

## Transporte de nutrientes, carbono orgânico particulado e Clorofila-a no estuário do Rio Camboriú, SC

Os estuários são as principais rotas de entrada de nutrientes provenientes da drenagem continental para o ambiente costeiro, possuindo concentrações elevadas de nutrientes. O presente trabalho abordará os efeitos da hidrodinâmica do estuário do rio Camboriú correlacionando com a concentração de nutrientes, carbono orgânico particulado (COP) e Clorofila-a (Cla), para determinar o transporte dos parâmetros químicos durante dois ciclos consecutivos de maré (25 horas). Em um experimento de campo, foram obtidos dados de velocidade e direção da corrente, nível d'água, salinidade, temperatura, turbidez e amostras d'água de superfície e fundo para determinação das concentrações de nutrientes, Cla e COP. O fluxo de enchente apresentou valor máximo de 92,61 m<sup>3</sup>/s, enquanto o fluxo de vazante apresentou valor máximo de 76,19 m<sup>3</sup>/s. A salinidade acompanhou o regime de correntes e serviu como indicador das características do sistema. As maiores concentrações dos parâmetros químicos foram registradas no momento de menor influência salina no estuário, com valores máximos de: 282,06 µM (NID), 7,77 µM (PO43-), 6,62 µM (Si), 17,10 µg/l (Cla) e 177,30 µM (COP). Foi observada uma exportação em direção ao oceano de COP, PO43-, Cla, Si e NID com respectivos valores de: 4,9\*10<sup>4</sup> mol C, 3,2\*10<sup>3</sup> mol P, 2,9\*10<sup>3</sup> g Cla, 3,2\*10<sup>4</sup> mol Si e 7,0\*10<sup>4</sup> mol N. Os resultados indicaram que as concentrações dos nutrientes aumentaram em demasia com o passar dos anos no estuário e que a qualidade da água na enseada de Balneário Camboriú pode estar sendo afetada negativamente pelo aporte do estuário para a enseada.

**Palavras-chave:** Hidrodinâmica; Nutrientes; Estuário; Enseada.

## Transport of nutrients, particulate organic carbon, and Chlorophyll-a in the estuary of Camboriú River, SC

Estuaries are the main entry routes for nutrients from continental drainage to the coastal environment, with high concentrations of nutrients. The present work will address the interrelation among hydrodynamics effects, nutrients concentration, particulate organic carbon (POC), and Chlorophyll-a (Cla) to determine the transport of chemical parameters during a tide cycle (25 hours) in Camboriú River estuary. In a field experiment were obtained: current velocity and direction, water level, salinity, temperature, and turbidity data; water samples from surface and bottom to determine nutrient concentrations, Cla and POC. The flood flow had a maximum value of 92.61 m<sup>3</sup>/s while the ebb flow had a maximum value of 76.19 m<sup>3</sup>/s. The salinity followed the current and served as an indicator of the system characteristics. The highest concentrations of chemical parameters were recorded at the lowest saline influence, with maximum values of 282.06 µM (NID), 7.77 µM (PO43-), 6.62 µM (Si), 17.10 µg/l (Cla) and 177.30 µM (COP) in the estuary. An export towards the ocean of COP, PO43-, Cla, Si and NID was observed with respective values of 4.9\*10<sup>4</sup> mol C, 3.2\*10<sup>3</sup> mol P, 2.9\*10<sup>3</sup> g Cla, 3.2\*10<sup>4</sup> mol Si and 7.0\*10<sup>4</sup> mol N. The results indicated that nutrient concentrations increased excessively over the years and the water quality in the bay of Balneário Camboriú may be negatively affected by the contribution from the estuary to the bay.

