

A QUALIDADE DA ÁGUA E AS MORTANDADES DE PEIXES NA LAGUNA DE ARARUAMA

Julio Cesar Wasserman (UFF) • Ângelo César Carvalho (UFF) • Kaylanne Montenegro da Silva (FIOCRUZ)
Murilo de Carvalho Vicente (UFF) • Teresa Cristina Soares de Mello Guimarães (UFF)

Introdução

O objetivo geral do presente documento é apresentar uma revisão sobre os processos físicos, químicos e biológicos que podem provocar modificação na qualidade da água, levando a mortandades de peixes em ambientes costeiros, e, particularmente, sobre os processos que, segundo a literatura, podem ocorrer na laguna de Araruama. Em se tratando de ambiente hipersalino, a laguna de Araruama tem características específicas distintas de outros tipos de ambientes. Esse tema também merece ser tocado ao longo do presente documento. Finalmente, será feita uma discussão sobre o estado da arte do conhecimento científico sobre a laguna de Araruama. Esse conhecimento é fruto de estudos realizados por diversos grupos de pesquisa das Universidades e dos Institutos de Pesquisa da região, que servem à compreensão do modo de funcionamento do sistema no passado e permitem o entendimento dos processos que podem ter levado a mortandades.

As mortandades de peixes em ambientes aquáticos naturais

Todos os ambientes aquáticos estão sujeitos, por processos diversos, à ocorrência de mortandades de peixes, também conhecidas como mortandades ou mortalidades em massa. Tais mortandades estão associadas a modificações nas características físicas, químicas e biológicas da água, as quais vão tornar a vida dos peixes inviável, durante períodos de tempo variáveis. Não é possível que ocorra uma mortandade de peixes em um sistema que tenha suas águas impróprias à vida; nesses casos, não há peixes, e, assim, eles não podem morrer. Em uma mortandade de peixes estudada no ano de 1996^{1,2}, na laguna de Piratininga, Niterói, a quantidade de peixes mortos foi estimada

¹ CUNHA, L. C.; WASSERMAN, J. C. Relationship between nutrients and macroalgal biomass in a Brazilian Coastal Lagoon: The impact of a lock construction. **Chemistry and Ecology**, v. 19, n. 4, p. 283-298, 2003.

² WASSERMAN, J. C. *et al.* The impact of a canal lock upon the water balance and the trophic state of Piratininga Lagoon, State of Rio de Janeiro, Brazil. In: KNOPPERS, B. A.; BIDONE, E. D. *et al.* (ed.). **Environmental Geochemistry of Coastal Lagoon Systems, Rio de Janeiro, Brazil**. Niterói: EDUFF, 1999. p.161-169. (Série Geoquímica Ambiental, 6).

em torno de 300 toneladas. Uma mortandade de tal dimensão só foi possível porque uma maré de sizígia excepcional promoveu a entrada de grandes cardumes de variadas espécies no sistema. Por uma lamentável coincidência, um forte vento Sudoeste, em um período em que as algas da laguna tinham morrido, promoveu o revolvimento do fundo e a emissão de gás sulfídrico para a coluna d'água, gerando forte anoxia. Como a maré de sizígia tinha passado, os peixes não puderam retornar a zonas de maior concentração de oxigênio e acabaram morrendo por asfixia.

O fenômeno da anoxia (ou hipoxia), causado pelo revolvimento de um sedimento de fundo, é um fenômeno comumente observado e considerado pela maioria dos pesquisadores como sendo natural dos ambientes de baixa hidrodinâmica. Em alguns documentos históricos publicados nos anos 50, nas Memórias do Instituto Oswaldo Cruz, vários autores discutem as mortandades de peixes associadas a um forte odor desagradável^{3,4,5}, sendo que Oliveira, Nascimento *et al.*⁶ mencionam:

...antes do século XX... Sucediã à lagoa, muitas vêzes, horríveis mortandades de peixes, e secagem dos limos nas margens que exalavam cheiro pútrido, do mesmo modo que também hoje acontece às lagoas naturais, ainda não urbanizadas. Algumas mortandades eram atribuídas a variações bruscas de salinidade: Rodrigo de Freitas era de água salgada, pouco depois de um temporal era de água doce, ou outras vêzes, mista, salobra. Numerosos foram os trabalhos, queixas e desesperos sem fim, referentes aos transtornos causados por esta laguna.

A percepção (na época pouco científica) de que as mortandades seriam atribuídas à salinidade também era consistente com o fato de que a água do mar é rica em sulfatos, que em ambientes anóxicos (ou redutores) se convertem em sulfetos precipitados nos sedimentos. As mudanças bruscas seriam associadas a fortes chuvas que normalmente vinham acompanhadas de rajadas de vento que remobilizavam o fundo, liberando gás sulfídrico (o famoso cheiro de ovo podre, ou, como citado por Lejeune de Oliveira, “cheiro pútrido”).

A anoxia (ou hipoxia) pode provocar mortandades de peixes muito intensas, como a relatada na baía de Coliumo, na costa Pacífica do Chile⁷. Segundo os autores, a anoxia teria ocorrido por causa de uma ressurgência de águas pouco oxigenadas de oceano, intermediárias, que teriam sufocado os peixes. Não obstante, tem-se demonstrado que as anoxias não podem ser consideradas como únicas responsáveis pelas mortandades, e algum outro fator pode ter papel importante. McInnes e Quigg⁸ estudaram mortandades de peixes anuais na região da baía de Galvestone (Texas), onde a anoxia (ou hipoxia) ocorre anualmente, contudo, nos dois anos estudados (verão de 2005 e verão de 2006),

³ OLIVEIRA, L. *et al.* Observações hidrobiológicas e mortandade de peixes na Lagoa Rodrigo de Freitas. **Memórias do Instituto Oswaldo Cruz**, v. 55, p. 211-271, 1957. ISSN 0074-0276.

⁴ OLIVEIRA, L. D. Sobre a lei da concentração das lagunas e sua aplicação no caso da Lagôa Rodrigo de Freitas. **Memórias do Instituto Oswaldo Cruz**, v. 53, p. 263-276, 1955. ISSN 0074-0276.

⁵ ARAGÃO, H. D. B. *et al.* Relatório sobre a situação da Lagôa Rodrigo de Freitas sob o ponto de vista biológico. **Memórias do Instituto Oswaldo Cruz**, v. 34, p. 457-463, 1939. ISSN 0074-0276.

⁶ OLIVEIRA, L. *et al.* Observações hidrobiológicas e mortandade de peixes na Lagoa Rodrigo de Freitas. **Memórias do Instituto Oswaldo Cruz**, *op. cit.*

⁷ HERNANDEZ-MIRANDA, E. *et al.* A major fish stranding caused by a natural hypoxic event in a shallow bay of the eastern South Pacific Ocean. **Journal of Fish Biology**, v. 76, n. 7, p. 1543-1564, May 2010.

⁸ MCINNES, A. S.; QUIGG, A. Near-Annual Fish Kills in Small Embayments: Casual vs. Causal Factors. **Journal of Coastal Research**, v. 26, n. 5, p. 957-966, Sep 2010. ISSN 0749-0208.

observou-se uma forte mortalidade no primeiro ano e ausência de mortalidade no segundo ano (ainda que a hipoxia tenha ocorrido nos dois anos). Os autores atribuem a mortalidade do verão de 2005 à ocorrência simultânea de uma floração algal, expressa pelas concentrações de clorofila e feopigmentos, concluindo que a combinação dos dois fatores (anoxia e floração) é necessária para a ocorrência do fenômeno.

Durante um extenso período, Jean Carmouze (cooperante do Institut de Recherche pour le Développement, no Departamento de Geoquímica da Universidade Federal Fluminense, Niterói) estudou os processos químicos e biológicos ligados à ocorrência de mortandades de peixes em lagunas costeiras da Região dos Lagos, mostrando a sua grande complexidade. Em estudo de vários anos, Azevedo e Carmouze⁹ averiguaram a ocorrência de uma mortandade de peixes logo após uma floração da cianofíceia *Synechocystis aquatilis* f. *salina*, a qual foi comprovadamente responsável pela produção de substâncias tóxicas para ratos em laboratório. É interessante notar que a mortandade afetou preferencialmente a espécie *Brevoortia tyrannus*, também conhecida como savelha na região, a mesma espécie que tem constantemente morrido em eventos recentes na laguna de Araruama e em outros ambientes costeiros do estado do Rio de Janeiro. É meritório de nota, ainda, o fato de que, embora a toxicidade da microalga cianofíceia tenha sido comprovada pelos estudos com ratos, a causa da morte dos peixes, uma hemorragia, não foi observada nos roedores. Os autores concluem sobre a necessidade de estudos mais aprofundados para entender os processos que levaram à mortandade dos peixes daquela laguna. O Professor Jean Carmouze retornou à França, mas não conseguiu desvendar o processo que, infelizmente, não voltou a ser estudado.

São necessárias modificações nas condições físico-químicas do sistema para explicar o que Carmouze e Knoppers (juntamente com muitos outros) chamaram de metabolismo das lagunas costeiras. O metabolismo das lagunas é controlado pelos processos de produção primária (a partir do CO₂) e pela mineralização (decomposição do carbono orgânico, respiração) da matéria orgânica. Inicialmente, esses autores¹⁰, estudando a laguna de Saquarema, identificaram a importância das variações diurnas nos processos pelágicos (relativos à coluna d'água) e bênticos (relativos ao sedimento), em que ocorre alternância de autotrofia e heterotrofia, ou seja, de produção de matéria orgânica (pela fotossíntese) e mineralização da matéria orgânica (pela respiração das algas e dos microorganismos). Esses autores já ressaltam a complexidade do processo e sua variabilidade diária, semanal, mensal e anual, levando à disponibilização de nutrientes na coluna d'água e alimentando, assim, as florações algais, algumas vezes responsáveis pelas mortandades de peixes. Um aspecto ressaltado no estudo de Carmouze, Knoppers *et al.*¹¹ é a relação entre os estoques de matéria orgânica e nutrientes presentes no sedimento e a produção de microalgas na coluna d'água.

⁹ AZEVEDO, S. M. F. D. O.; CARMOUZE, J.-P. Une mortalité de poissons dans une lagune tropicale (Brésil) durant une période de dominance de Cyanophyceae. **Revue d'Hydrobiologie Tropicale**, v. 27, n. 3, p. 265-272, 1994.

