



## Artigo Original

e-ISSN 2177-4560

DOI: 10.19180/2177-4560.v14n12020p81-97

Submetido em: 21 fev. 2020

Aceito em: 09 mar. 2020

# *Lagoas costeiras urbanas sujeitas a impactos antrópicos via aporte de efluentes: aspectos gerais e a concentração de metano na Lagoa Imboassica, Macaé, RJ*

**André Luiz dos Santos Fonseca**  <https://orcid.org/0000-0002-6334-6063>

Doutor em Ecologia e Recursos Naturais pela Universidade Federal de São Carlos. Professor do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia Fluminense (IFFluminense, Campus Cabo Frio) – Cabo Frio/RJ – Brasil. E-mail: andrefonsecabio@gmail.com

**Claudio Cardoso Marinho**  <https://orcid.org/0000-0003-0175-7227>

Doutor em Ciências Biológicas (Biofísica) pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) – Rio de Janeiro/RJ – Brasil. E-mail: claudiocardosomarinho@gmail.com.

**Murilo Minello**  <https://orcid.org/0000-0002-3037-9221>

Mestre em Ecologia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Professor do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro (IFRJ) - Rio de Janeiro/RJ – Brasil. E-mail: murilo.minello@ifrj.edu.br

**Francisco de Assis Esteves**  <https://orcid.org/0000-0003-2292-3589>

Doutor pelo Max-Planck Institut für Limnologie - Universität Kiel (Christian-Albrechts). Professor Titular da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) - Rio de Janeiro/RJ – Brasil. E-mail: festeves@globocom

As lagoas costeiras ocupam 13% da costa do planeta. No Brasil, ocorrem ao longo de toda a costa, com destaque para os Estados do Rio de Janeiro e Rio Grande do Sul. Em função de sua localização geográfica, as lagoas costeiras estão sujeitas a diversos impactos antrópicos. Ações multidisciplinares mitigadoras desses impactos são imprescindíveis para a mudança das condições atuais das lagoas costeiras do litoral brasileiro. Para isso, é necessário um maior conhecimento dos impactos causados e suas consequências para o funcionamento desses ecossistemas. O aporte de esgoto é um dos impactos ambientais e está diretamente relacionado ao aumento de produtividade do ecossistema. Por sua vez, quanto maior a produtividade aquática em águas lânticas, maior a emissão de metano para a atmosfera. Em um esforço para entender melhor a influência da eutrofização sobre o ciclo do metano, nós analisamos a concentração de metano no sedimento em quatro regiões da Lagoa Imboassica que apresentam diferentes características ambientais. Em cada região, foram coletados testemunhos de sedimento de 10 cm, que foram subdivididos em cinco perfis de 2 cm. Nós analisamos a concentração de metano na água intersticial do sedimento em cada perfil. Nós observamos que as regiões da lagoa influenciadas pelo aporte de esgoto apresentaram as maiores concentrações de metano no sedimento. Concluimos que o tratamento de esgoto é fundamental para a mitigação da eutrofização e, conseqüentemente, da produção de metano no ecossistema.

Palavras-chave: Metanogênese. Sedimento. Eutrofização. Matéria orgânica. Esgoto.





Lagoas costeiras urbanas sujeitas a impactos antrópicos via aporte de efluentes: aspectos gerais e a concentração de metano na Lagoa Imboassica, Macaé, RJ

André Luis dos Santos Fonseca et al.

*Urban coastal lagoons subject to anthropic impacts via effluent input: general aspects and the concentration of methane in Lagoa Imboassica, Macaé, RJ*

Coastal lagoons occupy 13% of the planet's coast. In Brazil, they occur along the entire coast, with emphasis on the states of Rio de Janeiro and Rio Grande do Sul. Due to their geographic location, coastal lagoons are subject to several anthropic impacts. Multidisciplinary actions to mitigate these impacts are essential for changing the current conditions of coastal lagoons on the Brazilian coast. For this, it is necessary to have a better knowledge of the impacts caused and their consequences for the functioning of these ecosystems. Sewage input is one of the environmental impacts and is directly related to the increase in ecosystem productivity. In turn, the higher the aquatic productivity in lentic water, the greater the emission of methane into the atmosphere. In an effort to better understand the influence of eutrophication on the methane cycle, we analyzed the concentration of methane in the sediment in four regions of the Imboassica lagoon that have different environmental characteristics. In each region, 10 cm sediment cores were collected, which were subdivided into five 2 cm profiles. We analyzed the methane concentration in the sediment's interstitial water in each profile. We observed that the lagoon regions influenced by the sewage supply had the highest concentrations of methane in the sediment. We conclude that sewage treatment is essential to mitigate eutrophication and, consequently, methane production in the ecosystem.

Keywords: Methanogenesis. Sediment. Eutrophication. Organic matter. Sewage.

*Lagunas costeras urbanas sujetas a impactos antrópicos a través de la entrada de efluentes: aspectos generales y la concentración de metano en Lagoa Imboassica, Macaé, RJ*

Las lagunas costeras ocupan el 13% de la costa del planeta. En Brasil, ocurren a lo largo de toda la costa, con énfasis en los estados de Río de Janeiro y Rio Grande do Sul. Debido a su ubicación geográfica, las lagunas costeras están sujetas a varios impactos antrópicos. Las acciones multidisciplinarias para mitigar estos impactos son esenciales para cambiar las condiciones actuales de las lagunas costeras en la costa brasileña. Para esto, es necesario tener un mejor conocimiento de los impactos causados y sus consecuencias para el funcionamiento de estos ecosistemas. El aporte de aguas residuales es uno de los impactos ambientales y está directamente relacionado con el aumento de la productividad del ecosistema. A su vez, cuanto mayor es la productividad acuática en el agua léntica, mayor es la emisión de metano a la atmósfera. En un esfuerzo por comprender mejor la influencia de la eutrofización en el ciclo del metano, analizamos la concentración de metano en el sedimento en cuatro regiones de la laguna Imboassica que tienen diferentes características ambientales. En cada región, se recogieron núcleos de sedimentos de 10 cm, que se subdividieron en cinco perfiles de 2 cm. Analizamos la concentración de metano en el agua intersticial del sedimento en cada perfil. Observamos que las regiones de la laguna influenciadas por el suministro de aguas residuales tenían las concentraciones más altas de metano en el sedimento. Concluimos que el tratamiento de aguas residuales es esencial para mitigar la eutrofización y, en consecuencia, la producción de metano en el ecosistema.

Palabras clave: Metanogénesis. Sedimento. Eutrofización. Materia orgánica. Aguas residuales.



Lagoas costeiras urbanas sujeitas a impactos antrópicos via aporte de efluentes: aspectos gerais e a concentração de metano na Lagoa Imboassica, Macaé, RJ

André Luis dos Santos Fonseca et al.

## 1 Introdução

As lagoas costeiras ocupam 13% da costa do planeta (BARNES, 1980). No Brasil, ocorrem ao longo de toda a costa, com destaque para os Estados do Rio de Janeiro e Rio Grande do Sul (ESTEVES, 1998). Em geral, as lagoas costeiras são ecossistemas rasos, ou seja, que apresentam profundidade média com no máximo três metros (SCHEFFER, 2004). Tais características intensificam as interações da coluna d'água com sedimentos, além de favorecer a presença de estandes de macrófitas aquáticas (MARINHO *et al.*, 2016).

