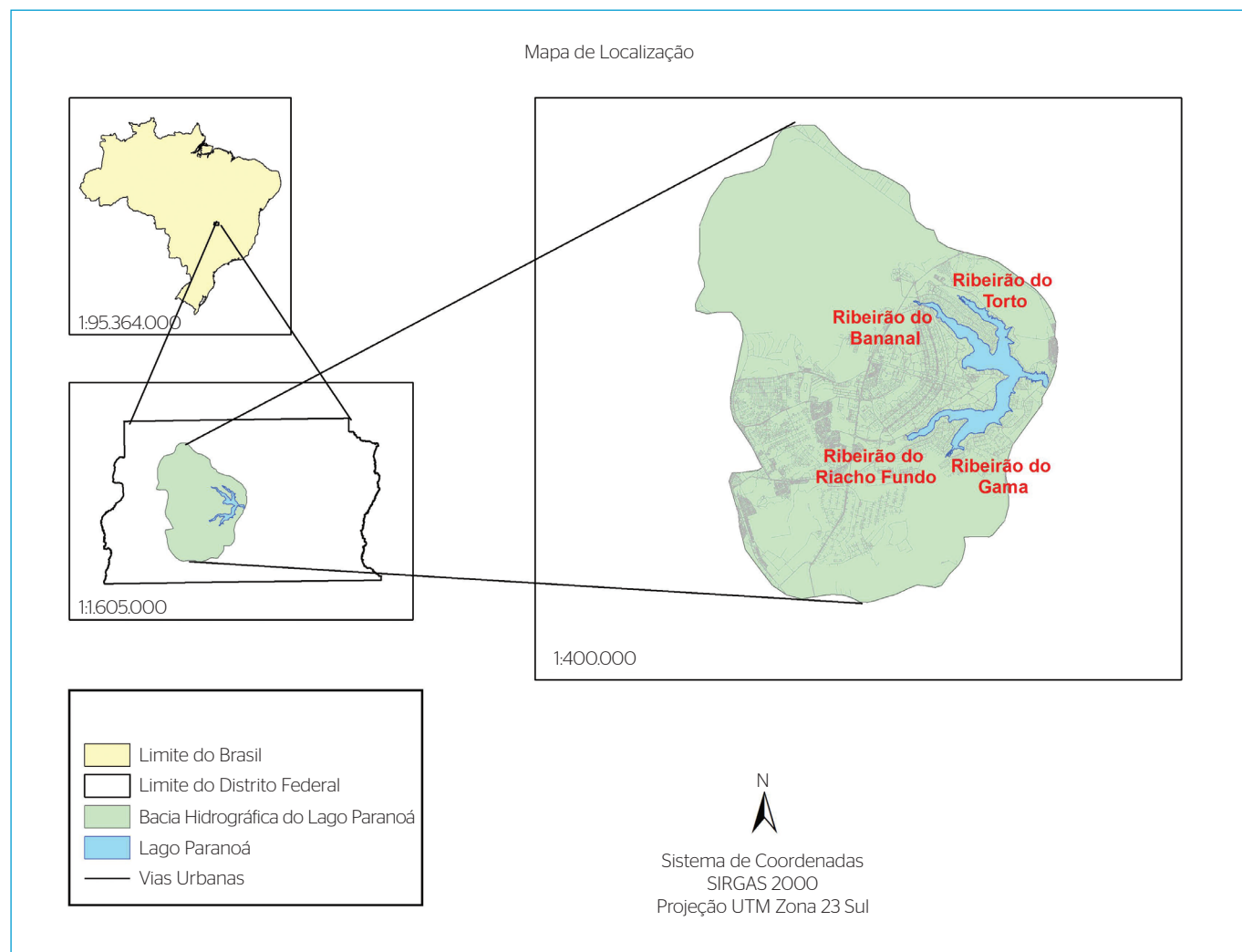


Figura 1 - Mapa de localização da Bacia do Lago Paranoá.

clorofila-*a* e fósforo total para uma escala numérica padrão, na qual são listados valores de 0 a 100 (Tabela 1), baseados em relações empíricas entre os parâmetros de qualidade da água.

Fonte dos dados

O Índice de Carlson foi calculado a partir de valores coletados em campo pela CAESB, referentes às amostragens executadas pelos quatro pontos distribuídos nos principais braços do reservatório, constantes na Figura 2: ponto A (Ribeirão do Riacho Fundo); ponto B (Ribeirão do Gama); ponto D (Ribeirão do Torto); ponto E (Ribeirão Bananal e na Região Central — ponto C — nas seguintes datas: 8 de maio de 1984, 22 de junho de 1994, 27 de maio de 1997 e 27 de junho 2001).