**Keywords:** Hydrodynamics; Nutrients; Estuary; Bay.

Topic: Oceanografia Física, Química, Geológica, Biológica

Received: 05/09/2022

Approved: 22/09/2022

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Julia Abrão Teixeira   
Universidade do Vale do Itajaí, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/0797223269936111>  
<http://orcid.org/0000-0003-3949-926X>  
[juliaabraoteixeira@hotmail.com](mailto:juliaabraoteixeira@hotmail.com)

Mauro Michelena Andrade   
Universidade do Vale do Itajaí, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/5753432574791907>  
<http://orcid.org/0000-0001-5613-0320>  
[michelena@univali.br](mailto:michelena@univali.br)

Jurandir Pereira Filho   
Universidade do Vale do Itajaí, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/1899580249545454>  
<http://orcid.org/0000-0002-7166-458X>  
[jurandir@univali.br](mailto:jurandir@univali.br)

Ricardo Utzig Nardi   
Universidade do Vale do Itajaí, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/9652276968641986>  
<http://orcid.org/0000-0003-3873-7940>  
[ricardoutzig@edu.univali.br](mailto:ricardoutzig@edu.univali.br)

Luis Hamilton Pospissil Garbossa   
Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/5115757587602689>  
<http://orcid.org/0000-0003-1544-0079>  
[luisgarbossa@epagri.sc.gov.br](mailto:luisgarbossa@epagri.sc.gov.br)



DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2022.009.0004

### Referencing this:

TEIXEIRA, J. A.; ANDRADE, M. M.; PEREIRA FILHO, J.; NARDI, R. U.; GARBOSSA, L. H. P.. Transporte de nutrientes, carbono orgânico particulado e Clorofila-a no estuário do Rio Camboriú, SC. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.13, n.9, p.44-56, 2022. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2022.009.0004>

## INTRODUÇÃO

Os estuários são sistemas de transição entre a bacia hidrográfica continental e o ambiente marinho e são de extrema relevância ecológica e econômica por apresentarem diversos serviços ecossistêmicos. Esses ambientes são as principais rotas de transporte de nutrientes provindos da drenagem continental para o ambiente costeiro. De forma geral, os estuários apresentam uma elevada concentração de nutrientes, a qual possui relação com o processo natural de intemperismo da crosta terrestre, mas também é influenciado pelas atividades antrópicas, as quais podem acarretar alta produtividade deste ecossistema ou até mesmo degradar a qualidade da água desses ambientes e das áreas oceânicas adjacentes (ESCHRIQUE, 2011).

Compreender a dinâmica do intercâmbio de substâncias entre o estuário e o oceano é de interesse fundamental para a pesquisa e gestão costeira (AGUIAR et al., 2019). A hidrodinâmica local causada pelos processos meteorológicos e oceanográficos e as características geomorfológicas do estuário controlam a intensidade dos processos bióticos e abióticos, determinando o balanço de massa dos nutrientes. Caso um estuário não possua capacidade para assimilar toda a carga de nutrientes, os excedentes serão exportados para a zona costeira (PEREIRA FILHO et al., 2016). A eficiência de assimilação pelo fitoplâncton é limitada principalmente pela penetração de luz nas águas em função da turbidez, fazendo com que estes nutrientes sejam muitas vezes assimilados na região das plumas estuarinas ou fluviais (MANN et al., 2013). A avaliação dos fluxos de nutrientes em estuários e ambientes costeiros tem sido utilizada em estudos de balanço de massa, com o intuito de estimar o metabolismo líquido do ambiente, isto é, se o ambiente apresenta um balanço hetero ou autotrófico (PEREIRA FILHO et al., 2016).

Taxas excepcionalmente altas de produção primária são historicamente associadas às águas costeiras e estuarinas em todo o mundo (BOYNTON et al., 1982; CLOERN et al., 2014). Vários fatores contribuem para a alta produtividade, no entanto o principal suprimento de nutrientes não depende exclusivamente das áreas continentais adjacentes, mas também, em alguns casos, de processos de ressurgência de águas oceânicas ricas em nutrientes e da deposição atmosférica direta de nitrogênio às águas superficiais estuarinas e costeiras. Além do aporte e disponibilidade de nutrientes, fatores adicionais, como turbidez da água, fluxos de marés, regime de estratificação, tempo de residência da água e outros são importantes para explicar a produtividade de um ambiente (BOYNTON et al., 2018). Desta forma, uma compreensão dos processos físicos que resulta na interação de massas de água de diferentes origens é um pré-requisito para o entendimento dos processos relacionados à produtividade primária e eutrofização costeira.

