

PEQUENOS ESTUÁRIOS ALIMENTADOS POR PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS: ESTUDO DE CASO DOS ESTUÁRIOS DOS RIOS MACAÉ E DAS OSTRAS (RJ)

Glenda Camila Barroso (UFRJ) · Mauricio Mussi Molisani (UFRJ)

Introdução

O que são estuários?

A definição clássica de estuários, aceita para estuários clássicos estabelecidos em planícies costeiras^{1,2} (PRITCHARD, 1952; FAIRBRIDGE, 1980), apresenta esses ambientes como corpos d'água costeiros, semifechados, com uma livre ligação com o oceano aberto, no interior dos quais a água do mar é mensuralmente diluída pela água doce oriunda da drenagem continental. Posteriormente, Day (1980)³ considera a influência dos tipos dos estuários em relação à sua conexão com o mar, que pode estar permanentemente ou periodicamente aberta para o oceano, influenciando, por exemplo, a circulação de massas de água e a distribuição de organismos de acordo com a forma da conexão. De acordo com Herdendorf⁴, Odum⁵ e Dyer (1997)⁶, os estuários precisam estar conectados diretamente com o oceano ou com outro corpo d'água salino, podendo ser consideradas estuários até lagoas costeiras que recebem a descarga fluvial e estão sujeitas à ação de maré ou ondas.

Como os estuários são caracterizados, em parte, pelo aporte de água fluvial, caso essa massa de água não seja capaz de diluir a água marinha, esse ambiente não é caracterizado como estuário⁷. A presença de água fluvial está associada a um balanço hídrico, no qual a soma dos volumes que chegam ao estuário é relacionada à precipitação e à descarga fluvial, e, se for maior ou menor do que a evaporação, poderá ocasionar a geração de estuários com águas salobras, salinas ou até hipersalinas, obviamente segundo a premissa da diluição da água do mar pela água fluvial. As definições de

¹ PRITCHARD, D. Salinity distribution and circulation in the Chesapeake Bay estuarine system. *Journal of Marine Research*, v.11, n.1, p. 106-123, 1952.

² FAIRBRIDGE, R.W. The Estuary: Its Definition and Geodynamic Cycle. In: OLAUSSON, E.; CATO, I. (Eds.). *Chemistry and Biogeochemistry of Estuaries*. New York: Wiley, 1980. p. 1-35.

³ DAY, J.H. What is an estuary? *South African Journal of Science*, v.76, p. 198-198, 1980.

⁴ HERDENDORF, S.E. Great lakes estuaries. *Estuaries*, v.13, p. 493-503, 1990.

⁵ ODUM, W.E. The lacustrine estuary might be a useful concept. *Estuaries*, v.13, p.506-507, 1990.

⁶ DYER, K.R. Tides in Estuaries. In: DYER., K.R. (Ed.). *A Physical Introduction*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons Ltd, 1997. p. 31-40.

⁷ CAMERON, W.M.; PRITCHARD, D.W. Estuaries. In: HILL, M. N. (ed). *The Sea: Ideas and Observations on Progress in the Study of the Seas*. New York: Interscience, 1963. p. 306-324.

Cameron e Pritchard⁸ e Day (1980)⁹ não levaram em consideração a influência da maré, que é o principal mecanismo de mistura de massas de água na maioria dos estuários. O efeito da maré deve promover modificações nos componentes de um estuário, induzindo a circulação de massas de água, a erosão e a deposição de materiais, criando gradientes de salinidade longitudinal e de profundidade, entre outros¹⁰. Considerando os efeitos da maré, a definição de Dionne, J.¹¹ veio ampliar a discussão inserindo a localização de três zonas ao longo do estuário: a) estuário inferior ou marinho, com ligação livre com o oceano aberto; b) estuário médio, sujeito à intensa mistura da água do mar com a água fluvial; c) estuário superior ou fluvial, caracterizado por água doce, mas sujeito à influência diária da maré, em relação ao aumento de volume de água. Tais fronteiras não são fixas, mas variam de acordo com a amplitude de maré (quadratura/ sizígia) e a intensidade da descarga fluvial (período de chuvas ou estiagem).

De forma a considerar aspectos relacionados à sedimentação, Dalrymple¹² Introduziram um conceito segundo o qual estuários são definidos como um sistema de vales inundados que recebe sedimentos tanto de origem fluvial como de origem marinha, cuja granulometria e estruturas sedimentares sofrem influência da maré, ondas e processos fluviais. Kjerfve¹³ não vislumbra apenas essa caracterização geológica, e acrescenta processos regionais, tais como: fatores climáticos, sedimentação recente e forçantes dinâmicas, que contribuem para a formação dos estuários e são responsáveis pela variedade de características geomorfológicas e fisiográficas observadas no ambiente. Para esse autor, “estuário é um ambiente costeiro que apresenta conexão restrita com o oceano adjacente. Tal conexão permanece aberta pelo menos intermitentemente”. Ainda subdivide o estuário em três zonas distintas: a) Zona de Maré do Rio (ZR), que corresponde à parte fluvial com salinidade praticamente igual a zero, mas ainda sujeita à influência da maré; b) Zona de Mistura (ZM), que é a região onde se observa a mistura de água doce advinda da drenagem continental com a água do mar; e c) Zona Costeira (ZC), que corresponde à região costeira adjacente que se estende até a frente da pluma estuarina.

De acordo com Perillo¹⁴, as definições de estuário englobam apenas os parâmetros fisiográficos (geomorfologia e hidrologia) e não contemplam parâmetros biológicos e químicos, sendo necessária uma classificação morfogenética que estabeleça uma interação entre as forças terrestres e marinhas na formação da morfologia do estuário. Segundo esse conceito, “Um estuário é um corpo d’água semifechado que estende até o limite efetivo da influência da maré, dentro do qual a água do mar entra por uma ou mais conexões livres com o mar aberto, ou qualquer outro corpo d’água salino costeiro, sendo significativamente diluída com a água doce derivada da drenagem continental, e pode sustentar espécies eurialinas em parte ou o ciclo de vida inteiro”.

⁸ CAMERON, W.M.; PRITCHARD, D.W. Estuaries. In: HILL, M. N. (ed). **The Sea: Ideas and Observations on Progress in the Study of the Seas**. New York: Interscience, 1963. p. 306-324.

⁹ DAY, J.H. What is an estuary? *op. cit.*

¹⁰ PERILLO, G.M.E. **Definitions and Geomorphologic Classifications of Estuaries. Geomorphology and Sedimentology of Estuaries**. Berlin: Elsevier Science B. V., 1995. p. 17-49, 1995.

¹¹ DIONNE, J.C. Towards a more adequate definition of the St. Lawrence Estuary. **Geomorphology**, v.7, p. 36-44, 1963.

¹² DALRYMPLE, R.W.; ZAITLIN, B.B.; BOYD, R. A Conceptual Model of Estuarine Sedimentation. **Journal of Sedimentary Petrology**, v.62, p. 1130-1146, 1992.

¹³ KJERFVE, B. Estuarine Geomorphology and Physical Oceanography. In: DAY JR., J. W. et al. (Eds). **Estuarine Ecology**. New York: Wiley, 1987. p. 47-48.

¹⁴ PERILLO, G.M.E. Definitions and Geomorphologic Classifications of Estuaries. **Geomorphology and Sedimentology of Estuaries**, *op. cit.*

A definição proposta por Dyer¹⁵ é considerada a mais completa dentro da oceanografia física, na qual “Estuário é um corpo de água semifechado, com ligação livre com o oceano aberto, que se estende ao longo do rio até o limite de influência da maré, no interior do qual a água do mar é mensuralmente diluída pela água doce oriunda da drenagem continental”. Diante do amplo espectro de condições hidrográficas, topográficas, climáticas, químicas e biológicas de estuários, com situações por vezes conflitantes, as quais impossibilitavam um consenso geral a respeito das definições, tornou-se cada vez mais evidente a necessidade de analisar esses ambientes não apenas como fenômenos locais, como se fazia em décadas passadas. Assim, para comparar diferentes estuários, foram propostos critérios de classificação desses ambientes costeiros, organizando-os de acordo com um conjunto de parâmetros e estabelecendo uma estrutura geral de funcionamento considerando a circulação e os processos de mistura envolvidos.

Classificação de estuários

Um primeiro sistema de classificação foi proposto por Stommel¹⁶, que considerou como causas físicas preponderantes dos movimentos de mistura dentro do corpo d’água estuarino a maré, o vento e a descarga fluvial. Adicionalmente, Pritchard (1952)¹⁷ classificou os estuários do ponto de vista geomorfológico, e os dois esforços resultaram na classificação: estuários de planície costeira (vale inundado); fiorde; formado por barras; e formado por processos como falhas tectônicas, erupções vulcânicas, tremores e deslizamento de terra.

A classificação de Hayes¹⁸ foi baseada na amplitude de maré e correlaciona esse parâmetro físico com várias características fisiográficas, definindo quatro tipos de estuários: estuários de micromarés (com amplitude de maré inferior a 2 m); estuários de mesomarés (com amplitude de maré variando de 2 a 4 m); estuários de macromarés (com amplitude maior do que 4m); e estuários de hipermarés (com amplitude maior do que 6 m).

Posteriormente, Dalrymple *et al.*¹⁹ desenvolveram uma classificação direcionada para um modelo mais complexo de fácies sedimentares, no qual estabeleceram a importância e o tamanho da drenagem fluvial, das ondas e das marés ao longo de períodos de tempo. Esse modelo classificou os estuários em: dominados por drenagem fluvial, por ondas e por marés. A diferença entre as duas classificações anteriores consiste no fato de que a última aponta para uma contínua evolução entre os extremos, ou seja, um estuário caracterizado por ondas pode vir a tornar-se dominado por marés.

A classificação morfológica de Fairbridge²⁰, baseada em fatores fisiográficos e hidrodinâmicos, se propõe a relacionar o relevo, a circulação na desembocadura do estuário, o nível do mar, a dinâmica fluvial-estuarina e o neotectonismo. Dessa forma, são descritas sete categorias de estuários: a) estuários com vales em forma de

¹⁵ DYER, K.R. Tides in Estuaries. In: DYER., K.R. (ed.). **A Physical Introduction**. 2nd Edition. New York: John Wiley & Sons Ltd, 1997. p.31-40.

¹⁶ STOMMEL, H. **Recent Development in the Study of Tidal Estuaries**.Tech. Rept. Massachusetts: Woods Hole Oceanographic Institution, 1951. 18 p. n. 51-33.

¹⁷ PRITCHARD, D. **Salinity Distribution and Circulation in the Chesapeake Bay Estuarine System**, *op. cit.*

¹⁸ HAYES, M.O. Morphology of sand accumulation in estuaries: an introduction to the symposium. **Geology and Engineering**, 1975, p. 3-22.

¹⁹ DALRYMPLE, R.W.; ZAITLIN, B.B.; BOYD, R. **A Conceptual Model of Estuarine Sedimentation**, *op. cit.*

²⁰ FAIRBRIDGE, R.W. The Estuary: Its Definition and Geodynamic Cycle. In: OLAUSSON, E.; CATO, I. (Eds.). **Chemistry and Biogeochemistry of Estuaries**, *op. cit.*

U e alto relevo (fjord) e relevo moderado (fjard); b) estuários em forma de V e relevo moderado (ria); c) estuários com vales em forma de funil e baixo relevo (estuários de planície costeira ou de barreira); d) estuários com vales em forma de L e baixo relevo (estuários construídos por barra); e) estuários de baixo relevo sazonalmente fechado (estuários cegos); f) estuários de frente deltaicos ou deltas de rios efêmeros (estuários deltaicos); g) estuários compostos (tectônicos). Mais recentemente, uma classificação morfogenética, baseada na origem e morfologia, procura contemplar todas as categorias possíveis de estuários, a saber: a) formados por vales fluviais, categoria que se subdivide em estuários de planície costeira e rias; b) formados por vales glaciais ou fiordes e fiardes; c) influenciados por rios de maré e estuários de frente deltaicos; d) estruturais, formados por processos neotectônicos; e e) lagoas costeiras, corpos d'água paralelos à costa separados do mar por uma barreira e conectados com o oceano por uma entrada, que, dependendo de sua natureza, pode ser obstruído (apenas uma entrada rasa e longa), restrito (poucas enseadas ou uma desembocadura larga) e vazado (grande número de entradas separadas por pequenas ilhas de barreiras).

Os estuários classificados geomorfologicamente apresentam diferenças significativas nos padrões de circulação, estratificação de salinidade e processos de mistura. Com base nisso, Pritchard²¹ criou uma classificação relacionada à estratificação de salinidade, na qual se tornou possível estabelecer de forma qualitativa as características dominantes da circulação da zona de mistura (ZM): a) cunha salina (há uma interface distinta entre a água da descarga fluvial e a marinha); b) altamente estratificado (apresenta uma acentuada estratificação vertical e diferença entre as salinidades de superfície e fundo de várias unidades); c) parcialmente misturado (estratificação da coluna d'água moderada com diferença entre superfície e fundo de poucas unidades); d) bem misturado ou verticalmente homogêneo (quando não há praticamente diferença entre a salinidade da superfície e fundo, ausência de haloclina).

