

# O MONITORAMENTO AMBIENTAL COMO SUBSÍDIO À GESTÃO DE ECOSISTEMAS AQUÁTICOS COSTEIROS: O EXEMPLO DA LAGOA IMBOASSICA, RJ, BRASIL

Roberto Nascimento de Farias (UFRJ) • Lorena Cescon de Salles (FSMA) • Amanda da Silva Batista Vitório (UFRJ)  
Frederico Meirelles-Pereira (UFRJ) • André Megali Amado (UFRN/UFJF) • Reinaldo Luiz Bozelli (UFRJ)  
Francisco de Assis Esteves (UFRJ) • Marcos Paulo Figueiredo-Barros (UFRJ)

## Introdução

Os ecossistemas estão em constante mudança, como resultado de múltiplas interações e transformações, por vezes cíclicas. Dessa forma, para compreender a sua dinâmica e o seu funcionamento e também avaliar como eles respondem a intervenções ou distúrbios, é preciso “observá-los” ao longo do tempo. Isso é possível por meio do monitoramento ambiental, que consiste na mensuração de variáveis físicas, químicas e/ou biológicas em longas séries temporais<sup>1</sup>. Tais variáveis são indicadoras da qualidade ambiental e devem ser selecionadas com a finalidade de responder a questões acerca das mudanças ambientais passíveis de ocorrer no ecossistema. O monitoramento ambiental também pode ser entendido como a amostragem de um sistema ou compartimento (ar, água, solo ou biota) ao longo do tempo a fim de observar e estudar o ambiente, assim como produzir conhecimento a partir desse processo<sup>2,3</sup>.

O monitoramento realizado em longo prazo é de extrema importância para orientar a gestão e o manejo dos ecossistemas e também as atividades humanas que deles fazem uso e, de alguma forma, afetam o ambiente. A existência de longas séries históricas de dados permite avaliar a evolução temporal da qualidade ambiental, indicar prioridades para a elaboração de ações de controle e fiscalização, além de orientar investimentos e subsidiar a elaboração e a implantação de leis específicas que levam à proteção e/ou à melhoria da qualidade ambiental<sup>4</sup>. Dessa forma, o monitoramento ambiental fornece o embasamento científico para a formulação de políticas ambientais e auxilia tanto na tomada de decisão na gestão ambiental quanto na avaliação se determinada ação tem sido efetiva<sup>5</sup>.

<sup>1</sup> LOVETT, G. M. *et al.* Who needs environmental monitoring? **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 5, n. 5, p. 253-260, 2007.

<sup>2</sup> ARTIOLA, J.; BRUSSEAU, M. L.; PEPPER L. L. **Environmental Monitoring and Characterization**. New York: Elsevier Science & Technology Books, 2004. p. 410.

<sup>3</sup> WIERSMA, B. G. **Environmental Monitoring**. Boca Raton: CRC Press, 2004. 768 p.

<sup>4</sup> LAMPARELLI, M. C. **Grau de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo**: avaliação dos métodos de monitoramento. 2004. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

<sup>5</sup> LOVETT, G. M. *et al.* Who needs environmental monitoring? **Frontiers in Ecology and the Environment**, *op. cit.*

O monitoramento ambiental pode ser realizado para diversos fins. Por meio dele é possível avaliar tendências, medir efeitos cumulativos de impactos e informar o público e os tomadores de decisão sobre as condições ambientais<sup>6</sup>. Isso permite que possam ser adotadas medidas preventivas e mitigadoras complementares. Por exemplo, por meio do monitoramento, é possível constatar a presença de substâncias em concentrações anômalas, estabelecer patamares aceitáveis para a manutenção da qualidade ambiental, assim como entender a dinâmica de vários processos. Dentre esses, destacam-se: a qualidade da água utilizada no abastecimento público, o lançamento de efluentes em corpos hídricos e a sua balneabilidade, a qualidade do ar em regiões urbanas e industriais, a degradação de solos e das florestas, o crescimento demográfico, a taxa de extinção de espécies, assim como as mudanças climáticas globais<sup>7</sup>. Além disso, os dados monitorados também contribuem consideravelmente para testar, calibrar e parametrizar modelos ambientais<sup>8</sup>.

No mundo inteiro existem programas de monitoramento ambiental voltados para os mais diversos objetivos. No Brasil, no âmbito socioeconômico, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) realiza a cada dez anos um censo demográfico em nível nacional. Os dados por ele gerados são de extrema importância para o planejamento estratégico e para subsidiar a formulação de políticas públicas. Outro exemplo no país é a Agência Nacional de Águas (ANA), que reúne dados hidrometeorológicos de todo o território nacional. São séries temporais de longo prazo da pluviosidade, intensidade e direção dos ventos, temperatura do ar, vazão de rios, qualidade da água, entre outras variáveis. Essa base de dados permite avaliar se um evento é incomum ou extremo e pode também ser usada para investigar como os ecossistemas aquáticos respondem a diferentes intervenções antrópicas.

Os ecossistemas aquáticos continentais costeiros são exemplos de ambientes sujeitos a diversos impactos antrópicos, relacionados principalmente ao crescimento populacional e à expansão urbana. Nas lagoas costeiras neotropicais, por exemplo, os distúrbios mundialmente mais frequentes são aqueles com origem na bacia hidrográfica; na maioria dos casos, associados à qualidade da água e ao aporte de sedimento e de nutrientes<sup>9</sup>. Esses distúrbios podem comprometer a manutenção da biodiversidade e a geração de serviços ecossistêmicos e podem favorecer o aparecimento de doenças, especialmente aquelas de veiculação hídrica. Um efeito dos impactos antrópicos sobre os ecossistemas aquáticos continentais, bem documentado e considerado de amplitude global, é a eutrofização artificial<sup>10,11</sup>. Ela tem se tornado uma das principais preocupações em países desenvolvidos e também em desenvolvimento<sup>12</sup>. Além disso, durante as últimas quatro décadas, a eutrofização tem se destacado mundialmente como uma das maiores ameaças à qualidade dos recursos hídricos<sup>13</sup>.

<sup>6</sup> MITCHELL, B. Resource and Environmental Management. 2<sup>nd</sup> ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2002. 367 p.

<sup>7</sup> ARTIOLA, J.; BRUSSEAU, M. L.; PEPPER L. L. **Environmental Monitoring and Characterization**, *op. cit.*

<sup>8</sup> LOVETT, G. M. et al. Who needs environmental monitoring? **Frontiers in Ecology and the Environment**, *op. cit.*

<sup>9</sup> ESTEVES, F. A. et al. Neotropical coastal lagoons: an appraisal of their biodiversity, functioning, threats and conservation management. **Brazilian Journal of Biology**, v. 68, n. 4, p. 967-981, 2008.

<sup>10</sup> SMITH, V. H.; JOYE, S. B.; HOWARTH, R.W. Eutrophication of freshwater and marine ecosystems. **Limnology and Oceanography**, v.51, p. 351-355, 2006.

<sup>11</sup> SMITH, V. H.; SCHINDLER, D. W. Eutrophication science: where do we go from here? **Trends in Ecology & Evolution**, v.24, p. 201-207, 2009.

<sup>12</sup> ANSARI, A. A.; GILL, S. S.; KHAN, F. A. Eutrophication: Threat to Aquatic Ecosystems. In: ANSARI, A. A. et al. (eds.). **Eutrophication: Causes, Consequences and Control**. Dordrecht: Springer, 2011. v. 1, p. 143-170.

<sup>13</sup> ISTVÁNOVICS, V. Eutrophication of lakes and reservoirs. In: LIKENS, G. E. (ed.). **Lake Ecosystem Ecology: A Global Perspective**, 2010. p. 47-55.

A eutrofização pode ser definida como o enriquecimento de um ecossistema aquático por nutrientes, o que causa um incremento na circulação de energia na coluna d'água e um acúmulo de matéria orgânica no corpo hídrico e acelera o seu envelhecimento. Esse processo pode se dar naturalmente, de modo lento e gradual, concretizando-se em escala geológica. Nesse caso, é também conhecido como “envelhecimento natural dos lagos”. Já a eutrofização artificial ou induzida pelas atividades humanas se dá de forma acelerada, súbita e promove um crescimento explosivo dos produtores primários do ecossistema, principalmente microalgas. Isso traz consequências indesejáveis para os demais organismos, para a qualidade da água e, conseqüentemente, para as atividades humanas que fazem uso do ecossistema. O incremento de nutrientes que promove a eutrofização artificial é decorrente de diversas origens, tais como esgotos domésticos, efluentes industriais e atividades agropecuárias. O aumento nas concentrações de nitrogênio (N) e fósforo (P) são as principais causas da eutrofização dos ecossistemas aquáticos<sup>14,15</sup>.

A eutrofização artificial é um termo multifacetado associado com o aumento na produtividade, simplificação das comunidades bióticas e redução na habilidade de os organismos adaptarem-se à carga de nutrientes imposta<sup>16</sup>. Durante o processo de eutrofização artificial, ocorre um aumento excessivo na biomassa de produtores primários que intensifica o acúmulo de matéria orgânica. Em decorrência da decomposição aeróbica desse material orgânico, a concentração de oxigênio dissolvido na água diminui. Com isso, pode ocorrer a morte de muitos organismos aquáticos, especialmente peixes. Além disso, o acréscimo de matéria orgânica provoca o aumento na turbidez da água e reduz a penetração da luz, o que diminui a taxa fotossintética de organismos menos adaptados a essas condições, como a vegetação submersa. Além desses problemas, também se destacam as mudanças na composição de espécies vegetais, o aumento na biomassa de espécies consumidoras, a redução na diversidade de peixes, o mau cheiro e a perda de valor estético do corpo hídrico<sup>17</sup>. A eutrofização artificial também pode favorecer a ocorrência de florações de algas tóxicas e intensificar os problemas já citados.

Em geral, o nível de eutrofização de um ecossistema aquático é avaliado com base em variáveis medidas de forma relativamente fácil, como concentração dos nutrientes limitantes (geralmente N ou P), clorofila-*a* e transparência da água. Geralmente se utiliza a concentração total de nutrientes em detrimento da concentração de suas formas inorgânicas. Os nutrientes presentes em moléculas orgânicas que não estão biodisponíveis podem, eventualmente, se tornar disponíveis para o fitoplâncton por processos biológicos na coluna d'água ou no sedimento<sup>18</sup>. A qualidade da água de um ecossistema aquático também pode ser avaliada quanto ao enriquecimento por nutrientes por meio de Índices de Estado Trófico (IETs), indicadores de fácil entendimento que permitem classificar corpos hídricos em diferentes estados tróficos ou graus de trofia.

<sup>14</sup> ANSARI, A. A.; KHAN, F. A. Studies on the role of selected nutrient sources in the eutrophication of freshwater ecosystem. **Nature, Environment and Pollution Technology**, v. 5, p. 47-52, 2006.