O município de Balneário Camboriú está localizado no litoral norte do estado de Santa Catarina, é um dos mais importantes balneários do sul do Brasil, apresenta uma população estimada de cerca de 142 mil habitantes (IBGE, 2019). Este município tem suas atividades e economia voltadas para o turismo de veraneio. Entre os meses de janeiro a dezembro de 2017 (último censo municipal), a cidade recebeu um total de 4,2 milhões de visitantes, sendo registrado no mês de janeiro em torno de 879 mil turistas. Isto ocasiona um aumento da entrada de nutrientes e matéria orgânica diretamente no estuário do rio Camboriú. Uma vez que, esta é a principal via de transporte para a enseada, a variação sazonal da qualidade da água na enseada

de Camboriú também é notável. Os piores valores são registrados no verão, principalmente no sul da enseada, região que sofre influência direta do estuário do rio Camboriú (KUROSHIMA et al., 2000, citado por PEREIRA FILHO et al., 2002). As elevadas concentrações de nutrientes são provenientes do aporte estuarino, já que este apresenta concentrações de nutrientes e COP (carbono orgânico particulado) muito maiores do que os registrados na enseada (PEREIRA FILHO et al., 2001). Desta forma, este estuário possui grande influência na distribuição de nutrientes na enseada, e por consequência na qualidade da água deste ambiente.

Em 1999 foram realizadas duas campanhas de medições de parâmetros físicos e químicos no estuário do rio Camboriú. Os resultados foram publicados em Pereira Filho et al. (2001 e 2002) e indicaram uma alta carga de nutrientes e uma circulação no estuário dependente das variações da maré astronômica. No período de 20 anos após a realização das campanhas, alguns estudos foram realizados, principalmente na enseada de Balneário Camboriú evidenciando o incremento dos nutrientes causados pelo aumento da população nos meses de verão (ABREU et al., 2003; PEZZUTO et al., 2006; OTTONELLI, 2014; RÖRIG et al., 2017). Devido a esse problema, as águas da enseada permanecem constantemente enriquecidas e favorecem processos de eutrofização, promovendo diversas modificações ambientais. A mais perceptível recentemente é a formação de Arribadas, que é caracterizada por um acúmulo expressivo de algas e briozoários na praia Central de Balneário Camboriú (RÖRIG et al., 2017). Este é um assunto muito pertinente encontrado em matérias de jornais e revistas visto a recorrência deste fenômeno, que por sua vez é indicativo do lançamento de efluentes domésticos e ineficiência de saneamento básico, gerando um impacto socioeconômico negativo para o município. Outros impactos ambientais verificados nesta região nestes 20 anos foram causados por obras de grande porte como: molhes, dragagens e aterros (PEZZUTO et al., 2006; 2007). Destacam-se impactos como: redução da abundância e diversidade de macrofauna bentônica; redução da produtividade biológica; proliferação de microalgas tóxicas; conflitos com a atividade pesqueira; possível contaminação das águas da enseada; modificação nos padrões de erosão e deposição do perfil praial (FATMA, 2014).

O rio Camboriú há décadas provê com seus recursos ecossistêmicos os municípios de Camboriú e Balneário Camboriú. Entretanto, os ambientes do estuário do rio Camboriú e da enseada de Balneário Camboriú, também há décadas são pressionados, o que gera uma degradação ambiental perceptível (PEREIRA FILHO et al., 2002). Tais pressões se referem desde as modificações na morfologia desses ambientes até ao lançamento de esgotos ou de resíduos do tratamento de efluentes destes municípios.