¹⁰ CARMOUZE, J. P.; KNOPPERS, B.; VASCONCELOS, P. Metabolism of a subtropical Brazilian Lagoon. **Biogeochemistry**, v. 14, n. 2, p. 129-148, 1991. ISSN 0168-2563

¹¹ *Ibid.*

Juntamente com outros estudos^{12,13,14,15}, os autores observam que a mineralização de nutrientes para a coluna d'água é frequentemente mais importante do que os próprios aportes de nutrientes oriundos dos esgotos domésticos. É evidente que, nesse quadro, a coleta de uma única amostra não permitiria a identificação de tão complexos processos.

Neste ponto, é necessária uma explicação sobre os processos das florações algais e as questões relacionadas à limitação de nutrientes e energia luminosa (Lei de Liebig). A Lei do Mínimo de Liebig é um conceito básico de ecologia, explicado na página 281 do livro de Ricklefs¹⁶, que estabelece a necessidade de um elemento (ou fator) limitante à produção primária (no nosso caso, das algas, sejam microalgas, sejam macroalgas). Assim, em um sistema, podemos ter nitrogênio, carbono, fósforo, molibdênio, luz abundantes, mas pouco ferro, e a produção primária será sempre controlada pela disponibilidade deste último elemento – o ferro é o fator limitante. Se uma pequena dose desse elemento limitante é despejada no ambiente, as algas respondem quase imediatamente com uma produção primária. A Figura 1 ilustra o processo. Qualquer desequilíbrio que forneça o nutriente limitante para o ambiente vai promover uma resposta quase imediata (sempre existe uma pequena defasagem, como indica a figura) em termos de produção primária. A partir da 50ª hora, o fitoplâncton passa a consumir intensamente os nutrientes introduzidos, esgotando-os da coluna d'água (como pode ser observado na 96ª hora). Por falta do nutriente limitante, também o fitoplâncton vai morrendo e, após um período de 4 a 5 dias de floração, o sistema retorna à normalidade. É evidente que, para o caso das algas tóxicas, as suas toxinas permanecem no ambiente por períodos mais longos e podem ser responsáveis pelas mortandades, como descrito por Azevedo e Carmouze¹⁷ mais acima.

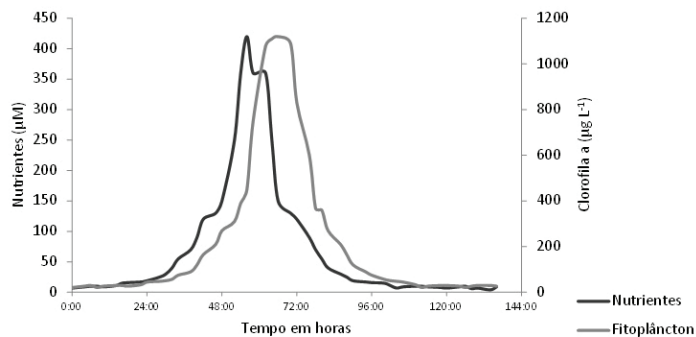


Figura 1 - Gráfico mostrando o enriquecimento em um nutriente limitante e a resposta em termos de produção primária do fitoplâncton

Fonte: os autores

¹² CUNHA, L. C.; WASSERMAN, J. C. Relationship between nutrients and macroalgal biomass in a Brazilian Coastal Lagoon: The impact of a lock construction, *op. cit.*

¹³ WASSERMAN, J. C. et al. The impact of a canal lock upon the water balance and the trophic state of Piratinga Lagoon, State of Rio de Janeiro, Brazil, *op. cit.*

¹⁴ CARMOUZE, J. P. et al. Benthic influence on the metabolism of a shallow tropical lagoon (Lagoa da Barra, Brazil). *Hydrobiologia*, v. 374, p. 89-100, 1998. ISSN 0018-8158.

¹⁵ CARMOUZE, J. P.; SAMPAIO, C. E.; DOMINGOS, P. Évolution des stocks de matière organique et de nutriments dans une lagune tropicale (Brésil) au cours d'une période marquée par une mortalité de poissons. *Revue d'Hydrobiologie Tropicale*, v. 27, n. 3, p. 217-234, 1994.

¹⁶ RICKLEFS, R. E. **A Economia da Natureza**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan S.A., 1993. 470 ISBN 8527703580.

¹⁷ AZEVEDO, S. M. F. D. O.; CARMOUZE, J.-P. Une mortalité de poissons dans une lagune tropicale (Brésil) durant une période de dominance de Cyanophyceae, *op. cit.*

O mais importante sobre as florações algais é que ocorrem sempre que há desequilíbrio químico na água com excesso do nutriente limitante. Isso pode ocorrer também pelos aportes de esgotos domésticos, mas, na maioria dos casos, como demonstram Carmouze, De Farias *et al.*¹⁸, os processos de mineralização a partir do sedimento são mais importantes. Cunha e Wasserman¹⁹ realizaram um balanço de massa no sistema lagunar Piratininga-Itaipu (Niterói) e verificaram que a quantidade de nutrientes necessária para a manutenção da produção primária no sistema era simplesmente 10 vezes maior do que os aportes do esgoto doméstico (principal poluição do sistema estudado). Nesse caso, pergunta-se: como a biomassa consegue os nutrientes necessários ao seu crescimento? Segundo a hipótese desses autores, a reciclagem dos nutrientes a partir dos sedimentos, o que Carmouze chama de remineralização, seria a principal responsável pela manutenção da produção primária.

O sistema funciona da seguinte forma: com o passar dos anos, os nutrientes vão sendo lançados pelas fontes culturais (agricultura e esgotos domésticos) ou fontes naturais (erosão dos solos), são absorvidos pelos produtores primários (fitoplâncton) e, com sua morte, vão para o sedimento. O sedimento funciona mais ou menos como um centro de estocagem de nutrientes, acumulando os aportes históricos de nutrientes que periodicamente são mineralizados para a coluna d'água, provocando as florações, as quais podem provocar as mortandades de peixes. O manual de florações algais nocivas²⁰ relata as diferentes florações já registradas e seus efeitos na biota em um volume de quase 800 páginas, sendo, portanto, uma temática extremamente complexa. De uma forma geral, as florações mais frequentes em lagunas costeiras estão associadas a cianofíceas (ou cianobactérias), criptofíceas e dinoflagelados, mas as primeiras são as que produzem o maior número de toxinas, entre elas a microcistina, a anatoxina, a saxitoxina e a nodularina. Algumas dessas microalgas também podem causar mortandades de peixes. Na Lagoa Rodrigo de Freitas, a ocorrência de florações algais foi extensamente registrada por Domingos, Gômara *et al.*²¹ desde o ano de 2000, e, em mortandade de 2010, foi identificada elevada densidade de *Chrysocromulina* sp., gênero de alga produtora de ictiotoxina que parece ter sido responsável pela mortandade, visto que não ocorreu anoxia. Segundo as autoras, essa é uma mudança radical nos processos de mortandade de peixes da Lagoa Rodrigo de Freitas, onde sempre ocorria anoxia.

Na verdade, alguns desses processos ainda são muito pouco compreendidos, e as relações ecológicas de todas as espécies presentes em ecossistemas podem estar sendo severamente afetadas pelas mudanças climáticas. Em um estudo na Laguna de Pamlico, na Carolina do Norte, algumas mudanças vêm sendo observadas em decorrência da maior incidência de furacões²². Processos de intensa mistura na coluna d'água em razão

¹⁸ CARMOUZE, J. P. *et al.* Benthic influence on the metabolism of a shallow tropical lagoon (Lagoa da Barra, Brazil), *op. cit.*

¹⁹ HALLEGRAEFF, G. M.; ANDERSON, D. M.; CEMBELLA, A. D. (eds.). **Manual on Harmful Marine Microalgae**. 2.ed. Paris, France: UNESCO Publishing, 2004. p.793 (Monographs on Oceanographic Methodology, v.11).

²⁰ DOMINGOS, P. *et al.* Eventos de mortandade de peixes associados a florações fitoplanctônicas na Lagoa Rodrigo de Freitas: Programa de 10 anos de monitoramento. **Oecologia Australis**, v. 16, n. 3, p. 441-466, 2012.

²¹ PAERL, H. W. *et al.* Assessing the Response of the Pamlico Sound, North Carolina, USA to Human and Climatic Disturbances Management Implications. In: KENNISH, M. J.; PAERL, H. W. (ed.). **Coastal Lagoons**: Critical Habitats of environmental change. Boca Raton, USA: CRC Press Taylor & Francis Group, 2010. cap. 2, p.17-42. (CRC Marine Sciences Series). ISBN 978-1-4200-8830-4.

²² FEEMA. Vida supera a morte na Lagoa Rodrigo de Freitas. **Revista da FEEMA**, v. 2, p. 26-35, 1993.

de fortes ventos, redução extrema da salinidade em consequência das chuvas e respostas antagônicas em períodos mais longos de seca vêm modificando a ecologia da laguna, provocando mortandades mais intensas e mais frequentes. Juntem-se a isso os aportes antrópicos de nutrientes, a ocupação desordenada das bacias de drenagem e vai ficando cada vez mais difícil fazer previsões sobre o futuro desses frágeis sistemas costeiros.

São necessários estudos de mais longo prazo, estudos abrangendo maior quantidade de parâmetros, inclusive as abundâncias das diversas espécies do plâncton, do necton e do bentos para entendermos as sucessões e os parâmetros físico-químicos que determinam essas sucessões. Olhando o caso da laguna de Araruama, é necessário que sejam medidos todos os parâmetros físico-químicos e biológicos simultaneamente em amostragens distantes das margens com frequência definida de tal forma a efetivamente permitir consistentes interpretações. Também é necessário realizar as interpretações, visto que só essas ações podem permitir o estabelecimento de procedimentos de remediação e gestão capazes de mitigar os impactos de todas estas interferências antrópicas.

Os processos tróficos em ambientes costeiros

As causas das mortandades de peixes se originam de mudanças nos processos ambientais. Essas mudanças, sejam antrópicas ou naturais, modificam o status físico, químico e ecológico da água, eventualmente provocando a mortandade. Quando mencionados os processos de mortandade, no item anterior, vimos que a causa mais comum das mortandades é a anoxia (ou hipoxia). No caso da laguna Rodrigo de Freitas, relatamos a ocorrência dessas mortandades nos anos de 1950, mas as mortandades mais antigas foram relatadas a partir de 1844²³. É muito provável que a ocorrência de mortandades por anoxia já fosse um processo natural naquela época, dado pela presença de sedimentos muito redutores, onde a acumulação de matéria orgânica era muito intensa, mesmo com uma reduzida presença do homem.