<sup>15</sup> WETZEL, R. G. **Limnology: Lake and river ecosystems**, 3<sup>th</sup> ed. San Diego: Academic Press, 2001.

<sup>16</sup> WETZEL, R. G. **Limnology: Lake and river ecosystems**, op. cit.

<sup>17</sup> DOKULIL, M. T.; TEUBNER, K. Eutrophication and Climate change: present situation and future scenarios. In: ANSARI, A. A. et al. (eds.), **Eutrophication: causes, consequences and control**, 2011, v. 1, p. 1-16.

<sup>18</sup> HORNE, A. J.; GOLDMAN, C. R. **Limnology**. New York: McGraw-Hill International Editions, 1994. 464 p.

Situada no norte do estado do Rio de Janeiro, a Lagoa Imboassica é um exemplo de ecossistema aquático continental que se encontra intensamente degradado. Esse corpo hídrico tem sofrido diversos impactos, dentre os quais pode-se destacar o seu assoreamento, o aterro de suas margens e a supressão dos bancos de macrófitas aquáticas. Além disso, o aporte excessivo de efluentes domésticos e industriais sem o tratamento adequado, durante décadas, fez com que a concentração de nutrientes, especialmente N e P, aumentasse consideravelmente na sua coluna d'água. Isso provocou a eutrofização artificial do ecossistema, o que compromete em grande parte a sua balneabilidade. Outro impacto considerável sobre a Lagoa Imboassica são as aberturas artificiais da barra arenosa que a separa do mar. Há relatos de que essa abertura ocorria naturalmente no passado, mas nas últimas décadas ela tem sido feita de forma artificial pela população local. Esses eventos têm grande influência sobre a dinâmica do corpo hídrico, assim como sobre a comunidade biótica.

A Lagoa Imboassica vem sendo monitorada desde o início da década de 1990, no âmbito do projeto intitulado Estudos Ecológicos nas Lagoas Costeiras do Norte Fluminense (ECOLAGOAS). Esse projeto iniciou suas atividades em março de 1992, por meio do convênio firmado entre a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e a PETROBRAS. Inicialmente, o seu principal objetivo foi monitorar quatro ecossistemas aquáticos costeiros da região, incluindo a Lagoa Imboassica (na zona urbana entre os municípios de Macaé e Rio das Ostras). Foram monitoradas variáveis abióticas (temperatura, pH, salinidade, alcalinidade e concentração dos nutrientes N e P) e bióticas (plâncton, macrófitas aquáticas e coliformes). O monitoramento ambiental em longo prazo possibilitou a criação de um extenso banco de dados das condições limnológicas do ecossistema ao longo das últimas três décadas, e grande parte das mudanças ocorridas no ecossistema foram registradas. Nesse contexto, o presente capítulo tem por objetivo caracterizar a variação em longo prazo (1992 – 2016) nas condições tróficas da coluna d'água da Lagoa Imboassica, de forma a subsidiar a gestão ambiental desse ecossistema. Mais especificamente, este estudo tem como foco as variáveis nitrogênio total (NT), fósforo total (PT), clorofila-*a* (CLa), salinidade, transparência, nível da água e suas inter-relações.

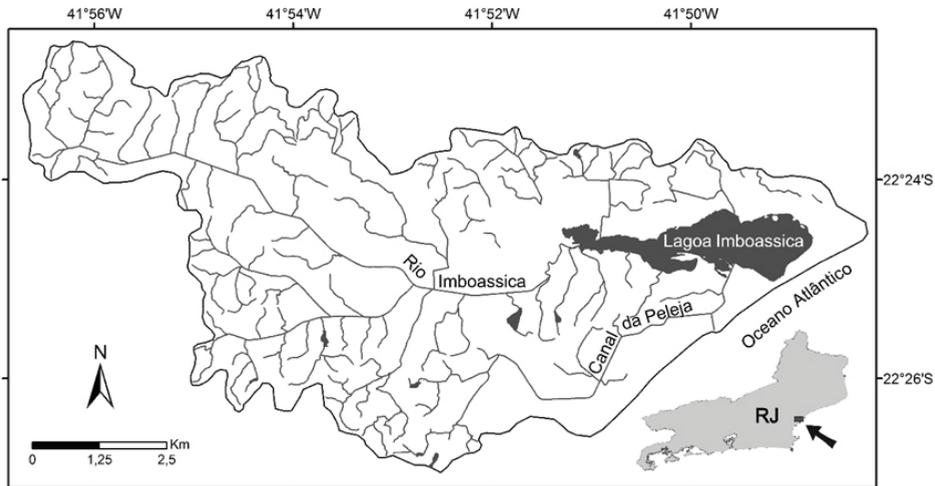
## Material e métodos

### Área de estudo

A Lagoa Imboassica está localizada entre os municípios de Macaé e Rio das Ostras, no litoral norte do estado do Rio de Janeiro (Figura 1). O clima regional é o tropical úmido, e as temperaturas médias anuais variam entre 18°C e 27°C. A umidade relativa do ar média é de 83%, e a pluviosidade média anual é de 1.300 mm, sendo bem definidas as estações seca (abril a setembro) e chuvosa (outubro a março)<sup>19</sup>. Esse corpo hídrico é responsável

<sup>19</sup> SANTOS, A. M. et al. Effects of the sand bar breaching on *Typha domingensis* (Pers.) in a tropical coastal lagoon. **Hydrobiologia**, v. 556, p. 61-68, 2006.

pela geração de diversos serviços ambientais, dentre eles as atividades de lazer, a prática de esportes aquáticos, a valorização imobiliária do seu entorno, o controle de inundações, a produção de pescado e a diluição de efluentes domésticos e industriais. Além disso, cabe destacar que, legalmente, ele é considerado uma área de interesse especial do estado do Rio de Janeiro, especialmente sob o ponto de vista turístico<sup>20</sup>.



**Figura 1 - Localização da área de estudo, com destaque para a Lagoa Imboassica, sua bacia hidrográfica, seus principais afluentes e a sua localização em relação ao estado do Rio de Janeiro**

Fonte: Elaborado pelos autores, a partir da Base Cartográfica Vetorial Contínua do Estado do Rio de Janeiro<sup>21</sup> na escala 1:25.000

A Lagoa Imboassica encontra-se separada do mar por uma barra arenosa (figura 2A) de aproximadamente 80 m de largura e 180 m de comprimento que, nas últimas décadas, tem sido eventualmente aberta por intervenção humana (figura 2B). A grande proximidade com o mar e a eventual mistura das suas águas com a água do mar, seja pela abertura da barra arenosa, seja por intrusões por essa barra ou pelo *spray* marinho, faz com que esse corpo hídrico apresente água predominantemente salobra (ver Resultados e Discussão). Tendo em vista as suas eventuais conexões com o oceano, apesar de ter sido tradicionalmente tratado como uma lagoa, esse corpo hídrico é conceitualmente uma laguna. Esse termo se refere a um corpo de águas rasas salobras ou salgadas situado em planícies costeiras, separado do oceano por uma barreira arenosa e conectado a ele ao menos intermitentemente por meio de canais restritos<sup>22,23,24,25</sup>.

<sup>20</sup> RIO DE JANEIRO (Estado). **Decreto Estadual n. 9760**, de 11 de março de 1987. Rio de Janeiro, 1987.

<sup>21</sup> IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Secretaria de Estado do Ambiente do Rio de Janeiro (SEA-RJ). **Base Cartográfica Vetorial Contínua do Estado do Rio de Janeiro**. [2017]. Escala 1:25.000. Disponível em: [ftp://geoftp.ibge.gov.br/cartas\\_e\\_mapas/bases\\_cartograficas\\_continuas/bc25/rj/versa02016/](ftp://geoftp.ibge.gov.br/cartas_e_mapas/bases_cartograficas_continuas/bc25/rj/versa02016/)

<sup>22</sup> PHLEGER, F. B. A review of some general features of coastal lagoons. In: Coastal lagoon research, past, present, and future. **UNESCO Technical Papers in Marine Science**, v. 33, p. 7-14, 1981.

<sup>23</sup> KJERFVE, B. Coastal lagoon processes. In: \_\_\_\_\_ (ed.). **Coastal lagoon processes**. Netherlands: Elsevier, 1994. p. 1-8.

<sup>24</sup> SUGUIO, K. **Dicionário de geologia sedimentar e áreas afins**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998, 1222 p.

<sup>25</sup> IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Vocabulário básico de recursos naturais e meio ambiente**. 2ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2004. 332 p.

Essa lagoa também pode ser conectada ao mar por meio da abertura de outra barra de areia, a barra do canal extravasor. Esse canal foi construído artificialmente e faz a conexão do Canal da Peleja com o mar (Figura 2A). Devido ao constante aporte de sedimento marinho, a desembocadura do canal extravasor é obstruída por uma barra arenosa, cuja abertura também pode ser adotada para reduzir o nível da água no corpo hídrico. Em 2011, um dique submerso (Figura 2C) foi construído próximo à desembocadura do Canal da Peleja na lagoa. Ele consiste em um pequeno barramento feito de concreto e atua como uma pequena barragem. Dessa forma, ele impede que todo o volume de água da lagoa seja escoado para o mar quando a barra do canal extravasor é aberta. Além disso, nessas ocasiões, a sua presença faz com que ocorra somente a saída de água da lagoa e não mais entrada de água do mar no ecossistema lântico.



**Figura 2 - Vista geral da Lagoa Imboassica. A:** Possíveis conexões (intermitentes) da lagoa com o mar, com destaque para a barra arenosa da lagoa, barra arenosa do canal extravasor (após abertura, em junho de 2012), Canal da Peleja, canal extravasor e dique submerso. **B:** Abertura da barra arenosa da lagoa (ao fundo) em novembro de 2016, evento que atraiu a atenção de um grande número de pessoas. **C:** Dique submerso após a abertura da barra do canal extravasor em dezembro de 2015. O dique impede que a maior parte da água da lagoa escoe para o mar (quando a barra do canal extravasor é aberta) e estabelece um nível mínimo necessário para não comprometer a biota aquática e assegurar espaço físico suficiente para receber ainda aporte de água da chuva

Fonte: Elaborado pelos autores

A bacia hidrográfica da Lagoa Imboassica possui aproximadamente 58 km<sup>2</sup> e situa-se em área de planície/baixada com relevo bastante uniforme e pontos mais elevados com altitude próxima a 180 metros<sup>26</sup>. Ela apresenta ocupações populacionais com hábito rural a montante da laguna, áreas industriais de grandes dimensões na região próxima à desembocadura do rio Imboassica e ocupação urbana intensa no entorno do ecossistema lêntico<sup>27</sup>. Essa ocupação teve início no final da década de 1970 e aumentou expressivamente a partir do final da década de 1990<sup>28</sup>, lançando no corpo hídrico grandes cargas de efluentes domésticos e industriais sem tratamento ou tratados de forma inadequada. Desde 2013, grande parte do esgoto doméstico que alcança a laguna é tratado pela Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Mutum em nível terciário, isto é, com a remoção dos nutrientes presentes no efluente.