Entretanto, nenhum dos trabalhos recentes teve como objetivo relacionar os processos hidrodinâmicos com a degradação ambiental verificada no estuário e na enseada. Processos físicos, tais como: as variações do nível d'água gerados pelas marés astronômica e meteorológica ou a magnitude da velocidade das correntes, podem ser modificados por alterações na batimetria ou por alteração nas margens de canais estuarinos (EIDAM et al., 2020; YUAN et al., 2015). Uma vez que, estes processos físicos, responsáveis pelas trocas de sedimentos, nutrientes e substâncias químicas em geral, são alterados, uma nova capacidade do ambiente em assimilar as pressões antrópicas é gerada. Na maior parte dos casos, estes ambientes perdem suas capacidades ecossistêmicas e não conseguem mais prover os recursos a eles

relacionados. Considerando as características físicas, químicas e biológicas, a qualidade da água tem seu papel fundamental no entendimento de ciclos biogeoquímicos dos nutrientes e da avaliação das mudanças providas de impactos antrópicos, acarretando o desenvolvimento de processos de eutrofização, sequestro de carbono, mudanças climáticas globais, econômicas e sociais (ESCHRIQUE, 2011).

Assim, é de grande importância para a preservação ambiental e manutenção dos serviços ecossistêmicos, compreender os processos físicos atuantes responsáveis pelas trocas de substâncias entre o estuário do rio Camboriú e a enseada adjacente. Portanto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a relação da hidrodinâmica do estuário, a partir de dados de nível d'água, velocidade e direção da corrente, temperatura, salinidade e turbidez, com o transporte de nutrientes inorgânicos dissolvidos ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  e Si), Carbono Orgânico Particulado (COP) e Clorofila-a (Cl) para a zona costeira, durante dois ciclos completos de maré de sizígia, para assim avaliar a importância do estuário na condição ambiental da enseada.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Área de estudo

O estuário do rio Camboriú está localizado no sul do Brasil no estado de Santa Catarina (Figura 1). Ele representa a parte final do rio Camboriú, que é um rio pouco sinuoso de ordem 5 e apresenta uma área de drenagem de aproximadamente 200 km<sup>2</sup> e 33,23 km de extensão, cortando os municípios de Balneário Camboriú e Camboriú. A vazão média do rio Camboriú é estimada entre 3 e 6 m<sup>3</sup>/s (PEREIRA FILHO et al., 2002). O clima nesta região é quente e temperado, a média de temperatura anual da bacia é de 19,5 °C, a temperatura mais alta registrada foi de 39,5°C enquanto a mais baixa foi de -2,6°C. A precipitação média anual da Bacia Hidrográfica do rio Camboriú é de 1600,4 mm (URBAN, 2008). A velocidade média do vento na região é de 4,4 km/h, com as maiores velocidades registradas em dezembro e menores em abril. A direção do vento predominante é de Sul-Sudoeste de fevereiro a setembro e Leste-Nordeste de outubro a janeiro (ARAÚJO et al., 2009).

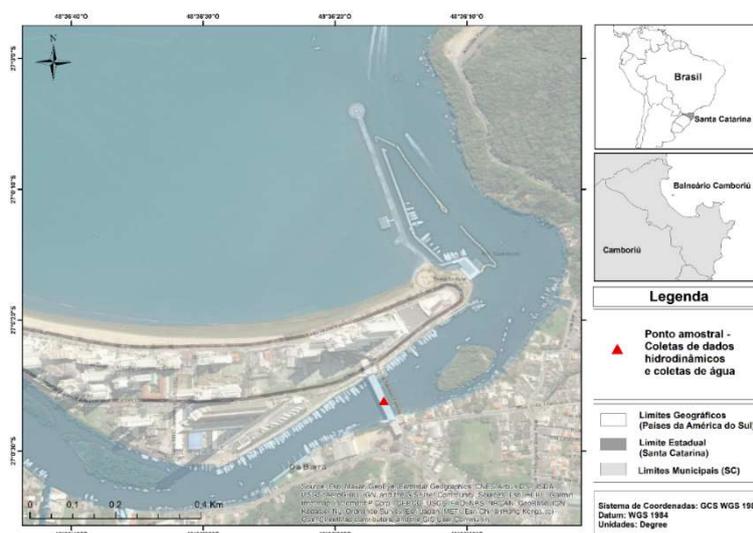


Figura 1: Localização da área de estudo com o ponto amostrado no estuário do Rio Camboriú.