Os diversos critérios de classificação morfodinâmicos e de salinidade apresentados anteriormente não contemplam aspectos relacionados com a qualidade da água e com as pressões antrópicas que tais ambientes suportam. A classificação ambiental de um estuário poderá ser inferida a partir da análise da estrutura salina e da qualidade da água. Esta última, por sua vez, pode ser inferida a partir da qualidade estética, critério sanitário e parâmetros físicos, químicos e biológicos²². A classificação para sistemas marinhos segundo o estado trófico foi proposta baseada no aumento de suprimento de matéria orgânica (por exemplo, carbono orgânico dissolvido) em um sistema, indicando o sistema como oligotrófico (<100 g/ano⁻¹), mesotrófico (<100 - 300 g/ano⁻¹), eutrófico (301 - 500 g/ano⁻¹) e hipertrófico (>500 g/ano⁻¹)²³. Lemley *et al.*²⁴ apresentam uma classificação que utiliza uma variedade de indicadores, como oxigênio dissolvido, nutrientes inorgânicos, fitoplâncton, epífitas e microfítobêntos, propondo as categorias Oligotrófico, Mesotrófico, Eutrófico e Hipereutrófico. A Tabela 1 apresenta um resumo da classificação dos estuários.

²¹ PRITCHARD, D. Estuarine Circulation Patterns. *Proceedings of American Society of Civil Engineers*, v.81, p. 717, 1955.

²² CONAMA. **Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente no 357**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências, 2005.

²³ NIXON, S.W. The fate of nitrogen and phosphorous at the land-sea margin of the North Atlantic Ocean. *Biogeochemistry*, v.35, p. 141-180, 1996.

²⁴ LEMLEY, D.A. *et al.* Towards the classification of eutrophic condition in estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v.164, p. 221-232, 2015.

Tabela 1 - Classificações de estuários ao longo do tempo

Parâmetro	Classificação	Referência
Parâmetros físicos	Estuários influenciados: maré, vento, descarga fluvial	Stommel (1951)
Geomorfologia	Planície costeira (vale inundado); Fiorde; formado por barras; Falhas tectônicas; Erupções vulcânicas	Pritchard (1952)
Morfologia (Relevo, circulação, nível do mar)	Estuários com vales em forma de U e alto relevo (<i>fjord</i>) e relevo moderado (<i>fjord</i>); estuários em forma de V e relevo moderado (<i>ria</i>); estuários com vales em forma de funil e	Fairbridge (1955)
	baixo relevo (estuários de planície costeira ou de barreira); estuários com vales em forma de L e baixo relevo (estuários construídos por barra); estuários de baixo relevo sazonalmente fechados (estuários cegos); estuários de frente deltaicos ou deltas de rios efêmeros (estuários deltaicos); estuários compostos (tectônicos)	
Amplitude de maré	Micromarés (<2 m); Mesomarés (2<A<4 m) Macromarés (>4 m); Hipermarés (>6 m)	Hayes (1975)
Estratificação de salinidade	Circulação da zona de mistura (ZM): a) cunha salina; b) altamente estratificado; c) parcialmente misturado; d) bem misturado ou verticalmente homogêneo.	Pritchard (1975)
Fácies sedimentares (evolução)	Estuários influenciados: tamanho da drenagem fluvial; ondas; marés	Dalrymple <i>et al.</i> (1992)
Parâmetros físico-químicos e biológicos (diversos)	Classificação e diretrizes para o enquadramento em classes considerando a saúde/bem-estar humano e o equilíbrio ecológico aquático	CONAMA (2005)
Parâmetros físico-químicos e biológicos (oxigênio dissolvido, nutrientes inorgânicos, fitoplâncton, epífitas e microfitobêntos)	Oligotrófico, Mesotrófico, Eutrófico, Hipereutrófico	Lemley <i>et al.</i> (2015)

Pequenas bacias hidrográficas e seus respectivos estuários dentro do contexto das Bacias do Atlântico Sudeste (22-29°)

Segundo Milliman e Syvitski (1992)²⁵, bacias de drenagem de reduzida área (<10.000 km²), embora drenem apenas cerca de 20% da área global, são ambientes que ocorrem em grande número, o que pode conferir a eles, coletivamente, uma importante parcela de contribuição de sedimentos e outros materiais das bacias hidrográficas para os oceanos. Atualmente, observam-se esforços para a obtenção de dados sobre a diversidade de bacias hidrográficas e estuários visando entender os fatores condicionantes e a variabilidade desses fatores frente aos processos naturais, ocupação humana e mudanças climáticas^{26,27,28}. Esse cenário se torna mais urgente para pequenos estuários, diante da reduzida extensão desses ambientes flúvio-estuarinos em oposição à crescente

²⁵ MILLIMAN, J.; SYVITSKI, J.P.M. Geomorphic Tectonic Control of Sediment Discharge to the ocean: The Importance of Small Mountainous Rivers. **Journal of Geology**, v.100, p. 525-5441, 1992.

²⁶ SYVITSKI, J.P.M.; SAITO, Y. Morphodynamics of deltas under the influence of humans. **Global and Planetary Change**, v.57, p. 261-282, 2007.

²⁷ TURNER, R.E.; RABALAIS, N.N.; JUSTIC, D.; DORTCH, Q. Global Patterns of dissolved N, P and Si in Large Rivers. **Biogeochemistry**, v.64, p. 297-317, 2003.

²⁸ PASQUAUD, S.; VASCONCELOS, R.P.; FRANÇA, S.; HENRIQUES, S.; COSTA, M.J.; CABRAL, H. Worldwide patterns of fish biodiversity in estuaries: Effect of global vs. local factors. **Estuarine Coastal and Shelf Science**, v154, p. 122-128, 2015.

e extensiva ocupação humana dessas regiões. Um dos exemplos mais analisados é a capacidade suporte desses estuários em processar a carga antrópica de matéria orgânica e de nutrientes. Em face de crescente emissão de nutrientes, considerando que o transporte global de nitrogênio e fósforo pelos rios para os estuários tem aumentado cerca de seis a nove vezes em relação aos valores pré-industriais, podem-se constatar alterações nos estuários, como as florações desordenadas de algas e macrófitas aquáticas, depleção de oxigênio, assoreamento, mortandade de organismos, mudança de composição de espécies, perda dos serviços ecossistêmicos e a insalubridade ou até mesmo a inviabilidade de possíveis usos pela sociedade humana costeira^{29,30,31,32,33}.

A zona costeira do Brasil pode ser dividida entre a porção quaternária ao norte, influenciada pela bacia do rio Amazonas; a porção terciária nordeste e leste (Formação Barreiras), drenada por pequenas e médias bacias hidrográficas desde o domínio semiárido até o úmido; a porção granítica sudeste e quaternária ao sul^{34,35}. Entre as latitudes 22 – 29°, onde houve o soerguimento da Serra do Mar durante a abertura do oceano Atlântico, foi formada uma série de pequenas bacias hidrográficas (áreas entre <10-1 a 104 km²) que drenam para o oceano Atlântico, denominadas Bacias do Atlântico Sudeste³⁶. Essas bacias têm uma geomorfologia que varia do relevo montanhoso ondulado (altitude >1.000 m) até uma planície costeira atingindo o nível do mar. Adicionalmente, a geomorfologia dessas bacias hidrográficas sugere eficiente transporte fluvial para a costa^{37,38}, com efeitos em ecossistemas costeiros^{39,40}, (PAGLIOSA *et al.*, 2005⁴¹; FONSECA *et al.*, 2014⁴²; MAUAD *et al.*, 2015⁴³). Durante séculos até o presente momento, uma ocupação extensiva da costa brasileira, que abriga em

²⁹ RABALAIS, N.N.; TURNER, R.E.; WISEMAN, JR, W.J. Hypoxia in the Gulf of Mexico “The Dead Zone.” **Annual Review of Ecology and Systematics**, v.33, p. 235-263, 2002.

³⁰ BOYER, J.N.; KELBLE, C. R.; ORTNER, P.B.; RUDNICK, D.T. Phytoplankton bloom status: Chlorophyll a biomass as an indicator of water quality condition in the southern estuaries of Florida, USA. **Ecological Indicators**, v.9, p. 550-557, 2009.

³¹ BRICKER, S.B.; CLEMENT, C.G.; PIRHALLA, D.E.; ORLANDO, S.P.; FARROW, D.R.G. National Estuarine Eutrophication Assessment: Effects of Nutrient Enrichment in the Nation's Estuaries. **NOAA—NOS Special Projects Office**, 1999.

³² SMITH, V.H. Responses of estuarine and coastal marine phytoplankton to nitrogen and phosphorus enrichment. **American Society of Limnology and Oceanography**, v.51, p. 377-384, 2003.

³³ MEYBECK, M. Rivers: from sources to global inputs. In: WOLLAST, R.; MACKENZIE, F.T.; CHOU, L. (eds.) Interactions of C, N, P and Si biogeochemical cycles and global change. **NATO ASI Series**, v.14, p. 163-193, 1993.

³⁴ GUERRA, H.T. **O litoral Atlântico**. Paisagens do Brasil. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, IBGE, 1962. 456 p.

³⁵ KNOPPERS, B.; EKAU, W.; FIGUEIREDO, A.G. The coast and shelf of east and northeast Brazil and material transport. **Geo-Marine Letters**, v.19, p. 171-178, 1999.

³⁶ KNOPPERS, B.; EKAU, W.; FIGUEIREDO, A.G. The coast and shelf of east and northeast Brazil and material transport, *op. cit.*

³⁷ FARIAS, M.M.; SANCHEZ, B.A. Geochemistry and mineralogy of recent sediments of Guanabara Bay (NE sector) and its major Rivers, Rio de Janeiro State, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.73, p. 121-133, 2001.

³⁸ MOLISANI, M.M.; NORONHA, F.R.C.; SCHULTZ, M.S.; REZENDE, C.E.; ALMEIDA, M.G.; SILVEIRA, C.S. Mismatch Between Sediment Metal Distribution and Pollution Source Gradient: A Case Study of a Small-Size Drainage Basin (Southeastern Brazil). **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v.94, p. 770-776, 2015.

³⁹ MOLISANI, M.M.; MARINS, R.V.; MACHADO, W.; PARAQUETTI, H.H.M.; BIDONE, E.D.; LACERDA, L.D. Environmental changes in Sepetiba Bay, SE Brazil. **Regional Environmental Changes**, v.4, p. 17-27, 2004.

⁴⁰ GODIVA, D.; EVANGELISTA, H.; KAMPEL, M.; LICINIO, M.V.; MUNITA, C. Combined use of aerogammaspectrometry and geochemistry to access sediment sources in a shallow coral site at Armação dos Búzios, Brazil. **Estuarine Coastal and Shelf Science**, v.87, p. 526-534, 2010.

⁴¹ PAGLIOSA, P.R.; FONSECA, A.; BOSQUILHA, G.E.; BRAGA, E.L.; BARBOSA, F.A.R. Phosphorus dynamics in water and sediments in urbanized and non-urbanized rivers in Southern Brazil. **Marine Pollution Bulletin**, v.50, p. 965-974, 2005.

⁴² FONSECA, E.M.; BAPTISTA NETO, J.A.; PEREIRA, M.P.S.; SILVA, C.G.; ARANTES, J.D. Study of pollutant distribution in the Guaxindiba Estuarine System – SE Brazil. **Marine Pollution Bulletin**, v.82, p. 45-54, 2014.

⁴³ MAUAD, C.R.; WAGENER, A.L.R.; MASSONE, C.G.; ANICETO, M.S.; LAZZARI, L.; CARREIRA, R.S.; FARIAS, C.O. Urban Rivers as conveyors of hydrocarbons to sediments of estuarine areas: Source characterization, flow rates and mass accumulation. **Science of the Total Environment**, v.506-507, p. 656-666, 2015.

torno de 60% da população do país, alterou profundamente o uso do solo, o que pode ser exemplificado pela redução de 85% da Floresta Atlântica na região⁴⁴. Essas bacias estão localizadas em áreas de grande adensamento populacional ou de importância socioeconômica, como o município do Rio de Janeiro, a Baixada Santista e a Região dos Lagos, entre outros. As mudanças nos usos dos solos, representadas pela urbanização, mineração, agricultura, pecuária e industrialização, vêm induzindo importantes transformações, com efeitos como redução no volume de água nos rios e no aporte fluvial aos estuários, poluição, desflorestamento, desabamentos de encostas, erosão e assoreamento, perda de biodiversidade, todos obviamente afetando a população que vive nessas regiões e ecossistemas continentais e costeiros^{45,46,47,48,49,50,51,52,53,54}.