A acumulação de matéria orgânica implica, mesmo nos ambientes naturais, a presença de fontes que podem ser autóctones ou alóctones (ou detríticas). As fontes autóctones são aquelas que produzem matéria orgânica na própria laguna, como as algas ou as vegetações das margens (por exemplo as taboas ou os mangues). Já as fontes alóctones ou detríticas produzem matéria orgânica na bacia de drenagem e são transportadas pelos rios até a laguna, onde se depositam e se preservam no fundo. O contínuo enriquecimento dos ambientes costeiros com os materiais, sejam alóctones ou autóctones, vão provocar um fenômeno bastante complexo que é a *eutroficação* (ou eutrofização)²⁴. Uma boa definição de eutroficação pode ser encontrada na página 424 do livro *A Economia da Natureza*¹²:

²³ NIENHUIS, P. Eutrophication, water management, and the functioning of Dutch estuaries and coastal lagoons. **Estuaries**, v. 15, n. 4, p. 538-548, 1992. ISSN 0160-8347.

²⁴ DAS, B.; NORDIN, R.; MAZUMDER, A. An alternative approach to reconstructing organic matter accumulation with contrasting watershed disturbance histories from lake sediments. **Environmental Pollution**, v. 155, n. 1, p. 117-124, 2008.

Qualquer substância que intensifica a produtividade de um habitat pode ser considerada fertilizante... Os nitratos e fosfatos e outros fertilizantes inorgânicos (...) aumentam a produção biológica. Uma consequência desta fertilização artificial, muitas vezes chamada de eutroficação, é a mudança das condições biológicas e químicas de um corpo d'água.

Embora as mudanças causadas pelos aportes de nutrientes não sejam necessariamente ruins para o meio ambiente, eles podem provocar desequilíbrios intensos, reduzindo a biodiversidade e provocando as mortandades de peixes e outros organismos de interesse comercial, segundo os processos descritos no item anterior. Assim, o entendimento dos processos que causam a eutroficação é chave para desvendar os mecanismos que causam as mortandades. Em outras palavras, as mortandades estão intimamente ligadas ao processo de eutroficação.

Após estabelecer a relação entre a eutroficação e as mortandades, é necessário introduzir o conceito de eutroficação cultural, ou seja, aquela parcela da eutroficação causada pelo homem. As principais fontes associadas à eutroficação cultural são:

- a) A agricultura: Na agricultura, são utilizados fertilizantes nos solos para aumentar a produção, particularmente o nitrogênio, o fósforo e o potássio. Esses nutrientes incorporados ao solo precisam encontrar condições químicas de retenção às partículas atribuídas à chamada Capacidade de Troca de Cátions (CTC)²⁵. Em solos agrícolas, a matéria orgânica (também incorporada ao solo para aumentar a fertilidade) é que atribui CTC ao solo, e, assim, quanto melhor a qualidade da matéria orgânica do solo, melhor a sua capacidade de retenção dos fertilizantes (nutrientes). Não obstante, a capacidade de retenção do solo nunca é capaz de reter indefinidamente os nutrientes^{26,27}, e uma parcela vai ser lixiviada para a água subterrânea, daí para os rios e lagos. Além das fontes agrícolas, a pecuária, a suinocultura, a avicultura e a piscicultura são fontes significativas de nutrientes para o ambiente aquático.
- b) Esgotos domésticos: Os esgotos domésticos possuem em sua composição uma série de poluentes resultantes do metabolismo fisiológico humano (urina e fezes), mas também dos resultantes do uso de produtos químicos nas residências (detergentes, pesticidas, metais pesados, etc.). Os contaminantes sanitários, compostos pelas bactérias, os parasitas e mais recentemente os vírus, são os mais notórios^{28,29}. Também abundantemente presentes no esgoto doméstico, os nutrientes e a matéria orgânica constituem contaminantes significativos, tendo

²⁵ VAN RAIJ, B. **Fertilidade do solo e adubação**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1991.

²⁶ MACHADO, R. L. *et al.* Perda de solo e nutrientes em voçorocas com diferentes níveis de recuperação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 945-954, 2010.

²⁷ BATLLE-AGUILAR, J. *et al.* Analysis of carbon and nitrogen dynamics in riparian soils: Model validation and sensitivity to environmental controls. **Science of the Total Environment**, v. 429, n. o, p. 246-256, 2012. ISSN 0048-9697.

²⁸ BARRAQUE, B. Past and future sustainability of water policies in Europe. **Natural Resources Forum**, v. 27, n. 3, p. 200-211, Aug 2003.

²⁹ COURA, J. R. *et al.* Epidemiological, social and sanitary aspects in area of Médio Solimões: I - Study of localities of São Francisco do Laranjal, Aranaí and São Lázaro do Surubim, municipality of Coari, State of Amazonas. **Anais da Academia Nacional de Medicina**, v. 153, n. 3, p. 122-126, 1993.

como principal efeito o processo de eutroficação no ambiente aquático receptor. Segundo Economopoulos³⁰, cada habitante da bacia de drenagem pode produzir 5 g de nitrogênio, 0,55 g de fósforo e 10,4 g de DBO por dia. Mesmo que o esgoto venha a ser tratado em estações terciárias, e os efluentes lançados nos chamados “wetlands construídos” (como o de Araruama, RJ), a eficiência de retirada de nutrientes ainda é muito baixa, podendo chegar nos processos mais sofisticados a 40 % do aporte de nutrientes³¹.

- c) Lixiviação do ambiente urbano: A lixiviação das vias públicas e de solos desnudos e degradados do ambiente urbano também pode contribuir com nutrientes para os ambientes costeiros. Os resíduos deixados pela atividade humana nas superfícies e calçadas das cidades podem ser resultantes da queima dos combustíveis fósseis (hidrocarbonetos pirolíticos), metais pesados e nutrientes, oriundos de todo tipo de lixo ou resíduo deixado na via pública. Veja o caso das feiras livres, onde, mesmo coletados os resíduos sólidos, permanecem os resíduos solúveis (chorume), que vão ser incorporados à água de lixiviação das cidades (também chamadas de “stormwaters” na literatura científica). A lixiviação de aterros controlados, lixões, e resíduos sólidos domésticos em geral também podem ser uma fonte muito significativa^{32,33,34,35}.
- d) As indústrias: Inúmeros tipos de indústrias podem lançar no meio ambiente concentrações consideráveis de nutrientes, particularmente a indústria alimentícia, de laticínios, de beneficiamento do pescado, de bebidas fermentadas, do papel e celulose, de fertilizantes, abatedouros, entre outras.

Diferentemente dos processos naturais de enriquecimento das águas com nutrientes, a eutroficação cultural é responsável pelo aporte excessivo, causando fortes desequilíbrios ecológicos, intensificando a produção de matéria orgânica que, em última instância, provoca incremento no processo de colmatação (assoreamento) dos ambientes costeiros, incluindo as lagunas.

Ao atingir os ecossistemas costeiros chamados lênticos (de menor hidrodinâmica), como lagos e lagunas costeiras, os nutrientes são rapidamente convertidos em produção primária (macro ou microalgas), seguindo o processo apresentado na Figura 1³⁶. É necessário chamar a atenção para o fato de que a eficiência dos produtores primários

³⁰ ECONOMOPOULOS, A. P. **Assessment of sources of air, water, and land pollution: a guide to rapid source inventory techniques and their use in formulating environmental control strategies**. Geneva: World Health Organization, 1993. 263p. Part two: Approaches for consideration in formulating environmental control strategies.

³¹ LENZI, M.; PALMIERI, R.; PORRELLLO, S. Restoration of the eutrophic Orbetello lagoon (Tyrrhenian Sea, Italy): water quality management. **Marine Pollution Bulletin**, v. 46, n. 12, p. 1540-1548, Dec. 2003.

³² BARMAN, P. J.; KARTHA, S. A.; PRADHAN, B. Empirical approach to predict leached nutrients from landfill site. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 9, p. 6619-6633, May 2015. ISSN 0944-1344.

³³ IQBAL, H. et al. Leaching of Metals, Organic Carbon and Nutrients from Municipal Waste under Semi-Arid Conditions. **International Journal of Environmental Research**, v. 9, n. 1, p. 187-196, Win 2015. ISSN 1735-6865.

³⁴ KUMAR, M. et al. Nutrient chemistry and salinity mapping of the Delhi aquifer, India: source identification perspective. **Environmental Geology**, v. 56, n. 6, p. 1171-1181, Jan. 2009. ISSN 0943-0105.

³⁵ RAJU, N. J.; RAM, P.; DEY, S. Groundwater Quality in the Lower Varuna River Basin, Varanasi District, Uttar Pradesh. **Journal of the Geological Society of India**, v. 73, n. 2, p. 178-192, Feb. 2009. ISSN 0016-7622.

³⁶ VOLLENWEIDER, R. A. Coastal marine eutrophication: principles and control. In: MARINE COASTAL EUTROPHICATION INTERNATIONAL CONFERENCE, 1992, Bologna, Italy. Bolonha: Elsevier, 1992. 1-20 p.

é extraordinária, de modo que, caso as condições sejam satisfatórias (luz, temperatura, ausência de substâncias tóxicas), todo o nutriente é convertido em produção primária, sobrando apenas traços do contaminante. Em dois trabalhos com a fanerógama marinha *Syringodium filiforme*, Short e colegas observaram que a retirada de nutrientes da água era tão intensa que podia esgotar rapidamente suas concentrações^{37,38}. Em ambientes com baixas concentrações de nutrientes, como em oceano aberto, a retirada é intensa e determina uma depressão das concentrações nos primeiros 200 metros. Abaixo dessa profundidade, onde a luz não penetra mais, as concentrações aumentam de maneira significativa até elevados valores em grandes profundidades, onde a luz passa a ser o fator limitante³⁹.

O processo de retirada dos nutrientes pelos produtores primários é bastante complexo, de forma que o conjunto de condições reinantes vai determinar a espécie dominante no processo. Em ambientes muito rasos, existe uma tendência à dominância de macroalgas ou macrófitas. Na laguna de Araruama, por exemplo, a enseada do Siqueira apresenta períodos de produção primária por enormes folhas de *Ulva lactuca*, também conhecida como alface do mar⁴⁰. Contudo, nos períodos de salinidade muito elevada (normalmente no inverno), a produção dessa espécie dá lugar a uma sucessão de microalgas fitoplanctônicas.

Nos ambientes onde a produção é de macroalgas, como na porção “jusante” (os autores chamam de jusante a porção Oeste da laguna de Piratininga, sendo aquela um pouco mais distante das entradas de rios) da Laguna de Piratininga^{41,42}, a presença das algas é mais perene, com um ciclo anual, e seu estudo e gestão costumam ser facilitados. Veja que, na Figura 2, uma foto tirada no banco de macroalgas em Piratininga, é possível identificar (na porção esquerda da foto) a transparência da água. Devido ao consumo dos nutrientes pelas macroalgas, o fitoplâncton não consegue se desenvolver, e o material em suspensão originário dos rios que deságuam na laguna não atinge essa porção da laguna, fazendo com que a água fique transparente.