Schettini et al. (1996) classificaram a maré local como micro maré, principalmente semi-diurna, com amplitude média de 0,8 m e valor máximo de 1,2 m. A influência meteorológica sobre o nível do mar também é importante, podendo elevá-la até cerca de 1 m acima do valor previsto para a maré astronômica. O estuário do rio Camboriú apresenta baixa profundidade e é classificado como do tipo parcialmente misturado, além disso, perto da sua desembocadura, possui um canal de aproximadamente 120 m de largura (PEREIRA FILHO et al., 2002).

### Dados hidrodinâmicos

Os dados de nível d'água, velocidade e direção de correntes, temperatura, salinidade e turbidez da água foram coletados entre às 08:30 do dia 09 às 08:30 de 10 de março de 2020, totalizando 25 horas, ou seja, dois ciclos de maré de sizígia completo, em um ponto nas proximidades da passarela Estaiada da Barra do rio Camboriú (Figura 1). Para isso foi instalado na parte mais profunda do canal do estuário, um Perfilador Acústico de Correntes por Doppler (PACD, sigla em inglês ADCP) marca NORTEK, modelo Aquadopp® para medir a velocidade e direção das correntes na coluna d'água e nível d'água cada 10 min. No mesmo ponto, foram registrados perfis verticais com um CTD, marca JFE, para obter os dados de temperatura, salinidade e turbidez da água, a cada hora. Também foram registradas, a cada hora, as vazões líquidas com um Perfilador Acústico de Correntes por Doppler (PACD, sigla em inglês ADCP) marca SONTEK, modelo RiverSurveyor® M9, em uma seção transversal ao canal localizada no mesmo ponto. Estes dados hidrodinâmicos foram coletados com recursos do projeto Estuário do rio Camboriú 2030.

### Tratamento dos dados físicos

O prisma de maré e o transporte total em um ciclo de maré foram calculados com os dados obtidos em campo. Para o prisma de maré ( $P$ ), o cálculo corresponde ao volume de água do mar que entra no estuário durante a maré enchente, estando relacionado intimamente com a altura da maré ( $H$ ), pois  $P = H_o \cdot A$ , onde  $A$  é a área superficial do estuário.

A taxa de transporte através da seção transversal ( $Q$ , mmol. d-1 ou mg. d-1) de cada parâmetro foi obtida a partir da soma do transporte em superfície ( $Q_s$ ) e fundo ( $Q_f$ ), segundo a expressão:

$$Q_s = \sum cs.us.Ai / 2$$

$$Q_f = \sum cf.uf.Ai / 2$$

$$Q = Q_s + Q_f$$

Onde:  $A_i$  é a área instantânea da seção transversal ( $m^2$ ) no momento da amostragem,  $c$  é o parâmetro de concentração (mmol.m-3 ou mg.m-3) em superfície ( $cs$ ) ou fundo ( $cf$ ) no momento de cada amostragem.  $u$  é a velocidade de corrente (m.h-1) em superfície ( $us$ ) ou fundo ( $uf$ ) utilizando o equipamento Aquadopp®. Por convenção, valores negativos representam correntes da região costeira para o estuário e valores positivos o inverso.

Os dados de vazão, foram registrados com um ADCP, marca SONTEK, modelo RiverSurveyor® M9. Esses dados foram utilizados para criar um entendimento sobre os processos de troca durante as 25 horas, entre o estuário do rio Camboriú e a enseada.

Os dados de temperatura, salinidade, turbidez, nível do mar, vazão e o cálculo do transporte de

nutrientes foram processados com o auxílio do software *Matlab*. Foram selecionados os dados de superfície e fundo dos perfis verticais do CTD, para gerar os gráficos de salinidade, temperatura e turbidez durante as 25 horas da campanha de campo.