Em relação a pequenos estuários da região norte do Estado do Rio de Janeiro, pode-se observar reduzida disponibilidade de informações sobre suas características. Essa lacuna de conhecimento no que concerne às variáveis hidroquímicas, produção primária e fluxos de materiais de regiões como a dos rios Macaé e das Ostras impossibilita a gestão integrada da bacia hidrográfica e da região estuarina, que poderia assegurar a qualidade das águas, da biodiversidade e dos serviços ecológicos e econômicos desses ambientes costeiros. Os estuários dos rios Macaé e das Ostras vêm sofrendo alterações devido ao cenário de crescimento socioeconômico induzido pelas atividades de exploração de petróleo e gás na Bacia de Campos ao longo dos últimos 40 anos, resultando em um rápido crescimento demográfico dos municípios de Macaé e Rio das Ostras.

Considerando que os estuários dos rios Macaé e das Ostras sejam influenciados por rios de pequenas áreas de bacias, 1.765 km² e 157 km², respectivamente, podem-se esperar classificações e condições similares dos estuários que proporcionarão similares cenários para gestões das águas. Além disso, as bacias possuem similares usos dos solos, com presença de cobertura vegetal original, pecuária, agricultura, embora seja diferente a extensão dessas atividades, enquanto ambos os estuários estão localizados em áreas

⁴⁴ RIBEIRO, M.C.; METZGER, J.P.; MARTENSEN, A.C.; PONZONI, F.J.; HIROTA, M.M. The Brazilian Atlantic Forest: how much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological Conservation**, v.142, p. 1141-1153, 2009.

⁴⁵ MOLISANI, M.M.; KJERFVE, B.; SILVA, A.P.; LACERDA, L.D. Water discharge and sediment load to Sepetiba Bay from an anthropogenically-altered drainage basin, SE Brazil. **Journal of Hydrology**, v.331, p. 425-433, 2006.

⁴⁶ MOULTON, T.P.; DE SOUZA, M.L.; OLIVEIRA, A.F. Conservation of catchments: some theoretical considerations and case histories from Rio de Janeiro. **Neotropical Biology and Conservation**, v.2, p. 28-35, 2007.

⁴⁷ COELHO-NETTO, A.L.; AVELAR, A.S.; LACERDA, W.A. Landslides and disasters in Southeastern and Southern Brazil. **Developments in Earth Surface Processes**, v.13, p. 223-243, 2009.

⁴⁸ GODIVA, D.; EVANGELISTA, H.; KAMPEL, M.; LICINIO, M.V.; MUNITA, C. Combined use of aerogammaspectrometry and geochemistry to access sediment sources in a shallow coral site at Armação dos Búzios, Brazil, *op. cit.*

⁴⁹ ANDRADE, T.M.B.; CAMARGO, P.B.; SILVA, D.M.L.; PICCOLO, M.C.; VIEIRA, A.S.; ALVES, L.F.; JOLY, C.A.; MARTINELLI, L.A. Dynamics of dissolved forms of carbon and inorganic nitrogen in small watersheds of the coastal Atlantic Forest in Southeast Brazil. **Water Air Soil Pollution**, v.214, p. 393-408, 2011.

⁵⁰ NETTO, A.L.C.; SATO, A.M.; AVELAR, A.S.; VIANNA, L.G.G.; ARAÚJO, I.S.; FERREIRA, D.L.C.; LIMA, P.H.; SILVA, A.P.A.; SILVA, R.P. The extreme landslide disaster in Brazil. In: PROCEEDINGS OF THE SECOND WORLD LANDSLIDE FORUM, Rome, 2011.

⁵¹ SILVEIRA, R.P.; RODRIGUES, A.P.C.; SANTELLI, R.E.; CORDEIRO, R.C.; BIDONE, E.D. Mass balance in the monitoring of pollutants in tidal rivers of the Guanabara Bay, Rio de Janeiro, Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.181, p. 165-173, 2011.

⁵² MOLISANI, M.M.; ESTEVES, F.A.; REZENDE, C.E.; LACERDA, L.D. Emissões naturais e antrópicas de nitrogênio, fósforo e metais para a bacia do rio Macaé (Macaé, RJ, Brasil) sob influência das atividades de exploração de petróleo e gás na Bacia de Campos. **Química Nova**, v.36, p. 27-33, 2013a.

⁵³ MOLISANI, M.M.; COSTA, R.N.; CUNHA, P.; REZENDE, C.E.; FERREIRA, M.I.P.; ESTEVES, F.A. Acute Toxicity Bioassay with the Amphipod, *Grandidierella bonnieroides* S. After Exposure to Sediments from an Urban Estuary (Macaé River Estuary, RJ, Brazil). **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v.90, p. 79-84, 2013b.

⁵⁴ CATELANI, P.A.; PETRY, A.C.; DI DARIO, F.; DOS SANTOS, V.L.; MINCARONE, M.M. Fish composition (Teleostei) of the estuarine region of the Macaé River, southeastern Brazil. **Check List**, v.10, p. 927-935, 2014.

urbanas. Apesar de haver reduzidas informações sobre esses estuários, são conhecidos os indícios de alteração e degradação, tanto na bacia quanto na região costeira, com reflexos na qualidade das águas e nos organismos estuarinos^{55,56,57,58,59,60}. Além disso, a transferência dos materiais fluviais pode afetar a região costeira adjacente. Um exemplo descrito é a transferência de partículas do rio Macaé através do seu estuário para a zona costeira, via deposição (*siltation*) em recifes de corais da espécie *Siderastrea stellata* na Praia da Tartaruga, no município de Armação dos Búzios⁶¹. Esse transporte está relacionado a características da bacia hidrográfica e do estuário do rio Macaé, como a fisiografia do relevo, associadas possivelmente, porém, à intervenção humana, como a retificação do rio, a mudança da cobertura vegetal e a possível intensificação de processos erosivos dos solos⁶². Entretanto, características da bacia do rio das Ostras e de seu estuário reduzem sua participação no balanço costeiro e partículas, possivelmente devido ao reduzido aporte fluvial. Desse modo, este estudo visa avaliar as condições dos estuários dos rios Macaé e das Ostras testando a hipótese: “Pequenos estuários alimentados por pequenas bacias hidrográficas são iguais em relação à hidroquímica, à produção primária e aos fluxos de materiais entre o continente e o oceano”, sendo essas informações fundamentais na geração de subsídios para a gestão das águas que integre bacia hidrográfica, estuário e zona costeira.

Área de estudo

As áreas abrangidas pelo presente estudo compreendem os estuários do rio Macaé e do rio das Ostras e suas respectivas bacias, que fazem parte da Região Hidrográfica VIII (RH-VIII), localizada na região Norte-Fluminense (Figura 1).

⁵⁵ MOLISANI, M.M. et al. Emissões naturais e antrópicas de nitrogênio, fósforo e metais para a bacia do rio Macaé (Macaé, RJ, Brasil) sob influência das atividades de exploração de petróleo e gás na Bacia de Campos. **Química Nova**, v.36, p. 27-33, 2013a.

⁵⁶ Molisani, M.M. et al. Acute Toxicity Bioassay with the Amphipod, *Grandidierella bonnieroides* S. After Exposure to Sediments from an Urban Estuary (Macaé River Estuary, RJ, Brazil), *op. cit.*

⁵⁷ PINHEIRO, M.R.C. **Avaliação de usos preponderantes e qualidade da água como subsídios para os instrumentos de gestão dos recursos hídricos, aplicada à bacia hidrográfica do rio Macaé**. Dissertação (Mestrado) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Campos, 2008.

⁵⁸ BERENQUER, J.N. et al. Effects of the environmental quality and oil derivative on the hepatic enzymatic activities in a tropical estuarine catfish (*Genidens genidens*) and the implications for field contamination assessment. **Ecotoxicology and Environmental Safety** [submetido].

⁵⁹ SANTIAGO, I.U. et al. Hydrocarbons and trace metals in mussels in the Macaé coast: Preliminary assessment for a coastal zone under influence of offshore oil field exploration in southeastern Brazil. **Marine Pollution Bulletin**, v.103, p. 349-353, 2016.

⁶⁰ Catelani, P.A. et al. Fish composition (Teleostei) of the estuarine region of the Macaé River, southeastern Brazil, *op. cit.*

⁶¹ GODIVA, D. et al. Combined use of aerogrammaspectrometry and geochemistry to access sediment sources in a shallow coral site at Armação dos Búzios, Brazil, *op. cit.*

⁶² MOLISANI, M.M. et al. Mismatch Between Sediment Metal Distribution and Pollution Source Gradient: A Case Study of a Small-Size Drainage Basin (Southeastern Brazil). *op. cit.*

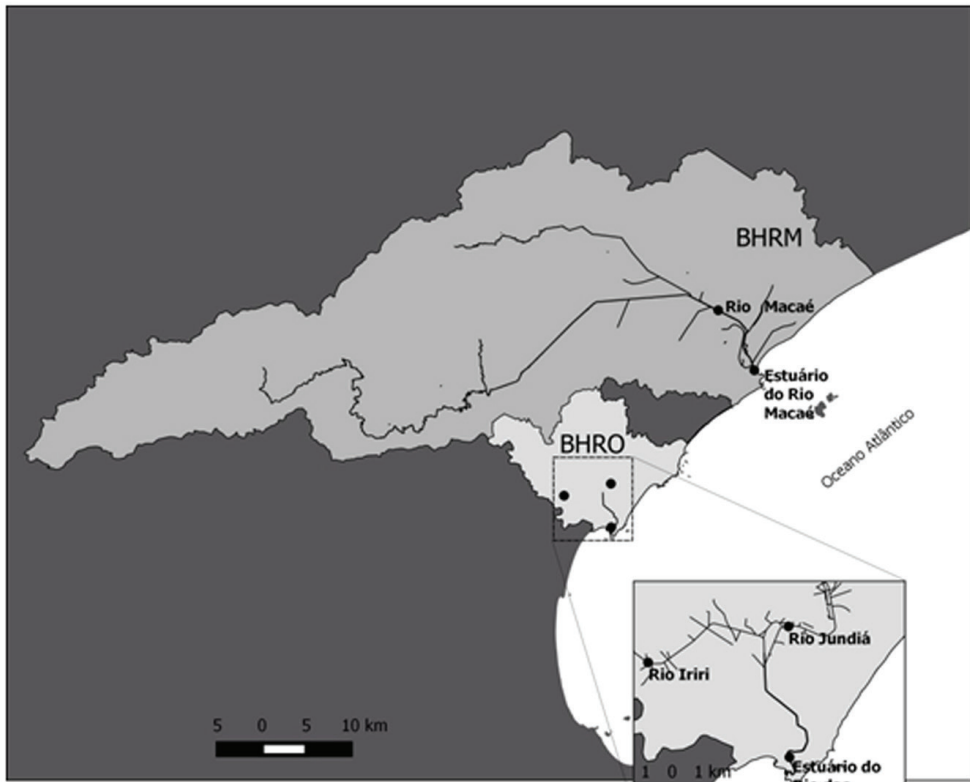


Figura 1 - Área de estudo indicando as bacias hidrográficas dos rios Macaé (BHRM) e das Ostras (BHRO) e seus respectivos estuários. Os círculos (pontos de coleta) indicam a amostragem da porção fluvial no baixo curso do rio e na seção transversal do estuário onde foram realizadas as análises em ciclos de maré

Bacia e estuário do Rio Macaé

O rio Macaé é considerado um rio de pequeno porte, com área da bacia hidrográfica de 1.765 km² e extensão do canal fluvial de 136 km. A bacia abrange parte dos municípios de Macaé (1.448 km²), Rio das Ostras (11 km²), Carapebus (11 km²), Casimiro de Abreu (83 km²), Conceição de Macabu (70 km²) e Nova Friburgo (142 km²). Sua nascente está localizada a 1.660 m de altitude, no interior do Parque Nacional dos Três Picos, no município de Nova Friburgo, compreendendo extensos remanescentes relativamente bem preservados de Mata Atlântica (Macaé de Cima). O relevo da bacia do rio Macaé caracteriza-se pela presença de montanhas (parte integrante da Serra do Mar) de encostas íngremes e por uma extensa planície litorânea localizada a leste. O curso alto e médio da bacia do rio Macaé apresenta rochas de idades pré-cambrianas (mais de 1,8 bilhão de anos) em vales profundos e escarpados escavados pelos rios e sujeitos a intensos processos erosivos e deslizamentos de terra. Já a parte baixa da bacia do rio

Macaé tem origem sedimentar (formada por acúmulo de sedimentos holocênicos)⁶³. O clima de sua bacia é tropical úmido e varia de acordo com a altitude e a disposição do relevo, das massas de ar e da proximidade com o oceano. Apresenta diferentes condições em cada parte da bacia, com um clima mais frio e úmido e maior pluviosidade média anual (2.119 mm) devido a chuvas orográficas em seu alto curso, e menor pluviosidade e maior temperatura em seu baixo curso. Para este trecho da bacia, a precipitação média anual fica entre 1.500 a 2.000 mm, e temperaturas oscilam entre 17,5 a 25°C. A estação chuvosa se estende de novembro a março, e a estação seca de abril a outubro. A calha principal percorre o sentido leste-oeste, com uma vazão média de 20,4 m³/s na altura da BR101, e deságua no Oceano Atlântico, junto à cidade de Macaé, como um rio de sétima ordem⁶⁴. Em relação à cobertura vegetal, a bacia do rio Macaé caracteriza-se pelo predomínio de formações florestais da Mata Atlântica, diferenciadas pela variação de altitude e drenagem das áreas. A cobertura anterior às alterações humanas era de: (a) florestas ombrófilas nas montanhas e nas áreas de baixada não alagáveis; (b) florestas paludosas em áreas alagáveis das planícies de inundação; (c) campo nas porções de planície; (d) brejos (alagamento constante); (e) restingas onde o solo era arenoso; e (f) mangues nos solos formados por argila⁶⁵. Ao longo de sua bacia, há diferentes usos do solo, que variam de áreas de cobertura florestal (41%) no seu alto curso, até áreas de pastagens (34%), agricultura (19%) e zonas urbanas (3,7%) em seu baixo curso⁶⁶. O município de Macaé teve um forte crescimento populacional em curto período de tempo, sendo que, a partir da década de 70, sua população aumentou de aproximadamente 50 mil para mais de 200 mil pessoas em 2010, devido às atividades de exploração de petróleo na Bacia de Campos. Esse cenário impulsionou taxas anuais de crescimento econômico de 5,7%, enquanto a média do Estado do Rio de Janeiro era de 0,5%⁶⁷.