As datas citadas foram selecionadas por serem as datas de coleta mais próximas às datas das imagens geradas pelo sensor TM, que tem resolução espacial de 30 m e temporal de 16 dias. As amostras contêm dados de coleta mensais, referentes ao período de seca, que se inicia em maio e se estende até setembro. Esse período foi

escolhido visando à obtenção de imagens sem cobertura de nuvens. Além disso, o revolvimento dos sedimentos de fundo, quando do período chuvoso, altera o comportamento espectral da água, o que poderia superestimar parâmetros que alterariam as classes de trofia encontradas no Lago Paranoá.

As cenas LANDSAT TM 5 utilizadas referem-se às datas: 26 de maio de 1984, 7 de junho de 1994, 30 de maio de 1997 e 10 de junho de 2001. As datas das cenas são as mais próximas das coletas de campo e sem cobertura de nuvens no momento da aquisição, pois, como salientado anteriormente, a periodicidade de obtenção dos dados Landsat, ou sua resolução temporal, é de 16 dias.

Este estudo utilizou valores das bandas do visível 1 (TM1, correspondendo à região da luz azul), 2 (TM2, luz verde), 3 (TM3, luz vermelha) e da banda do infravermelho próximo 4 (TM4). A escolha dessas bandas baseou-se no comportamento espectral da água. A água quando limpa, apresenta o seu pico de reflectância na faixa do azul-verde (TM1 e TM2) e tende a deslocar esse pico para a região do verde (TM2) quando do aumento da biomassa algal e para os maiores comprimentos (TM3 e TM4) quando da incorporação de sólidos em suspensão. Como a interação da energia eletromagnética com o alvo é da ordem de alguns micrômetros de profundidade, as informações avaliadas por sistemas sensores refletem as características da superfície, pois, no caso de águas transparentes com sedimentos depositados no fundo, a resposta espectral obtida tende a ser de água limpa.

A escolha dos períodos para análise apresentados na primeira coluna da Tabela 2 é justificada pelas nítidas variações nos valores de concentração de fósforo total e clorofila-*a* e pelas variações de profundidade de desaparecimento do Disco de Secchi nas quatro fases limnológicas do Lago Paranoá: eutrofização e oligotrofização 1, 2 e 3 (STARLING; FERREIRA; ANGELINI, 2002).

Segundo esses autores, o Lago Paranoá, por receber cerca de 200 L.s⁻¹ de efluentes que passavam apenas pelo tratamento primário de gradação, apresentava-se eutrofizado, no período de 1976 a 1992. A fase seguinte, de 1993 a 1995, a de oligotrofização 1, é representada pelo controle de aportes de efluentes com a instalação de um sistema de tratamento terciário. De 1996 a 1998, Starling, Ferreira e Angelini (2002)

Tabela 1 - Classificação de Estado Trófico, segundo Carlson (1977).

Categoria trófica	Valor do TSI
Ultraoligotrófico	<20
Oligotrófico	21-40
Mesotrófico	41-50
Eutrófico	51-60
Hipereutrófico	>60

Fonte: Tundisi (2001).



Fonte: Fonseca (2001).

Figura 2 - Localização dos pontos de coleta.

Tabela 2 - Fases limnológicas do Lago Paranoá.

Anos	Cena LANDSAT	Fases de evolução limnológica do lago
1976 a 1992	08/05/1984	Eutrofização
1993 a 1995	07/06/1994	Oligotrofização 1 - controle de aportes
1996 a 1998	30/05/1997	Oligotrofização 2 - fase inicial
1999 a 2001	10/06/2001	Oligotrofização 3 - estabilização

Fonte: Starling, Ferreira e Angelini (2002).

consideram a fase inicial da oligotrofização, seguida de sua estabilização, de 1999 a 2001 (Tabela 2).

Para comprovar essa variação, foram testados os algoritmos constantes na Tabela 3, propostos por Waldron, Steeves e Finn (2001) para a espacialização das concentrações de clorofila-*a*, de fósforo total e de profundidade do Disco de Secchi. Esses algoritmos se referem às cenas LANDSAT TM 5 referentes aos anos de 1984, 1994, 1997 e 2001 em toda a lâmina d'água do Lago Paranoá. A escolha dessa cena de 1984 para representar a primeira fase se baseou no fato de ser uma das primeiras cenas do Landsat TM5, colocado em órbita em 1º de março de 1984. A seleção das cenas das fases 2 e 3 (1994 e 1997, respectivamente) obedeceu a lógica de se selecionar a melhor cena no meio da fase e, para última fase descrita por Starling, Ferreira e Angelini (2002), selecionou-se a melhor cena do meio do período seco. A seleção de cenas evitou, então, o início e o fim da fase e as possíveis interferências, no período chuvoso, do revolvimento dos sedimentos de fundo. E conforme salientado por Waldron, Steeves e Finn (2001), a variação de trofia do reservatório, em dados de sistemas sensores, ao longo do período seco, é muito pequena, e a opção por quatro datas mostrou-se suficiente para especializar as fases limnológicas apontadas por Starling, Ferreira e Angelini (2002).