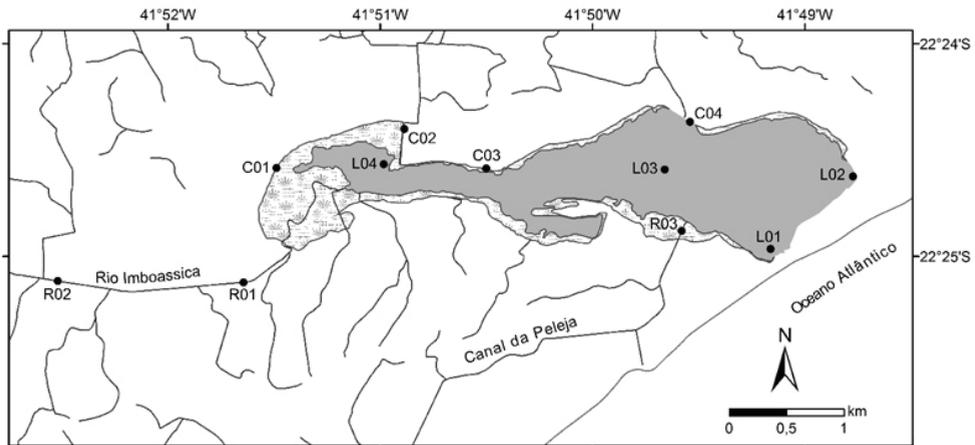
## Monitoramento das condições tróficas

A Lagoa Imboassica foi monitorada mensalmente de 1992 a 2009. Entre 2010 e 2012, as amostragens ocorreram em intervalos irregulares. A partir de 2013, a amostragem passou a ser bimestral e incluiu também rios e canais artificiais que desaguam na laguna. As estações amostrais (figura 3) representam três tipos de ambientes: “laguna” (LO1, LO2, LO3 e LO4), “rios” (RO1, RO2 e RO3) e “canais” (CO1, CO2, CO3 e CO4). O grupo “rios” é formado por estações amostrais localizadas nas desembocaduras dos dois maiores afluentes do ecossistema lêntico e recebem a maior parte do escoamento superficial da bacia hidrográfica. Dessa forma, esse grupo representa principalmente as fontes difusas de nutrientes. O grupo “canais”, por sua vez, representa as principais fontes pontuais de nutrientes para a Lagoa Imboassica. Durante o primeiro período, foram monitoradas quatro estações amostrais (LO1, LO2, LO3 e LO4), todas localizadas na laguna.

<sup>26</sup> BARRETO, G. S. Mapeamento ambiental da bacia hidrográfica da Lagoa Imboassica: subsídio para construção de planos de bacia. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, Campos dos Goytacazes/RJ, v.3, n.2, p. 125-144 jul./dez. 2009.

<sup>27</sup> BARRETO, G. S. Mapeamento ambiental da bacia hidrográfica da Lagoa Imboassica: subsídio para construção de planos de bacia, *op. cit.*

<sup>28</sup> BOZELLI et al. Interactive effects of environmental variability and human impacts on the long-term dynamics of an Amazonian floodplain lake and a South Atlantic coastal lagoon. **Limnologia**, v. 39, p. 306-313. 2009.



**Figura 3 - Localização das estações amostrais monitoradas nos três tipos de ambientes: “lagoa” (L01, L02, L03 e L04), “rios” (R01, R02 e R03) e “canais” (C01, C02, C03 e C04). Notar que alguns rios e canais (especialmente a oeste da lagoa, como o canal C01) encontram-se atualmente aterrados ou confinados a galerias subterrâneas**

Fonte: Elaborado pelos autores com base na Base Cartográfica Vetorial Contínua do Estado do Rio de Janeiro<sup>29</sup> na escala 1:25.000

Em cada estação amostral, a profundidade da coluna d’água foi mensurada (com o uso de um cabo graduado), a transparência da coluna d’água foi estimada (pela profundidade total do disco de Secchi) e a salinidade medida (utilizando-se um termocondutivímetro). Além disso, foram coletadas amostras a não mais do que 0,30 m de profundidade e levadas para o laboratório para que fossem mensuradas as concentrações de NT<sup>30</sup>, de PT<sup>31</sup> e de clorofila-*a*<sup>32</sup>.

## Variação no nível da água na lagoa

Em geral, o nível da água em um corpo hídrico é monitorado com base em medições feitas em uma régua limétrica localizada fixa em um ponto. No entanto, a Lagoa Imboassica não possuía tal régua até 2013. Dessa forma, no presente trabalho, o nível da água no corpo hídrico corresponde ao valor de profundidade máxima da lagoa. Esta, por sua vez, foi estimada para cada coleta a partir dos valores de profundidade medidos nas estações amostrais L01, L02, L03 e L04, cuja localização tem sido mantida exatamente a mesma ao longo de todo o período do monitoramento. A estação amostral

<sup>29</sup> IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Secretaria de Estado do Ambiente do Rio de Janeiro. SEA-RJ. **Base Cartográfica Vetorial Contínua do Estado do Rio de Janeiro**. *op. cit.*

<sup>30</sup> MACKERETH, F. J. H.; HERON, J.; TALLING, J. F. **Water analysis: some revised methods for limnologists**. Ambleside: Freshwater Biological Association, 1978. 117p.

<sup>31</sup> GOLTERMAN, H. L.; CLIMO, R. S.; OHSTAD, M. A. M. **Methods for physical and chemical analysis of freshwaters**. Washington, D.C.: I. B. P. Health Association, 1978.

<sup>32</sup> EATON, A. D. et al. (eds.). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21 ed. Washington, D.C.: APHA-AWWA-WEF American Public, 2005.

LO2 foi selecionada como referência para se estimar o nível da água por ser a estação amostral mais próxima à régua linimétrica e possuir o fundo menos irregular no seu entorno. Nas coletas em que LO2 esteve seca, o nível da água foi estimado a partir da profundidade medida em LO4. Quando essa também estava seca, utilizaram-se os valores medidos em LO3 para estimar a profundidade máxima.

Para identificar a relação numérica das profundidades medidas nas estações amostrais com a profundidade máxima do corpo hídrico, foi realizado um mapeamento batimétrico da laguna no dia 03 de dezembro de 2015, quando a profundidade da coluna d'água na régua linimétrica próxima a LO2 era de 1,20 m. Para isso, foi utilizada uma sonda Garmin-eccho 551c, com resolução de 0,10 m e um GPS Garmin Etrex 20x. A profundidade foi medida em intervalos de 50 metros em 40 transectos distribuídos pela laguna (sentido norte-sul), equidistantes 200 metros, totalizando aproximadamente 1000 pontos de medição. Essas informações foram transferidas para uma planilha digital e convertidas em um arquivo do tipo *shapefile*. Esse arquivo foi transformado em um arquivo *raster* com 25 metros de tamanho de *pixel* por meio de interpolação espacial por triangulação. O perímetro da Lagoa Imboassica e a delimitação dos bancos de macrófitas aquáticas foram definidos a partir da vetorização manual de uma composição colorida RGB 321 de uma cena do satélite *RapidEye*, compatível com a escala 1:10.000, obtida em 25 de junho de 2014. Todas essas análises foram desenvolvidas com o software QGIS®, versão 2.14.6. O volume do corpo hídrico foi posteriormente calculado com base no arquivo *raster*. Para isso, foi utilizado o pacote “r.lake” do software GRASS GIS® versão 7.0.4.

Tendo-se em vista a grande influência das aberturas artificiais de barra arenosa da laguna sobre o nível da água, foi realizada uma extensa busca por registros desses eventos ocorridos entre julho de 1992 e dezembro de 2016. Grande parte deles foi registrada ao longo do monitoramento feito no âmbito do projeto ECOLAGOAS. Além disso, a busca por esses registros foi feita também em artigos, teses, dissertações, assim como matérias de jornais sobre a Lagoa Imboassica. As aberturas artificiais da barra do canal extravasor foram aqui desconsideradas, pois a carência de registros desses eventos comprometeria tal inventário e subestimaria a frequência de sua ocorrência.

## Análise dos dados

Como indicativo do grau de eutrofização, foi estimado o IET, calculado com base nos valores das concentrações de fósforo total (PT) e de clorofila-*a* (CLa), segundo o método utilizado pela Companhia Estadual de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB)<sup>33</sup>. O IET do corpo hídrico corresponde à média aritmética do IET Fósforo (PT) e do IET Clorofila-*a* (CLa), calculados segundo as equações 1 e 2<sup>34</sup>:

<sup>33</sup> CETESB. COMPANHIA ESTADUAL DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Relatório de Qualidade das Águas Superficiais do Estado de São Paulo**. Apêndice C: Índices de Qualidade das Águas, 2015.

<sup>34</sup> LAMPARELLI, M. C. **Grau de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo**: avaliação dos métodos de monitoramento, *op. cit.*

$$IET(CLa) = 10 \times \left\{ 6 - \left[ 0,92 - \left( 0,34 \times \frac{\ln(CLa)}{\ln(2)} \right) \right] \right\} \quad (1)$$

$$IET(PT) = 10 \times \left\{ 6 - \left[ 1,77 - \left( 0,42 \times \frac{\ln(PT)}{\ln(2)} \right) \right] \right\} \quad (2)$$

onde:

CLa: concentração de clorofila-*a* medida à superfície da água, em  $\mu\text{g.L}^{-1}$ ;

PT: concentração de P total medida à superfície da água, em  $\mu\text{g.L}^{-1}$ ;

No presente trabalho, o IET foi calculado primeiramente para cada estação amostral da laguna (LO1, LO2, LO3 e LO4). Feito isso, calculou-se a média dos valores das quatro estações amostrais para se determinar o valor do IET da laguna correspondente a cada coleta. A partir do valor do IET, o corpo hídrico foi classificado em um dos seis estados tróficos: ultraoligotrófico ( $IET < 47$ ), oligotrófico ( $47 < IET < 52$ ), mesotrófico ( $52 < IET < 59$ ), eutrófico ( $59 < IET < 63$ ), supereutrófico ( $63 < IET < 67$ ) e hipereutrófico ( $IET > 67$ ).