O estuário está localizado na porção urbanizada da bacia. Seu canal estuarino principal possui largura máxima de 130 m e profundidade máxima de 3,8 m. É influenciado por maré semidiurna do tipo micromaré, cujas amplitudes médias variam de 0,5 a 1,3 m nas marés de quadratura e sizígia, respectivamente. No entorno há fragmentos de manguezais, embora a ocupação municipal desordenada seja a principal paisagem observada na foz. Os impactos ambientais na região estuarina tiveram início no século XVIII, quando, nas proximidades desta, se instalou a sede do município de Macaé, RJ. As margens do estuário, que antes eram pouco povoadas e apresentavam extensas áreas de várzea, ao longo dos anos, e devido ao crescimento urbano, sofreu inúmeras alterações. Dentre elas, destacam-se obras de dragagem, retificação e alargamento nos 26 km de extensão do baixo curso do rio Macaé, no final da década de 60, pelo

⁶³ ALMEIDA *et al.* **Geologia e recursos minerais da folha Macaé SF.24-Y-A-1, Estado do Rio de Janeiro**. Belo Horizonte: CPRM, 2012.

⁶⁴ AMARAL, K.J. **Estuário do Rio Macaé**: Modelagem Computacional como Ferramenta para o Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.

⁶⁵ ALMEIDA *et al.* **Geologia e recursos minerais da folha Macaé SF.24-Y-A-1**, *op. cit.*

⁶⁶ PINHEIRO, M.R.C. **Avaliação de usos preponderantes e qualidade da água como subsídios para os instrumentos de gestão dos recursos hídricos, aplicada à bacia hidrográfica do rio Macaé**, *op. cit.*

⁶⁷ IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas. O Brasil município por município. Disponível em <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>. Acesso em: 2010.

extinto Departamento Nacional de Obras e Saneamento (DNOS). Com a retificação, observou-se a eliminação das lagoas marginais, e, com a mudança no uso dos solos e o aumento dos processos erosivos, o assoreamento do leito. A partir da década de 70, com a exploração *offshore* de petróleo e gás da Bacia de Campos, observou-se um intenso crescimento populacional e econômico, que gerou uma pressão cada vez maior sobre os recursos naturais, alterando as condições ambientais do baixo curso do rio. O estuário do rio Macaé, apesar dos diversos impactos existentes em seu entorno, apresenta grande importância econômica e histórica para a região, porém recebe quase que a totalidade do esgoto sem tratamento produzido no município^{68,69}.

Bacia e estuário do Rio das Ostras

A bacia de drenagem do rio das Ostras é limitada a oeste com a bacia do rio São João, ao norte com a bacia do rio Macaé e a leste com a bacia da lagoa Imboassica. Os municípios que fazem parte da bacia do Rio das Ostras são Casimiro de Abreu e Rio das Ostras, sendo que este último apresenta maior participação territorial (92,5% da bacia). A bacia hidrográfica drena uma área de 157 km², sendo formada por dois afluentes principais: os rios Iriri e Jundiá⁷⁰. Embora sejam ambientes de baixa energia, transportam água e sedimentos finos para o estuário. Em relação à geomorfologia da bacia hidrográfica, podem-se observar dois tipos de sistemas de relevo: os relevos de agradação e de degradação. Os primeiros podem ser divididos em: a) planícies aluviais (formadas por sedimentos argilo-arenosos, padrão de drenagem variando de bem drenado a mal drenado); b) colúvio-aluviais (formadas por sedimentos argilo-arenosos, mal drenados); e c) flúvio-lagunar (depósitos de sedimentos argilosos orgânicos de paleolagunas, muito mal drenados). Quanto aos relevos de degradação, têm-se: a) colinas isoladas (amplitude topográfica inferior a 100 m); b) domínio suave colinoso (amplitude topográfica inferior a 50 m); c) domínio colinoso (inferior a 100 m); d) alinhamentos serranos e degraus estruturais (apresentam grande amplitude topográfica – 300 a 700 m); e) escarpas serranas (amplitude topográfica superior a 500 m)⁷¹. A bacia hidrográfica do rio das Ostras, devido às suas características fisiográficas, com reduzida declividade do relevo (declividade média de 0,0207 m/m) é caracterizada por apresentar várias áreas de inundação e forte influência do regime de marés sobre o rio, com entrada da língua salina até o trecho onde o Valão das Corujas desemboca no rio das Ostras (6 km a partir da foz)⁷². Ao longo dessa bacia, o rio atravessa pastagens e

⁶⁸ COSTA, R.N.; FERREIRA, M.I.P. **A conferência da Terra: Aquecimento global, sociedade e biodiversidade** O impacto secundário da atividade petrolífera na cidade de Macaé com base na fotointerpretação de imagens aéreas. João Pessoa: Editora Universitária da UFPB, 2010. v.2, p. 142-150.

⁶⁹ RESSIGUIER, J. H. P. **Atividade Petrolífera e Impactos no Espaço Urbano do Município de Macaé: 1970-2010**. 2011. Dissertação (Mestrado em Planejamento Regional e Gestão de Cidades) - Universidade Candido Mendes, UCAM, Campos de Goytacazes, RJ, 2011.

⁷⁰ PRIOSTE, M.A.O. **Bacia Hidrográfica do rio das Ostras: proposta para gestão ambiental sustentável**. 2007. 193 p. Dissertação (Mestrado) - PEAMB/UERJ, Rio de Janeiro, 2007.

⁷¹ PRIOSTE, M.A.O. **Bacia Hidrográfica do rio das Ostras: proposta para gestão ambiental sustentável**, *op. cit.*

⁷² SEMADS. GTZ. Subsídios para Gestão dos Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos rios Macacu, São João, Macaé e Macabu. In: **Projeto PLANÁGUA-SEMADS/GTZ de Cooperação Técnica Brasil-Alemanha**. Rio de Janeiro, 1999.

alagados, e apresenta uma faixa de manguezal em sua foz que é protegida também por lei municipal. O rio das Ostras também sofreu impactos da retificação da sua calha, com modificações no regime de descargas, aumento da velocidade de escoamento e aumento da quantidade de sedimentos provenientes da erosão dos bancos de areia, inclusive devido à dragagem^{73,74}. Os índices de precipitação da região de Rio das Ostras são considerados os mais baixos entre as regiões do Estado. A pluviosidade média anual está em torno dos 1.300 a 1.500 mm. A temperatura média anual na região fica entre 20° e 25°. Em relação ao uso e ocupação do solo, pode-se destacar a pecuária. Em relação ao total das terras disponíveis na área rural no município de Rio das Ostras (17.993 ha), 66,5% (11.975 ha) são ocupados por pastagens, sendo que apenas 2,46% (442 ha) do total são representados por terras produtivas utilizadas na lavoura (permanente e temporária). Em relação às matas naturais e plantadas, ocupam 27% da área da bacia (4.858 ha)⁷⁵. Recentemente, entre 1991 e 2015, o município de Rio das Ostras teve uma taxa de crescimento de 720%, passando de 18.195 habitantes para uma população estimada de 131.976 (IBGE, 2014). Segundo dados do Censo de 2000, a urbanização na área de estudo é bastante elevada (95% das pessoas vivem em áreas urbanas). Também se pode observar uma tendência de adensamento e verticalização e reservas de terras para especulação urbana, nas áreas já consolidadas e em áreas rurais⁷⁶. O turismo, acentuado no verão, ocasiona um aumento expressivo da população na bacia. A bacia hidrográfica do rio das Ostras tem sofrido interferências antrópicas por muitas décadas, das quais se destacam a erosão em antigas áreas de exploração de saibro e em áreas de pasto em colinas, arraste de materiais e assoreamento de canais, riscos de enchentes em áreas urbanas, ocupação urbana em planícies alagáveis, além de o estuário também receber parte do esgoto não tratado do município^{77,78}.

Metodologia

A amostragem contemplou quatro campanhas, sendo duas no rio Macaé e outras duas no rio das Ostras, realizadas em outubro de 2014. O posicionamento geográfico dos pontos amostrais está identificado na Figura 1. As campanhas foram realizadas visando caracterizar o aporte fluvial da bacia hidrográfica, incluindo medições da vazão, de concentrações de material particulado em suspensão, nutrientes e clorofila *a*, bem como dos fluxos desses materiais da bacia hidrográfica para o estuário. Essa região representa o trecho mais a jusante da bacia sem influência da salinidade ou do volume da maré, sendo referente à porção inferior das bacias. Os mesmos fluxos e variáveis foram obtidos nos estuários em coletas horárias ao longo de um ciclo de maré de quadratura e sizígia, em uma seção transversal fixa, localizada a aproximadamente 400 m da desembocadura da foz do rio Macaé e 700 m da foz do rio das Ostras.

⁷³ PRIOSTE, M.A.O. Bacia Hidrográfica do rio das Ostras: proposta para gestão ambiental sustentável, *op. cit.*

⁷⁴ RIO DAS OSTRAS Prefeitura Municipal. **Diagnóstico Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio das Ostras**. 2004. 147 p.

⁷⁵ PRIOSTE, M.A.O. **Bacia Hidrográfica do rio das Ostras**: proposta para gestão ambiental sustentável, *op. cit.*

⁷⁶ PRIOSTE, M.A.O. **Bacia Hidrográfica do rio das Ostras**: proposta para gestão ambiental sustentável, *op. cit.*

⁷⁷ *Ibid.*

⁷⁸ RIO DAS OSTRAS Prefeitura Municipal. **Diagnóstico Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio das Ostras**. 2004. 147 p.

Tanto na porção fluvial quanto no estuário, foram realizadas medições *in situ* de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), salinidade, condutividade ($\mu\text{s}/\text{cm}^2$), pH e oxigênio dissolvido (mg/L). Na porção fluvial, a vazão (m^3/s) do rio Macaé e a dos rios Iri e Jundiá foram medidas através da obtenção da área da seção transversal (comprimento e profundidade de cada seção transversal) e da velocidade da corrente de água medida por um correntômetro mecânico. No estuário do rio Macaé, as medições horárias dos fluxos de água nas marés de enchente e de vazante ao longo de cada ciclo de maré semidiurno de sizígia e quadratura foram realizadas utilizando um correntômetro de efeito Doppler (ADCP) ancorado a um barco. Devido à reduzida profundidade e à limitação do uso do ADCP, no estuário do rio das Ostras, os fluxos de água foram medidos por meio da medição da área da seção transversal e da velocidade da corrente utilizando o correntômetro mecânico.

As amostras de água de subsuperfície e de fundo foram coletadas principalmente no estuário do rio Macaé, enquanto nas outras áreas somente amostras de superfície foram coletadas devido à reduzida profundidade. As amostras de água foram filtradas em membrana de poro de $0,45\ \mu\text{m}$ para obtenção da fração dissolvida de nutrientes e das partículas em suspensão, enquanto outras amostras foram filtradas em membranas de poro de $0,8\ \mu\text{m}$ para análise de clorofila α . As análises de nutrientes englobam as formas de nitrogênio total (NT, mg/L), nitrogênio total dissolvido (NTD, mg/L), amônia (NH_4^+ , mg/L), fósforo total (PT, mg/L) e fosfato (PO_4^{3-} , mg/L). Para a determinação das concentrações de partículas em suspensão (MPS), alíquotas de volumes filtrados foram relacionadas à massa retida nos filtros por meio de gravimetria (STRICKLAND; PARSONS, 1972). Os nutrientes NT e NTD foram analisados por combustão pirolítica em equipamento TOC-Vcpn Shimadzu, enquanto NH_4^+ , PT, PO_4^{3-} foram determinados por colorimetria e espectrofotometria de UV_{vis}^{79,80}. Para a determinação de clorofila α ($\mu\text{g}/\text{L}$), o material retido em membrana foi extraído em etanol 90%, e foi realizada leitura em espectrofotometria de UV_{vis}⁸¹.