Para o processamento das imagens foi utilizado o software ENVI 4.0. Todos os 28 algoritmos constantes da Tabela 3 foram processados para cada cena selecionada, o que gerou um total de 112 novas imagens.

Foram escolhidos cinco pontos nas imagens LANDSAT TM 5 para a determinação dos valores obtidos em cada algoritmo para cada ponto. Os pontos foram selecionados de acordo com os pontos de amostragem nos quatro principais braços e na região central do reservatório determinados pela CAESB no Programa Limnológico.

Tabela 3 - Algoritmos testados em cada imagem LANDSAT TM 5.

TM1	(TM4) ²	TM2 / TM3	((TM4 - TM3) / (TM4 + TM3))
TM2	ln (TM1)	ln (TM1 / TM2)	((TM2 - TM1) / (TM2 + TM1))
TM3	ln (TM2)	ln (TM1 / TM3)	((TM2 - TM3) / (TM2 + TM3))
TM4	ln (TM3)	ln (TM2 / TM3)	ln ((TM4 - TM3) / (TM4 + TM3))
(TM1) ²	ln (TM4)	(TM1 + TM2) / 2	ln ((TM2 - TM1) / (TM2 + TM1))
(TM2) ²	TM1 / TM2	(TM1 + TM3) / 2	ln ((TM2 - TM3) / (TM2 + TM3))
(TM3) ²	TM1 / TM3	(TM2 + TM3) / 2	TM2 - TM3

Fonte: Waldron, Steeves e Finn (2001).

Os valores obtidos nas cenas LANDSAT TM 5 foram correlacionados com os dados coletados pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal para as mesmas épocas. Os valores coletados para clorofila-*a* e fósforo total se referem à profundidade de 1 m; os valores para transparência da água se referem à superfície.

Os valores coletados para clorofila-*a*, fósforo total e profundidade do Disco de Secchi foram relacionados aos valores gerados a partir do teste dos algoritmos. Cada parâmetro foi correlacionado individualmente. Com o intuito de descrever a relação entre os valores gerados e os valores coletados para clorofila-*a*, fósforo total e profundidade do Disco de Secchi, o método estatístico utilizado foi a regressão linear. Procurou-se determinar o ajustamento de uma reta em relação a essas variáveis, de forma a obter a função definida pela Equação 1:

$$Y = aX + b \quad (1)$$

A partir da análise dos coeficientes de correlação de Pearson, foram selecionados os de maior valor de *r* para cada parâmetro estudado. Após a determinação dos coeficientes de correlação de Pearson (*r*) entre os dados coletados pela CAESB e as bandas LANDSAT TM 5, iniciou-se a etapa de quantificação desses parâmetros nas imagens geradas, por meio da aplicação do modelo linear encontrado. Após a quantificação dos parâmetros, o Índice de Estado Trófico pode ser estimado e espacializado para todo o corpo hídrico. Para essa estimativa foi utilizado o Índice de Carlson – Carlson TSI (CARLSON, 1977).

O índice de Carlson para cada parâmetro é calculado por meio das Equações 2 a 4.

$$TSI (TP) = 10 \left(6 - \frac{\ln(48/TP)}{\ln 2} \right) \quad (2)$$

$$TSI (Chla) = 10 \left(6 - \frac{2.04 - 0.68 \ln Chla}{\ln 2} \right) \quad (3)$$

$$TSI (SDD) = 10 \left(6 - \frac{\ln SDD}{\ln 2} \right) \quad (4)$$

As unidades são o metro (m) para a profundidade do Disco de Secchi (SDD) e µg.L⁻¹ para fósforo total (TP) e para clorofila-*a* (Chla).

Para realizar a estimativa do Índice de Estado Trófico do Lago Paranoá, foram usadas as imagens geradas para o estado trófico, a partir de cada parâmetro, e a média aritmética entre elas, segundo a Equação 5.

$$TSI = \frac{TSI (SDD) + TSI(Chla) + TSI(TP)}{3} \quad (5)$$

RESULTADOS

A partir da análise da correlação entre os valores coletados para fósforo total, clorofila-*a* e transparência da água e os valores gerados no teste dos algoritmos, chegou-se ao índice de correlação para todos os períodos, como descrito na Tabela 4. Para efeito de comparação foram selecionados os de maior valor.

As estimativas do Índice de Estado Trófico a partir das figuras geradas são apresentadas a seguir. Mostram o estado trófico para o espelho d'água do Lago Paranoá a partir da média aritmética entre as figuras geradas para o estado trófico, por parâmetro.