Esses ecossistemas apresentam elevada produtividade, tanto na coluna d'água como na região bentônica, além de apresentarem elevada variedade de *habitat* para muitas espécies de produtores, consumidores e predadores (KENNISH; PAERL, 2010).

Além disso, as lagoas costeiras fornecem diversos serviços ecossistêmicos, tais como: lazer, beleza cênica, controle de inundações, diluição de efluentes, assim como valorização imobiliária no seu entorno e valorização turística da região. Esses ecossistemas possuem também relevância socioeconômica, pois fornecem água para o abastecimento, para o agronegócio e para a indústria.

### 1.1 Características gerais

As lagoas costeiras podem ser caracterizadas em função de diferentes aspectos, tais como:

1) Processo de formação:

- a) Lagoas formadas pelo isolamento de enseada ou braços de mar por cordões de areia;
- b) Lagoas formadas pelo fechamento de desembocaduras de rios por sedimentos marinhos;
- c) Lagoas formadas pelo fechamento da desembocadura de rios por recifes de corais;
- d) Lagoas formadas pelo fechamento da desembocadura de rios por sedimentos fluviomarinhos;
- e) Lagoas formadas nas depressões entre faixas de areia que constituem as restingas.

2) Geomorfologia dos canais que as conectam com o oceano (KJERFVE, 1994):

- a) Lagunas sufocadas são caracterizadas por uma única ligação estreita com o mar;
- b) Lagunas restritas têm normalmente dois ou mais canais de ligação que permanecem conectados com o mar em tempo integral;

c) Lagunas abertas são caracterizadas pela presença de numerosas enseadas e a presença de um ou mais canais que permitem uma troca intensa da água da laguna com o oceano.

3) Quanto à concentração de sais dissolvidos, ou seja, em relação a valores de salinidade na água (BULGER *et al.*, 1998):

- a) limnéticas: com valores de salinidade entre 0 e 0,5;
- b) oligohalinas: salinidade entre 0,5 e 5;
- c) mesohalinas salinidade entre 5 e 18;
- d) polihalinas: salinidade entre 18 e 30;



Lagoas costeiras urbanas sujeitas a impactos antrópicos via aporte de efluentes: aspectos gerais e a concentração de metano na Lagoa Imboassica, Macaé, RJ

André Luis dos Santos Fonseca et al.

- e) euhalinas: salinidade entre 30 e 40;  
f) hiperhalinas: salinidade superior a 40.

4) Quanto à coloração da água (ESTEVES, 1998):

a) Águas claras: geralmente lagunas formadas de água de origem oceânica e/ou de rios que percorrem terrenos com baixa concentração de matéria orgânica solúvel.

b) Águas escuras: Em geral têm sua origem de águas do lençol freático de regiões arenosas ou de rios que percorrem terrenos com elevada concentração de matéria orgânica em decomposição. Essa matéria orgânica disponibiliza substâncias húmicas solúveis, responsáveis pela coloração que varia do amarelo a marrom, dependendo da concentração dessas substâncias.

## 1.2 Impactos antrópicos

Como quaisquer outros ecossistemas aquáticos continentais, as lagoas costeiras encontram-se sob certas diretrizes quanto à sua proteção. Um dos aspectos importantes diz respeito à Faixa Marginal de Proteção (FMP), necessária à proteção, defesa, conservação e operação de sistemas fluviais e lacustres. Essas faixas de terra são de domínio público, e suas larguras são determinadas em projeção horizontal, considerados os níveis máximos de água (NMA), de acordo com as determinações dos órgãos federais e estaduais (Lei Estadual nº 1.130/87).

Infelizmente, grande parte dos corpos d'água não tem sua FMP preservada, acarretando a ocupação irregular de suas margens e provocando uma série de outros impactos. Dentre esses corpos d'água, encontram-se as lagoas costeiras. A ocupação de sua FMP acarreta a impermeabilidade do solo nas margens, dificultando a drenagem da água das chuvas, provocando o aumento do volume de água nas cheias e impossibilitando o abastecimento dos lençóis freáticos. Outro aspecto relevante é a potencialização de processos erosivos, além do desmoronamento das margens, provocando aporte de material para a lagoa e promovendo redução da sua profundidade.

Em função de sua localização geográfica, as lagoas costeiras estão particularmente sujeitas aos seguintes impactos antrópicos: lançamento de efluentes domésticos e industriais, aterramentos e edificações nas margens, assoreamento, retirada de sedimento, degradação da vegetação no seu entorno e nos seus tributários, introdução de espécies exóticas, sobrepesca e aberturas artificiais da barra arenosa que separa o corpo hídrico do mar (ESTEVES, 1998a; ESTEVES *et al.*, 2008).

Esses impactos acarretam a alteração ou perda de *habitat*, comprometendo tanto a sobrevivência de muitas espécies quanto o fornecimento de diversos serviços ecossistêmicos. Muitos dos impactos são decorrentes do processo de urbanização, tendo em vista a rápida expansão urbana na região costeira. Muitos são os exemplos de lagoas costeiras urbanas brasileiras que se encontram em avançado estágio de degradação.



Lagoas costeiras urbanas sujeitas a impactos antrópicos via aporte de efluentes: aspectos gerais e a concentração de metano na Lagoa Imboassica, Macaé, RJ

André Luis dos Santos Fonseca et al.

### 1.3 Aporte de efluentes

Dentre os impactos antrópicos a que estão sujeitas as lagoas costeiras, um dos mais relevantes consiste no lançamento de efluentes *in natura*. Esses efluentes podem ser de origem doméstica, industrial ou estar relacionados ao agronegócio. Em geral, os efluentes domésticos são ricos em matéria orgânica e nutrientes, como nitrogênio e fósforo, mas também podem apresentar contaminantes emergentes. Segundo a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, contaminantes emergentes são

poluentes que, atualmente, não são incluídos em programas de monitoramento e que podem se tornar candidatos para legislações futuras, dependendo de pesquisas sobre a toxicidade, efeitos sobre a saúde, percepção pelo público e dados sobre sua ocorrência em vários ambientes (USEPA, 2011).

Essas substâncias podem ser classificadas como persistentes, bioacumulativas e tóxicas; contaminantes orgânicos globais; produtos de higiene pessoal e produtos farmacêuticos; perturbadores endócrinos e, ainda, as nanopartículas.

Os efluentes ricos em matéria orgânica, como o esgoto doméstico ou os dejetos de animais, assim como adubos químicos, promovem uma série de alterações na coluna d'água e no sedimento, como o processo de eutrofização artificial, a perda de diversidade de espécies e o aumento drástico dos valores de produtividade. Em tais condições, podem ocorrer florações de algas ou intensa expansão dos bancos de macrófitas aquáticas. Tais condições promovem ainda mais o aumento de matéria orgânica na coluna d'água, e posterior deposição no sedimento, alterando sua estrutura e composição. Essas alterações podem intensificar os processos de respiração e decomposição da matéria orgânica, diminuindo consideravelmente os valores de oxigênio dissolvido na água. Nesse caso, os processos redutores, ou seja, que acontecem em anaerobiose, são potencializados. Dentre eles, podemos destacar a desnitrificação e a metanogênese, processos responsáveis pela produção de dois importantes gases relacionados ao efeito estufa, o óxido nitroso e o metano, respectivamente.