A partir das vazões nos rios e nos estuários, e das concentrações dos nutrientes e partículas em suspensão, foram calculados fluxos dos materiais e balanços acoplando a bacia hidrográfica, estuário e zona costeira. Os fluxos fluviais instantâneos (g/s) foram calculados, enquanto nos estuários foram medidos fluxos de enchente e vazante (g/s) e os balanços de massa (fluxo residual), adotando por convenção os fluxos de importação (-) e de exportação (+) no estuário⁸².

Resultados e discussão

A Tabela 2 apresenta os valores médios (desvio padrão) dos parâmetros analisados na porção inferior dos rios Macaé e das Ostras e nos respectivos estuários. Comparando as bacias hidrográficas, podemos ressaltar que, embora sejam pequenas

⁷⁹ STRICKLAND, J. D. H.; PARSONS, T. R. **A Practical Handbook of Seawater Analysis**. 2ª ed. Ottawa: Fisheries Research Board of Canada, 1972. 167 p. (Bulletin, 167).

⁸⁰ CARMOUZE, J.P. **O metabolismo dos ecossistemas aquáticos**: fundamentos teóricos, métodos de estudo e análises químicas. São Paulo: Editora Edgard Blucher: FAPESP, 1994. 254 p.

⁸¹ NUSCH, E.A.; PALME, G. Biologische methoden für die praxis der gewässeruntersuchung 1. Bestimmung des Chlorophyll a und Phaeopigmentgehaltes in Oberflächenwasser. **GWF**, v. 116, n. 12, p. 562-565, 1975.

⁸² KJERFVE, B. et al. Estimation of material fluxes in an estuarine cross section: a critical analysis of spatial measurement density and errors. **Limnology and Oceanography**, v. 26, p. 325-335, 1981.

bacias, a diferença de uma ordem de grandeza das áreas dos rios Macaé e das Ostras (1.765 km² e 157 km², respectivamente) insere diferentes magnitudes de vazões fluviais que são transferidas para o estuário (12 m³/s e 3,1 m³/s, respectivamente). É importante ressaltar que essas vazões são vazões típicas da estação seca, enquanto, na estação de chuvas, vazões máximas no rio Macaé foram medidas em 170 m³/s no ano de 2013⁸³. Esse valor ficou próximo do valor estimado para picos de vazão com tempo de retorno de 2 anos, enquanto vazões máximas de tempo de recorrência de 100 anos na foz do rio Macaé podem chegar a até 1.312 m³/s, sendo esses valores similares a outras estimativas⁸⁴. Para a bacia do rio das Ostras, não há medições de valores máximos, que podem ser bastante episódicos, visto a reduzida área e declividade da bacia. Enquanto no rio Macaé foi amostrada água fluvial, as águas salobras observadas nos rios Jundiá e Iriri indicam misturas de águas fluviais e marinhas, sugerindo que as vazões realmente fluviais sejam ainda menores do que as medidas nesses rios. Esses dados indicam que essa bacia sofre forte influência do regime de marés, com entrada da cunha salina que pode chegar a até mais do que 6 km a partir da foz⁸⁵.

De uma maneira geral, ambas as bacias possuem águas bem oxigenadas, com similares concentrações de material particulado em suspensão. O pH indicou águas ácidas para ambas as bacias, sendo menor o pH na porção inferior dos rios Jundiá e Iriri. As concentrações dos nutrientes e de clorofila *a* foram maiores na bacia do rio das Ostras. Essa análise indica que as menores vazões nos rios Jundiá e Iriri podem reduzir a capacidade de diluição de efluentes não tratados, como os provenientes da urbanização (esgoto doméstico) e da pecuária, entre outras fontes distribuídas nessas sub-bacias, tornando essas águas mais suscetíveis às entradas de nutrientes e resultando em maiores concentrações de N e P. Por outro lado, no rio Macaé, apesar de esse rio receber maiores cargas de N e P de fontes naturais e antrópicas devido, por exemplo, à maior população residente na bacia (MOLISANI *et al.*, 2013), as menores concentrações de nutrientes nas águas fluviais podem estar relacionadas à maior vazão fluvial e, conseqüentemente, à capacidade de diluição mais eficiente dos efluentes, além da retenção, em solos mais extensos, das emissões de nutrientes, como, por exemplo, da pecuária.

Tabela 2 - Média (DP) dos valores de vazão, parâmetros físicos, químicos e biológicos do aporte fluvial das porções finais das bacias dos rios Macaé e das Ostras (n=4) e nos estuários (n=144).

	Rio Macaé	Estuário	Rio das Ostras		Estuário
			Rio Iriri	Rio Jundiá	
Vazão	12 ± 2,7	34 ± 18	0,72 ± 0,1	2,4 ± 0,3	4,1 ± 4,5
Salinidade	0 ± 0	19 ± 0,7	0,35 ± 0,1	10 ± 13	34 ± 0,7
pH	6,5 ± 0,7	8,0 ± 0,1	5,4 ± 1,6	5,3 ± 0,4	7,6 ± 1,1
O ₂ dissolvido	6,2 ± 0,1	7,5 ± 0,6	6,0 ± 1,4	7,3 ± 3,9	5,5 ± 0,04
MPS	5,8 ± 1,0	32 ± 11	5,1 ± 0	5,1 ± 0	33 ± 7,8
NT	0,33 ± 0,1	0,90 ± 0,1	2,7 ± 0,8	4,1 ± 0,4	0,96 ± 0,25
NTD	0,20 ± 0	0,73 ± 0,01	2,3 ± 0,6	3,3 ± 0,1	0,77 ± 0,1
NH ₄ ⁺	0,035 ± 0,02	0,35 ± 0,1	0,86 ± 0,2	1,74 ± 0,020	0,07 ± 0,02
PT	0,070 ± 0	0,25 ± 0,1	0,10 ± 0	0,09 ± 0,01	0,10 ± 0,11
PO ₄ ³⁻	0,025 ± 0	0,09 ± 0,04	0,035 ± 0	0,07 ± 0,01	0,13 ± 0,01
N:P	4,7 ± 1,1	8,6 ± 1,9	71 ± 16	46 ± 10	13 ± 3,1
Chl <i>a</i>	2,9 ± 0	5,5 ± 2,1	-	21,6 ± 0	2,1 ± 0,6

⁸³ Molisani, M.M. *et al.* Temporal and spatial fluxes of water, suspended matter and nutrients of typical small coastal river from Southeast Atlantic Basins (22-29°S), Brazil. **Hydrological Processes** [submetido].

⁸⁴ BARBOZA, A.P. **Estudo hidrológico de vazões máximas na Bacia do Rio Macaé**. Monografia (Graduação) - Escola Politécnica da UFRJ, 2014.

⁸⁵ SEMADS. GTZ. Subsídios para Gestão dos Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos rios Macacu, São João, Macaé e Macabu. In: **Projeto PLANÁGUA SEMADS GTZ de Cooperação Técnica Brasil-Alemanha**, *op. cit.*

Outra análise oriunda da Tabela 2 é a comparação das condições dos estuários. Da mesma forma que para as bacias hidrográficas, as magnitudes dos fluxos de enchente e vazantes nos estuários foram diferentes, sendo maiores os fluxos de água no estuário do rio Macaé, o que provavelmente explica suas águas serem mais oxigenadas. A interação dos fluxos fluviais e marinhos conferem águas salobras ao estuário do rio Macaé, enquanto o reduzido aporte de água da bacia confere águas tipicamente marinhas ao estuário do rio das Ostras. Essas diferenças das massas de água indicam que o estuário do rio Macaé é mais influenciado pelo aporte da bacia hidrográfica, enquanto o estuário do rio das Ostras parece ser mais influenciado pelo oceano costeiro e a ação de marés. O pH e as partículas em suspensão foram similares entre as áreas. Em relação aos nutrientes, os estuários foram similares em relação ao NT, NTD e PO_4^{3-} , enquanto NH_4^+ , PT e clorofila α foram maiores no estuário do rio Macaé. Essa distribuição pode refletir a influência da carga de esgoto doméstico sem tratamento que é lançada em ambos os estuários, mas sendo maior a quantidade lançada no rio Macaé, além das emissões de nutrientes por outras fontes, que são mais diversas e em maior quantidade nessa bacia^{86,87}. O estudo de Molisani *et al.* (2013)⁸⁸ avaliou, por meio da metodologia de Fatores de Emissões, as cargas de N e P para a bacia do rio Macaé oriundas de processos naturais, como erosão e lixiviação de solos e pela deposição atmosférica; e por atividades humanas, como urbanização (esgoto, lixo e escoamento), agricultura e pecuária. Dentre essas fontes, as emissões antrópicas são responsáveis por 90% e 99% das emissões de N e P, de um total de 1.599 ton/ano e 787 ton/ano, respectivamente. Das atividades humanas que contribuem para esse aporte, a pecuária (620 e 377 ton/ano, respectivamente) e o lançamento de esgoto doméstico (550 e 262 ton/ano, respectivamente) são as principais fontes de emissão dos nutrientes para a bacia que são transferidos para o estuário. Por fim, a produção primária representada pela clorofila α indicou maior presença de biomassa de fitoplâncton no estuário do rio Macaé, possivelmente associada à maior concentração e carga de nutrientes (NH_4^+) nessa região, enquanto em Rio das Ostras a biomassa de fitoplâncton foi menor, provavelmente relacionada ao menor aporte de nutrientes. As razões médias N:P para os estuários do rio Macaé (7:1) e do rio das Ostras (15:1) foram menores do que a razão proposta por Redfield (16:1), o que sugere que o nitrogênio seja limitante para a produção primária, principalmente para o estuário do rio Macaé, ou que haja enriquecimento de fósforo que sustente a maior produção de biomassa do fitoplâncton nesse estuário.

Por fim, os dados da Tabela 2 fornecem a comparação entre as condições da porção inferior das bacias hidrográficas e de seus respectivos estuários. A interação das águas fluviais com as águas marinhas resulta na água salobra do estuário do rio Macaé, enquanto o reduzido aporte fluvial aumenta a importância da água marinha no estuário do rio das Ostras, como observado nos valores de salinidade. Os fluxos

⁸⁶ PRIOSTE, M.A.O. **Bacia Hidrográfica do rio das Ostras**: proposta para gestão ambiental sustentável, *op. cit.*

⁸⁷ MOLISANI, M.M. *et al.* Emissões naturais e antrópicas de nitrogênio, fósforo e metais para a bacia do rio Macaé (Macaé, RJ, Brasil) sob influência das atividades de exploração de petróleo e gás na Bacia de Campos. **Química Nova**, v.36, p. 27-33, 2013.

⁸⁸ *Ibid.*

de água de enchente e vazante nos estuários mobilizam mais água do que as bacias hidrográficas transferem, sendo maior essa diferença no estuário do rio Macaé, o que talvez esteja relacionado com a sua morfologia e posição costeira. Desse modo, podemos esperar que os estuários tenham importância na transferência de materiais para a zona costeira, amplificando os aportes fluviais devido ao maior volume de água movimentado no estuário em relação ao que chega pelas bacias. As águas do estuário do rio Macaé estiveram mais oxigenadas do que as do rio, sugerindo que a ação da mistura das massas de água seja responsável pela melhora da sua oxigenação. Porém, no estuário do rio das Ostras, podemos observar uma piora dos níveis de oxigênio dissolvido no estuário em relação ao aporte fluvial. O menor fluxo de água entre a bacia hidrográfica e o estuário pode dificultar a solubilização de oxigênio atmosférico nas águas, associado à menor produção primária que reduz o aporte de oxigênio pela fotossíntese. Por outro lado, a pior qualidade das águas fluviais do rio das Ostras sugere transferência de matéria orgânica da bacia que induz o consumo de oxigênio no estuário. Como os dois estuários são urbanos e recebem esgoto não tratado, podemos supor que o maior volume e movimentação de água em Macaé podem contribuir na melhor qualidade desse parâmetro, associado à maior produção primária do fitoplâncton. É interessante notar que os dois estuários tiveram a mesma intensidade de aumento das concentrações de partículas em suspensão em relação às bacias contribuintes. Um fator que explique este aumento pode ser a maior mobilização de água nos estuários, que acarreta maior ressuspensão de partículas bentônicas. Outro fator pode estar relacionado à produção primária de fitoplânctônica e à produção de partículas orgânicas, sendo mais importante esse fator no estuário do rio Macaé, que apresentou maiores concentrações de clorofila α em relação à sua bacia.