³⁷ SHORT, F. T. et al. Evidence for phosphorus limitation in carbonate sediments of the seagrass *Syringodium filiforme*. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 20, p. 419-430, 1985.

³⁸ SHORT, F. T.; MCROY, C. P. Nitrogen uptake by leaves of the seagrass *Zostera marina* L. **Botanica Marina**, v. 27, p. 547-555, 1984.

³⁹ BROECKER, W. S.; PENG, T.-H. **Tracers in the Sea**. Palisades, NY: Lamont-Doherty Geological Observatory, 1982. 690p.

⁴⁰ WASSERMAN, J. C.; SILVA-FILHO, E. V. **Relatório resumido do monitoramento do Projeto Perynas (Araruama) para instalação de um condomínio de casas com marina e hotel**. Rio de Janeiro: AGS, Empreendimentos Turísticos e Hoteleiros SA., 1995. p.6.

⁴¹ CUNHA, L. C.; WASSERMAN, J. C. Relationship between nutrients and macroalgal biomass in a Brazilian Coastal Lagoon: The impact of a lock construction, *op. cit.*

⁴² WASSERMAN, J. C. et al. The impact of a canal lock upon the water balance and the trophic state of Piratininga Lagoon, State of Rio de Janeiro, Brazil. In: KNOPPERS, B. A.; BIDONE, E. D. et al (ed.). **Environmental Geochemistry of Coastal Lagoon Systems, Rio de Janeiro, Brazil**. *op. cit.*



Figura 2 - Banco de *Chara Hornemannii* da laguna de Piratininga, Niterói. Observa-se na porção esquerda da imagem a presença de uma pequena área desprovida de algas, onde a coloração clara é o fundo arenoso, denotando a transparência da água

Foto Wasserman, 1996

Um outro efeito da intensa produção primária que pode ser observado na figura 2 é a presença de bolhas de ar (na verdade bolhas de oxigênio) resultantes da conversão de dióxido de carbono em oxigênio através do processo conhecido como fotossíntese. Os valores de oxigênio dissolvido medidos nos estudos de Wasserman e outros^{43,44} podem ultrapassar em mais de 200% os níveis de saturação do gás (até 16 mg L⁻¹). O problema das produções excessivas de macroalgas é que, durante os períodos de senescência (morte) das plantas, a matéria orgânica entra em decomposição e, em vez de produzir oxigênio, consome o gás e produz CO₂ (processo inverso). Gera com isso forte anoxia da água que, no caso de Piratininga, causou intensas mortandades de peixes no ano de 1996⁴⁵. Esses autores, sugerem, como medida de gestão, a retirada periódica das algas no período pré-senescência, de maneira que elas não degradem dentro da água da laguna e, com isso, não intensifiquem o processo de consumo do oxigênio da água, reduzindo a possibilidade de ocorrência de mortandades. Esse mesmo mecanismo foi implementado na laguna de Orbetello, na Itália⁴⁶, permitindo uma melhoria significativa do ambiente. Na Lagoa Rodrigo de Freitas, a Prefeitura do Rio de Janeiro também faz a retirada periódica dos bancos de *Ruppia maritima*⁴⁷, uma fanerógama marinha que se desenvolve em diversas porções daquele sistema.

231

⁴³ CUNHA, L. C.; WASSERMAN, J. C. Relationship between nutrients and macroalgal biomass in a Brazilian Coastal Lagoon: The impact of a lock construction, *op. cit.*

⁴⁴ WASSERMAN, J. C. *et al.* The impact of a canal lock upon the water balance and the trophic state of Piratininga Lagoon, State of Rio de Janeiro, Brazil, *op. cit.*

⁴⁵ CUNHA, L. C.; WASSERMAN, J. C. Relationship between nutrients and macroalgal biomass in a Brazilian Coastal Lagoon: The impact of a lock construction, *op. cit.*

⁴⁶ LENZI, M.; PALMIERI, R.; PORRELLO, S. Restoration of the eutrophic Orbetello lagoon (Tyrrhenian Sea, Italy): water quality management, *op. cit.*

⁴⁷ DOMINGOS, P. *et al.* Eventos de mortandade de peixes associados a florações fitoplanctônicas na Lagoa Rodrigo de Freitas: Programa de 10 anos de monitoramento, *op. cit.*

Em Piratininga, na Lagoa Rodrigo de Freitas, na laguna de Ortebello, na Itália, e em muitas outras, a produção primária de macroalgas só é possível porque as condições ambientais são favoráveis. No caso de Piratininga, a porção “jusante” fica mais distante das fontes de material particulado em suspensão (os rios) e, com isso, a transparência permite à alga se fixar no fundo e ainda assim ter luz disponível para o seu crescimento. Em ambientes turbidos e profundos, a luz desfavorece a produção das macroalgas, gerando então a dominância da produção primária de microalgas⁴⁸. Quanto mais rico em microalgas, mais difícil fica a penetração da luz na água, impedindo assim o crescimento das macroalgas.

Em um sistema dominado pelo fitoplâncton, os processos são muito mais complicados e dinâmicos do que nos dominados por macroalgas. Em vez da dominância de apenas uma espécie, o que ocorre é uma sucessão de florações mais ou menos intensas, cada vez com uma espécie diferente. Entre essas espécies, algumas podem ser florações algais nocivas (FAN, ou HAB), as quais costumam ser responsáveis por mortalidades de peixes⁴⁹. Em um tipo de sistema dominado por microalgas, não é possível, como para as macroalgas, retirar as algas do sistema, seja pelo tamanho microscópico dos organismos, seja pela rapidez de sua ciclagem (veja a Figura 1). Nesses casos, o controle das florações só pode ser realizado pela redução dos aportes de nutrientes ou, em algumas situações favoráveis, com a melhoria da renovação da água⁵⁰.

Como demonstrado na Figura 1, aportes intensos de nutrientes que podem ser resultantes da ocorrência de chuvas fortes na bacia de drenagem ou da ocorrência de acidentes de rompimento de dutos de esgotos (como registrado no canal do Jardim de Alah em 2010) vão promover as florações. Além desses processos, a difusão de nutrientes do sedimento para a coluna d'água também pode ser um fator de ocorrência de floração de microalgas. Essa questão da difusão tem sido tema de pesquisa de nosso grupo de pesquisa da UFF, tendo gerado alguns relatórios e artigos científicos.

A importância do estoque de nutrientes no sedimento está relacionada ao impacto do aumento da abertura de conexões com o mar. No Estudo de Impacto Ambiental da abertura da Barra Franca em Saquarema, Wasserman⁵¹ observa que a abertura e a intensificação das trocas de água entre a laguna e o mar deveriam promover a intensificação do processo de remineralização (difusão) dos nutrientes do sedimento, devido ao fato de se formar um maior gradiente de concentração entre o sedimento e a coluna d'água. A Figura 3 representa a formação desse gradiente para as situações antes da abertura, no momento da abertura, após a abertura e muito após a abertura. Observa-se que a redução na concentração de nutrientes só ocorre muito após a abertura. O tempo necessário à melhoria da qualidade da água vai depender do tamanho do estoque de nutrientes no sedimento e da dinâmica de transferência desses nutrientes para a coluna d'água. Pode ser um processo milenar!

⁴⁸ ASAEDA, T.; VAN BON, T. Modelling the effects of macrophytes on algal blooming in eutrophic shallow lakes. **Ecological Modelling**, v. 104, p. 261-287, 1997.

⁴⁹ HALLEGRAEFF, G. M.; ANDERSON, D. M.; CEMBELLA, A. D., Eds. **Manual on Harmful Marine Microalgae**. (Monographs on Oceanographic Methodology), *op. cit.*

⁵⁰ CATALAO DIONISIO, L. P.; RHEINHEIMER, G.; BORREGO, J. J. Microbiological Pollution of Ria Formosa (South of Portugal). **Marine Pollution Bulletin**, v. 40, n. 2, p. 186-193, 2000. ISSN 0025-326X.

⁵¹ WASSERMAN, J. C. **Estudo do Impacto Ambiental da Abertura da Barra da Laguna de Saquarema**. Saquarema, RJ: Prefeitura Municipal de saquarema, 2000. p.385.

No caso da laguna de Saquarema, a abertura de conexão ocorreu em 2002, mas, até 2004, quando foi realizado o trabalho de Azevedo⁵², ficou demonstrado que não houve melhoria significativa. Displícetemente, a Prefeitura e as agências ambientais locais deixaram de fazer os monitoramentos das concentrações de nutrientes, e até hoje ainda não sabemos se a abertura da Barra Franca efetivamente promoveu melhoria na qualidade da água. No caso da laguna de Orbetello, na Itália⁵³, não houve abertura de conexão com o mar, mas o procedimento de retirada das macroalgas, durante anos seguidos, levou a consistente redução na concentração de nutrientes no sedimento, e a contaminação só persistiu nos locais onde ainda havia aportes de esgoto.

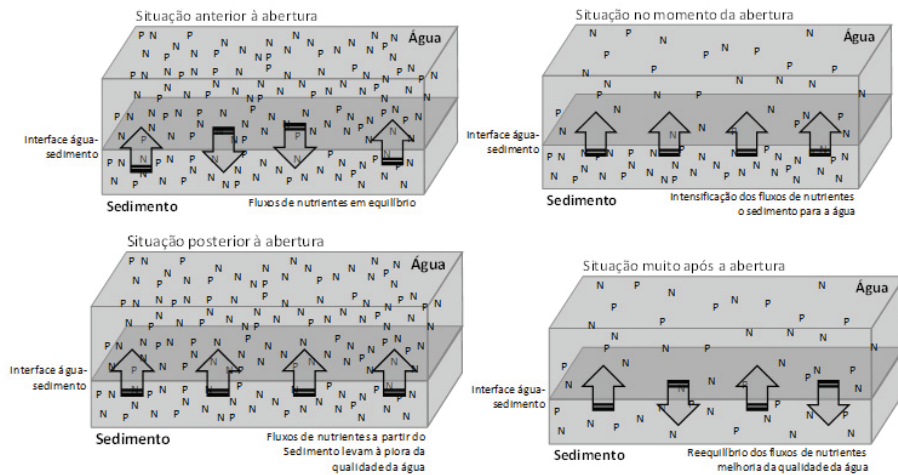


Figura 3 - Esquema de evolução da disponibilidade de nutrientes durante o processo de abertura de barra em lagunas costeiras

Fonte: os autores

Atualmente, nosso grupo de pesquisa está desenvolvendo um estudo com sedimentos da laguna de Araruama utilizando experimentos em laboratório e um sistema conhecido como “bell-jar”, a fim de determinar se os nutrientes do sedimento passariam à coluna d’água e a que taxa. Com isto, poderemos estimar, a partir de modelagens numéricas, os tempos necessários para a melhoria da qualidade da água em situações diversas de abertura (uma, duas ou mais aberturas).