Na Figura 3 o Índice de Carlson (Carlson TSI) mostrou que no ano de 1984 todo o espelho d'água apresenta-se hipereutrófico, com raros pontos eutróficos.

Na Figura 4 observa-se que, para o Índice de Carlson (Carlson TSI) em 1994, quase todo o espelho d'água apresenta-se eutrófico, com extensas áreas mesotróficas observadas em toda a extensão do lago. A porção inicial do Ribeirão do Torto apresenta-se oligotrófica e a porção inicial do Riacho Fundo apresenta-se hipereutrófica.

Na Figura 5, referente às estimativas de 1997, para o índice de Carlson (Carlson TSI) quase toda Região Central apresenta-se mesotrófica.

Tabela 4 - Índice de correlação campo x imagem.

Ano	Parâmetro	Banda	Valor de r	Modelo linear ajustado
1984	Fósforo total	$(TM1 + TM2) / 2$	-0,7549	$Y = -0,0055x + 0,2546$
	Clorofila- <i>a</i>	$(TM2)^2$	0,8449	$Y = 0,0003x + 0,0193$
	Transparência	$(TM2)^2$	-0,8141	$Y = -0,1692x + 86,908$
1994	Fósforo total	$\ln(TM2)$	-0,8644	$Y = -0,184x + 0,5969$
	Clorofila- <i>a</i>	$(TM2)^2$	-0,9215	$Y = -0,0003 + 0,0832$
	Transparência	$\ln(TM2)$	1,00	$Y = 200x - 500$
1997	Fósforo total	$\ln(TM4 - TM3) / (TM4 + TM3)$	-0,8714	$Y = -0,1608x + 0,0684$
	Clorofila- <i>a</i>	$(TM3)$	0,9709	$Y = 0,0056x - 0,0565$
	Transparência	$\ln(TM3)$	-0,9303	$Y = -173,08 + 567,69$
2001	Fósforo total	$(TM1)^2$	0,6619	$Y = 6E - 05x + 0,0017$
	Clorofila- <i>a</i>	$TM2 - TM3$	0,9432	$Y = 0,0006x - 0,0046$
	Transparência	$(TM1)^2$	-0,7661	$Y = -0,9021x + 336,2$

Estimativa do estado trófico do Lago Paranoá.

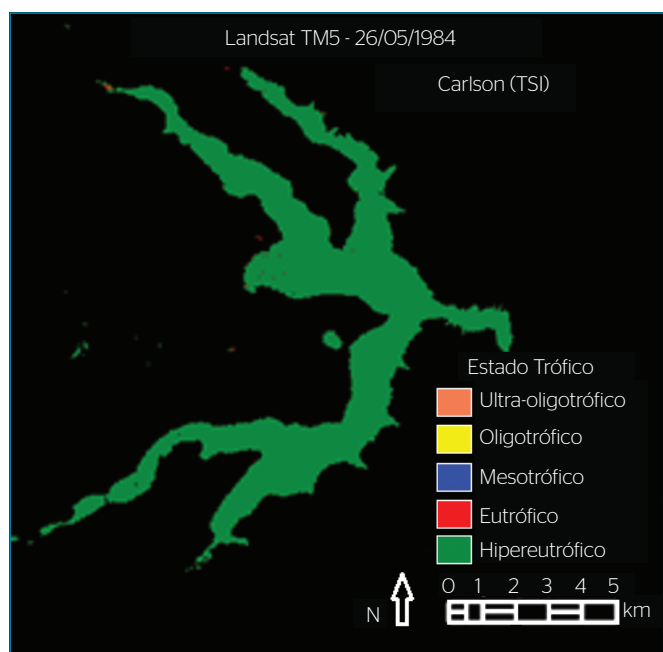


Figura 3 - Carlson TSI para o espelho d'água do Lago Paranoá, 1984.

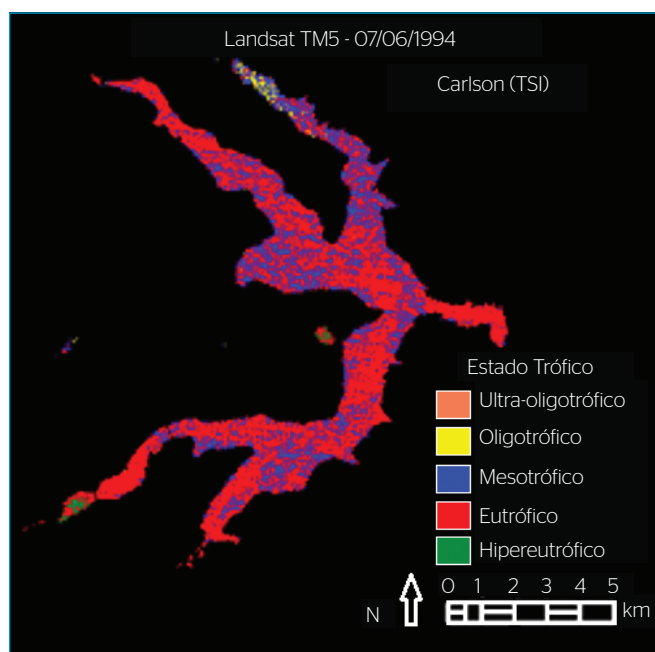


Figura 4 - Carlson TSI para o espelho d'água do Lago Paranoá, 1994.