Já o aporte de substâncias químicas tóxicas, como metais pesados e contaminantes orgânicos, pode promover sérios riscos não só ao ambiente, mas também para a população em geral. As principais fontes de poluição por metais pesados são provenientes dos efluentes industriais, como a mineração e atividades agrícolas (AGUIAR *et al.*, 2002). Um dos grandes representantes de contaminantes orgânicos são os agrotóxicos. Nas áreas urbanas, são os agrotóxicos não agrícolas, conhecidos como pesticidas urbanos, pesticidas residenciais ou domissanitários, utilizados no combate às pragas urbanas, para evitar surtos e epidemias, e no uso doméstico, para evitar proliferação de espécies indesejáveis nos domicílios (DUAVI *et al.*, 2015). Quando presentes no meio ambiente, esses contaminantes podem se deslocar entre diferentes compartimentos como sedimento ou biota de ecossistemas aquáticos.



Lagoas costeiras urbanas sujeitas a impactos antrópicos via aporte de efluentes: aspectos gerais e a concentração de metano na Lagoa Imboassica, Macaé, RJ

André Luis dos Santos Fonseca et al.

#### 1.4 Ações mitigadoras

Apesar de inúmeras pesquisas realizadas no litoral fluminense, as lagunas ainda são pouco estudadas, principalmente do ponto de vista geomorfológico e geológico. Conhecer a dinâmica e a formação das lagunas pode auxiliar no gerenciamento costeiro, cada vez mais necessário em virtude da concentração populacional nessas áreas (SILVESTRE; SILVA 2016). O processo de eutrofização resultante do lançamento de esgotos em corpos d'água também pode ser crítico, pois pode criar essas condições que potencializam os efeitos das substâncias tóxicas por tornarem estas mais solúveis e biodisponíveis, como no caso de diversos estuários ao longo da costa brasileira (DRUDE; OLAF, 2008).

Estratégias de conservação multidisciplinares, que possibilitem a integração das várias áreas do conhecimento científico, além da participação dos órgãos governamentais, setor privado e a sociedade em geral, podem fornecer condições para mudança das condições atuais das lagoas costeiras do litoral brasileiro (ESTEVES *et al.*, 2008). De acordo com Setti *et al.* (2011),

a gestão de águas é uma atividade analítica e criativa voltada à formulação de princípios e diretrizes, para o preparo de documentos orientadores e normativos, estruturação de sistemas gerenciais e tomada de decisões que têm por objetivo final promover o inventário, uso, controle e proteção dos recursos hídricos.

O gerenciamento de recursos hídricos requer uma série de desafios, pois envolve a resolução de questões econômicas, sociais e ambientais, necessitando de uma abordagem multidisciplinar, interdisciplinar ou transdisciplinar. Com intuito de prever os impactos futuros, e propor soluções que resolvam ou mitiguem tais impactos, são necessárias pesquisas que forneçam informações necessárias para o conhecimento do funcionamento dos ecossistemas aquáticos, amparando os gestores de recursos hídricos, com relação a aspectos não apenas legais, mas também técnicos (MARINHO, 2018).

Dentre as intervenções, podemos destacar como atividade preliminar o levantamento em relação à ocupação do solo da bacia hidrográfica onde está localizada a lagoa costeira (DUARTE; MARÇAL, 2010; LIMA *et al.*, 2017). Tal levantamento pode apontar a possibilidade de um manejo capaz de reduzir o aporte de matéria orgânica e nutrientes. Pode indicar também aspectos negativos, como a redução da vegetação, dragagem ou retificações de rios, além de atividades econômicas potencialmente poluidoras, assim como aspectos positivos, como a presença de Estação de Tratamento de Efluentes (SANTOS; FERREIRA, 2014), manejo para aumento da drenagem das vias, diminuindo as fontes difusas de aporte de efluentes. Após esse levantamento, será possível apontar intervenções capazes de minimizar os impactos ambientais.

Para remoção de matéria orgânica e nutrientes, podem ser realizados os processos de abertura da barra de areia que separa a lagoa do mar ou dragagem do sedimento. Essas intervenções provocam alterações drásticas na coluna d'água e sedimento. No caso da abertura da barra de areia, ocorre a exportação de nutrientes e matéria orgânica, com considerável redução da profundidade da coluna d'água possibilitando a ocorrência de exposição do sedimento, além de aumento da salinidade. Esse procedimento deve atender a determinados requisitos, buscando amenizar os impactos, além de



Lagoas costeiras urbanas sujeitas a impactos antrópicos via aporte de efluentes: aspectos gerais e a concentração de metano na Lagoa Imboassica, Macaé, RJ

André Luis dos Santos Fonseca et al.

estabelecimento de um monitoramento quanto às condições das lagoas e de parâmetros climáticos, que buscam prever quando realizar as aberturas (SANTOS *et al.*, 2105). Já em relação à dragagem, ocorrem alterações significativas na estrutura do sedimento como o aumento da profundidade das lagoas, provocando alterações na sua hidrodinâmica e aporte de material para a coluna d'água, além de biodisponibilizar alguns compostos que se encontravam imobilizados no sedimento.

Outra questão relevante com relação à abertura artificial da barra de areia consiste na entrada de organismos de origem marinha. Algumas dessas espécies com interesse econômico, como peixes e camarões, são muito valorizadas. Por isso, o processo de abertura da barra de areia funciona também como importante mecanismo de introdução de espécies de interesse econômico para a atividade pesqueira.

A instalação de estações de tratamento de esgoto (ETEs) é mais adequada como forma de minimizar o aporte de matéria orgânica, nutrientes (principalmente nitrogênio e fósforo) e poluentes, como metais pesados e compostos orgânicos, defensivos agrícolas, fármacos, entre outros. As ETEs podem utilizar processos baseados em fenômenos químicos ou físicos, até biológicos, como decomposição por microrganismos ou absorção de nutrientes por plantas aquáticas. Esses processos podem estar baseados em operações que realizem atividades que os caracterizem como primários (sólidos grosseiros ou sedimentáveis), secundários (sólidos inorgânicos, dissolvidos orgânicos ou em suspensão) ou terciários (remoção de substâncias orgânicas ou inorgânicas dissolvidas).

Alguns estudos mostram que, quanto maior a produtividade aquática em águas lênticas, maior a emissão de metano para a atmosfera (WHITING; CHANTON, 1993; YANG *et al.*, 2015). Considerando que a produtividade aquática aumentará no século XXI devido às mudanças climáticas e à crescente população humana, pode ocorrer um aumento concomitante nas emissões aquáticas de metano. Em um esforço para entender melhor a influência da eutrofização sobre o ciclo do metano, nós analisamos a concentração de metano no sedimento em quatro regiões da Lagoa Imboassica que apresentam diferentes características ambientais.