A razão Secchi/Profundidade foi calculada para cada estação amostral do ambiente “laguna”, e a média aritmética das quatro estações amostrais foi utilizada para representar o corpo hídrico. As coletas com transparência total (profundidade do disco de Secchi igual à profundidade da coluna d’água) foram desconsideradas. Em geral, os valores de transparência total (Secchi/Profundidade = 1,0) foram observados quando a laguna apresentava nível de água muito baixo. Se o nível da água fosse mais alto, provavelmente a transparência não seria total, ou seja, a consideração desses valores superestimaria a transparência da coluna d’água.

Os valores de  $r_{(Pearson)}$  entre a concentração de nutrientes (PT e NT) e a profundidade máxima foram calculados para avaliar a dinâmica dessas variáveis em relação à variação no nível da água na laguna e, indiretamente, em relação às aberturas artificiais de barra. As correlações foram calculadas para o período entre julho de 1992 e dezembro de 2009 e também para todo o período amostral (1992-2016). Essa divisão foi feita pelo fato de, a partir da construção do dique submerso em 2011, a Lagoa Imboassica ter apresentado pouca variação no nível da água. Adicionalmente, foi calculada a correlação linear entre NT e salinidade para todo período amostrado. Os teores de nutrientes foram transformados para  $\mu\text{mol.L}^{-1}$ , e referem-se aos valores médios das estações LO1, LO2, LO3 e LO4. Nas coletas em que uma ou mais estação amostral esteve seca, foi considerada a média das outras estações amostrais. Todos os valores foram transformados na forma  $\log_{10}^{(x+1)}$ .

## Resultados e discussão

Com base nos dados gerados por um monitoramento ambiental (realizado no âmbito do projeto ECOLAGOAS), este estudo caracterizou a variação em longo prazo nas condições tróficas de um corpo hídrico lêntico, raso e de água predominantemente salobra. Foi possível constatar que, durante o período analisado (1992 a 2016), houve uma intensificação do processo de eutrofização artificial da Lagoa Imboassica, especialmente a partir do final da década de 1990. Tal fato fica bastante evidente ao se observar a série de dados de NT, PT, CLa, IET e transparência da água. O monitoramento também possibilitou avaliar a amplitude de variação nas condições limnológicas da laguna. A longa série de dados de salinidade, por exemplo, permite afirmar com maior segurança que essa laguna é predominantemente salobra. A resolução CONAMA 357/05<sup>35</sup> estabelece que o corpo hídrico seja considerado de água doce se a sua salinidade for menor que 0,5; salobra se a salinidade variar de 0,5 e 30,0 e salino se for maior que 30,0. Das 240 amostragens feitas na laguna entre 1992 e 2016, a salinidade foi maior que 0,5 em 78,70% dos casos.

A Política Nacional de Recursos Hídricos<sup>36</sup> tem como um dos seus instrumentos o enquadramento dos corpos hídricos em classes, definidas com base nos usos preponderantes mais restritivos da água. Para a Lagoa Imboassica, esse enquadramento em classe de uso ainda não foi aprovado pelo Comitê de Bacias Hidrográficas dos rios Macaé e das Ostras. Nesses casos, até que o enquadramento seja aprovado, o corpo hídrico é considerado classe I se for salobro ou salino, ou classe II se for de águas doces<sup>37</sup>. Dessa forma, por ser um corpo hídrico salobro, ela deve ser considerada classe I até que o seu enquadramento seja aprovado. Por lei,<sup>38</sup> o valor máximo para a concentração de fósforo total na água de corpos hídricos enquadrados como classe I de águas salobras é 0,124 mg.L<sup>-1</sup>. A resolução CONAMA 357/05 não estabelece limites para a concentração de nitrogênio total, apenas para as suas frações inorgânicas: nitrato (0,40 mg.L<sup>-1</sup> N), nitrito (0,07 mg.L<sup>-1</sup> N) e nitrogênio amoniacal (0,40 mg.L<sup>-1</sup> N). Da mesma forma, essa resolução estabelece limites para CLa somente para ecossistemas de água doce.

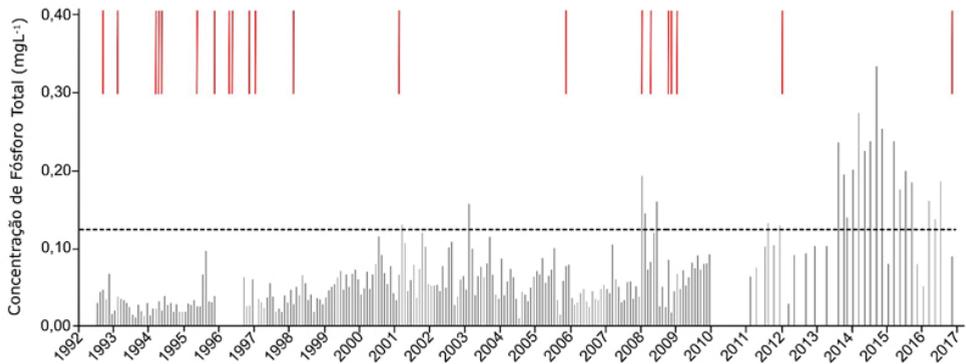
Em relação a PT, entre julho de 1992 e dezembro de 1999, o valor médio foi 0,04±0,02 mg.L<sup>-1</sup>. Nos anos seguintes, o PT aumentou, assim com a sua variabilidade intra-anual (figura 4). Entre janeiro de 2000 e dezembro de 2012, o PT apresentou valor médio de 0,07±0,03 mg.L<sup>-1</sup>. No período entre 2013 e 2016, foram observados os maiores valores, com média de 0,18±0,07 mg.L<sup>-1</sup>.

<sup>35</sup> BRASIL. **Resolução CONAMA no 357**, de 18 de março de 2005. Brasília, 2005.

<sup>36</sup> BRASIL. **Lei n. 9.433**, de 8 de janeiro de 1997. Brasília, 1997.

<sup>37</sup> BRASIL. **Resolução CONAMA n° 357**, *op. cit.*

<sup>38</sup> *Ibid.*

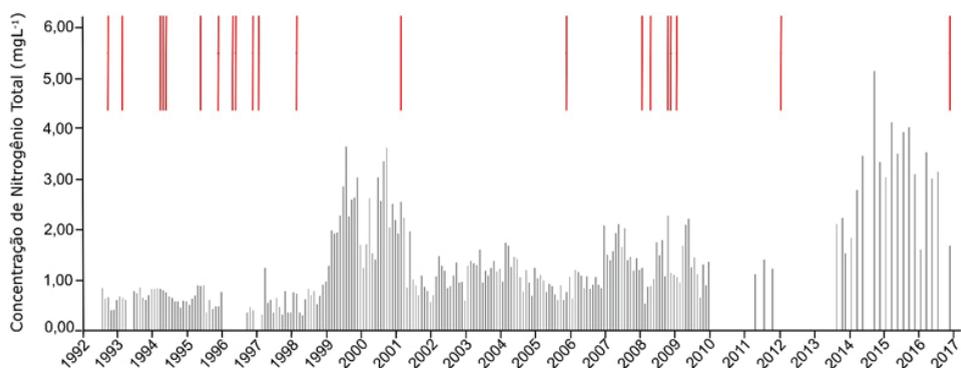


**Figura 4 - Variação temporal na concentração de fósforo total (PT) na coluna d'água da Lagoa Imboassica entre 1992 e 2016. Os valores correspondem à média aritmética dos valores medidos nas quatro estações amostrais na lagoa (LO1, LO2, LO3 e LO4).**

As barras vermelhas acima indicam a ocorrência de abertura artificial da barra arenosa da lagoa. A linha horizontal tracejada se refere ao limite estabelecido pela Resolução CONAMA 357/05 para a concentração de PT em corpos hídricos salobros de classe I.

Fonte: Elaborado pelos autores

A concentração de NT na lagoa aumentou consideravelmente a partir do final da década de 1990 (figura 5). No período de julho de 1992 a dezembro de 1998, NT apresentou valor médio de  $0,63 \pm 0,19$  mg.L<sup>-1</sup>. Entre janeiro de 1999 e março de 2001, foram observados valores maiores ( $2,32 \pm 0,66$  mg.L<sup>-1</sup>). Entre abril de 2001 e dezembro de 2012, NT apresentou valor médio de  $1,18 \pm 0,39$  mg.L<sup>-1</sup>. Apesar da diminuição, os valores de NT permaneceram em um patamar acima daquele anterior ao ano de 1999. Os valores mais altos de NT foram observados entre 2013 e 2016, com média de  $3,01 \pm 0,98$  mg.L<sup>-1</sup>.



**Figura 5 - Variação temporal na concentração de nitrogênio total (NT) na coluna d'água da Lagoa Imboassica entre 1992 e 2016. Os valores correspondem à média aritmética dos valores medidos nas quatro estações amostrais na lagoa (LO1, LO2, LO3 e LO4). As barras vermelhas acima indicam a ocorrência de abertura artificial da barra arenosa da lagoa**

Fonte: Elaborado pelos autores

As concentrações de NT e de PT aumentaram consideravelmente a partir do final da década de 1990. Na década anterior, em 1980, PT apresentava valor médio de  $0,020 \text{ mg.L}^{-1}$  e NT  $0,666 \text{ mg.L}^{-1}$ <sup>39</sup>. Em águas naturais, o PT não passa de poucas dezenas de microgramas por litro, enquanto NT tende a ser cerca de dez a vinte vezes maior<sup>40,41</sup>. Esse aumento observado em NT e PT acarretou na mudança de um estado de águas claras para um estado de águas turvas. A hipótese de “estados estáveis alternativos” afirma que os lagos rasos podem exibir pelo menos dois estados alternativos, um estado claro com dominância de plantas submersas e um estado turbido com dominância de fitoplâncton e material suspenso, sob condições similares. Em estudo feito com diversos lagos na América do Norte, América do Sul e Europa<sup>42</sup>, os autores observaram que a área coberta por macrófitas aquáticas submersas diminuiu drasticamente com PT entre  $0,05$  e  $0,20 \text{ mg.L}^{-1}$ , e essas plantas submersas tornam-se raras em lagos com NT acima de  $1,0$  a  $2,0 \text{ mg.L}^{-1}$ . Na Lagoa Imboassica, em maio e junho de 1999, observou-se a ausência dos estandes de vegetação submersa (*Charophytas*) e grandes florações de cianobactérias. Esse foi o último ano em que *Charophytas* foram observadas nesse corpo hídrico<sup>43</sup>. A partir de então, mesmo com a abertura da barra ocorrida em fevereiro de 2001 (e consequente exportação de biomassa fitoplanctônica), a laguna passou a funcionar irreversivelmente em estado de águas turvas dominado por fitoplâncton.