Extensas áreas eutróficas são observadas nos quatro braços, com maior incidência nos braços do Ribeirão do Gama e do Riacho Fundo. A porção inicial dos quatro braços, assim como as margens do Riacho Fundo apresentam-se hipereutróficas.

Na Figura 6 observa-se que, para 2001, o índice de Carlson (Carlson TSI) mostra que grande parte do espelho d'água apresenta-se mesotrófica. Áreas eutróficas são observadas nos braços do Riacho Fundo e do Ribeirão do Gama e na porção inicial dos braços do Ribeirão do Torto e do Ribeirão Bananal. Grande parte da Região Central apresenta áreas oligotróficas que se estendem até a região próxima à barragem.

DISCUSSÃO

O aumento populacional, aliado à falta de tratamento de esgotos domésticos, levou à eutrofização do Lago Paranoá. Esse estado eutrófico foi a principal característica do Lago Paranoá por um longo tempo, desde o início da década de 1960 até 1999 (ANGELINI; BINI; STARLING, 2008).

Para tentar conter esse processo de eutrofização, algumas medidas foram tomadas pela CAESB. Essas medidas tinham como objetivo impedir os eventos de grande mortalidade de peixes, ocorridos nas décadas de 1970 e 1980 (STARLING; FERREIRA; ANGELINI, 2002; ANGELINI; BINI; STARLING, 2008). As medidas ocorreram sob a forma de três intervenções: a implantação das Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs) Sul e Norte em 1993, o funcionamento efetivo das ETEs em 1996 e o *flushing* ocorrido em 1999. O *flushing* consiste na abertura abrupta das comportas do reservatório para retirar a camada superficial da água e, como consequência, todo o plâncton contido na zona eufótica.

Esses eventos tiveram significativa importância no processo de despoluição do reservatório e são visualizados na análise das Figuras 3 a 6, que permitem perceber a melhora significativa na qualidade da água do Lago Paranoá ao longo das quatro fases limnológicas.

A análise da Figura 3 mostra um resultado compatível com o resultado apresentado por Starling, Pereira e Angelini (2002). O espelho d'água aparece eutrófico em sua totalidade em um período anterior à implantação das ETEs, que ocorreu em 1993.

A análise da Figura 4, referente a 1994, mostra uma melhora na qualidade da água do lago. Essa melhora condiz com os resultados encontrados por Starling, Pereira e Angelini (2002) e Angelini, Bini e Starling (2008) e coincide com uma das medidas tomadas pela CAESB, a implantação das ETEs em 1993.

A potencialidade do sistema Landsat para a espacialização do estado trófico de águas interiores tem sido testado há muito tempo, como destacado nos trabalhos de Waldron, Steeves e Finn (2001), que ensejou na investigação dos algoritmos aqui testados, mas também em trabalhos mais recentes, como o de Olmanson, Bauer e Brezonik (2008), no qual os autores investigaram 20 anos de claridade de água e de estado trófico de cerca de 10.500 lagos no estado de Minnesota.

Sass *et al.* (2007) também utilizaram dados TM do Landsat para investigar o estado trófico de lagos boreais no Canadá e salientam que existem propriedades ópticas inerentes que são obtidas diretamente por sistemas sensores, tais como a clorofila-*a*, turbidez e sólidos em suspensão. Porém, como salientado por Waldron, Steeves e Finn (2001) e Olmanson, Brezonik e Bauer (2013), outras propriedades