É evidente que os processos que suportam a eutroficação nos ecossistemas costeiros são bem complexos, concorrendo para sua intensificação as atividades agrícolas e de criação de animais, os despejos de esgotos domésticos *in natura* e de efluentes de estação de tratamento, a lixiviação de calçamentos urbanos, a lixiviação

⁵² AZEVEDO, F. B. B. **Modelagem da Capacidade de Suporte da Laguna de Saquarema, RJ após a Abertura de uma Conexão Permanente com o Mar**. 2005. 117p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2005.

⁵³ LENZI, M.; PALMIERI, R.; PORRELLO, S. Restoration of the eutrophic Orbetello lagoon (Tyrrhenian Sea, Italy): water quality management, *op. cit.*

de solos degradados e as indústrias. Além desses processos, há mecanismos naturais, como a difusão de nutrientes do sedimento para a coluna d'água e a decomposição da matéria orgânica (seja antrópica ou não). Assim, os mecanismos responsáveis pelas florações algais e, por consequência, pelas mortandades de peixes não podem ser vistos como uma situação de causa e efeito direto, mas como uma composição de fatores.

Características físico-químicas de lagunas hipersalinas

A formação das lagunas hipersalinas é resultado das características das bacias de drenagem onde se situam, do clima e das suas características geomorfológicas. Para ser hipersalina, é necessário que a laguna seja relativamente isolada do mar. A razão é simples: se a laguna tiver uma taxa de troca muito intensa com o oceano, a hipersalinidade deve ser diluída na água do mar. Kjerfve⁵⁴ classifica as lagunas costeiras em vazadas, semiabertas e afogadas, sendo a última aquela que apresenta a menor taxa de troca de água. As lagunas hipersalinas também não podem receber aportes significativos de água doce, e, para isso, é necessário que estejam localizadas em regiões áridas, ou semiáridas, de preferência em bacias de drenagem de pequenas dimensões, visto que bacias de maior dimensão podem gerar aportes mais significativos de água, impedindo a hipersalinidade.

Considerando que a hipersalinidade de lagunas está fortemente associada aos processos climáticos, existem muitas lagunas no mundo que apresentam hipersalinidade intermitente, como a laguna de Caimanero-Huizache, na costa Oeste do México, descrita por Moore e Slinn⁵⁵, que apresenta pouco mais de 175 km² de área, mas uma amplitude de salinidade que varia de 23 (na estação úmida) a 84 (na estação seca). Muitas lagunas também podem apresentar hipersalinidade perene, como a de Coorong, na Austrália⁵⁶, a de Akyatan, na Turquia⁵⁷, e a de Indian River, na Flórida⁵⁸. A laguna de Araruama, no Rio de Janeiro, também é um sistema hipersalino perene, controlado pelas características únicas do clima na região onde se situa⁵⁹.

Nesses sistemas, a hipersalinidade atribui determinadas particularidades geoquímicas, físicas e biológicas que devem ser consideradas para tentarmos entender seu funcionamento. Diferentemente dos ambientes salobros e de água doce, os processos tróficos nos ambientes hipersalinos vêm sendo pouco estudados.

⁵⁴ KJERFVE, B. Comparative oceanography of coastal lagoons. In: WOLFE, D. A. (ed.). **Estuarine Variability**. New York: Academic Press, 1986. p.63-81.

⁵⁵ MOORE, N. H.; SLINN, D. J. The physical hydrology of a lagoon system on the Pacific coast of Mexico. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 19, p. 413-426, 1984.

⁵⁶ WEBSTER, I. T. The hydrodynamics and salinity regime of a coastal lagoon - The Coorong, Australia - Seasonal to multi-decadal timescales. **Estuarine Coastal and Shelf Science**, v. 90, n. 4, p. 264-274, Dec. 2010. ISSN 0272-7714.

⁵⁷ LECUYER, C. et al. Water sources, mixing and evaporation in the Akyatan lagoon, Turkey. **Estuarine Coastal and Shelf Science**, v. 115, p. 200-209, Dec. 2012. ISSN 0272-7714.

⁵⁸ KANG, Y.; KOCH, F.; GOBLER, C. J. The interactive roles of nutrient loading and zooplankton grazing in facilitating the expansion of harmful algal blooms caused by the pelagophyte, *Aureoumbra lagunensis*, to the Indian River Lagoon, FL, USA. **Harmful Algae**, v. 49, p. 162-173, Nov. 2015. ISSN 1568-9883.

⁵⁹ KJERFVE, B. et al. Hydrology and salt balance in a large, hypersaline coastal lagoon: Lagoa de Araruama, Brazil. **Estuarine Coastal and Shelf Science**, v. 42, n. 6, p. 701-725, Jun. 1996.

O desenvolvimento da vida nesse tipo de ambiente não é favorecido pela excessiva pressão osmótica, extremos de pH, temperaturas elevadas e baixa disponibilidade de oxigênio, e somente organismos que dispõem de mecanismos adaptativos específicos são capazes de sobreviver⁶⁰. Essa forte pressão do ambiente considerado extremo sobre a vida aquática pode levar os processos tróficos a serem controlados preferencialmente por fatores físicos e químicos, em detrimento dos biológicos⁶¹. Assim, podemos entender que o processo de resposta imediata ao enriquecimento com nutrientes descrito na Figura 1 pode não ocorrer de maneira tão evidente.

Alguns trabalhos têm demonstrado que ambientes hipersalinos têm tendência a apresentar uma baixa produção primária fitoplanctônica, visto que a disponibilidade de nitrogênio e particularmente de fósforo na coluna d'água é restrita⁶². As águas das lagoas hipersalinas ficam transparentes e permitem uma maior proliferação de biomassa macroalgal próximo ao fundo, onde, além disso, os nutrientes encontram-se mais disponíveis^{63,64}. Esse conceito pode explicar por que, até 2005, a laguna de Araruama era dominada por uma produção primária de microalgas de fundo ou de macroalgas, enquanto as águas eram bastante transparentes. O que aconteceu em 2005 ainda é um mistério. Por que a laguna adquiriu uma coloração acastanhada? Por que o fitoplâncton passou a dominar, e a água perdeu sua transparência? Qual o "shift" ou mudança de processo que ocorreu no sistema? Temos que discutir um pouco mais e talvez olharmos com um pouco mais de cuidado os processos que estão ocorrendo no sedimento das lagoas hipersalinas.

O fósforo incorporado nos ambientes aquáticos é preferencialmente depositado no sedimento^{65,66}, onde, segundo Williams, Jaquet *et al.*⁶⁷, pode aparecer sob diversas formas:

- Fósforo em apatita (AP), que consiste no ortofosfato presente na forma cristalina ou amorfa do mineral apatita (CaPO_4); quando na forma cristalina, é praticamente insolúvel na água;
- Fósforo não associado à apatita (NAIP), que consiste nos íons ortofosfato restantes, ligados a partículas outras que não sejam o cálcio;
- Fósforo orgânico (OP), que inclui todas as formas de fósforo associadas a átomos de carbono, oriundos de matéria orgânica formada localmente (autóctone) ou em degradação (alóctone ou detrítica).

⁶⁰ SHILO, M. Strategies of adaptation to extreme conditions in aquatic microorganisms. *Naturwissenschaften*, v. 67, n. 8, p. 384-389, 1980.

⁶¹ STILLER, M.; NISSENBAUM, A. Geochemical investigation of phosphorus and nitrogen in the hypersaline Dead Sea, *op. cit.*

⁶² STILLER, M.; NISSENBAUM, A. Geochemical investigation of phosphorus and nitrogen in the hypersaline Dead Sea. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, v. 63, n. 19-20, p. 3467-3475, Oct. 1999. ISSN 0016-7037.

⁶³ SOUZA, M. F. L. *et al.* Nutrient budgets and trophic state in a hypersaline coastal lagoon: Lagoa de Araruama, Brazil. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, v. 57, n. 5-6, p. 843-858.

⁶⁴ CANFIELD JR, D. E. *et al.* Prediction of Chlorophyll a Concentrations in Florida Lakes: Importance of Aquatic Macrophytes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, v. 41, n. 3, p. 497-501, 1984. ISSN 0706-652X.

⁶⁵ VALDES, D. S.; REAL, E. Nitrogen and phosphorus in water and sediments at Ria Lagartos coastal lagoon, Yucatan, Gulf of Mexico. *Indian Journal of Marine Sciences*, v. 33, n. 4, p. 338-345, Dec. 2004. ISSN 0379-5136.

⁶⁶ COTNER, J. B. *et al.* Nutrient, sulfur and carbon dynamics in a hypersaline lagoon. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, v. 59, n. 4, p. 639-652, Apr 2004. ISSN 0272-7714.

⁶⁷ WILLIAMS, J. D. H.; JAQUET, J. M.; THOMAS, R. L. Forms of Phosphorus in the Surficial Sediments of Lake Erie. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, v. 33, n. 3, p. 413-429, 1976. ISSN 0015-296X.

Mais recentemente, estabeleceu-se também a importância das formas de fósforo associadas ao ferro, através da formação de um mineral amorfo, a Vivianita⁶⁸, principalmente em condições anóxicas. Um aspecto que nos interessa particularmente é a precipitação de apatita formada (não mineral das rochas), que é capaz de reter o fósforo no sedimento, fenômeno este que ocorre intensamente na água do mar por causa do pH⁶⁹. A dessalinização e a presença intensa de matéria orgânica nos sedimentos poderão, então, provocar a redução no pH do sedimento e a consequente liberação de fósforo para a coluna d'água, promovendo com isso as temidas florações algais. O processo de liberação do fósforo para a coluna d'água intensifica também a turbidez, fazendo com que a dominância da produção primária mude de fitobentônica ou macroalgal para fitoplanctônica. Um processo que poderia explicar a modificação na coloração da água e as recentes modificações na laguna de Araruama.