### Dados químicos

As amostras de água para a determinação dos parâmetros químicos e microbiológicos foram coletadas com uma garrafa de Niskin na mesma campanha e ponto amostral descritos anteriormente, a cada hora, em superfície e fundo, durante 25 horas, totalizando assim 50 amostras de cada parâmetro. Imediatamente após a coleta, as amostras foram transferidas para frascos de polipropileno previamente higienizados com solução ácida (HCl 0,1N). O processamento foi realizado em um laboratório instalado em campo, nas dependências da Marina Tedesco, com um intervalo máximo de 30 minutos após cada coleta. As amostras foram filtradas em filtros GFF, sendo separadas em alíquotas para posterior determinação dos nutrientes inorgânicos ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  e  $\text{SiO}_4^{4-}$ ) e o filtro para a determinação da Clorofila-a (Cla). Uma segunda filtração foi realizada em filtros calcinados de GFF para a determinação do carbono orgânico particulado (COP). Todo o material foi imediatamente congelado e transportado para o laboratório de Oceanografia Química da UNIVALI. Durante a coleta, ocorreu a perda de uma amostra coletada no fundo, por problemas no amostrador. Portanto, foi realizado o método de interpolação por *Spline* para preenchimento desta lacuna na série temporal.

### Determinações analíticas

A determinação dos nutrientes inorgânicos foi realizada através das técnicas clássicas colorimétricas e o COP foi determinado pela titulação. Todos os procedimentos metodológicos foram realizados seguindo recomendações e orientações descritas em APHA et al. (2018). Após as determinações, foram confeccionados gráficos mostrando as variações das concentrações dos parâmetros químicos de superfície e fundo para interpretação dos resultados.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

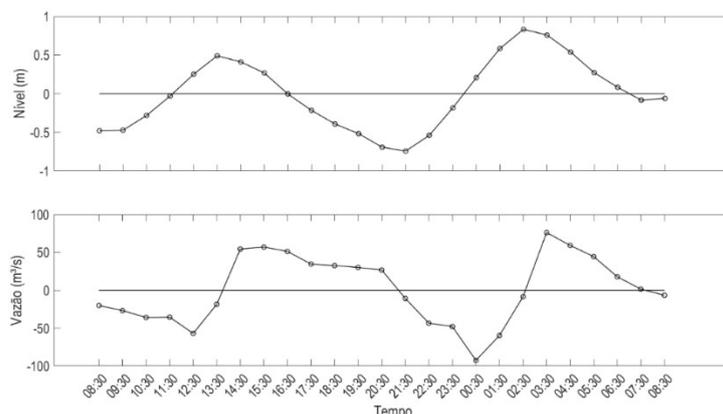
### Dados hidrodinâmicos e Parâmetros físicos

Durante o período das coletas, foram registradas duas preamares, sendo uma às 13h30min do dia 09 e outra às 02h30min do dia 10, e duas baixa-mares, uma às 09h30min e outra às 21h30min, ambas no dia 09 (Figura 2A).

Na Figura 2B, os valores negativos correspondem aos fluxos de enchente, enquanto os valores positivos correspondem a fluxos de vazante no estuário, acompanhando a variação do nível do mar causado pela maré astronômica. Sendo assim, os valores de vazão mais intensos de enchente foi 92,61 m<sup>3</sup>/s, que ocorreram 03 h após a baixa-mar das 21h30min do dia 9, durante a elevação do nível do mar. Já com a descida do nível do mar, ocorreram os fluxos de vazante com um valor máximo de 76,19 m<sup>3</sup>/s, registrado 01 h após