## 2 Materiais e Métodos

### 2.1 Área de estudo

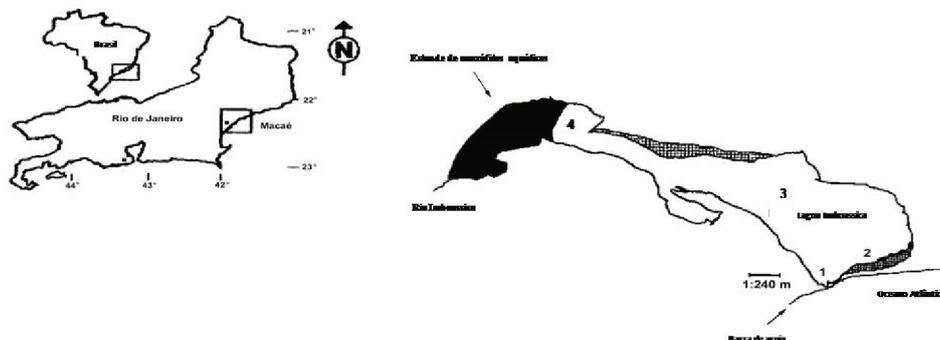
A Lagoa Imboassica está localizada na cidade de Macaé, norte do estado do Rio de Janeiro, Brasil (42° 00' W; 22° 30' S). A lagoa possui uma área superficial de 3,26 km<sup>2</sup>, profundidade média de 1,09 m e profundidade máxima de 2,00 m (PANOSSO *et al.*, 1998). Cerca de 38% de sua área total é colonizada por macrófitas aquáticas, principalmente na região litorânea, de acordo com seu alto índice de desenvolvimento de perímetro e profundidades reduzidas (PANOSSO *et al.*, 1998). Uma barra de areia estreita (~ 30 m de largura) separa a lagoa do mar. Até 2013, a lagoa foi submetida à descarga de esgoto através de um canal de efluentes domésticos (ESTEVEZ, 1998). A partir de 2013, entrou em operação a Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Mutum, reduzindo sensivelmente a entrada de nutrientes e patógenos na lagoa (SANTOS; FERREIRA, 2014).

Lagoas costeiras urbanas sujeitas a impactos antrópicos via aporte de efluentes: aspectos gerais e a concentração de metano na Lagoa Imboassica, Macaé, RJ

André Luis dos Santos Fonseca et al.

De acordo com as características espaciais da Lagoa de Imboassica, distinguimos quatro regiões que representam a heterogeneidade da lagoa para medir a concentração de metano no sedimento. A distribuição das estações de amostragem foi definida como: (1) próximo à barra de areia que separa a lagoa do mar, (2) próximo ao canal de descarga de esgoto, (3) estação limética central e (4) próximo ao estande de macrófitas aquáticas emergentes *Typha domingensis* Pers. e *Eleocharis mutata* (L.) Roem. Et Shult (Figura 1).

Figura 1: Mapa esquemático da localização dos locais de amostragem na lagoa de Imboassica: (1) próximo ao bar de areia que separa a lagoa de Imboassica do mar; (2) próximo à entrada de esgoto; (3) ponto central; (4) o local mais continental colonizado por macrófitas aquáticas



Fonte: Autores (2018).

## 2.2 Coleta de amostras de sedimento

A coleta de amostras de sedimento foi realizada em setembro de 2000. Cada estação foi amostrada uma vez no mesmo dia para as medidas de sedimentos e variáveis abióticas.

Cinco testemunhos de sedimentos de 10 cm de profundidade foram retirados de cada estação usando um amostrador de sedimento modificado proposto por Ambühl & Bühner (1975). Cada testemunho foi subdividido em cinco perfis de 2 cm (0-2 cm, 2-4 cm, 4-6 cm, 6-8 cm e 8-10 cm).

## 2.3 Análise da concentração de metano

As amostras de sedimentos (5 ml) de cada perfil foram colocadas separadamente em frascos de vidro com rolhas de borracha. Foram adicionados 4 mL de NaOH a 4% para expelir metano da água intersticial do sedimento (CASPER, 1992).

No laboratório, os frascos foram fortemente agitados para expelir o metano para a atmosfera interna dos frascos (headspace), e 0,2 mL de gás foram retirados usando seringas e injetados em cromatógrafo a gás (VARIAN Star 3400 - Varian Co., EUA) com temperatura do detector FID a



Lagoas costeiras urbanas sujeitas a impactos antrópicos via aporte de efluentes: aspectos gerais e a concentração de metano na Lagoa Imboassica, Macaé, RJ

André Luis dos Santos Fonseca et al.

220 °C, temperatura do injetor a 120 °C e uma coluna Poropak-Q de 1 m (malha 60/100) a 85 °C e N<sub>2</sub> como gás de arraste.

#### 2.4 Análise das variáveis abióticas

As variáveis abióticas relacionadas à produção de metano foram avaliadas no sedimento da lagoa. Um testemunho de sedimentos foi coletado para medir as concentrações de nitrogênio Kjeldahl (ALLEN *et al.*, 1974), fósforo total (FASSBENDER, 1973) e carbono orgânico (utilizando um TOC-5000 Analyzer Shimadzu Co., Japão) de cada perfil. A partir das concentrações de C, N e P, foram determinadas as razões estequiométricas C:N, N:P e C:P. A razão estequiométrica é um indicador da qualidade da matéria orgânica disponível no ecossistema aquático. Baixas razões C:N e C:P tendem a resultar em maiores eficiências na utilização do substrato pelos microorganismos.

#### 2.5 Análise de dados

Os resultados da concentração de metano na água intersticial foram analisados usando o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis e o pós-teste de Dunn, com um nível de significância de 95%. As comparações foram feitas entre os diferentes perfis de sedimento em cada estação e para os perfis iguais em diferentes estações.

As similaridades entre as amostras de metano e razões C:N, N:P e C:P foram examinadas por meio de uma análise de agrupamento usando a distância euclidiana entre os grupos.