Todas essas análises nos fornecem condições para classificar a porção final das bacias e os estuários de acordo com os usos preponderantes das águas, como preconizado pela Resolução CONAMA 357⁸⁹. Segundo esse enquadramento, a porção final do rio Macaé é considerada classe 1 de acordo com as concentrações de nitrogênio amoniacal, oxigênio dissolvido e clorofila α , e Classe 2 de acordo com os teores de fósforo total. O estuário do rio Macaé, considerado como ambiente de água salobra, foi enquadrado na Classe 1 para oxigênio dissolvido, amônia, embora seja Classe 3 para fósforo total. Como os rios Jundiá e Iriri possuíam água salobra durante as coletas, foram analisados como tal de acordo com a Resolução CONAMA n^o 357. Segundo o enquadramento, os rios foram considerados como classe 1 de acordo com as concentrações de fósforo total e oxigênio dissolvido, e Classe 3 considerando pH e nitrogênio amoniacal. Em relação ao estuário do rio das Ostras, as águas foram consideradas como marinhas, e o enquadramento conferiu Classe 1 para nitrogênio amoniacal e Classe 2 para oxigênio dissolvido e fósforo total. Desse modo, dependendo do parâmetro, os ambientes analisados, ambos os rios e ambos os estuários, podem ser enquadrados na classe especial, cujas águas podem ser usadas para abastecimento humano com desinfecção (rios), preservação do

⁸⁹ CONAMA. Resolução no 357 do Conselho Nacional de Meio Ambiente. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências, 2005.

equilíbrio natural das comunidades aquáticas, recreação, e até na classe 3, em que os usos são restritos a navegação e harmonia da paisagem. Apesar de não ter sido realizada uma classificação baseada em estado trófico, o enquadramento das águas segundo seus usos preponderantes nos dá uma dimensão da qualidade das águas dos estuários.

A qualidade das águas dos estuários, que se reflete, por exemplo, no enquadramento dos usos preponderantes das águas, é influenciada pelas emissões de nutrientes oriundos de processo naturais e atividades humanas, pelos aspectos hidrológicos, morfológicos, climáticos e oceanográficos, entre outros. Parte desses aspectos foi analisada ao longo de ciclos de marés de sizígia e quadratura nos estuários (Figuras 2-7). Os fluxos de água nos estuários indicaram que um volume maior de água é transportado na maré de sizígia, sendo observados no estuário do rio Macaé os maiores fluxos de água (Figura 2). As velocidades de corrente, tanto na vazante quanto na enchente, foram maiores no estuário do rio Macaé (0,4 – 0,6 m/s) do que no estuário do rio das Ostras (0,1 – 0,3 m/s).

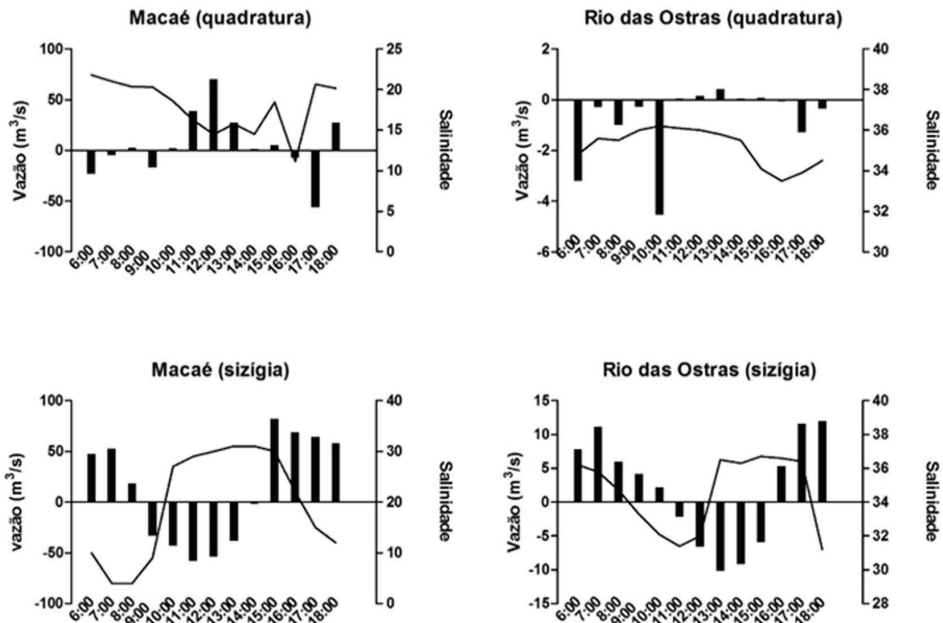


Figura 2 - Vazões horárias do estuário do rio Macaé e do rio das Ostras nas marés de quadratura e sizígia. Valores negativos (enchente) e valores positivos (vazante).

Nas Figuras 3 e 4 são apresentados parâmetros como temperatura, partículas em suspensão e salinidade na superfície e fundo da coluna d'água dos estuários, nas marés de sizígia e quadratura. As distribuições horárias dentro dos ciclos de marés de quadratura indicaram que o estuário do rio Macaé possui estratificação térmica e de salinidade, enquanto no estuário do rio das Ostras não foram observadas estratificações,

sendo a coluna d'água homogênea. Por outro lado, na maré de sizígia, a estratificação não fica aparente, sugerindo que ambos os estuários não sejam estratificados. Em relação às partículas em suspensão, o fundo da coluna d'água teve maiores concentrações devido ao processo de ressuspensão pela entrada da cunha salina no estuário do rio Macaé, enquanto no estuário do rio das Ostras essa distribuição foi mais homogênea, sendo a ausência da estratificação relacionada à menor profundidade deste estuário.

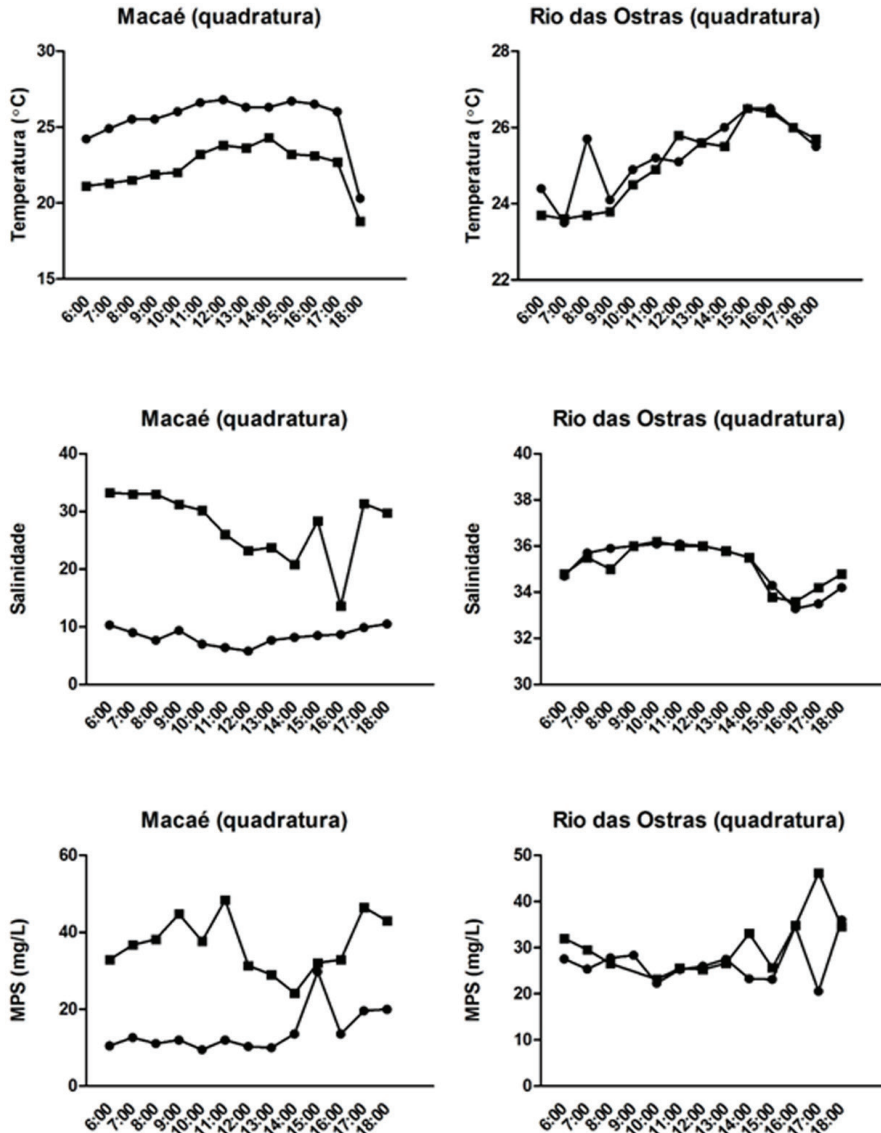


Figura 3 - Variação horária de parâmetros físico-químicos ao longo de um ciclo de maré de quadratura nos estuários dos rios Macaé e das Ostras

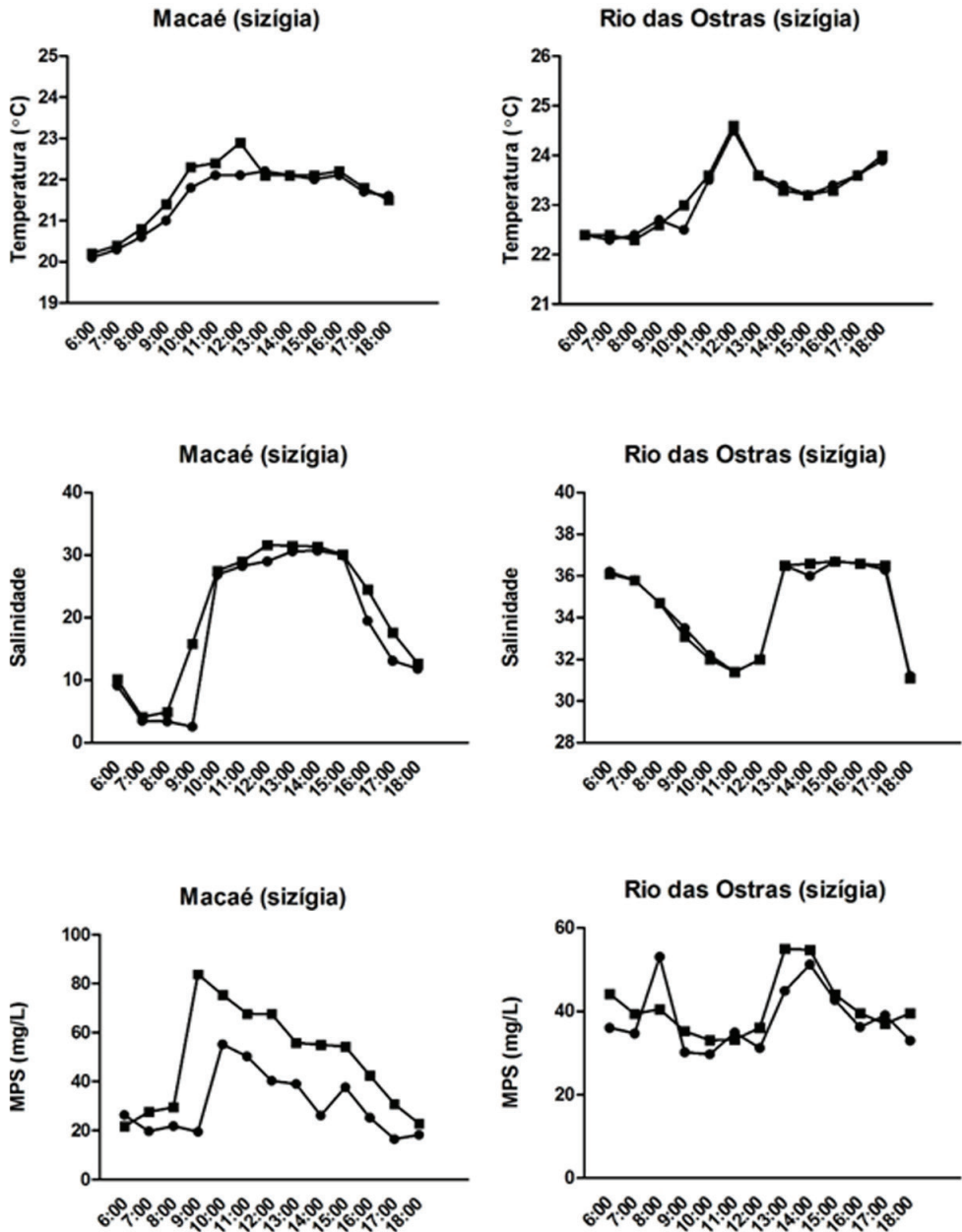


Figura 4 - Variação horária de parâmetros físico-químicos ao longo de um ciclo de maré de sizigia nos estuários dos rios Macaé e das Ostras

Em uma condição estratificada típica de estuários forçados por descarga fluvial moderada com amplitude de maré pequena, como o do rio Macaé, presume-se que o entranhamento seja o mecanismo predominante de transferência de água diante do perfil vertical de salinidade e velocidade, característico desse tipo de estuário⁹⁰. Em estuários bem misturados, como o estuário do rio das Ostras, que foi caracterizado como verticalmente homogêneo nas duas marés consecutivas, os mecanismos de mistura preponderantes são de natureza advectiva e por difusão turbulenta, que permitem a homogeneização vertical, com o aumento da salinidade na superfície da coluna d'água e a onda de maré se estendendo por longas distâncias estuário acima⁹¹.