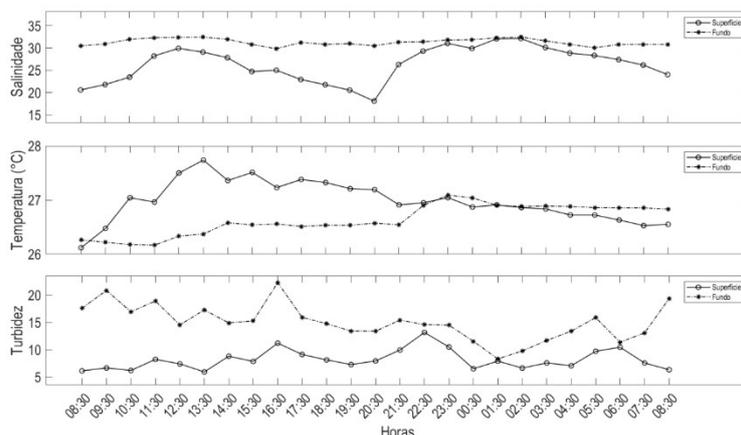
a preamar das 02h30min do dia 10. Também foi registrado uma variação de nível de 1,58 m, no ponto de amostragem. A profundidade máxima do local foi de 6,79 m e a profundidade mínima de 5,21 m.

O Prisma de maré calculado corresponde ao volume de água do mar que entra no estuário durante a maré enchente e está relacionado intimamente com a altura da maré. Desta forma, para o estuário do rio Camboriú, foi considerada a área superficial do canal principal, estimada em aproximadamente 597.000 m<sup>2</sup> e a altura da maré de 1,58 m, registrada na campanha de sizígia. Assim, o volume de água trocado entre a enseada e o estuário em 12,4h, durante a maré de sizígia foi estimado em 943.260 m<sup>3</sup>.



**Figura 2:** (A) Variação do nível do mar (m); (B) fluxo da vazão (m<sup>3</sup>/s) no estuário durante um ciclo de 25 horas.

A Figura 3 apresenta os dados de superfície e fundo de salinidade, temperatura e turbidez d'água, durante o ciclo de maré. Os maiores valores de salinidade foram registrados no fundo, com valor máximo de 32,46 (Figura 3A), visto as características de intrusão marinha e a maior densidade da água do mar em relação à água fluvial. As menores salinidades observadas em superfície, com valor mínimo de 18,10, que refletem os momentos de maior influência da água de origem estuarina, no ponto de amostragem. Conforme os valores de temperatura d'água (Figura 3B), é possível identificar que a temperatura superficial entre às 08h30min às 21h30min, apresentou os maiores valores, porém, a partir das 22h30min, a temperatura permaneceu aproximadamente constante e homogênea da superfície ao fundo, em torno de 26,80 °C. Por fim, os maiores valores de turbidez de aproximadamente 22,60 NTU (Figura 3C) foram registrados no fundo, fato que pode estar associado ao movimento das correntes próximas ao fundo que podem causar a ressuspensão do sedimento.



**Figura 3:** Dados coletados de superfície e fundo de (A) Salinidade; (B) Temperatura (°C); (C) Turbidez durante um ciclo de 25 horas no estuário.

## Nutrientes inorgânicos

O comportamento dos nutrientes inorgânicos  $\text{PO}_4^{3-}$ , Si e NID ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ) coletados durante o ciclo de maré é apresentado na Figura 4. As concentrações de nutrientes no estuário acompanharam de maneira inversa a elevação do nível do mar, ou seja, quando ocorre o fluxo de enchente e por consequência a intrusão salina, a concentração de nutrientes tende a diminuir. Porém, quando inverte o fluxo para vazante, período com maior influência das águas fluviais, ocorre um aumento significativo nas concentrações dos nutrientes. Esse aumento das concentrações está relacionado ao aumento da influência da água da região mais interna do estuário, de menor qualidade.