A mudança de águas claras para águas turvas se refletiu no aumento da biomassa fitoplanctônica e, conseqüentemente, na concentração de clorofila-*a* (figura 6) e também na diminuição da transparência da água (figura 7). CLa apresentou os valores mais baixos entre os anos de 1992 e 1995, com média de  $9,38 \pm 7,35 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$ . Entre janeiro de 1999 e março de 2001, CLa aumentou consideravelmente ( $75,99 \pm 42,41 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$ ). No período entre abril de 2001 e dezembro de 2012, foi observado o valor médio de  $21,88 \pm 18,10 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$  e, entre 2013 e 2016, ocorreram os maiores valores ( $122,10 \pm 39,20 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$ ). A variação na razão Secchi/Profundidade, assim como os dados de NT, possibilita identificar quatro fases distintas na Lagoa Imboassica: julho de 1992 a fevereiro de 1999 ( $0,69 \pm 0,16$ ), março de 1999 a fevereiro de 2001 ( $0,39 \pm 0,17$ ), março de 2001 a dezembro de 2008 ( $0,54 \pm 0,14$ ) e janeiro de 2009 a novembro de 2016 ( $0,23 \pm 0,08$ ).

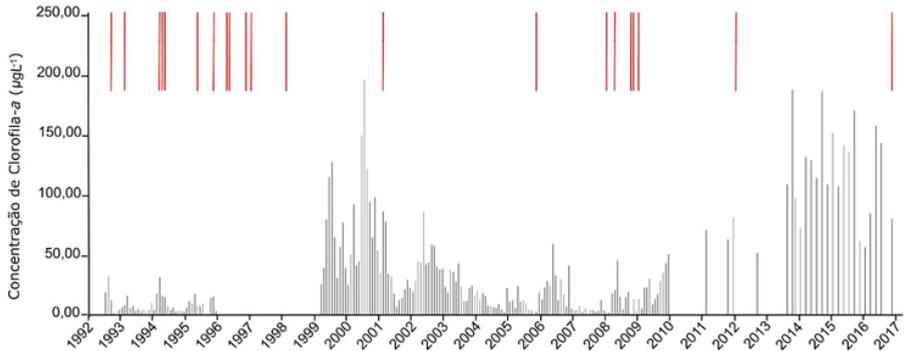
<sup>39</sup> RIO DE JANEIRO (Estado). **Relatório do diagnóstico das disponibilidades hídricas da Região Hidrográfica Macaé e das Ostras (RD-04) versão final revisada**. 2013. 420 p.

<sup>40</sup> MOSS, B. **Ecology of freshwaters**: Man and medium, past to future. London: Blackwell Science, 1998. 557 p.

<sup>41</sup> MOSS, B.; MADGWICK, J.; PHILLIPS, G. L. **A Guide to the Restoration of Nutrient-Enriched Shallow Lakes**. Norwich: Broads Authority and Environment Agency, 1996. 180 p.

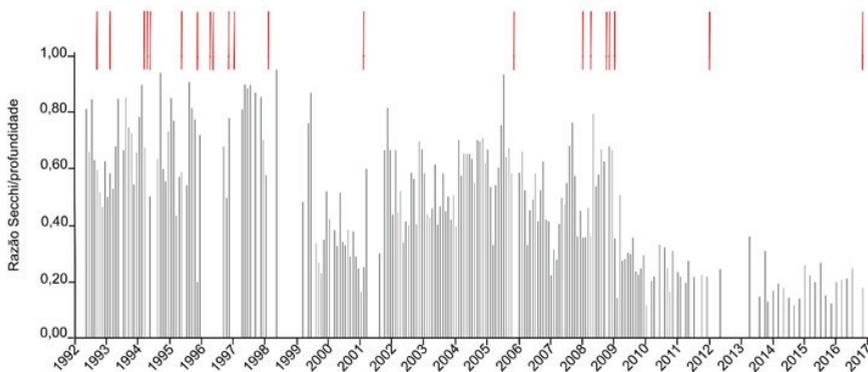
<sup>42</sup> KOSTEN, S. et al. Climate related differences in the dominance of submerged macrophytes in shallow lakes. **Global Change Biology**, v. 15, p. 2503–2517, 2009.

<sup>43</sup> PALMA-SILVA, C.; ALBERTONI, E. F.; ESTEVES, F. A. Clear water associated with biomass and nutrient variation during the growth of a charophyte stand, in a tropical coastal lagoon after a drawdown. **Hydrobiologia**, v.482, p. 79–87, 2002.



**Figura 6 - Variação temporal na concentração de clorofila-a (CLa) na coluna d'água da Lagoa Imboassica entre 1992 e 2016. Os valores correspondem à média aritmética dos valores medidos nas quatro estações amostrais na lagoa (LO1, LO2, LO3 e LO4). As barras vermelhas acima indicam a ocorrência de abertura artificial da barra arenosa da lagoa.**

Fonte: Elaborado pelos autores



**Figura 7 - Variação em longo prazo (1992 a 2016) na razão Secchi/Profundidade, estimada com base no valor médio da razão Secchi/profundidade das estações amostrais LO1, LO2, LO3 e LO4. Foram desconsideradas as coletas nas quais o valor da transparência profundidade do disco de Secchi se igualou à profundidade total da coluna d'água. As barras vermelhas acima indicam a ocorrência de abertura artificial da barra arenosa da lagoa.**

Fonte: Elaborado pelos autores

O P geralmente é escasso em ambientes aquáticos e frequentemente limita o crescimento das algas<sup>44</sup>. Dessa forma, a disponibilidade de P tem sido tradicionalmente utilizada para determinar o limiar para a mudança de estado estável alternativo<sup>45</sup>. Com a mudança de estado alternativo na lagoa, houve um grande aumento na concentração de nutrientes na coluna d'água. De dezembro de 1998 a julho de 1999, a concentração de fósforo total variou de 0,03 mg.L<sup>-1</sup> a 0,07 mg.L<sup>-1</sup>, e a concentração de nitrogênio total variou de 0,97 mg.L<sup>-1</sup> a 3,65 mg.L<sup>-1</sup>.

<sup>44</sup> SCHINDLER D. W. Evolution of phosphorus limitation in lakes. **Science**, v.195, p. 260-262, 1977.

<sup>45</sup> SCHEFFER, M. et al. Alternative equilibria in shallow lakes. **Trends in Ecology & Evolution**, v.8, p. 275-279, 1993.

A partir do ano 2000, foi observado um aumento na variabilidade intra-anual dos teores de PT, NT e CLa. O incremento na variância de variáveis limnológicas, especialmente fósforo, é um forte indicador de mudança do estado alternativo (i.e., do estado de águas claras para o estado turvo), que pode ocorrer mesmo muito tempo após tal incremento<sup>46</sup>. Muito embora estudos sobre incrementos na variância e mudanças de regime requeiram modelos apropriados, anomalias podem indicar mudanças iminentes no funcionamento de ecossistemas, e, a partir de 1999, foi claro o padrão de incremento de variabilidade dos dados, especialmente para o PT. A sua maior variabilidade está em parte relacionada à perda da vegetação submersa. Isso fez com que o sedimento se tornasse muito mais vulnerável à ressuspensão pela ação do vento. Consequentemente, os nutrientes depositados no sedimento passaram a ser lançados na coluna d'água com maior frequência. Além disso, em estudo feito na Lagoa Imboassica em 1997, observou-se que o aumento na concentração de P na coluna d'água induzia a um aumento na absorção desse nutriente pelas macrófitas aquáticas submersas, o que tende a reduzir a sua concentração no ambiente<sup>47</sup>.

Com base no IET, o grau de trofia da laguna variou de mesotrófico a hipereutrófico (figura 8), com predomínio do supereutrófico (37,66% das coletas), seguido de hipereutrófico (32,47 %), eutrófico (22,51 %) e mesotrófico (7,36 %). Assim como a concentração de nutrientes, o IET apresenta um considerável aumento no final da década de 1990. Os maiores valores foram observados entre 2013 e 2016, período no qual o corpo hídrico se manteve em estado hipereutrófico. No entanto, cabe destacar aqui que, até o final da década de 1990, a maior parte dos nutrientes e da produtividade primária da Lagoa Imboassica estava associada às macrófitas aquáticas submersas, tendo em vista que até então esse corpo hídrico encontrava-se em um estado de águas claras. Como o IET não leva em consideração a produtividade desse grupo de plantas e os nutrientes estocados nelas, o índice pode ter subestimado o grau de trofia da laguna naquele período.

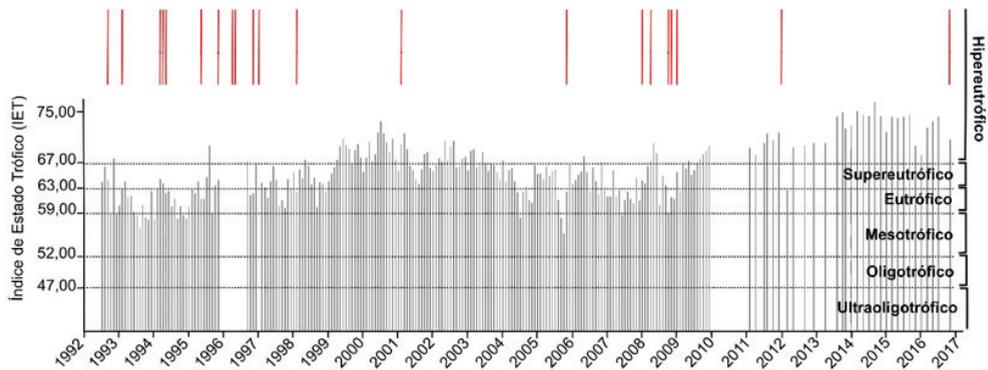
No mundo inteiro, o estado trófico dos ecossistemas aquáticos tem sido avaliado com base na utilização de diferentes índices. O *Trophic State Index* (TSI)<sup>48</sup> é um dos índices mais clássicos e se baseia nos valores de clorofila-*a*, concentração de PT e profundidade do Secchi para estimar indiretamente a biomassa de algas e indicar o grau de eutrofização dos ambientes aquáticos. No entanto, como ele foi desenvolvido para lagos de clima temperado, a sua aplicação em ecossistemas tropicais precisa ser avaliada com cuidado. Na região tropical, os ecossistemas aquáticos apresentam altas taxas de reciclagem de nutrientes, que são constantemente reutilizados pelos produtores primários<sup>49</sup>. Assim, ainda que um lago tropical apresente baixas concentrações de nutrientes, ele pode apresentar altas taxas de produtividade. Dessa forma, os valores-limite para clorofila-*a*, assim como as equações de correlação dos parâmetros que compõem o índice, precisam ser ajustados à realidade da região. Nesse sentido, embora o IET utilizado aqui tenha sido criado com base em reservatórios, a sua utilização no presente estudo se justifica pelo fato de ter sido criado com base em ecossistemas lênticos e do sudeste do Brasil.