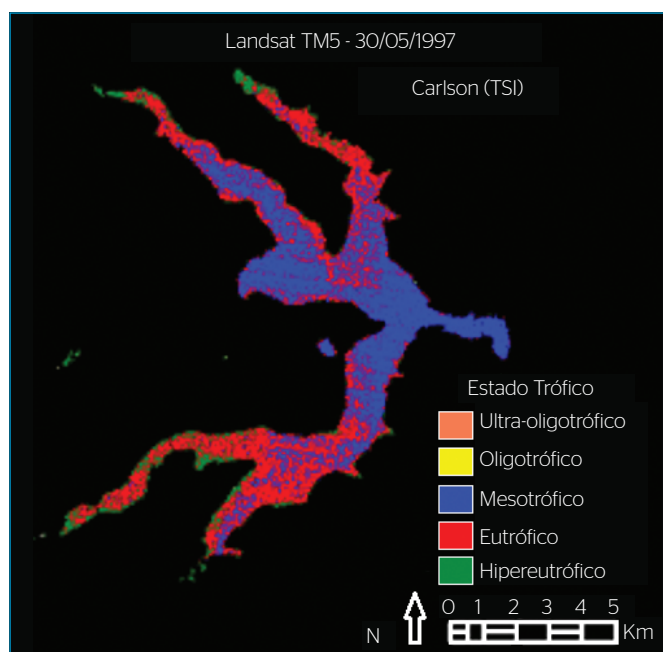


Figura 5 - Carlson TSI para o espelho d'água do Lago Paranoá, 1997.

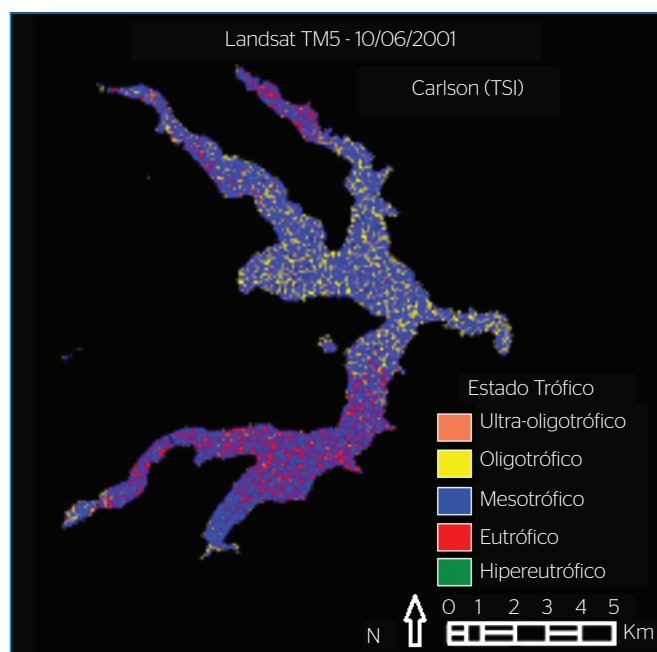


Figura 6 - Carlson TSI para o espelho d'água do Lago Paranoá, 2001.

ópticas não inerentes também são passíveis de serem investigadas, como fósforo total e matéria orgânica dissolvida, pois interferem nas propriedades inerentes.

O funcionamento efetivo das ETEs em 1996 contribuiu para que uma nova melhora na qualidade da água do reservatório fosse evidenciada na Figura 5, referente a 1997. Angelini, Bini e Starling (2008) relatam que, a partir de 1995 já ocorria uma dinâmica irregular de fósforo e de clorofila-*a*, cujos valores começavam a diminuir. Entretanto, uma redução efetiva dos teores de fósforo e de clorofila-*a* teve início apenas a partir do funcionamento adequado das ETEs, pois a abundância de fitoplâncton e do fósforo era suficiente para que ocorresse a retroalimentação do sistema. A influência das variáveis no evento de eutrofização mostra que a clorofila-*a* não depende exclusivamente do fósforo (STARLING; PEREIRA; ANGELINI, 2002; ANGELINI; BINI; STARLING, 2008).

Até então, a transparência da água não tinha mudado significativamente, mesmo após as duas intervenções referentes às ETEs (STARLING; PEREIRA; ANGELINI, 2002; ANGELINI; BINI; STARLING, 2008). Os autores relatam que a redução considerável nos teores de fósforo e o aumento expressivo da transparência da água ocorreram com o *flushing* acontecido em 1999 e explicam a melhora na qualidade da água do reservatório, visualizada na Figura 6.

Mesmo com a significativa melhora na qualidade da água do reservatório, algumas regiões permanecem eutrofizadas. A tendência do Riacho Fundo de permanecer eutrófico foi relatada por Starling, Pereira e Angelini (2002), assim como a sua capacidade de disseminar esse estado para outras regiões do lago.

CONCLUSÃO

A partir da utilização de sensoriamento remoto, este trabalho empírico objetivou testar uma metodologia para mapear o estado trófico do Lago Paranoá. A metodologia proposta mostrou bom potencial de aplicação a ambientes lênticos.

O mapeamento realizado mostrou com clareza a evolução na qualidade das águas do lago. A evolução para condições mesotróficas e oligotróficas no estado trófico do Lago Paranoá representa a restauração da qualidade da água de um reservatório urbano que sofria um longo e intenso processo de eutrofização. Mesmo que a classificação proposta pelo Índice de Carlson para os indicadores fósforo total, clorofila-*a* e transparência tenha sido desenvolvida para reservatórios e lagos de regiões temperadas, considera-se que o objetivo do trabalho foi atingido.