Atualmente, com o suporte de recursos do Programa Universal do CNPq, estamos realizando estudos da disponibilidade de fósforo e nutrientes em 36 amostras de sedimento da laguna, além de uma avaliação detalhada dos processos de transferências de fósforo e nitrogênio entre o sedimento e a coluna d'água para situações diversas de salinidade, em experimentos *in vitro* e *in situ*. Esses experimentos estão utilizando os equipamentos e estruturas apresentados nas Figuras 4 e 5. Os seus resultados, produtos de uma tese de doutorado e de mestrado, serão disponibilizados em breve

A fim de fechar melhor este estudo, é necessário que verifiquemos o que já foi realizado na laguna de Araruama até os dias de hoje, se o conhecimento que já detemos é capaz de dar alguma indicação dos processos que vêm causando a queda na qualidade da água e as mortandades e se existe efetivamente uma relação dessas mortandades com as florações algais.

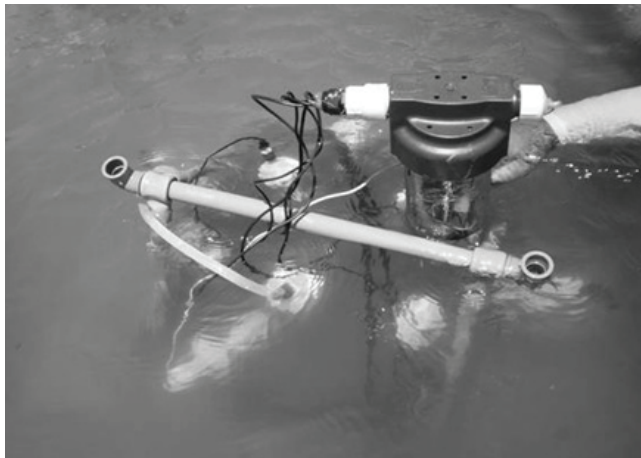


Figura 4 - Bell-jar (experimentos *in situ*) em fase de teste, instalado na laguna de Araruama, com o objetivo de estudar as trocas de nutrientes entre o sedimento e a água

Foto Wasserman (2016)

⁶⁸ EGGER, M. et al. Vivianite is a major sink for phosphorus in methanogenic coastal surface sediments. **Geochimica Et Cosmochimica Acta**, v. 169, p. 217-235, Nov. 2015. ISSN 0016-7037.

⁶⁹ BOSTAN, V. et al. Forms of particulate phosphorus in suspension and in bottom sediment in the Danube Delta. **Lakes & Reservoirs: Research & Management**, v. 5, n. 2, p. 105-110, 2000. ISSN 1440-1770.

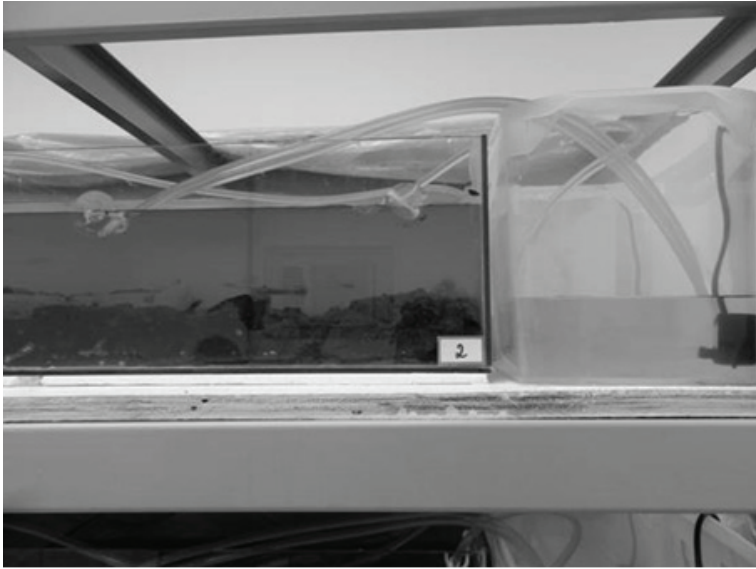


Figura 5 - Experimentos *in vitro*, em que água da laguna será colocada em contato com os sedimentos a fim de se avaliarem as trocas entre os dois compartimentos em diferentes condições ambientais (particularmente de salinidade)

Foto Wasserman (2016)

Os processos de eutroficação na laguna de Araruama (levantamento da literatura)

237

A formação da laguna de Araruama (Figura 6) foi muito detalhadamente descrita no trabalho de Turcq, Martin *et al.*⁷⁰, mostrando que o alagamento e fechamento desses sistemas não ocorrem por processos geomorfológicos muito simples. A formação desses ecossistemas está intimamente ligada aos processos consecutivos de elevação e abaixamento do nível do mar nos últimos 123 mil anos, relacionados aos eventos de glaciação e interglaciação (eras do gelo e períodos intermediários).

Originalmente, a costa da região dos lagos era simplesmente muito recortada com enseadas e baías (nos moldes de Angra dos Reis e Paraty). Na transgressão de 123 mil anos atrás (quando o nível do mar estava próximo ao atual), as ondas incidentes na costa promoveram a formação de tênue cordão arenoso, o que conhecemos hoje como barras, responsáveis pelo fechamento das lagunas. Outras barras foram formadas nos períodos mais recentes, há 7.000 e há 5.000 anos atrás, consolidando o fechamento das lagunas da região dos Lagos⁷¹. As estruturas em forma de cúspide (por exemplo Ponta da Acaíra, “Arubinha”) são formadas posteriormente por processos associados à dinâmica das ondas na laguna⁷².

⁷⁰ TURCQ, B. *et al.* Origin and evolution of the Quaternary coastal plain between Guaratiba and Cabo Frio, State of Rio de Janeiro, Brazil. *In*: KNOPPERS, B. A.; BIDONE, E. D. *et al.* (ed.). **Environmental Geochemistry of Coastal Lagoon Systems of Rio de Janeiro, Brazil**. Niterói: UFF/FINEP, 1999. p.25-46. (Série Geoquímica Ambiental, v.6).

⁷¹ TURCQ, B. *et al.* Origin and evolution of the Quaternary coastal plain between Guaratiba and Cabo Frio, State of Rio de Janeiro, Brazil, *op. cit.*

⁷² ALVES, A. R. **Modelagem numérica aplicada ao estudo da origem e evolução morfológica dos esporões da Lagoa de Araruama, RJ**. 2006. 135p. Tese (Doutorado em Geologia e Geofísica Marinha) Departamento de Geologia Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2006.

Embora os processos de formação não tenham um papel muito relevante na qualidade da água e na ocorrência das mortandades de peixes, eles são importantes para a caracterização do sistema. O aspecto climático da região, analisado por Barbieri⁷³, também é importante para explicar por que a laguna de Araruama é hipersalina e não apresenta sedimentos finos e orgânicos, como a maior parte das outras lagunas. Na verdade, a hipersalinidade é atribuída ao balanço hídrico, estudado por Kjerfve, Schettini et al.⁷⁴, francamente negativo, isto é, devido às muito baixas taxas de pluviosidade, a evaporação é muito mais intensa do que a precipitação, gerando um déficit hídrico (valores negativos de precipitação menos a evaporação; Figura 7). Veja que, na Figura 7, a maioria dos valores estão abaixo da barra de equilíbrio (valor zero de precipitação menos evaporação) nas medições realizadas entre os anos de 1970 e 1990. A condição hipersalina e de baixa pluviosidade são responsáveis pela ausência de sedimentação fina (comum nas outras lagunas) e pela deposição mais intensa de sedimentos carbonáticos que sustentaram durante muitos anos a produção de barrilha pela Companhia Alcalis.

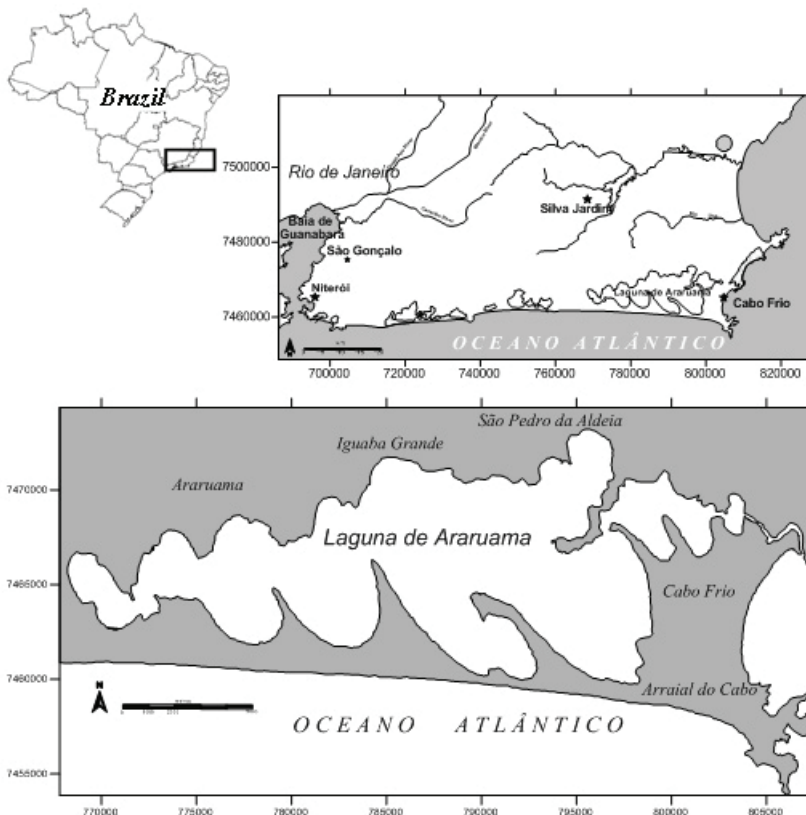


Figura 6: Localização da laguna de Araruama

Fonte: os autores

⁷³ BARBIERI, E. Cabo Frio e Iguaba Grande, dois microclimas distintos a um curto intervalo espacial. In: LACERDA, L. D.; ARAÚJO, D. S. D. et al (eds.). **Restingas**: Origem, estrutura, processos. Niterói: CEUFF, 1984, p.3-13.

⁷⁴ KJERFVE, B. et al. Hydrology and salt balance in a large, hypersaline coastal lagoon: Lagoa de Araruama, Brazil, op. cit.