<sup>46</sup> CARPENTER, S. R.; BROCK W. A. Rising variance: a leading indicator of ecological transition. **Ecology Letters**, v. 9, p. 311-318, 2006.

<sup>47</sup> PALMA-SILVA, C.; ALBERTONI, E. F.; ESTEVES, F. A. Clear water associated with biomass and nutrient variation during the growth of a charophyte stand, in a tropical coastal lagoon after a drawdown, *op. cit.*

<sup>48</sup> CARLSON, R. E. A trophic state index for lakes. **Limnology and Oceanography**, v. 22, n. 2, p. 361-369, 1977.

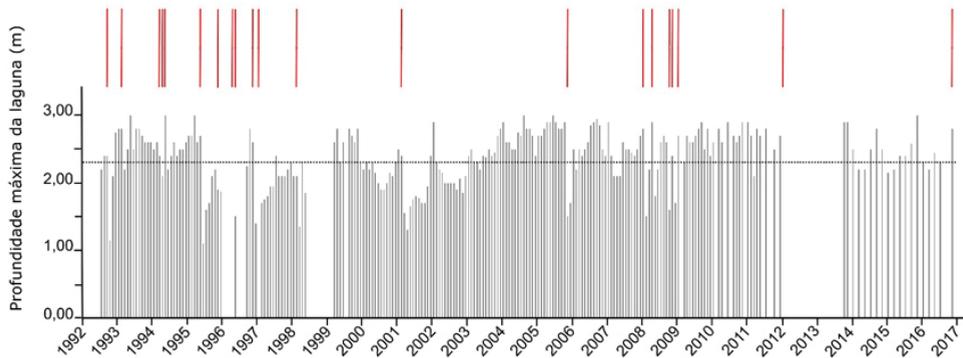
<sup>49</sup> ESTEVES, F. A. Considerações sobre a aplicação da tipologia de lagos temperados a lagos tropicais. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 2, p. 3-28, 1988.



**Figura 8 - Variação em longo prazo (1992 a 2016) no estado trófico da Lagoa Imboassica, estimado com base no Índice de Estado Trófico (IET). As linhas horizontais se referem aos limites entre os diferentes graus de trofia. As barras vermelhas acima indicam a ocorrência de abertura artificial da barra arenosa da lagoa.**

Fonte: Elaborado pelos autores

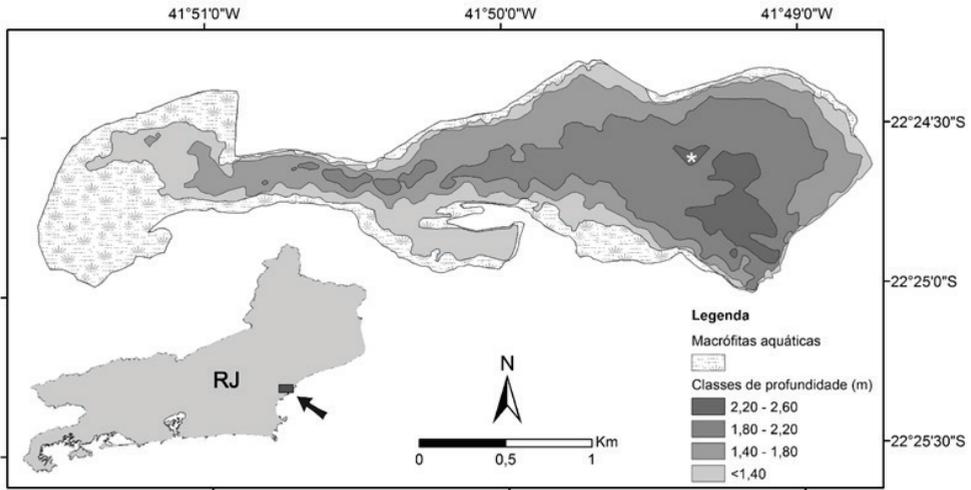
O nível da água na Lagoa Imboassica, representado aqui pela estimativa da sua profundidade máxima, apresentou grande variação entre 1992 e 2016 (figura 9) e variou de 1,10 m a 3,00 m. As maiores variações foram observadas após aberturas artificiais da barra arenosa da lagoa. Nesses eventos, a maior parte do volume de água do corpo hídrico é lançado ao mar, e este aporta água para a lagoa à medida que a maré sobe. Essa entrada de água de origem marinha aumenta a salinidade da lagoa. Com o fechamento natural da barra arenosa e aporte de água doce dos afluentes, o volume da lagoa aumenta, e a sua salinidade diminui. Isso fica evidenciado pela alta correlação negativa da profundidade máxima com a salinidade ( $r_{(Pearson)} = -0,709$ ;  $p < 0,0001$ ,  $n = 216$ ). A maior amplitude de variação no nível da água é observada no período anterior à construção do dique submerso (agosto de 2011). A presença desse barramento impede que a Lagoa Imboassica seja totalmente esvaziada quando a barra do canal extravasor é aberta e assegura a manutenção de um nível médio de água correspondente à profundidade máxima de 2,30 metros. É importante ressaltar aqui que a abertura artificial da barra arenosa da lagoa, em novembro de 2016, foi realizada um dia após a amostragem do monitoramento. Dessa forma, a sua influência sobre o nível da água não pode ser percebida no presente trabalho.



**Figura 9 - Variação em longo prazo (1992 a 2016) no nível da água da Lagoa Imboassica, com base na estimativa da profundidade máxima da laguna em cada coleta. A linha pontilhada se refere à profundidade máxima da laguna quando a água se encontra no nível do dique submerso, localizado no Canal da Peleja. As barras vermelhas acima indicam a ocorrência de abertura artificial da barra arenosa da laguna.**

Fonte: Elaborado pelos autores.

A variação no nível da água influencia fortemente nas características morfométricas dos corpos hídricos. Por isso, em lagos e lagoas rasos em clima tropical, com altas taxas de evaporação, é extremamente importante que o nível da água no momento da medição das profundidades seja levado em consideração. No mapeamento batimétrico realizado em dezembro de 2015 (figura 10), a Lagoa Imboassica apresentava profundidade máxima de 2,70 metros, e o nível na régua linimétrica era 1,20 m (0,40 m acima do nível do dique submerso). Com a água nesse nível, a laguna cobre uma área de aproximadamente 3,29 km<sup>2</sup>, o seu volume se aproxima a 4,8×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> e a sua profundidade média é de 1,45 m. O nível máximo já registrado na régua linimétrica foi de 1,50 m, o que corresponde à profundidade máxima de 3,0 m. Nessa situação, a laguna cobre uma área de 3,53 km<sup>2</sup>, o seu volume se iguala a 5,8×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> e a profundidade média é 1,65 m. Quando a barra do canal extravasor é aberta, o nível da água na laguna é regulado pelo dique submerso (0,80 m na régua linimétrica). Nesses momentos, a área coberta pela laguna é de aproximadamente 3,00 km<sup>2</sup>, com volume de 3,5×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, profundidade máxima de 2,30 m e profundidade média de 1,15 m.



**Figura 10 - Mapa batimétrico da Lagoa Imboassica, com destaque para a sua localização no estado do Rio de Janeiro. O asterisco indica a localização aproximada do ponto de maior profundidade na laguna, utilizado como base da estimativa do nível da água. O mapeamento batimétrico foi realizado no dia 03 de dezembro de 2015, quando o nível da água atingia 1,20 metros na régua linimétrica próximo à estação amostral LO2 (0,40 metros acima do nível do dique submerso no Canal da Peleja).**

Fonte: Elaborado pelos autores

No período entre julho de 1992 e dezembro de 2016, ocorreram 21 aberturas artificiais de barra arenosa da laguna (ANEXO 1). A abertura da barra da laguna em novembro de 2016 foi considerada no inventário, mas a sua influência foi desconsiderada pois ocorreu no dia seguinte ao monitoramento. A maior parte desses eventos ocorreu em períodos de muita precipitação pluviométrica, com o intuito de amenizar os impactos das inundações dos conjuntos habitacionais construídos nas áreas alagáveis no entorno da laguna e também colaborar para que o enchimento da laguna seja relativamente rápido. No entanto, em fevereiro de 2001, a barra arenosa foi aberta em um período seco, devido à detecção de cianotoxinas na água.

Ao se considerar toda a série histórica (1992 e 2016), observa-se uma correlação negativa entre NT e salinidade ( $r_{\text{Pearson}} = -0,369$ ;  $p < 0,0001$ ;  $n = 213$ ). Na Lagoa Imboassica, as aberturas da barra arenosa da laguna são a causa principal do aumento da salinidade, que diminui à medida que a barra é fechada e o corpo hídrico passa a receber aporte de água doce dos seus afluentes. Sendo assim, a salinidade pode ser vista como um indicador indireto da ocorrência de abertura da barra da laguna. Dessa forma, a correlação acima indica que, ao se considerar todo o período monitorado, o NT tende a ser menor no período após as aberturas. Tal resultado corrobora padrão já observado anteriormente<sup>50</sup> de exportação de nitrogênio após aberturas de barra.

<sup>50</sup> BOZELLI et al. Interactive effects of environmental variability and human impacts on the long-term dynamics of an Amazonian floodplain lake and a South Atlantic coastal lagoon, *op. cit.*

Por outro lado, PT apresenta um padrão inverso. Quanto menor o nível da água na laguna (os níveis mais baixos ocorreram geralmente após aberturas de barra), maior o valor de PT. Isso foi evidenciado pela relação negativa de PT com a profundidade máxima da laguna no período de 1992 a 2009 ( $r_{\text{(Pearson)}} = -0,298$ ;  $p < 0,0001$ ;  $n = 187$ ) e de 1992 a 2016 ( $r_{\text{(Pearson)}} = -0,139$ ;  $p < 0,04$ ;  $n = 211$ ). Essa relação mostra que os eventos de abertura de barra podem inclusive aumentar a concentração de nutrientes na coluna d'água. Isso decorre principalmente do aporte contínuo de esgoto doméstico sem tratamento adequado e do volume de água reduzido no ecossistema, o que diminui a capacidade de diluição dos poluentes. As correlações observadas entre PT e a profundidade máxima refletem não apenas o padrão de acúmulo/diluição, mas podem sugerir indiretamente a tendência de incremento de PT após aberturas de barra. Muito embora não tenha sido observada relação significativa entre fósforo e salinidade, a sua correlação negativa com a profundidade máxima pode indicar padrão de incremento após eventos de aberturas, em consonância com trabalhos anteriores<sup>51</sup>.