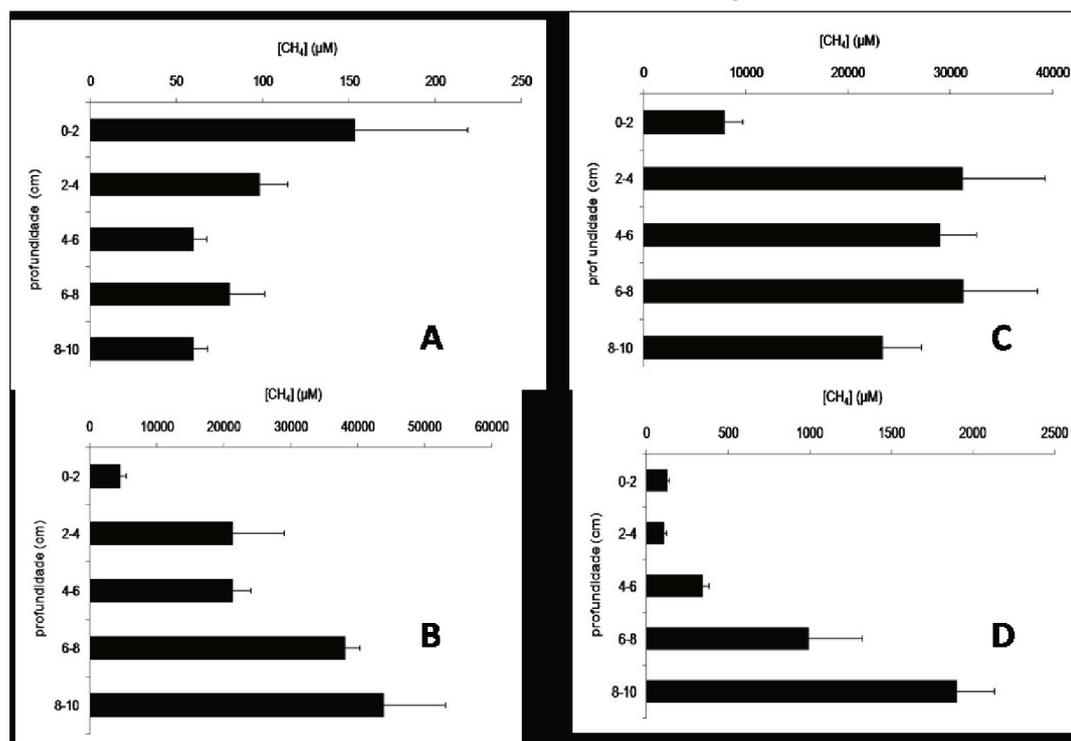
### 3 Resultados

As estações 2 e 3 apresentaram as maiores concentrações de metano na água intersticial em comparação às estações 1 e 4 ( $p < 0,05$ ). A estação 1 apresentou a menor concentração de metano na água intersticial, sem diferença significativa ( $p > 0,05$ ) em relação à estação 4. As concentrações no perfil de metano no sedimento apresentaram um padrão crescente nas estações 2, 3 e 4 e diminuíram na estação 1 (Figura 2). Na estação 1, a fração 0-2 cm apresentou diferenças estatísticas ( $p < 0,05$ ) em relação às frações 4-6 e 8-10 cm. Na estação 2, a fração 0-2 cm apresentou diferenças estatísticas ( $p < 0,05$ ) em relação às frações 6-8 e 8-10 cm. Na estação 3, a fração 0-2 cm apresentou diferenças estatísticas ( $p < 0,05$ ) em relação às frações 2-4, 4-6 e 6-8 cm. As frações 2-4, 4-6, 6-8 e 8-10 cm não apresentaram diferenças estatísticas entre si ( $p > 0,05$ ) nessas estações. Na estação 4, a fração 0-2 cm apresentou diferenças estatísticas ( $p < 0,05$ ) em relação à fração 8-10 cm, e a fração 2-4 cm apresentou diferença estatística ( $p < 0,05$ ) em relação às frações 6-8 e 8-10 cm.

Lagoas costeiras urbanas sujeitas a impactos antrópicos via aporte de efluentes: aspectos gerais e a concentração de metano na Lagoa Imboassica, Macaé, RJ

André Luis dos Santos Fonseca et al.

Figura 2: Concentração de metano ( $\mu\text{M}$ ) no perfil do sedimento (0-2, 2-4, 4-6, 6-8 e 8-10 cm) na estação 1 (A), estação 2 (B), estação 3 (C) e estação 4 (D) na Lagoa Imboassica



Fonte: Autores (2020).

As concentrações de carbono foram menores na estação 1. A estação 4 apresentou as maiores concentrações de carbono. As estações 2 e 3 apresentaram concentrações intermediárias de carbono em comparação às estações 1 e 4. O mesmo padrão foi observado para as concentrações de nitrogênio e fósforo (Tabela 1).

Tabela 1. Concentrações de carbono orgânico (C), nitrogênio Kjeldahl (N) e fósforo total (P) ( $\text{mg.g}^{-1}$ ) e razões C:N, N:P e C:P nos perfis 0-2 cm, 2-4 cm, 4-6 cm, 6-8 cm e 8-10 cm das estações 1, 2, 3 e 4 da Lagoa Imboassica (continua)

Estação	Perfil cm	C $\text{mg.g}^{-1}$	N $\text{mg.g}^{-1}$	P $\text{mg.g}^{-1}$	C:N	N:P	C:P
Imb 1	0-2	1,940	0,317	0,002	7,1	285,9	2041,9
	2-4	4,230	0,350	0,003	14,1	234,2	3305,4
	4-6	3,400	0,350	0,001	11,3	573,6	6494,5
	6-8	2,500	0,382	0,002	7,6	511,9	3907,1
	8-10	2,060	0,382	0,002	6,3	528,2	3320,1
Imb 2	0-2	10,050	0,881	0,014	13,3	141,1	1878,0
	2-4	11,280	0,954	0,021	13,8	100,2	1381,8
	4-6	17,590	1,767	0,032	11,6	122,3	1419,7



Lagoas costeiras urbanas sujeitas a impactos antrópicos via aporte de efluentes: aspectos gerais e a concentração de metano na Lagoa Imboassica, Macaé, RJ

André Luis dos Santos Fonseca et al.

Tabela 1. Concentrações de carbono orgânico (C), nitrogênio Kjeldahl (N) e fósforo total (P) (mg.g<sup>-1</sup>) e razões C:N, N:P e C:P nos perfis 0-2 cm, 2-4 cm, 4-6 cm, 6-8 cm e 8-10 cm das estações 1, 2, 3 e 4 da Lagoa Imboassica (conclusão)

Estação	Perfil cm	C mg.g <sup>-1</sup>	N mg.g <sup>-1</sup>	P mg.g <sup>-1</sup>	C:N	N:P	C:P
	6-8	16,060	1,657	0,019	11,3	197,5	2232,5
	8-10	10,380	1,530	0,022	7,9	151,4	1197,6
Imb 3	0-2	16,870	2,424	0,019	8,1	285,8	2320,1
	2-4	9,790	0,817	0,021	14,0	85,6	1196,5
	4-6	7,490	1,132	0,014	7,7	175,6	1355,4
	6-8	10,090	1,392	0,025	8,5	122,1	1032,5
	8-10	5,730	1,391	0,026	4,8	118,7	570,5
Imb 4	0-2	49,480	5,160	0,076	11,2	149,5	1672,3
	2-4	48,040	5,186	0,051	10,8	223,3	2412,5
	4-6	43,100	4,201	0,044	12,0	213,2	2552,0
	6-8	34,240	2,727	0,033	14,6	181,0	2651,5
	8-10	27,890	2,140	0,028	15,2	168,3	2559,4