O sensoriamento remoto constitui uma ferramenta para a análise de dados ambientais de ecossistemas aquáticos e pode ter a sua escala de uso ampliada. De modo a tornar mais sistemática a utilização desses dados, sugere-se a realização de novas pesquisas para o desenvolvimento de modelos empíricos que relacionem as propriedades físicas e químicas da água aos dados de sensoriamento remoto.

Recomenda-se como contribuição a estudos futuros que cada tributário do lago Paranoá seja analisado diante da sua microbacia e que seja levada em consideração a contribuição de cada braço do lago na estimativa do seu estado trófico.

Também se sugere a verificação da utilização de índices validados para a realidade tropical, como o de Cunha, Calijuri e Lamparelli (2013), como forma de melhorar a espacialização das classes de trofia de reservatórios.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, D.M.; GLIBERT, P.M.; BURKHOLDER, J.M. (2002) Harmful algal blooms and eutrophication: nutrient sources, composition, and consequences. *Estuaries*, v. 25, n. 4, p. 704-726.
- ANGELINI, R.; BINI, L.M.; STARLING, F.L.R.M. (2008) Efeitos de diferentes intervenções no processo de eutrofização do Lago Paranoá (Brasília - DF). *Oecologia Brasiliensis*, v. 12, n. 3, p. 564-571.
- BARTRAM, J. & BALLANCE, R. (Eds) (1996) *Water quality monitoring: a practical guide to the design and implementation of freshwater quality studies and monitoring programmes*. London: Chapman & Hall.
- BRASIL. (1997) *Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989*. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9433.htm>. Acesso em: 8 nov. 2014.
- BRONDI, S.H.G. (1994) *Eutrofização da Represa de Barra Bonita e comportamento da comunidade fitoplanctônica*. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Carlos.
- BUFON, A.G.M.; LANDIM, P.M.B.; MELO, J.S.C. (2009) Estimativa do tempo de vida útil de represa de pequeno porte. *Acta Scientiarum*, v. 31, n. 1, p. 87-92.
- BUZELLI, G.M. & CUNHA-SANTINO, M.B. (2013) Análise e diagnóstico da qualidade da água e estado trófico do reservatório de Barra Bonita, SP. *Revista Ambiente & Água*, v. 8, n. 1, p. 186-205.
- BUKATA, R.P. (2005) *Satellite monitoring of inland and coastal water quality: retrospection, introspection, future direction*. CRC Press, Boca Raton, EUA. 246 p.
- Caesb/Pnud - Companhia de Saneamento Ambiental Do Distrito Federal/Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. (1987) Projeto BRA/87/11/B/01/01. Avaliação dos Aspectos Sanitários do Lago Paranoá e da Bacia do Rio São Bartolomeu.