Tendo em vista o que foi exposto acima, a abertura artificial da barra arenosa da laguna mostra-se uma medida inapropriada, pois reduz apenas pontualmente o processo de eutrofização. A eficácia dessas intervenções não é observada em longo prazo. A concentração de nutrientes e o estado trófico da laguna apresentaram uma redução somente imediatamente após eventos de abertura artificial da barra. Isso pode ser observado em NT após os eventos de aberturas da barra ocorridos em 1994, em fevereiro de 2001 e em janeiro e outubro de 2008. No entanto, geralmente após um mês, a concentração de nutrientes apresentava valores iguais ou superiores àqueles anteriores ao evento. Em 50% dos eventos de aberturas da barra arenosa, o grau de trofia da laguna aumentou logo no primeiro mês subsequente, em 28% dos casos ele diminuiu e em 22% dos casos se manteve. No período entre setembro de 1992 e novembro de 1995, todos os eventos de abertura de barra levaram à diminuição ou manutenção do grau de trofia. No entanto, a partir de novembro de 1996, em todas as ocasiões a laguna passou para um estado mais eutrofizado, exceto em fevereiro de 2001 e em novembro de 2008.

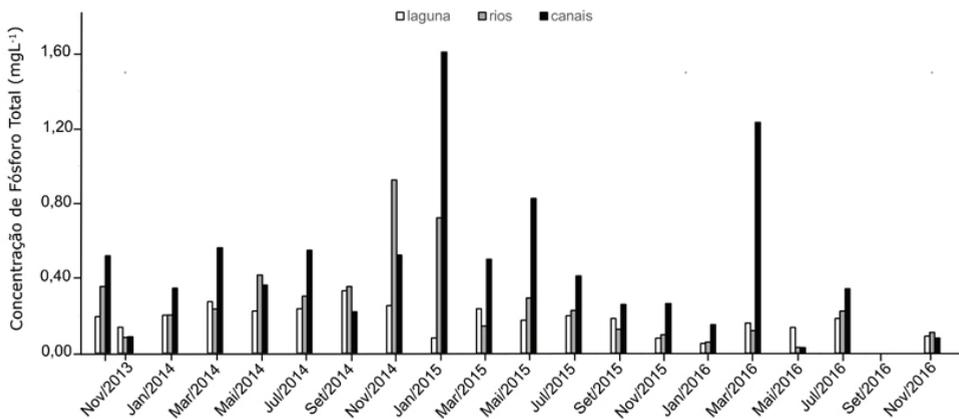
O potencial do aporte de esgoto em causar prejuízos aos ecossistemas é maior quanto menor for a capacidade de diluição do corpo hídrico. Dessa forma, as aberturas de barra tendem a reduzir o potencial de depuração da carga de matéria orgânica e nutrientes que são lançados com os efluentes na laguna. Com o despejo contínuo de nutrientes em suas águas, a Lagoa Imboassica tende a retornar rapidamente ao estado trófico anterior ao distúrbio provocado pela abertura de barra. Esse padrão também foi observado na Lagoa Grussaí, uma laguna costeira no norte do Estado do Rio de Janeiro. Esse ecossistema retornava às condições limnológicas (abióticas) anteriores à abertura artificial da barra em um período de apenas 10 a 20 dias<sup>52</sup>.

<sup>51</sup> BOZELLI et al. Interactive effects of environmental variability and human impacts on the long-term dynamics of an Amazonian floodplain lake and a South Atlantic coastal lagoon, *op. cit.*

<sup>52</sup> SUZUKI, M. S.; OVALLE, A. R. C.; PEREIRA, E. A. Effects of sand bar openings on some limnological variables in a hypertrophic tropical coastal lagoon, Brazil. **Hydrobiologia**, v. 368, p. 111-122, 1998.

Além dos efeitos sobre a concentração de nutrientes, as aberturas artificiais da barra arenosa podem causar diversos impactos na biota aquática. Elas favorecem a dragagem do fundo da laguna e a supressão da vegetação submersa, o que aumenta a sua taxa de decomposição e, conseqüentemente, o aporte de nutrientes para a coluna d'água<sup>53</sup>. Na Lagoa Imboassica, a variação na salinidade da água após a abertura artificial da barra arenosa impacta também os organismos zooplancônicos, que podem apresentar baixa resiliência a esse distúrbio caso a comunidade ali estabelecida seja tipicamente de água doce<sup>54</sup>. Além disso, essas intervenções alteram a composição da comunidade de peixes<sup>55</sup> e reduzem a biomassa de fitoplâncton<sup>56</sup>. Em relação à necessidade de eventos de abertura da barra da laguna para fins hidráulicos, com a construção do dique submerso, a abertura da barra do canal extravasor no período de chuvas já evitaria inundações nos bairros no entorno da laguna.

Os três tipos de ambientes aqui estudados (“laguna”, “rios” e “canais”) apresentaram padrão semelhante na variação temporal da concentração total de nutrientes na água. Os valores médios para concentração de nutrientes foram maiores no grupo “canais” (NT:  $5,53 \pm 3,58 \text{ mg.L}^{-1}$  e PT  $0,468 \pm 0,396 \text{ mg.L}^{-1}$ ) e no grupo “rios” (NT:  $3,05 \pm 1,55 \text{ mg.L}^{-1}$  e PT  $0,26 \pm 0,23 \text{ mg.L}^{-1}$ ). Nesses dois ambientes, os valores máximos ocorreram em novembro de 2014 e janeiro de 2015. O grupo “laguna” apresentou o menor valor médio para a concentração de fósforo total (Figura 11) e de nitrogênio total (Figura 12) no período estudado.



**Figura 11 - Variação nos valores médios de concentração de fósforo total nos três tipos de ambientes estudados: “laguna”, “rios” e “canais” no período entre setembro de 2013 e novembro de 2016**

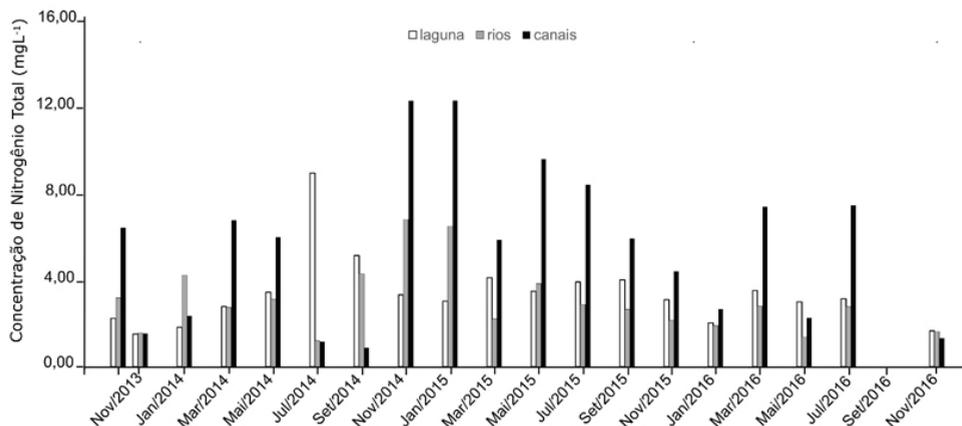
Fonte: Elaborado pelos autores

<sup>53</sup> SANTOS, A. M. et al. Effects of the sand bar breaching on *Typha domingensis* (Pers.) in a tropical coastal lagoon, *op. cit.*

<sup>54</sup> SANTANGELO, J. M. et al. Zooplankton responses to sandbar opening in a tropical eutrophic coastal lagoon. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v.71, n.3, p. 657-668, 2007.

<sup>55</sup> SÁNCHEZ-BOTERO, J. I. et al. Indicators of influence of salinity in the resistance and resilience of fish assemblage in a tropical coastal lagoon (Southeastern Brazil). **Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras**, v. 38, p. 52-68, 2009.

<sup>56</sup> MELO, S. **Fitoplâncton da Lagoa Imboassica (Macaé, RJ-Brasil): flora, estrutura de comunidade e variações espaciais e temporais.** Tese (Doutorado em Ecologia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.



**Figura 12 - Variação nos valores médios de concentração nitrogênio total nos três tipos de ambientes estudados: “laguna”, “rios” e “canais” no período entre setembro de 2013 e novembro de 2016**

Fonte: Elaborado pelos autores

Os maiores valores para NT foram observados nas estações amostrais do grupo “canais”, que aportam efluentes domésticos e industriais para a laguna. No período analisado, os canais Co1, Co2 e Co4 apresentaram padrão de variação temporal semelhante entre si, com os menores valores em julho e setembro de 2014 e valores máximos em novembro de 2014 e janeiro de 2015. O canal Co3, por outro lado, apresentou os menores valores para NT, com pouca amplitude de variação no período. Em relação ao valor médio no período, o maior foi observado no canal Co4 ( $8,49 \pm 7,48 \text{ mg.L}^{-1}$ ), seguido dos canais Co1 ( $6,43 \pm 4,94 \text{ mg.L}^{-1}$ ), Co2 ( $4,31 \pm 3,09 \text{ mg.L}^{-1}$ ) e Co3 ( $2,90 \pm 2,48 \text{ mg.L}^{-1}$ ).

Em relação a PT, os maiores valores foram observados nos canais Co1 e Co4, especialmente em janeiro de 2015. Os canais Co2 e Co3 apresentaram os menores valores na maior parte das coletas e as menores amplitudes de variação no período. Em relação ao valor médio no período, o maior foi observado no canal Co1 ( $0,99 \pm 1,19 \text{ mg.L}^{-1}$ ), seguido pelos canais Co4 ( $0,54 \pm 0,58 \text{ mg.L}^{-1}$ ), Co3 ( $0,22 \pm 0,29 \text{ mg.L}^{-1}$ ) e Co2 ( $0,12 \pm 0,09 \text{ mg.L}^{-1}$ ).

No período entre 2013 e 2016, os canais apresentaram concentrações de N e P maiores do que as dos rios. Isso sugere que o N e o P na Lagoa Imboassica são provenientes principalmente de fontes pontuais, como lançamento de efluentes domésticos e industriais nos canais. Ainda no início da década de 1990, estimava-se que a Lagoa Imboassica já recebia diariamente cerca de 7 kg de P e 70 kg de N somente de um dos canais artificiais que nela desaguam<sup>57</sup>.