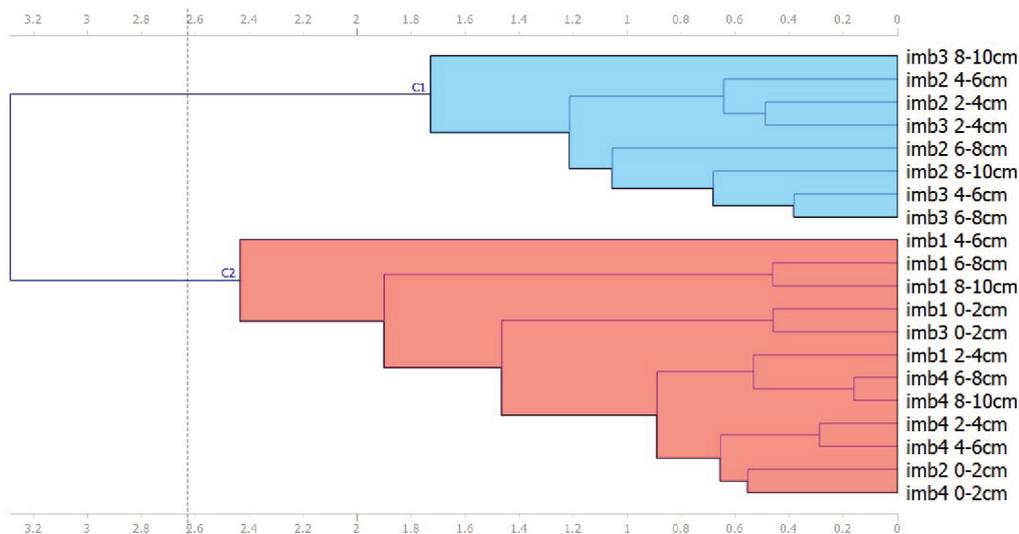
Fonte: Autores (2020).

A análise de agrupamentos separou os perfis de sedimento em dois grupos (Figura 3). O primeiro corresponde às estações 2 e 3, indo dos perfis 2-4 cm até 8-10 cm, que apresentaram as maiores concentrações de metano. O segundo corresponde às estações 1 e 4, incluindo todos os perfis do sedimento nas duas estações e também o perfil 0-2 cm das estações 2 e 3. Isso ocorreu porque os perfis mais superficiais das estações 2 e 3 apresentaram concentrações menores e mais próximas às observadas nas estações 1 e 4. Dessa forma, os pontos amostrais foram mais importantes do que os perfis do sedimento para a caracterização da Lagoa Imboassica em função da concentração de metano no sedimento. Os perfis de sedimento assumiram importância secundária, quando a concentração de metano em determinada fração foi muito discrepante das demais. Devido a isso, nossa análise abordou mais os aspectos relacionados às diferenças entre os pontos amostrais do que entre os perfis do sedimento.

Lagoas costeiras urbanas sujeitas a impactos antrópicos via aporte de efluentes: aspectos gerais e a concentração de metano na Lagoa Imboassica, Macaé, RJ

André Luis dos Santos Fonseca et al.

Figura 3: Dendrograma de análise de agrupamento gerado para os perfis de sedimento das estações amostrais na Lagoa Imboassica. Cada tratamento é indicado com a estação amostral e o perfil de sedimento



Fonte: Autores (2020).

#### 4 Discussão

Nosso estudo demonstrou que as diferentes características espaciais encontradas na Lagoa Imboassica foram o principal fator para a caracterização da lagoa em relação às concentrações de metano observadas no sedimento. A observação desse cenário foi possível a partir da análise de agrupamento, que demonstrou importância maior para os pontos amostrais, que se agruparam, e menor para os perfis do sedimento, que ficaram misturados nos grupos. Dentre as características espaciais estudadas (proximidade com o mar, presença de macrófitas aquáticas e aporte de esgoto *in natura*), o aporte de esgoto *in natura* se demonstrou um fator determinante para as maiores concentrações de metano no sedimento próximo ao canal de lançamento de efluentes. Além disso, a influência do lançamento de esgoto *in natura* parece se distribuir amplamente na lagoa, uma vez que a estação central, que sofre influência de todo o seu entorno, apresentou concentrações de metano e de C, N e P semelhantes à da estação próxima ao canal de lançamento de efluentes. A proximidade com o mar e a presença das macrófitas aquáticas parecem ter um efeito mais restrito à sua localização.

Na estação 1, o sedimento arenoso com baixa deposição de matéria orgânica, de acordo com baixas concentrações de carbono orgânico e nutrientes, explica as menores concentrações de metano observadas nessa estação. A ausência de macrófitas aquáticas e a maior distância para o canal de aporte de esgoto são fatores que contribuem para a baixa deposição de matéria orgânica. Além disso, a proximidade com o mar pode promover o aporte natural de sulfato, favorecendo o processo de redução de sulfato, que concorre com a metanogênese por doadores de elétrons (LOVELY; PHILLIPS, 1987; REJMANKOVA; POST, 1996).



Lagoas costeiras urbanas sujeitas a impactos antrópicos via aporte de efluentes: aspectos gerais e a concentração de metano na Lagoa Imboassica, Macaé, RJ

André Luis dos Santos Fonseca et al.

.....

A estação 2 apresentou as maiores concentrações de metano no sedimento e valores intermediários de carbono orgânico e nutrientes. Dois aspectos poderiam explicar esses resultados. Primeiro, a matéria orgânica do esgoto é caracteristicamente mais lábil do que a originária de macrófitas aquáticas, sendo constituída por aproximadamente 50% de proteínas, 40% de carboidratos e 10% de gorduras e óleos (SHON et al., 2006; SHON et al., 2007). A decomposição da matéria orgânica lábil é mais rápida do que a da matéria orgânica refratária e pode resultar em seu consumo rápido e na depleção de oxigênio (CUNHA-SANTINO; BIANCHINI JR., 2006), explicando os valores intermediários de carbono e nutrientes orgânicos e também o aumento repentino de concentrações de metano abaixo de 0-2 cm no perfil de sedimentos da estação 2. Outros estudos também mostraram maiores concentrações de metano nos sedimentos devido à influência da eutrofização (NEVES *et al.*, 2011; FURLANETTO *et al.*, 2012). Segundo, a matéria orgânica oriunda do esgoto que aporta na lagoa é dissolvida em água, podendo se distribuir provavelmente por uma área abrangente, atingindo pontos distantes de seu lançamento, contribuindo para a diminuição das concentrações em cada ponto onde está presente.

A estação 3, devido à sua posição quase central, poderia receber influência igual de toda a região litorânea, resumindo as diferentes influências de cada estação, mas essa estação apresentou concentrações de carbono, nutrientes e metano semelhantes às observadas na estação 2. Observamos uma profundidade de 0,90 m nesse local, mas esse ponto central pode variar entre 0,8 e 2,1 m e tem profundidade média de 1,5 m ( $\pm 0,3$  m) (PETRUCIO, 1998). De acordo com Panosso *et al.* (1998), regiões com profundidades superiores a 1,2 m na Lagoa de Imboassica correspondem a áreas de sedimentação e são acumuladores potencialmente locais de poluentes originários dos efluentes lançados na lagoa. Portanto, a semelhança entre as estações 2 e 3 indica uma influência do esgoto nessa estação e pouca ou nenhuma influência do mar (estação 1) e da região litorânea colonizada por macrófitas aquáticas (estação 4). Esse resultado está em desacordo com Esteves (1998), que mostrou que as condições sanitárias da lagoa de Imboassica já estavam fortemente degradadas, mas apenas em áreas próximas às descargas de esgoto. Furtado *et al.* (1997) também sugeriram que a entrada contínua de nitrogênio e fósforo na lagoa de Imboassica, proveniente da descarga de esgoto, era insuficiente para causar um aumento significativo nas concentrações desses nutrientes nos sedimentos durante o período estudado, mas apontou a possibilidade de absorção de nutrientes por comunidades biológicas (macrófitas aquáticas e fitoplâncton) que reduzem a entrada na lagoa. A partir da análise de agrupamento, nós observamos que as concentrações de metano no perfil 0-2 cm nas estações 2 e 3 ficaram mais próximas das estações 1 e 4, onde foram observadas as menores concentrações de metano. A coluna de água oxigenada da lagoa Imboassica provavelmente possibilita a oxidação do metano, explicando a menor concentração de metano no perfil superior do sedimento (0-2 cm).