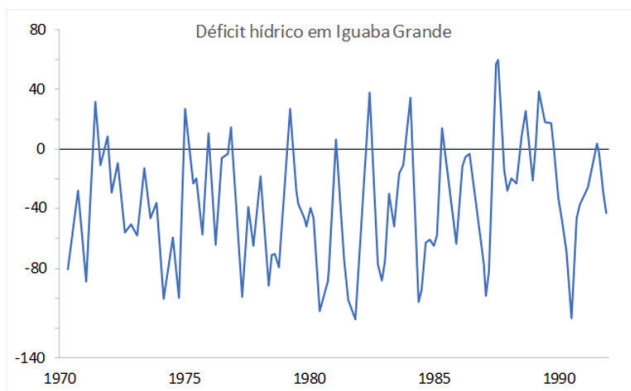


Figura 7: balanço hídrico (pluviosidade - evaporação) na laguna de Araruama⁷⁵

Fonte: Kjerfve et al. (1996)⁷⁶

A crescente ocupação do entorno da laguna nos últimos 45 anos é expressa em termos de um crescimento percentual total da ordem de 421%. Assim, a taxa de crescimento populacional excepcional da região vem aumentando paulatinamente os aportes de água doce à laguna de Araruama, que verifica seus níveis de salinidade caindo constantemente. A Tabela 1 apresenta os valores mínimos e máximos de salinidade da laguna medidos por diversos autores ao longo dos anos. É evidente que, ano a ano, existe uma oscilação dada pela variação na pluviosidade, de maneira que em 2002/2003, um período particularmente seco, nossa equipe de pesquisa chegou a medir salinidades da ordem de 90 na região da Ponta da Acaíra, mas, posteriormente, a salinidade tornou a cair. Uma intensa queda também pode ser observada no ano de 1990, período particularmente úmido.

O aumento populacional deve levar a uma intensa redução na salinidade. Assim, assumindo um consumo *per capita* de 250 litros de água por dia, é possível calcular um aporte atual de 1,66 m³ s⁻¹, comparado com o aporte de 0,40 m³ s⁻¹ calculado para a década de 1970. Não está contabilizado nesses números o aumento populacional dos meses de verão, quando a população deve duplicar.

Tabela 1 - Variação temporal da salinidade na laguna de Araruama desde o início dos anos 1990.

	Moreira-Turcq ⁷⁷	Souza ⁷⁸	Souza ⁷⁹	Mello ⁸⁰	Miranda ⁸¹
Amostragens	1990	1991/1992	1994	2005/2006	2011/2012
Mínima	36	44	41	37	30
Máxima	46	51	62	55	52
Média	41	48	52	48	46

* Os dados deste trabalho foram obtidos de monitoramento ambiental realizado pelo Câmara Técnica do Comitê de Bacias Lagos/São João. Os dados foram gentilmente cedidos pelo Sr. Arnaldo.

⁷⁵ *Ibid.*

⁷⁶ KJERFVE, B. et al. Hydrology and salt balance in a large, hypersaline coastal lagoon: Lagoa de Araruama, Brazil, *op. cit.*

⁷⁷ MOREIRA-TURCQ, P. F. Impact of a low salinity year on the metabolism of a hypersaline coastal lagoon (Brazil). **Hydrobiologia**, v. 429, n. 1-3, p. 133-140, Jun. 2000. ISSN 0018-8158

⁷⁸ SOUZA, M. F. L. **Distribuição Espacial, Sazonal e Fontes Fluviais de Nutrientes na Lagoa de Araruama, RJ**. 1993. 167p. Dissertação (Mestrado) - Departamento de geoquímica, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 1993.

⁷⁹ SOUZA, W. F. L. **Dinâmica de Nutrientes na Laguna Hipersalina de Araruama**. 1997. 89p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Geociências (Geoquímica), Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 1997.

⁸⁰ MELLO, T. B. M. **Caracterização biogeoquímica da Lagoa de Araruama, RJ**. 2007. 81 Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Geoquímica, University Federal Fluminense, Niterói, 2007.

⁸¹ MIRANDA, F. M. **Variações de salinidade na Lagoa de Araruama, RJ**. 2013. 43p. Projeto Final (Graduação) - Universidade Federal Fluminense, 2013.

Olhando um pouco mais a fundo a biogeoquímica, o primeiro trabalho a estudar os processos tróficos na laguna de Araruama foi de André, Oliveira *et al.*⁸². Contudo, o primeiro estudo realmente sistemático dos processos de eutroficação da laguna remonta ao início da década de 1990, realizado por Moreira-Turcq⁸³. É muito provável que a autora não intencionasse estudar um ano tão úmido, mas ela não pôde considerar o ano de 1990 como típico e tratou o problema como uma exceção. Em um ano normal, era de se esperar encontrar uma produção primária fitobentônica (microorganismos de fundo), com uma água muito transparente, mas a autora encontrou um quadro muito diferente, com a transparência muito reduzida, uma produção do plâncton (microalgas) muito elevada e um fitobentos pouco significativo (devido à redução na transparência da água). Se o quadro de pluviosidade continuasse alguns anos mais, é muito provável que houvesse mortandades, em uma reprodução daquilo que vem acontecendo atualmente.

Souza⁸⁴ fez o mesmo tipo de estudo nos anos seguintes e conseguiu pela primeira vez avaliar o sistema em suas condições normais. Nesse estudo, o autor observou alguns pontos importantes que justificavam a aparentemente boa qualidade do ecossistema na época, dentre eles o fato de a laguna ter suas águas oligotróficas (pouca contaminação por nutrientes), gerando uma muito baixa produção primária da água, em um sistema altamente limitado pelo fósforo. Souza⁸⁵ observou ainda que o sistema apresentava grande parte de sua produção fitoplanctônica no sedimento (fitobentos) e, por essa razão, a laguna teria suas águas perfeitamente transparentes. A associação da produção algal no sedimento corrobora o que foi discutido no item 4 do presente capítulo, indicando que os nutrientes que eram incorporados na laguna tendiam a se acumular no sedimento. Embora o autor não tenha mencionado isso de maneira explícita, nós acreditamos que os aportes de nutrientes ao longo dos anos foram sendo acumulados continuamente no sedimento. Isso já tinha sido observado no modelo desenvolvido por Cunha e Wasserman¹ para a laguna de Piratininga, onde o sedimento constitui o principal reservatório que alimenta a produção primária da laguna, sendo os esgotos domésticos responsáveis por menos de 10% das necessidades das plantas. Não quer dizer que os esgotos não sejam importantes para a degradação do sistema, mas eles só são importantes quando os aportes são perenes durante muitos anos. Se o aporte (acréscimo) é de 10% ao ano, então a cada dez anos os estoques duplicam. No caso de Araruama, verificando o crescimento populacional desde os anos 1970 (Figura 7), concluímos que os estoques de nutrientes do sedimento já devem ter aumentado várias vezes.

Continuando a evolução do conhecimento dos processos biogeoquímicos da laguna de Araruama, identificamos a dissertação de mestrado de Souza⁸⁶, que agora identificou também as fontes de nutrientes para o ecossistema, avaliando os aportes oriundos dos rios da região. Ele observou que os principais rios, responsáveis por mais de 90 % dos aportes

⁸² ANDRÉ, D. L. *et al.* **Estudo Preliminar Sobre as Condições Hidroquímicas da Lagoa de Araruama, Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: Ministério da Marinha. Instituto de Pesquisas da Marinha, 1981. p.21.

⁸³ MOREIRA-TURCQ, P. F. Impact of a low salinity year on the metabolism of a hypersaline coastal lagoon (Brazil), *op. cit.*

⁸⁴ SOUZA, M. F. L. **Distribuição Espacial, Sazonal e Fontes Fluviais de Nutrientes na Lagoa de Araruama - RJ**, *op. cit.*

⁸⁵ *Ibid.*

⁸⁶ *Ibid.*

de água doce, estão na porção Oeste da laguna (rio das Moças, Mataruna e rio Salgado), que é a parte mais restrita e mais distante da renovação do canal de Itajuru e mais sujeita à degradação. Quase que profeticamente, Souza⁸⁷ concluiu que a intensificação dos aportes de nutrientes para o ecossistema poderia promover uma mudança de produção fitobentônica para fitoplanctônica, condição irreversível, visto que o desenvolvimento da produção biológica do sedimento depende da transparência da água, mas, com as microalgas na coluna d'água, a luz não penetra mais e não mais é possível a produção fitobentônica.

Ainda no final dos anos 1990, o nosso grupo de pesquisas da UFF fez um monitoramento na região do entorno do que seria o empreendimento Ilhas Perynas (dados não publicados). O estudo abrangeu a região da Enseada do Siqueira, onde observamos uma intensa produção de macroalgas (*Ulva lactuta*). As folhas eram realmente de enormes dimensões, mas apareciam apenas no meio e final do verão, morrendo antes do início do inverno. Pelo que observamos, as algas começavam a se desenvolver no início do verão, pois a salinidade caía e os aportes de nutrientes aumentavam como resultado das chuvas e do aumento da população de veraneio no município de Cabo Frio, respectivamente. É interessante notar que a produção das macroalgas não deixava sedimentos lamosos, ricos em matéria orgânica, como é comum nesse tipo de sistema. Em um trabalho de campo recente, realizado na mesma região, observamos que as algas da Enseada do Siqueira ainda estão se desenvolvendo da mesma forma.

Ainda no final da década de 1990, foram feitas avaliações da capacidade de retenção de nitrogênio o fósforo pelas macroalgas da laguna. Nesse estudo, Lourenço, Barbarino et al.⁸⁸ estudaram as variações nas concentrações dos nutrientes nas espécies *Acanthophora spicifera*, *Chaetomorpha crassa*, *Derbesia vaucheriaeformis*, *Gracilaria cervicornis*, *Gracilariopsis tenuifrons*, *Hypnea valentiae*, *Rhizoclonium afficanum* e *Ulva lactuca*, observando que o elemento determinante da produção era o fósforo. A intensa retirada do fósforo da coluna d'água pelas algas promovia a restrição na produção primária fitoplanctônica, mesmo nas áreas onde os aportes eram mais significativos, como nas praias de São Pedro da Aldeia e do centro de Araruama. Nesse período, foi realizado um estudo que identificou os foraminíferos do bentos (grupo de microalgas que desenvolvem microconchas carbonáticas), o que chamamos mais acima de fitobentos. Assim, a partir da coleta de mais de 90 amostras de sedimento, Debenay, Geslin et al.⁸⁹ identificaram a dominância das espécies *Triloculina oblonga* e *Ammonia tepida*, além da menos abundante *Cribolephidium excavatum*, espécies consideradas típicas de ambientes hipersalinos, com sedimentos arenosos e carbonáticos.

Fechando a caracterização do fitobentos, o mesmo grupo de pesquisas da Universidade de São Paulo e da Université de Angers (França) estudou o grupo das diatomáceas presentes nos sedimentos da laguna⁹⁰. Eles observaram que algumas assembleias de diatomáceas dominadas por espécies eurihalinas (que suportam largas variações nas concentrações de sais) eram muito abrangentes, particularmente

⁸⁷ *Ibid.*

⁸⁸ LOURENÇO, S. O. et al. Seasonal variations in tissue nitrogen and phosphorus of eight macroalgae from a tropical hypersaline coastal environment. *Cryptogamie Algologie*, v. 26, n. 4, p. 355-371, Nov. 2005. ISSN 0181-1568.