- Carlson, R.E. (1977) A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, v. 22, n. 2, p. 361-369.
- CHENG, K.S. & LEI, T.C. (2001) Reservoir Trophic state Evaluation using Landsat TM Images. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 37, n. 5, p. 1321-1334.
- CESP - COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO. (1996) *Programa de Gerenciamento de Reservatórios: monitoramento de qualidade da água nos reservatórios da Cesp: 1986-1996*. São Paulo: CESP.
- COMPANHIA DE PLANEJAMENTO DO DISTRITO FEDERAL - CODEPLAN. (2011) Pesquisa Distrital por Amostra de Domicílios. Disponível em: <<http://www.codeplan.df.gov.br/areas-tematicas/anuario-estatistico-do-df/295-pesquisa-distrital-por-amostra-de-domicilios.html>>. Acesso em: 10 set. 2014.
- CUNHA, D.G.F.; CALIJURI, M.C.; LAMPARELLI, M.C.; MENEGON JUNIOR, N. (2013) Resolução CONAMA 357/2005: análise espacial e temporal de não conformidades em rios e reservatórios do estado de São Paulo de acordo com seus enquadramentos (2005-2009). *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 18, n. 2, p. 159-168.
- CUNHA, D.G.F.; CALIJURI, M.C.; LAMPARELLI, M.C. (2013) A trophic state index for tropical/subtropical reservoirs (TSItsr). *Ecological Engineering*, v. 60, p. 126-134.
- ESTEVES, F.A. (2011) *Fundamentos de Limnologia*. 3ª ed. Rio de Janeiro: Interciência, 790 p.
- FELIZATTO, M.R.; ITONAGA, L.C.; TEIXEIRA PINTO, M.A.; CAVALCANTI, C.G.B. (1999) Statistical tendency analysis of Lake Paranoá limnological data and its trophic state classification based on CEPIS methodology. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Resumo dos Trabalhos Técnicos. Rio de Janeiro: ABES. p. 2159-2168.
- FERREIRA, R.C.; LOPES, W.G.R.; ARAÚJO, J.L.L. (2012) A água como suporte para atividades de lazer e turismo: possibilidades e limitações da barragem Piracuruca no Estado do Piauí (Brasil). *Raê Ga*, v. 25, p. 134-163.
- FONSECA, F.O. (Org.) (2001). *Olhares sobre o Lago Paranoá*. 1ª ed. Brasília: Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, 425 p.
- FRANZ, C.; MAKESCHIN, F.; WEIß, H.; LORZ, C. (2014) Sediments in urban river basins: identification of sediment sources within the Lago Paranoá catchment, Brasília DF, Brazil: using the fingerprint approach. *Science of the Total Environment*, v. 466-467, p. 513-523.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (2010) Censo Demográfico. Disponível em: <<http://censo2010.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 1 set. 2014.
- LILLESAND, T.M.; JOHNSON, W.L.; DEUEL, R.L.; LINDSTROM, O.M.; MEISNER, D.E. (1983) Use of Landsat data to predict the trophic state of Minnesota Lakes. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 49, n. 2, p. 219-229.
- MARGALEF, R. (1992) *Ecologia*. Barcelona: Omega, 951 p.
- MITTENZWEY, K.H.; GITELSON, A.A.; KONDRATIEV, K.Y. (1992) Determination of Chlorophyll-a of inland waters on the basis of spectral reflectance. *Limnology and Oceanography*, v. 37, n. 1, p. 147-149.
- NOVO, E.M.L.M. & TUNDISI, J.G. (1988) Sensoriamento remoto de águas interiores: perspectivas. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 5, 1988, Natal. *Anais do 5º Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. São José dos Campos: INPE, p. 13-21.
- OLMANSON, L.G.; BAUER, M.E.; BREZONIK, P.L. (2008) A 20-year Landsat water clarity census of Minnesota's 10,000 lakes. *Remote Sensing of Environment*, v. 112, n. 11, p. 4086-4097.
- OLMANSON, L.G.; BREZONIK, P.L.; BAUER, M.E. (2013) Airborne hyperspectral remote sensing to assess spatial distribution of water quality characteristics in large rivers: the Mississippi River and its tributaries in Minnesota. *Remote Sensing of Environment*, v. 130, p. 254-265.
- RITCHIE, J.C.; ZIMBA, P.V.; EVERITT, J.H. (2003) Remote sensing techniques to assess water quality. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 69, n. 6, p. 695-704.
- ROCHA, A.J.A. (1994) Caracterização limnológica do Distrito Federal. In: PINTO, M.N. (Ed.) *Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas*. EDUnB, Brasília, Brasil. p. 469-492.
- SASS, G.Z.; CREED, I.F.; BAYLEY, S.E.; DEVITO, K.J. (2007) Understanding variation in trophic status of lakes on the Boreal Plain: a 20 year retrospective using Landsat TM imagery. *Remote Sensing of Environment*, v. 109, n. 2, p. 127-141.
- SAUSEN, T.M. & PEREIRA, M.D.B. (1986) Estudo da qualidade da água de reservatórios utilizando técnicas de sensoriamento remoto: conceitos metodológicos. In: *Simpósio Latino-Americano de Sensoriamento Remoto*. Anais. Gramado: INPE/SELP/RSBC, v. 1, p. 638-644.
- SHEELA, A.M.; LETHA, J.; JOSEPH, S.; RAMACHANDRAN, K.K.; SANALKUMAR, S.P. (2011) Trophic state index of a lake system using IRS (P6-LISS III) satellite imagery. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 177, n. 1-4, p. 575-592.
- STARLING, F.L.R.M.; PEREIRA, C.E.B.; ANGELINI, R. (2002) *Modelagem Ecológica da Dinâmica do Fósforo e Avaliação da Capacidade Suporte do Lago Paranoá Frente à Ocupação da sua Bacia de Drenagem*. Brasília: Companhia Energética de Brasília, Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal. 162 p.
- TUNDISI, J.G. (Ed.) (2001) *Planejamento e Gerenciamento de Lagos e Reservatórios: uma abordagem integrada ao problema da eutrofização*. Osaka: Rima. 385 p.
- VENTURA, D.L.T. (2013) *Uso do sensoriamento remoto para monitoramento da concentração de clorofila a em açudes do semiárido*. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Brasília. 53 p.
- VOLLENWEIDER, R.A. (1976) Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrofication. *Memorie dell'Instituto Italiano di Idrobiologia*. v. 33, p. 53-83.
- WALDRON, M.C.; STEEVES, P.A.; Finn, J.T. (2001) *Use of Thematic Mapper Imagery to assess water quality, trophic state, and macrophyte distributions in Massachusetts lakes*. Massachusetts: Water-Resources Investigations Report 01-4016. 40 p.