A estação 4, caracterizada pela colonização de macrófitas aquáticas, apresentou baixas concentrações de metano e maiores concentrações de carbono e nutrientes. As macrófitas aquáticas podem afetar os processos de produção de metano pela alocação de matéria orgânica lábil sob o sedimento através da exsudação radicular e produção de detritos particulados (WHITING; CHANTON 1993; MINODA; KIMURA 1994); oxidação do metano, pela entrada de O<sub>2</sub> atmosférico para a rizosfera (DE BONT *et al.* 1978; KING 1994); e emissão de metano, atuando



Lagoas costeiras urbanas sujeitas a impactos antrópicos via aporte de efluentes: aspectos gerais e a concentração de metano na Lagoa Imboassica, Macaé, RJ

André Luis dos Santos Fonseca et al.

.....

como um canal que permite que o CH<sub>4</sub> escape para fora do sistema (SEBACHER *et al.* 1985; CHANTON; DACEY 1991; WHITING; CHANTON, 1992). Os sedimentos dessa estação foram coletados a cerca de 5 m de distância do estande de macrófitas aquáticas. A distância dos estandes provavelmente diminui ou impede a contribuição da exsudação radicular das macrófitas aquáticas para a metanogênese, a contribuição do O<sub>2</sub> para a oxidação do metano e a ação como um canal para a emissão de metano. Portanto, a contribuição das macrófitas aquáticas nesse caso provavelmente ocorreu principalmente pela deposição de detritos sobre o sedimento. Os tecidos das macrófitas aquáticas são constituídos por compostos e inorgânicos solúveis e fibras, correspondendo principalmente à matéria orgânica particulada (LITTLE, 1979; HENRY-SILVA *et al.*, 2001). Durante a decomposição, essas frações dos tecidos vegetais são processadas em taxas diferentes e, em geral, os detritos que se acumulam nos sedimentos são basicamente matéria orgânica particulada constituída de fibras (por exemplo, matriz lignocelulósica), que apresentam decomposição mais lenta (BIANCHINI JR.; CUNHA-SANTINO, 2008). Segundo Cunha e Bianchini Jr. (1999), a ocorrência de taxas reduzidas de formação de gases a partir da decomposição de detritos de macrófitas aquáticas está relacionada principalmente à depleção de compostos lábeis, permanecendo apenas compostos refratários difíceis de decompor. O aumento gradual da concentração de metano no perfil de sedimentos na estação 4 contrastou com o aumento abrupto nas estações 2 e 3, provavelmente devido à disponibilidade de carbono orgânico lábil a partir do esgoto, corroborando o argumento de limitação por carbono orgânico lábil na estação 4.

Os processos de degradação antrópicos da Lagoa Imboassica são antigos e variados. O aporte de esgoto é um dos principais problemas que esse ecossistema sofre, causando inúmeras consequências negativas, tais como o processo de degradação anaeróbica da matéria orgânica que gera metano. Já é bem estabelecido que o processo de metanogênese se relaciona com a produtividade do ambiente (WHITING; CHANTON, 1993; YANG *et al.*, 2015). Nesse sentido, alguns fatores distintos devem induzir aumentos na produtividade aquática ao longo do século 21. Primeiro, o aumento da população humana (37% até 2050 e 50% até 2100) (SAMIR; LUTZ, 2017) aumentará a lançamento de esgoto nas águas interiores. Segundo, as mudanças climáticas, intensificando as tempestades, tendem a aumentar o escoamento superficial, carreando nutrientes de forma difusa para as águas interiores (JEPPESEN *et al.*, 2011; SINHA *et al.*, 2017). Nós podemos tratar as águas residuais, mas aquela proveniente do escoamento superficial parece ser intratável (MOSS *et al.*, 2011). Vale ressaltar que, além das consequências ambientais da eutrofização, há também as perdas econômicas relacionadas a questões sociais, ecológicas e políticas (PRETTY *et al.*, 2003). Um estudo realizado nos EUA estipulou uma medida conservadora de US\$ 2,2 bilhões em perdas anuais decorrentes da eutrofização (DODDS *et al.*, 2009). Portanto, independentemente da incapacidade de tratar as águas de escoamento superficial, é imprescindível o tratamento das águas residuais. Nesse sentido, no ano de 2013, entrou em operação a Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) de Mutum, que está reduzindo a entrada de nutrientes e patógenos na bacia hidrográfica da Lagoa Imboassica para níveis que estão dentro dos parâmetros permitidos na legislação vigente (SANTOS; FERREIRA, 2014). Novos estudos são necessários para avaliar o efeito do tratamento do esgoto sobre o ciclo do metano na Lagoa Imboassica.



Lagoas costeiras urbanas sujeitas a impactos antrópicos via aporte de efluentes: aspectos gerais e a concentração de metano na Lagoa Imboassica, Macaé, RJ

André Luis dos Santos Fonseca et al.

### Referências

ALLEN, S. E. *et al.* *Chemical analysis of ecological material*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1974. 565 p.

AMBÜHL, H.; BÜHRER. Zur technik der Entnahme ungestörter Grossproben von Seesedimenten: ein verbessertes Bohrlot. *Schweiz. Z. Hydrol.*, v. 37, p. 175-186, 1975.

BARNES, R. S. K. *Coastal Lagoons*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1980.

BEAULIEU, J. J.; DELSONTRO, T.; DOWNING, J. A. Eutrophication will increase methane emissions from lakes and impoundments during the 21st century. *Nature Communications*, v. 10, n. 1, 2019. DOI: 10.1038/s41467-019-09100-5.

BIANCHINI JR., I.; CUNHA-SANTINO, M. B. As rotas de liberação do carbono dos detritos de macrófitas aquáticas. *Oecologia Brasiliensis*, v. 12, p. 20-29, 2008.

BULGER, A. J. *et al.* Biologically-Based Estuarine salinity zones derived from a Multivariate analysis. *Estuaries*, v. 16, p. 311-322, 1998.

CASPER, P. Methane production in lakes of different trophic state. *Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol.*, v. 37, p. 149-154, 1992.

COSTA, J. P. *et al.* (Nano)plastics in the environment: Sources, fates and effects. *Science of the Total Environment*, v. 566-567, p. 15-26, 2016. DOI: doi:10.1016/j.scitotenv.2016.05.041.