⁸⁹ DEBENAY, J. P. et al. Foraminiferal assemblages in a hypersaline lagoon, Araruama (RJ) Brazil. *Journal of Foraminiferal Research*, v. 31, n. 2, p. 133-151, Apr. 2001. ISSN 0096-1191.

⁹⁰ SYLVESTRE, F. et al. Modern benthic diatom distribution in a hypersaline coastal lagoon: the Lagoa de Araruama, RJ, Brazil. *Hydrobiologia*, v. 443, n. 1-3, p. 213-231, Jan. 2001. ISSN 0018-8158.

Cocconeis placentula, *Catenula adhaerens* e *Cocconeis diminuta*. Os autores observaram também a presença das espécies *Nitzschia* spp e *Fallacia cryptolyra* como indicadoras de contaminação antrópica por esgotos. Embora essas espécies não fossem dominantes, sua extensa distribuição na laguna demonstrava que os impactos da ocupação do entorno já começavam a se fazer sentir (na época em que o estudo foi realizado).

À medida que avançamos na década de 2000, a água da laguna permaneceu oligotrófica, baseada em uma cada vez mais intensa produção bentônica, mas, no mês de maio de 2005, da noite para o dia, a laguna modificou completamente seus processos tróficos, concretizando o que vinha sendo previsto pelos diversos pesquisadores desde o início da década de 1990. No início de 2005, o grupo de pesquisa da REMADS-UFF estava fazendo um extenso trabalho de levantamento batimétrico da laguna, e pudemos observar que, embora a qualidade da água estivesse se degradando nas regiões próximas às fontes de nutrientes (centro de Araruama e São Pedro da Aldeia), com uma intensa produção de macroalgas, na maior parte do sistema as águas permaneciam transparentes. Terminamos nosso trabalho ainda em abril de 2005 e, ao retornar à laguna, observamos com muita surpresa a cor castanha da água. Na época foram lançadas muitas conjecturas sobre as razões pelas quais o processo estava ocorrendo; autoridades municipais chegaram a aventar que a mudança teria sido provocada pela dragagem do canal de Itajuru, pois a draga teria perfurado um depósito de ferro (hipótese que não tinha nenhuma possível fundamentação científica).

Infelizmente, naquele período (como atualmente), não havia em andamento nenhum estudo ou programa de monitoramento consistente da qualidade da água que pudesse demonstrar, a partir de dados científicos, o aumento na produção fitoplanctônica, a diminuição na produção bentônica e suas relações com os processos tróficos (relacionados à disponibilidade de nutrientes). Alguns anos após a mudança, foram publicadas duas dissertações de mestrado que fizeram uma avaliação superficial dos processos. No primeiro trabalho, Mello⁹¹ fez apenas três coletas, no período de final de primavera e início do verão, com amostragens na margem da laguna e mais uma amostragem no meio da laguna (12 amostras). Embora o estudo seja muito restrito temporalmente, a autora identifica a significativa mudança de sistema controlado pela produção bentônica (anterior a 2005) para sistema controlado pela produção planctônica, o que atribuiu à água a coloração acastanhada. Alguns pontos interessantes do trabalho chamaram a atenção como, por exemplo, a melhor qualidade da água ser observada no Canal de Itajuru, apesar da presença de inúmeras fontes antrópicas (incluindo a estação de tratamento da PROLAGOS). A autora atribuiu a melhor qualidade da água à mais intensa troca de água com o mar nessa região.

É interessante notar que as amostras coletadas nas margens apresentaram resultados muito distintos dos resultados observados nas amostras coletadas no meio da laguna. Embora a autora não mencione, é evidente pelos seus resultados que coletas nas margens sofrem uma grande influência do batimento das ondas (mesmo muito pequenas), que removem de maneira significativa o fundo e não permitem uma distinção dos processos que ocorrem na coluna d'água e no sedimento. Concluímos assim que, para fins de avaliação da qualidade da água, as amostragens precisam ser feitas no meio da laguna e de barco (sem remexer o fundo).

⁹¹ MELLO, T. B. M. Caracterização biogeoquímica da Lagoa de Araruama, RJ, *op. cit.*

No ano seguinte, Guerra⁹² fez um estudo mais focado nos sedimentos, mas com uma abrangência muito inferior à da primeira autora, coletando apenas três estações e estudando alguns indicadores dos aportes antrópicos e da atividade bacteriana no fundo da laguna. Embora ele não esclarecesse os processos que modificaram as condições da laguna, conseguiu identificar de maneira inequívoca a presença de aportes de esgoto doméstico nos sedimentos, principalmente na região do Centro de Araruama.

Outros estudos ainda foram realizados na região, mas abrangendo aspectos como a dinâmica da ictiofauna e as estatísticas de pesca na região⁹³, ou a cadeia trófica de peixes⁹⁴, além dos estudos de revisão mais abrangentes publicados pelo Consórcio Intermunicipal Lagos-São João^{95,96}, que contribuíram de maneira significativa para o conhecimento da laguna, mas não permitem avançar no entendimento dos processos de eutroficação.

Atualmente, existem diversos programas de monitoramento da laguna de Araruama, realizados por demanda do Comitê de Bacias Lagos-São João, do Consórcio Intermunicipal Lagos-São João e de outras instituições locais, que estão sendo executados pelos gestores dos recursos hídricos, incluindo as empresas de águas da região. Contudo, os estudos que vêm sendo feitos são exageradamente fragmentados, abrangendo os problemas de maneira muito superficial, a partir de medições de parâmetros físico-químicos feitos à beira da laguna. Mesmo com frequência quinzenal, semanal ou diária, esses monitoramentos não permitem tirar conclusões. Atualmente, nossa equipe de pesquisa está fazendo uma análise integrada dos resultados desses monitoramentos, tentando identificar os processos a fim de determinar as medidas de mitigação para recuperar o ecossistema.

Conclusões

Após estas páginas de discussão sobre qualidade da água e sua relação com os processos tróficos e florações algais, e sobre o conhecimento a respeito da laguna de Araruama, seria possível identificar as causas de mortandades de peixes?

Inicialmente, podemos dizer que as consecutivas mortandades de peixes na laguna de Araruama não têm como causa principal a anoxia ou hipoxia. Mesmo que possam ocorrer anoxias em áreas localizadas, ela não é abrangente em toda a laguna, permitindo aos peixes se deslocar para áreas com oxigenação suficiente. Embora localmente os sedimentos estejam muito ricos em matéria orgânica, a laguna apresenta uma sedimentação muito carbonática e arenosa; assim, os processos de anoxia relatados para lagoas como a Rodrigo de Freitas não ocorrem nesse sistema.

⁹² GUERRA, L. V. **Processos microbiológicos e composição da matéria orgânica relacionados à eutrofização de uma lagoa costeira hipersalina, L. Araruama, RJ.** 2008. 108p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Geoquímica, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2008.

⁹³ SAAD, A. M. **Composição, distribuição espacial, dinâmica de populações de peixes e estatística pesqueira na lagoa hipersalina de Araruama, RJ.** 2003. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2003.

⁹⁴ ALMEIDA-SILVA, P. H. et al. Trophic ecology and food consumption of fishes in a hypersaline tropical lagoon. **Journal of Fish Biology.** v. 86, n. 6, p. 1781-1795, Jun. 2015. ISSN 0022-1112.

⁹⁵ BIDEGAIN, P.; PEREIRA, L. F. M. **Plano das Bacias Hidrográficas da Região dos Lagos e do Rio São João. Araruama, RJ: Consórcio Intermunicipal Lagos São João.** CILSJ, 2005. p.87.

⁹⁶ BIDEGAIN, P.; VÖLCKER, C. M. **Bacia Hidrográfica dos rios São João e Ostras: Águas, Terras e Conservação Ambiental.** Araruama, RJ: Consórcio Intermunicipal Lagos São João, 2003. 177p.

A laguna de Araruama, como ambiente hipersalino perene, teve, durante um longo período que deve remontar a pelo menos 4000 anos (período em que o nível do mar atinge a altura atual), uma sedimentação carbonática e uma intensa acumulação de nutrientes nos sedimentos, garantindo baixa produtividade na coluna d'água (ambiente oligotrófico). A ocupação humana nos últimos 45 anos, os aportes de nutrientes passaram a ser intensificados, mas o sistema manteve o processo de estocagem dessa poluição no sedimento. Em 2005, parece que ocorreu uma mudança, a capacidade de suporte do sistema aparentemente se esgotou, e os nutrientes passaram a alimentar uma produção primária fitoplanctônica que atribuiu uma intensa coloração acastanhada às águas da laguna. São essas florações que parecem estar causando mortandades de peixes.

Como pode ser constatado ao longo do texto que descreve o conhecimento que já temos dessa laguna, o processo de eutroficação é resultado de uma evolução dos aportes de nutrientes com o passar dos anos. Os aportes antes das concessões de serviços de fornecimento de água e esgoto foram importantes, mas os aportes depois das concessões também têm contribuído. Podemos dizer que o crescimento populacional verificado nos últimos anos é o responsável pela eutroficação.

Duas grandes mortandades ocorridas em 2009 e 2011 certamente foram resultado da crescente eutroficação da laguna como um todo, do processo de acumulação e liberação de nutrientes a partir do sedimento e do processo de dessalinização da laguna.

Concluimos que as ações de transposição de águas das estações de tratamento da região da laguna para o rio Una devem ser ações positivas para a laguna. Contudo, a melhoria da qualidade da água ainda depende do esgotamento do estoque de nutrientes do sedimento. Os estudos que o grupo da REMADS-UFF está desenvolvendo poderão indicar o tempo necessário para esgotamento completo do estoque. Por outro lado, consideramos crucial que seja iniciado rapidamente um programa de monitoramento avaliando todos os parâmetros necessários ao entendimento dos processos no sistema.

Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa ProLagos S. A. - Concessionária de Serviços Públicos de Água, que forneceu a oportunidade de realizar este trabalho. Julio Cesar Wasserman também agradece ao CNPq por sua bolsa de produtividade em pesquisa (processo número 306714/2013-2). Ângelo Cesar Carvalho, Murilo de Carvalho Vicente e Teresa Cristina Soares de Mello Guimarães agradecem por suas bolsas de mestrado e doutorado CNPq e CAPES, respectivamente, no Programa de Geoquímica da UFF.