As Figuras 5 e 6 apresentam a variação horária das concentrações de nutrientes ao longo dos ciclos de marés de quadratura e sizígia para ambos os estuários. Segundo essa comparação, os teores de nutrientes foram similares, à exceção da amônia e do fósforo total, que foram maiores no estuário do rio Macaé (Tabela 1).

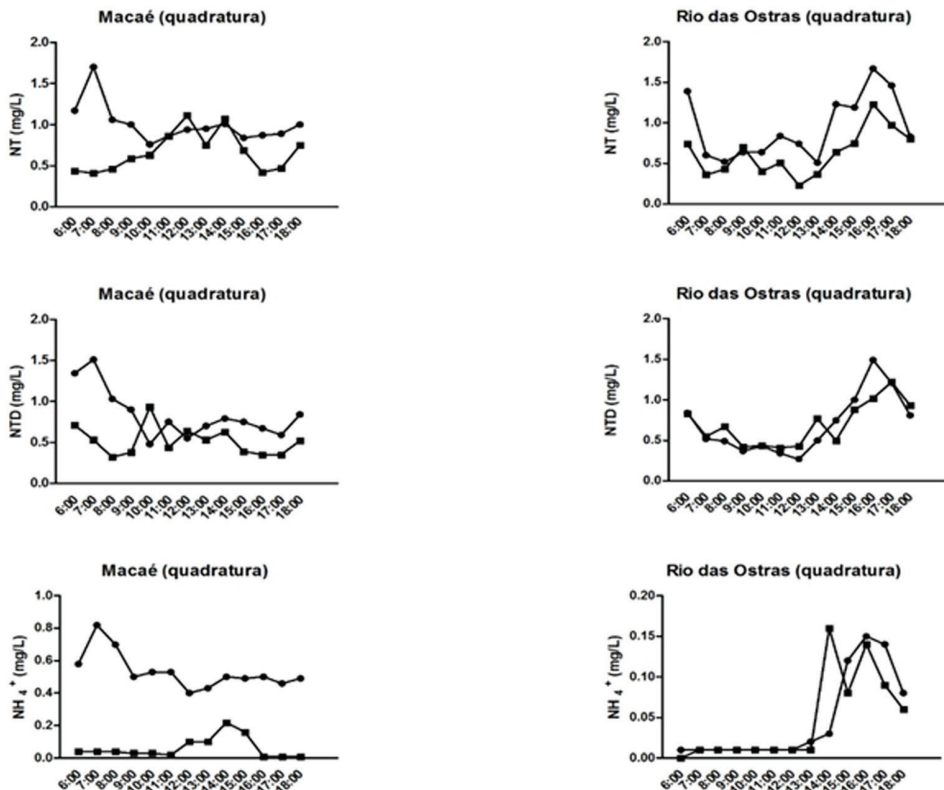


Figura 5 - Variação horária de nutrientes ao longo de um ciclo de maré de quadratura nos estuários dos rios Macaé e das Ostras (continua)

⁹⁰ MIRANDA, L.B.; CASTRO, B.M.; KJERFVE, B. **Princípios de Oceanografia Física de Estuários**. São Paulo: EDUSP, 2002.

⁹¹ DYER, K.R. Tides in Estuaries. In: DYER, K.R. (ed.). **A Physical Introduction**. 2nd ed., op. cit.

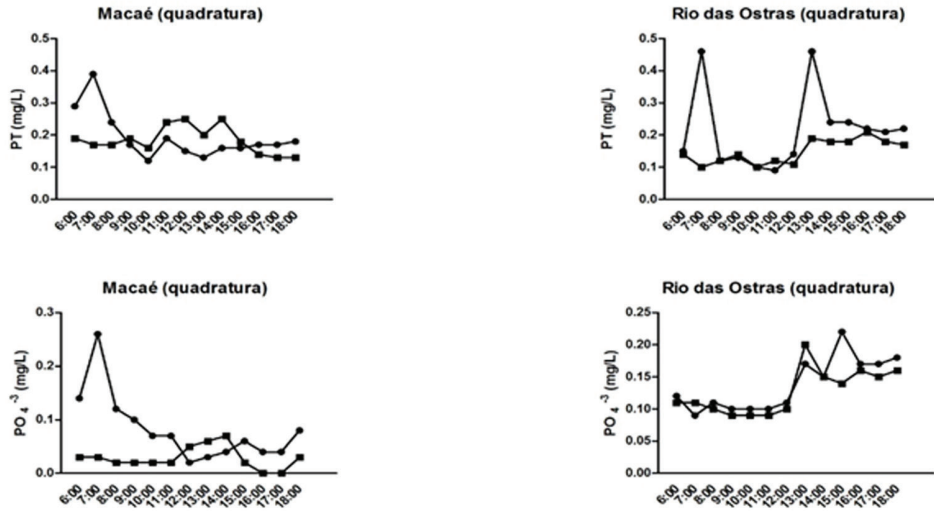


Figura 5 - Variação horária de nutrientes ao longo de um ciclo de maré de quadratura nos estuários dos rios Macaé e das Ostras (conclusão)

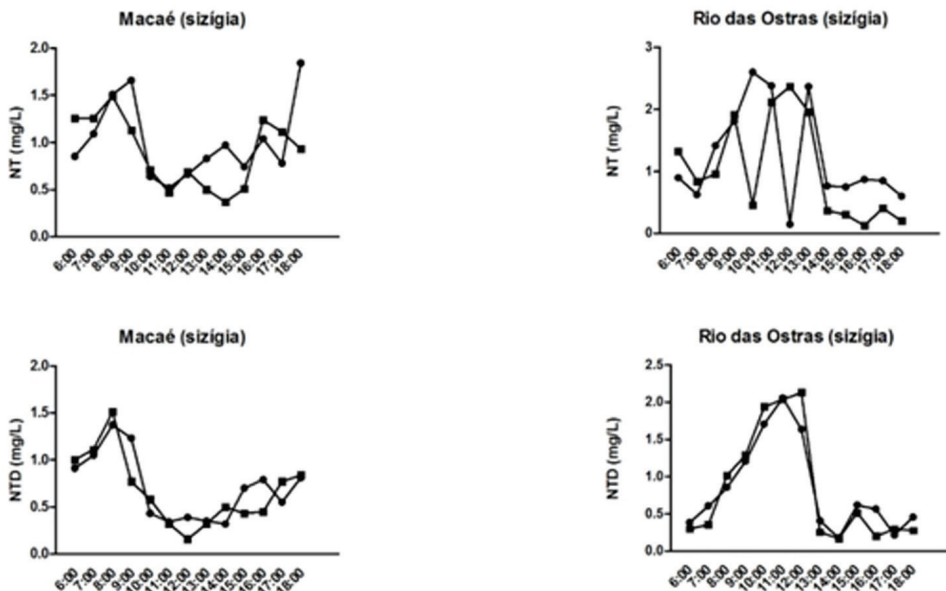


Figura 6 - Variação horária de nutrientes ao longo de um ciclo de maré de sizígia nos estuários dos rios Macaé e das Ostras (continua)

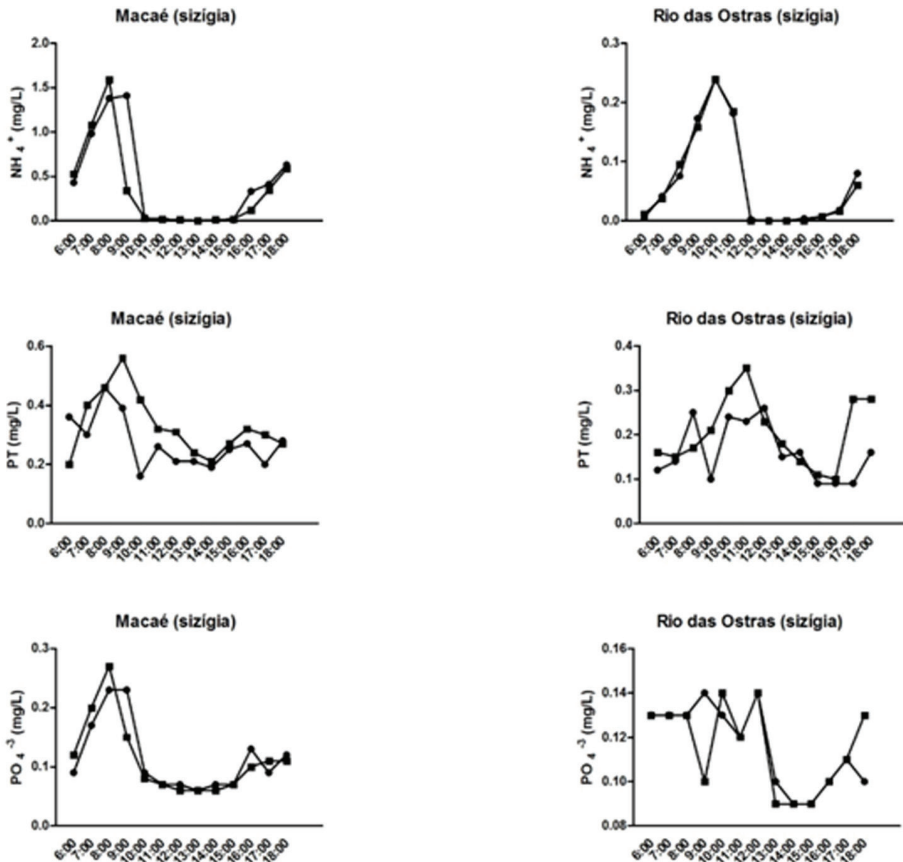


Figura 6 - Variação horária de nutrientes ao longo de um ciclo de maré de sizígia nos estuários dos rios Macaé e das Ostras (conclusão)

Em geral, pode-se observar ausência de estratificação química dos nutrientes no estuário do rio das Ostras, enquanto no estuário do rio Macaé essa estratificação é mais aparente na maré de quadratura, estando a coluna d'água mais homogênea na maré de sizígia. As análises de correlação mostram uma relação estatisticamente inversa entre salinidade e os nutrientes analisados, indicando um efeito de diluição pela entrada da água marinha em ambos os estuários.

Diante da disponibilidade de nutrientes dissolvidos e de outros fatores, como turbidez, a biomassa de fitoplâncton foi avaliada por meio das concentrações de clorofila α . Como mencionado, a produção primária foi superior no estuário do rio Macaé, se comparada com a do estuário do rio das Ostras, provavelmente devido à maior disponibilidade de nutrientes. Em geral, não foi observada correlação entre salinidade (maré) e as concentrações de clorofila α , à exceção do observado no estuário do rio das Ostras, na maré de quadratura, sugerindo que a produção primária aumenta à medida que as águas marinhas adentram o estuário, possivelmente por diminuição da turbidez da água.

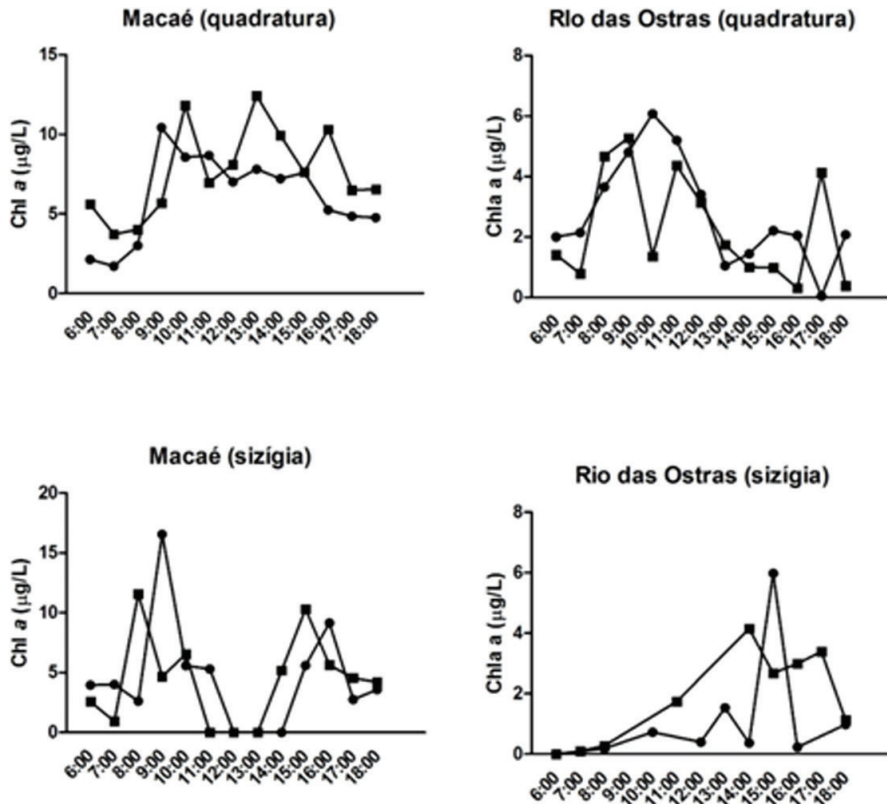


Figura 7 - Variação horária de clorofila α ao longo de um ciclo de maré de quadratura e sizígia nos estuários dos rios Macaé e das Ostras