CUNHA, M. B.; BIANCHINI JR., I. Degradação anaeróbia de Cabomba piauhyensis e Scirpus cubensis: Cinética de formação de gases. *Acta Limnologica Brasiliensia*, v. 11, n. 1, p. 15-26, 1999.

DODDS, W. K. *et al.* Eutrophication of U.S. freshwaters: analysis of potential economic damages. *Environ Sci Technol.*, v. 43, p. 2-19, 2009.

DUARTE, N. S.; MARÇAL, M. S. As perspectivas e desafios de implementação do Plano de Bacia da Região Hidrográfica VIII. *Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego*, v. 4, n. 2, p. 95-115, 2010.

ESTEVES, F. A. Lagoas costeiras: origem, funcionamento e possibilidades de manejo. In: ESTEVES, F. A. *Ecologia das Lagoas Costeiras do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba e do Município de Macaé, RJ*. Rio de Janeiro: UFRJ, NUPEM, 1998a. p. 63-87.

FASSBENDER, H. W. Simulate P-Bestimmung in N-Kjeldahl Ausfchlub von Bodenproben. *Die Phosphorsäure*, v. 30, p. 44-53, 1973.

FURLANETO, L. M. *et al.* Methane levels in shallow subtropical lake sediments: Dependence on the trophic status of the lake and allochthonous input. *Limnologica*, v. 42, p. 151-155, 2012.

FURTADO, A. L. S.; PETRUCIO, M. M.; ESTEVES, F. A. C, N, P and pheopigments in the sediment of a brazilian coastal lagoon, Macaé, Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Biologia*, v. 57, p. 127-134, 1997.



Lagoas costeiras urbanas sujeitas a impactos antrópicos via aporte de efluentes: aspectos gerais e a concentração de metano na Lagoa Imboassica, Macaé, RJ

André Luis dos Santos Fonseca et al.

GHISELLI, G.; JARDIM, W. F. Interferentes endócrinos no ambiente. *Química Nova*, v. 30, n. 3, p. 695-706, 2007.

JEPPESEN, E. *et al.* Climate change effects on nitrogen loading from cultivated catchments in Europe: implications for nitrogen retention, ecological state of lakes and adaptation. *Hydrobiologia*, v. 663, p. 1–21, 2011.

KENNISH, M. J.; PAERL, H. W. (eds.). *Coastal Lagoons: Critical Habitats of Environmental Change*. Boca Raton, Florida: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010.

KING, G. M. Associations of methanotrophs with the roots and rhizomes of aquatic vegetation. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 60, n. 9, p. 3220-3227, 1994.

KJERFVE, B. *Coastal lagoons processes*. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 1-8

LIMA, E.S.; MARTINS, M. I. F. P.; FURTADO, A. L. S. Mapeamento do Uso da Terra Urbana no Entorno da Lagoa Imboassica em Macaé, RJ. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 11., 2017. *Anais...* ISBN 978-85-7029-141-7.

LOVLEY, D. R.; PHILLIPS, E. J. Competitive mechanisms for inhibition of sulfate reduction and methane production in the zone of ferric iron reduction in sediments. *Applied and environmental microbiology*, v. 53, n. 11, p. 2636–2641, 1987.

MARINHO, C. C.; FONSECA, A. L. S.; ESTEVES, F. A. Impactos antrópicos nas lagoas costeiras do norte do estado do Rio de Janeiro: uma revisão sobre a eutrofização artificial e gases de efeito estufa. *Revista Brasileira de Pós Graduação*, Brasília, v.13, n.32, p. 703-728, 2016.

MOSS, B. *et al.* Allied attack: climate change and eutrophication. *Inland Waters*, v. 1, n. 2, p. 101-105, 2011.

NEVES, J. M. C. O. S.; ARAGOM, G. T.; FILHO, E. V. S. Effects of eutrophication and *Typha domingensis* Pers. on methanogenesis in tropical constructed wetland. *Acta Limnológica Brasiliensia*, v. 23, n. 2, p. 145-153, 2011.

PANOSSO, R. F., ATTAYDE, J. L.; MUEHE, D. Morfometria das lagoas Imboassica, Cabiúnas, Comprida e Carapebus: Implicações para seu funcionamento e manejo. In: ESTEVES, F. A. (ed.). *Ecologia das lagoas costeiras do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba e do Município de Macaé, RJ*. Macaé: UFRJ, NUPEM, 1998. p. 147-157.

PETRUCIO, M. M., FURTADO, A. L. S. Concentração de nitrogênio e fósforo da coluna d'água da lagoa Imboassica. In: ESTEVES, F. A. (ed.). *Ecologia das lagoas costeiras do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba e do Município de Macaé, RJ*. Macaé: UFRJ, NUPEM, 1998. p. 123-133.

PRETTY, J. N. *et al.* Environmental costs of freshwater eutrophication in England and Wales. *Environ. Sci. Technol.*, v. 37, p. 201–208, 2003.

REJMANKOVA, E.; POST, R. A. Methane in sulfate-rich and sulfate-poor wetland sediments. *Biogeochemistry*, v. 34, p. 57–70, 1996.

SAMIR, K. C.; LUTZ, W. The human core of the shared socioeconomic pathways: population scenarios by age, sex and level of education for all countries to 2100. *Glob. Environ. Change.*, v. 42, p. 181–192, 2017.



Lagoas costeiras urbanas sujeitas a impactos antrópicos via aporte de efluentes: aspectos gerais e a concentração de metano na Lagoa Imboassica, Macaé, RJ

André Luis dos Santos Fonseca et al.

SANTOS, M. C. *et al.* Manejo de Lagoas Costeiras: estabelecendo normas e procedimentos para abertura artificial da barra de areia em uma lagoa do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba. *Revista de Engenharia da Faculdade Salesiana*, v. 20, p. 18-25, 2015.

SANTOS, R. F. B., FERREIRA, M. I. P. Impactos negativos, positivos e propostas mitigadoras em bacias hidrográficas: estudo de caso da BH da Lagoa Imboassica, Macaé, RJ. *Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamago*, v. 8, n. 2, p. 77-99, 2014.

SCHEFFER, M. *Ecology of Shallow Lakes*. Berlin: Springer. 2004.

SHON, H. K.; VIGNESWARAN, S.; SNYDER, S. A. Effluent organic matter (EfOM) in wastewater: constituents, effects, and treatment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, v. 36, n. 4, p. 327-374, 2006.

SINHA, E.; MICHALAK, A. M.; BALAJI, V. Eutrophication will increase during the 21st century as a result of precipitation changes. *Science*, v. 357, p. 405-408, 2017.

USEPA. United States Environmental Protection Agency. Disponível em: <http://www.epa.gov/esd/bios/pdf/contaminants-biosolids2.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2020.

WHITING, G. J.; CHANTON, J. P. Primary production control of methane emission from wetlands. *Nature*, v. 364, p. 794-795, 1993.

YANG, H. *et al.* Greenhouse gas metabolism in Nordic boreal lakes. *Biogeochemistry*, v. 126, p. 211-225, 2015.

### ***Agradecimentos***

Os autores agradecem à PETROBRAS, FINEP e CNPq pelo apoio financeiro. Agradecemos também ao NUPEM/UFRJ pelo apoio logístico.