A ETE Mutum entrou em operação no ano de 2013 e, desde então, trata o efluente doméstico a nível terciário, isto é, com remoção dos nutrientes. Ainda assim, os maiores valores de NT e PT na laguna foram observados recentemente, entre 2013 e 2016. Nesse período, esse ecossistema também apresentou o seu maior grau de trofia. Apesar de a ETE estar em funcionamento, nem todos os domicílios no entorno do corpo hídrico

<sup>57</sup> FERREIRA, C. L. Redução das concentrações de nitrogênio e fósforo dos efluentes lançados na lagoa Imboassica, através de uma região colonizada por macrófitas aquáticas. In: ESTEVES, F. A. (ed.). **Ecologia das lagoas costeiras do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba e do Município de Macaé (RJ)**. Macaé: NUPEM. UFRJ, 1998. p. 375-390.

encontram-se adequadamente conectados à rede de esgoto. Dessa forma, ainda há efluentes sem o devido tratamento sendo aportados para a Lagoa Imboassica, como sugerem os elevados valores de NT e PT medidos nos canais. Outra fonte de nutrientes para a laguna é o próprio aporte interno do nutriente acumulado no sedimento (*internal loading*). Essa fertilização interna do próprio ecossistema é uma condição que pode dificultar a melhoria das condições ambientais da laguna, mesmo que haja o tratamento adequado de todo o efluente lançado no sistema. O processo de eutrofização artificial não é regulado por apenas um fator, mas sim por diferentes fatores que interagem entre si. Na Lagoa Imboassica, o aumento no aporte de nutrientes ao longo dos anos e as aberturas artificiais da barra arenosa têm atuado como estressores crônicos e agudos que, sinergicamente, possuem, por exemplo, um efeito negativo mais forte sobre a riqueza de espécies de invertebrados bentônicos e de zooplâncton<sup>58</sup>.

Uma alternativa bastante promissora para a redução dos efeitos da eutrofização artificial e, conseqüentemente, para a recuperação da Lagoa Imboassica é a remoção do excesso de nutrientes acumulados por meio do manejo das macrófitas aquáticas. Essas plantas absorvem grande parte dos nutrientes presentes na coluna d'água e no sedimento e incorporam-no em sua biomassa. Em estudo feito na década de 1990, a existência de um banco de macrófitas aquáticas nessa laguna (próximo à estação amostral LO2) foi capaz de reduzir NT e fósforo na água em 93,8% e 97,1%, respectivamente, e a densidade de coliformes fecais em mais de 99,0%<sup>59</sup>. Além disso, *Typha domingensis*, uma das espécies de macrófitas mais comuns atualmente na Lagoa Imboassica, apresenta uma das maiores capacidades de estocagem de nutrientes<sup>60</sup>. Embora essa vegetação aquática remova grande parte do nutriente disponível no ecossistema e o estoque sob a forma de biomassa vegetal, se a vegetação não for removida periodicamente, com a sua decomposição o nutriente retorna à coluna d'água.

O presente estudo mostrou que o monitoramento ambiental em longo prazo é uma importante ferramenta para o diagnóstico e o acompanhamento das mudanças ocorridas em um ecossistema. A observação cuidadosa e estruturada é fundamental para a ciência que embasa tomadas de decisão por gestores públicos. Além disso, informações monitoradas em longo prazo são raras e extremamente valiosas, e os seus custos são muito pequenos quando comparados ao valor dos recursos naturais protegidos e às políticas que podem ser subsidiadas<sup>61</sup>.

## Conclusão

O monitoramento ambiental de longo prazo possibilita um melhor entendimento de fenômenos pontuais, sejam naturais ou antrópicos, e pode subsidiar o desenvolvimento de propostas de gestão mais adequadas para o ecossistema em questão. Este trabalho mostrou que o monitoramento foi muito importante para compreender a dinâmica do processo de eutrofização artificial da Lagoa Imboassica e investigar a influência em longo prazo de intervenções pontuais como as aberturas artificiais da barra arenosa.

<sup>58</sup> BOZELLI et al. Interactive effects of environmental variability and human impacts on the long-term dynamics of an Amazonian floodplain lake and a South Atlantic coastal lagoon, *op. cit.*

<sup>59</sup> FERREIRA, C. L. Redução das concentrações de nitrogênio e fósforo dos efluentes lançados na lagoa Imboassica, através de uma região colonizada por macrófitas aquáticas. In: ESTEVES, F. A. (ed.). **Ecologia das lagoas costeiras do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba e do Município de Macaé (RJ)**, *op. cit.*

<sup>60</sup> *Ibid.*

<sup>61</sup> LOVETT, G. M. et al. Who needs environmental monitoring? **Frontiers in Ecology and the Environment**, *op. cit.*

O processo de eutrofização artificial da Lagoa Imboassica se intensificou ao longo do período estudado, especialmente a partir do final da década de 1990. Atualmente, esse ecossistema apresenta características predominantes de hipereutrofia, com altas concentrações de nutrientes, especialmente de fósforo. Apesar de, desde 2013, grande parte do efluente doméstico que chega à Lagoa Imboassica vir sendo tratado, ainda se observam elevadas concentrações de nutrientes, especialmente nos canais artificiais que desembocam na laguna.

A abertura artificial da barra arenosa é uma medida ineficaz frente às conseqüências do processo de eutrofização artificial desse corpo hídrico, pois pode reduzir somente pontualmente a quantidade de nutrientes. Além disso, essa medida pode também favorecer o aumento da concentração de nutrientes na coluna d'água em decorrência do aporte concentrado de efluentes *in natura* ainda existentes, dada a redução no volume de água no ecossistema.

Ainda que parte do excesso de nutrientes presentes na coluna d'água seja removida com as aberturas artificiais da barra arenosa, essa medida por si só não assegura a recuperação do ecossistema. Isso depende também da remoção do excesso de nutrientes já estocados no sedimento da laguna. Nesse sentido, o manejo de macrófitas aquáticas mostra-se como uma alternativa promissora para a recuperação desse ecossistema de grande importância para a região.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a todos os pesquisadores, técnicos e alunos que participaram do projeto ECOLAGOAS e contribuíram para o monitoramento ambiental. Agradecem também a João Marcelo Silva de Souza pelo suporte em campo nas coletas e também no mapeamento batimétrico da Lagoa Imboassica. Os autores são gratos também a Kaná Manhães e a Thais Steigleder pelas fotografias gentilmente cedidas e a Anderson Gripp e Matias do Nascimento Ritter pelas sugestões de melhoria dadas às versões iniciais do texto.

## Anexo

Dia	Mês	Ano	Fonte
30	setembro	1992	Branco <i>et al.</i> (2007) <sup>62</sup>
03	março	1993	Branco <i>et al.</i> (2007) <sup>62</sup>
16	março	1994	Branco <i>et al.</i> (2007) <sup>62</sup>

**Quadro 1. Registro das aberturas artificiais da barra arenosa da laguna ocorridas no período entre julho de 1992 e dezembro de 2016 na Lagoa Imboassica. Os registros encontrados nas diferentes fontes bibliográficas listadas foram confirmados com base nas cadernetas de campo do projeto ECOLAGOAS. (continua)**

<sup>62</sup> BRANCO, CWC; KOZLOWSKY-SUZUKI, B.; ESTEVES, FA. Environmental changes and zooplankton temporal and spatial variation in a disturbed brazilian coastal lagoon. *Brazilian Journal of Biology*, v. 67, n. 2, p.251-262, 2007.

<sup>63</sup> ERAZO, J. A. G. **Estudo de modelagem sobre a abertura da barra da Lagoa Imboassica - RJ.** 2003. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

Dia	Mês	Ano	Fonte
26	abril	1994	Erazo (2003) <sup>63</sup>
31	maio	1994	Branco et al. (2007) <sup>62</sup>
29	maio	1995	Branco et al. (2007) <sup>62</sup>
02	novembro	1995	Albertoni et al. (2002) <sup>64</sup>
??	abril	1996	Albertoni et al. (2002) <sup>64</sup>
17	maio	1996	Erazo (2003) <sup>63</sup>
16	novembro	1996	Melo et al. (2007) <sup>65</sup>
06	janeiro	1997	Melo et al. (2007) <sup>65</sup>
16	fevereiro	1998	Melo et al. (2007) <sup>65</sup>
08	fevereiro	2001	Bozelli et al. (2009) <sup>66</sup>
09	novembro	2005	Carvalho (2005) <sup>67</sup>
08	janeiro	2008	Barboza (2008) <sup>68</sup>
16	abril	2008	Câmara (2010) <sup>69</sup>
02	outubro	2008	monitoramento ECOLAGOAS
18	novembro	2008	Câmara (2010) <sup>69</sup>
15	janeiro	2009	Câmara (2010) <sup>69</sup>
04	janeiro	2012	Campolina (2012) <sup>70</sup>
17	novembro	2016	Fontes (2016) <sup>71</sup>

**Quadro 1. Registro das aberturas artificiais da barra arenosa da laguna ocorridas no período entre julho de 1992 e dezembro de 2016 na Lagoa Imboassica. Os registros encontrados nas diferentes fontes bibliográficas listadas foram confirmados com base nas cadernetas de campo do projeto ECOLAGOAS. (conclusão)**

<sup>64</sup> ALBERTONI, E.F.; PALMA-SILVA, C.; ESTEVES, F.A. Distribution and growth in adults of *Macrobrachium acanthurus* Wiegmann, (Decapoda, Palaemonidae) in a tropical coastal lagoon, Brazil. *Revista Brasileira de Zoologia*, v. 19, n. 2, p.61-70, dez. 2002.

<sup>65</sup> MELO, S.; BOZELLI, R.L.; ESTEVES, F.A. Temporal and spatial fluctuations of phytoplankton in a tropical coastal lagoon, southeast Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, v. 67, n. 3, p.475-483, 2007.

<sup>66</sup> BOZELLI et al. Interactive effects of environmental variability and human impacts on the long-term dynamics of an Amazonian floodplain lake and a South Atlantic coastal lagoon, *op. cit.*

<sup>67</sup> CARVALHO, M. **Macaenses festejam abertura da barra da lagoa**. 2005. Disponível em: <http://www.macaes.rj.gov.br/noticias/leitura/noticia/macaenses-festejam-abertura-da-barra-da-lagoa>. Acesso em: 10 jan. 2017.

<sup>68</sup> BARBOZA, L. **Abertura da barra ajuda a renovar a vida na Lagoa**. 2008. Disponível em: <http://www.macaes.rj.gov.br/noticias/leitura/noticia/abertura-da-barra-ajuda-a-renovar-a-vida-na-lagoa>. Acesso em: 10 jan. 2017.

<sup>69</sup> CAMARA, E.M. **Gradientes ambientais e a ictiofauna litorânea de ecossistemas costeiros: os efeitos de aberturas da barra arenosa de duas lagoas costeiras do sudeste brasileiro, RJ**. 2010. 100 p. Dissertação (Mestrado em Ecologia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

<sup>70</sup> CAMPOLINA, T. **Barra da Lagoa de Imboassica é aberta**. 2012. Disponível em: <http://www.macaes.rj.gov.br/noticias/leitura/noticia/barra-da-lagoa-de-imboassica-e-aberta>. Acesso em: 10 jan. 2017.

<sup>71</sup> FONTES, M. **Prefeitura realiza a abertura da barra da Lagoa**. 2016. Disponível em: <http://www.odebateon.com.br/site/noticia/detalhe/37494/prefeitura-realiza-a-abertura-da-barra-da-lagoa>. Acesso em: 10 jan. 2017.