Por fim, os estuários foram comparados em relação aos fluxos oriundos das respectivas bacias hidrográficas; aos fluxos de enchente e vazante (e balanço) em cada estuário; e, por fim, aos balanços dos fluxos resultantes dos aportes fluviais e estuarinos, avaliando a capacidade de exportação dos materiais para a zona costeira ou de retenção nos estuários. As Tabelas 3 e 4 apresentam esses fluxos, que demonstraram a capacidade de retenção dos nutrientes e partículas em suspensão pelos estuários, à exceção dos nutrientes que foram exportados pelo estuário do rio Macaé, na maré de sizígia, para a costa; e para PO_4^{3-} no estuário do rio das Ostras, também exportado para a zona costeira, na maré de sizígia. As maiores retenções de nitrogênio e suas formas foram observadas no estuário do rio das Ostras, enquanto no estuário do rio Macaé as maiores taxas de retenção foram observadas para fósforo e partículas em suspensão. Esse cenário demonstra a suscetibilidade dos estuários à eutrofização e ao assoreamento devido à capacidade de retenção dos estuários do aporte de suas bacias

hidrográficas. Porém, a capacidade de retenção dos estuários pode gerar um cenário de poluição por outros materiais com impactos, por exemplo, na biodiversidade. O estudo de Berenguer *et al.* (no prelo) sugere que bagres (*Genidens genidens*) do estuário do rio Macaé respondem à contaminação por derivados de petróleo produzindo enzimas de detoxificação, da mesma forma que mexilhões *Perna perna* coletados nessa região também confirmam um cenário de contaminação avançado, devido aos elevados níveis de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) na biomassa desses bivalves⁹². Esse cenário reflete a carga de derivados de petróleo lançados no estuário, porém associada à capacidade de retenção do estuário, que aumenta o tempo de residência desses contaminantes mantendo-os disponíveis para incorporação pela biota.

Tabela 3 - Fluxos fluviais instantâneos, fluxos residuais no estuário e balanço de massa entre bacia do rio Macaé e zona costeira em diferentes marés*

	Rio Macaé	Estuário	Rio das Ostras		Estuário
			Rio Iriri	Rio Jundiá	
Vazão	12 ± 2,7	34 ± 18	0,72 ± 0,1	2,4 ± 0,3	4,1 ± 4,5
Salinidade	0 ± 0	19 ± 0,7	0,35 ± 0,1	10 ± 13	34 ± 0,7
pH	6,5 ± 0,7	8,0 ± 0,1	5,4 ± 1,6	5,3 ± 0,4	7,6 ± 1,1
O ₂ dissolvido	6,2 ± 0,1	7,5 ± 0,6	6,0 ± 1,4	7,3 ± 3,9	5,5 ± 0,04
MPS	5,8 ± 1,0	32 ± 11	5,1 ± 0	5,1 ± 0	33 ± 7,8
NT	0,33 ± 0,1	0,90 ± 0,1	2,7 ± 0,8	4,1 ± 0,4	0,96 ± 0,25
NTD	0,20 ± 0	0,73 ± 0,01	2,3 ± 0,6	3,3 ± 0,1	0,77 ± 0,1
NH ₄ ⁺	0,035 ± 0,02	0,35 ± 0,1	0,86 ± 0,2	1,74 ± 0,020	0,07 ± 0,02
PT	0,070 ± 0	0,25 ± 0,1	0,10 ± 0	0,09 ± 0,01	0,10 ± 0,11
PO ₄ ³⁻	0,025 ± 0	0,09 ± 0,04	0,035 ± 0	0,07 ± 0,01	0,13 ± 0,01
N:P	4,7 ± 1,1	8,6 ± 1,9	71 ± 16	46 ± 10	13 ± 3,1
Chl a	2,9 ± 0	5,5 ± 2,1	-	21,6 ± 0	2,1 ± 0,6

* Unidade (g/s), fluxos residuais no estuário (g/s): balanço entre as marés de enchente e vazante (- retenção; + exportação), balanço para bacia do rio Macaé: (R) retenção no estuário (E) exportação para a zona costeira.

Da mesma forma, esses balanços mostram as diferenças entre os estuários no caso da capacidade de exportação do rio Macaé, indicando que essa bacia hidrográfica tem uma maior influência na zona costeira, por exemplo, na fertilização por nutrientes que podem sustentar a produção primária e biológica da região. Por outro lado, essa exportação é associada à influência de fontes antrópicas, que são responsáveis pela maior parte dos nutrientes lançados na bacia do rio Macaé⁹³ que atingem o estuário e a zona costeira em marés de alta amplitude, podendo contribuir para um cenário de eutrofização costeira. Por outro lado, o estuário do rio das Ostras tem uma contribuição para a zona costeira restrita, sendo mais impactado devido à sua capacidade de retenção dos materiais fluviais.

⁹² SANTIAGO, I.U. *et al.* Hydrocarbons and trace metals in mussels in the Macaé coast: Preliminary assessment for a coastal zone under influence of offshore oil field exploration in southeastern Brazil, *op. cit.*

⁹³ Molisani, M.M. *et al.* Emissões naturais e antrópicas de nitrogênio, fósforo e metais para a bacia do rio Macaé (Macaé, RJ, Brasil) sob influência das atividades de exploração de petróleo e gás na Bacia de Campos, *op. cit.*

Tabela 4 - Fluxos fluviais instantâneos, fluxos residuais no estuário e balanço de massa entre bacia do rio das Ostras e zona costeira em diferentes marés*

	Quadratura			Sizígia		
	Fluvial	Estuário	Balanço	Fluvial	Estuário	Balanço
MPS	15	- 33	47 (R)	16,9	- 23	40 (R)
NT	10	- 0,98	11 (R)	10,9	- 2,47	13 (R)
NTD	8,5	- 0,84	9,4 (R)	8,69	- 0,97	9,7 (R)
NH ₄ ⁺	3,6	- 0,025	3,4 (R)	4,53	-0,39	4,9 (R)
PT	0,26	- 0,15	0,41 (R)	0,30	0,14	0,16 (R)
PO ₄ ³⁻	0,16	- 0,13	0,29 (R)	0,17	0,19	0,02 (E)

*Unidade (g/s), fluxos residuais no estuário (g/s): balanço entre as marés de enchente e vazante (- retenção; + exportação), balanço para bacia do rio das Ostras: (R) retenção no estuário (E) exportação para a zona costeira.

Quando analisamos as condições de pequenos estuários da costa brasileira, como os dos rios Cocó, Pacoti, Pirangi (CE), Curimataú (RN), Barra das Jangadas (PE), Caravelas (BA), Cananéia-Iguapé (SP), Santos - São Vicente (SP), Camboriú, Tavares, Perequê e Defuntos (SC) podemos apontar faixas de variação de salinidade (1,7 - 39), NH₄⁺ (0,48 - 45 μmol/L), PO₄³⁻ (0,01 - 8,67 μmol/L), MPS (8,0 - 173 mg/L) e clorofila *a* (0,76 - 61 μg/L)^{94,95,96,97,98,99,100,101,102}. Quando comparamos esses valores com os observados nos estuários dos rios Macaé e das Ostras, situamos estes dois ambientes costeiros como não impactados ou moderadamente impactados, indicando que esforços de gestão ambiental, como o controle e tratamento das emissões de efluentes de atividades humanas, devem ocorrer logo, pois irão manter as condições ainda pristinas ou reverter condições moderadamente adversas que podem ser mais facilmente revertidas. Por outro lado, as concentrações máximas de NH₄⁺ (67 μmol/L) no estuário do rio Macaé foram superiores à faixa reportada para os estuários, indicando um cenário de contaminação por esse composto nitrogenado que pode ser tóxico à biota e que reflete o aporte de esgoto doméstico não tratado no estuário.

⁹⁴ MIRANDA, L. B.; BERGAMO, A. L.; CASTRO, B.M. Interactions of river discharge and tidal modulation in a tropical estuary, NE Brazil. **Ocean Dynamics**, v.55, p. 430-440, 2005.

⁹⁵ SCHETTINI, C. A. F.; PEREIRA F; SPILLERE, L. Caracterização oceanográfica e biogeoquímica dos estuários dos rios Tavares e Defuntos, Reserva Extrativista de Pirajubá, Florianópolis, SC. **Notas Técnicas Facimar**, v.4, p. 11-28, 2000.

⁹⁶ Pereira Filho, J. et al. Intratidal variation and net Transport of Dissolved Inorganic Nutrients, POC and Chlorophyll a in the Camboriú River Estuary, Brazil. **Coastal and Shelf Science**, v.53, p. 249-257, 2001.

⁹⁷ Noriega, C. D. et al. Distribuição Espacial da biomassa fitoplanctônica e sua relação com sais nutrientes, no sistema estuarino de Barra das Jangadas, Pernambuco, Brasil. **Arquivos de Ciências do Mar**, v.38, p. 5-18, 2005.

⁹⁸ AZEVEDO J.S.; BRAGA, E.S. Caracterização hidroquímica para qualificação ambiental dos estuários de Santos-São Vicente e Cananéia. **Arquivo de Ciências do Mar**, 44: 52-61, 2011.

⁹⁹ BERBEL, G.B.B. **Estudo do fósforo sedimentar e de suas especiações químicas em dois sistemas costeiros e plataforma continental sudeste (Brasil) e Baía do Almirantado (região antártica) considerando suas relações biogeoquímica**. 2008. 283 p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, 2008.

¹⁰⁰ CHIOZZINI, V. G. et al. Tide influence on hydrochemical parameters in two coastal regions of São Paulo (Brazil) under different environmental occupations. In: SAFETY, HEALTH AND ENVIRONMENT WORLD CONGRESS, July 25-28 2010.

¹⁰¹ FONSECA, L.V. **Capacidade de retenção de Fósforo e Material Particulado em Suspensão por Manguezal de Área Impactada por Efluentes da Carcinocultura**. 2009. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais do Instituto de Ciências do Mar, 2009.

¹⁰² SIGNORIN, M.; PEREIRA-FILHO, J.; DELFIM, R.; SCHETTINI, C. A. F. Hidrodinâmica e nutrientes inorgânicos dissolvidos no estuário do rio Perequê, SC. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, v.14, p. 11-19, 2010.

Conclusão

Os estuários dos rios Macaé e das Ostras são classificados como de planícies costeiras (vale inundado), dominados por micromarés semidiurnas, sendo o estuário do rio Macaé influenciado pela drenagem fluvial e estratificado e/ou não estratificado (dependendo da maré); enquanto o do rio das Ostras é dominado pela ação de marés, sendo não estratificado. Porém, mesmo que a literatura classifique ambos os estuários como de pequenas dimensões e alimentados por pequenas bacias hidrográficas, a diferença de uma ordem de grandeza na área das bacias contribuintes é suficiente para inserir importantes diferenças nos estuários relativas à hidroquímica, produção primária do fitoplâncton e no fluxo de materiais entre o continente e o oceano. Entre as diferenças, podemos observar os maiores fluxos de água e menores concentrações de nutrientes na porção inferior do rio Macaé, enquanto no estuário foram observados maiores fluxos de águas salobras, mais oxigenadas e com maiores concentrações de amônia, fósforo total e clorofila α (produção primária), sendo que o estuário pode tanto reter materiais fluviais, principalmente partículas, quanto exportá-los para a zona costeira. Já a bacia inferior do rio das Ostras teve menores fluxos de águas, maiores concentrações de nutrientes e apresentação de águas salobras e menos oxigenadas, enquanto o estuário teve menores fluxos de água, sendo as águas estuarinas tipicamente salinas, com menores ou similares concentrações de nutrientes, menores teores de clorofila α , sendo que o estuário sempre retém materiais fluviais. Esse cenário aponta susceptibilidades diferentes para cada estuário aos impactos antrópicos, como possíveis eventos de redução de oxigênio no estuário do rio das Ostras devido à sua característica hidrodinâmica e à emissão de esgoto sem tratamento, enquanto no estuário do rio Macaé pode-se propor a poluição por amônia e a possibilidade de eutrofização pelo aporte de nutrientes de origem antrópica, principalmente pelo esgoto não tratado. Porém, ainda podemos classificar esses ambientes como pouco ou moderadamente poluídos, o que torna urgentes medidas de gestão que visem manter as condições pristinas ou reverter as condições deletérias que ainda não se estabeleceram em definitivo.

Agradecimentos

Este estudo foi financiado pela FAPERJ (E-26/010-002008/2015) e pelo Comitê de Bacias Hidrográficas Macaé-Ostras. O Iate Clube de Macaé disponibilizou suas dependências para as coletas em Macaé.