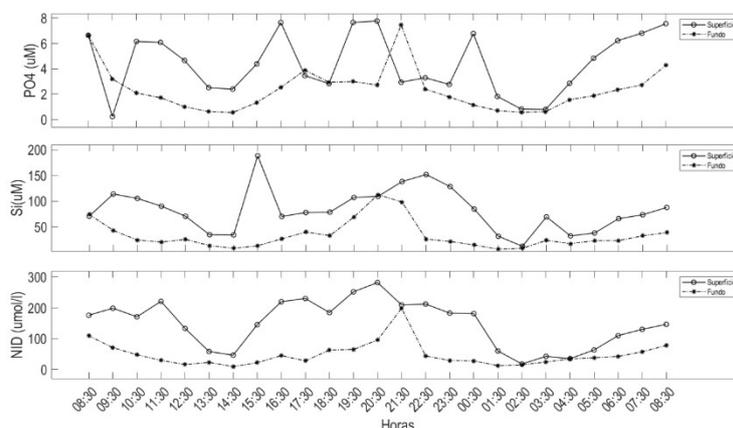
A partir dos valores de  $\text{PO}_4^{3-}$  (Figura 4A) é possível identificar a influência das oscilações da maré nesses parâmetros. No início da coleta foram registrados valores elevados de  $\text{PO}_4^{3-}$  devido a influência das águas fluviais, conforme o nível do mar aumentou e por consequência o fluxo de enchente, a concentração foi diminuindo. Quando chegou no ápice da primeira preamar às 13h30min, o valor mínimo registrado foi de 2,38  $\mu\text{M}$  para superfície e 0,54  $\mu\text{M}$  para o fundo. Já na baixa-mar ocorreu o inverso, conforme inverteu o fluxo de corrente, as concentrações de  $\text{PO}_4^{3-}$  começaram a se elevar, na baixa-mar às 20h30min o valor máximo registrado foi de 7,77  $\mu\text{M}$  para superfície e 2,9  $\mu\text{M}$  para o fundo. As 02h30min quando ocorreu a estofa da segunda preamar, as concentrações de nutrientes diminuíram novamente, apresentando um mínimo de 0,56  $\mu\text{M}$  para fundo e superfície. Durante todo o ciclo, as maiores concentrações de  $\text{PO}_4^{3-}$  foram observadas na superfície nos períodos de maior influência fluvial. O pico foi identificado na maré baixa, no período da noite, onde a atividade fotossintética não ocorre. Os valores obtidos foram elevados quando comparados a estudos de autores como Eschrique (2011), o qual registrou um máximo de 2,24  $\mu\text{M}$  para sistemas estuarinos pouco impactados do Nordeste e Sudeste do Brasil. Porém, estudos feitos por Eschrique (2009) nos sistemas estuarinos de Santos, obtiveram máximos de 16,30  $\mu\text{M}$ , caracterizando eutrofização, portanto, a concentração encontrada para  $\text{PO}_4^{3-}$  pode indicar um sistema eutrofizado. Estudo feito por Pereira Filho et al. (2002) em 1999 no estuário do rio Camboriú, registrou valores de  $\text{PO}_4^{3-}$  entre 0,6 e 3,5  $\mu\text{M}$ , indicando valores inferiores aos observados no presente estudo, mostrando aumento significativo no período.

O Si ( $\mu\text{M}$ ) (Figura 4B) também acompanhou de maneira inversa o nível do mar, quando o fluxo de enchente dominava, a substância apresentou as menores concentrações. No momento do fluxo de enchente máximo (00h30min), foram obtidos os menores valores de Si até que às 01h30min atingiu seu valor mínimo de fundo de 6,61  $\mu\text{M}$  e às 02h30min apresentou o valor mínimo de superfície de 8,31  $\mu\text{M}$ . Porém, quando o estuário apresentou menor influência do sal, na maré baixa, foi possível observar um aumento na concentração dos nutrientes, obtendo um valor máximo de superfície de 188,3  $\mu\text{M}$  e de fundo de 109,3  $\mu\text{M}$ . Os maiores valores de Si estão associados à maior influência da água de origem fluvial. O alto valor pode estar associado a processos erosivos que ocorrem na margem do canal estuarino e à ressuspensão dos sedimentos de fundo, contribuindo com a liberação de frações dissolvidas (ESCHRIQUE, 2011). O silicato é utilizado pelas microalgas do grupo das diatomáceas e dos silicoflagelados para formação das suas frústulas,

sendo o nutriente inorgânico que se apresenta com as maiores concentrações nos ambientes estuarinos devido principalmente a sua origem terrígena (NORIEGA et al., 2005).

No comportamento do NID (Figura 4C), também ficou clara a influência das águas fluviais no aumento das concentrações no ambiente, visto que este nutriente acompanhou exatamente a variação do nível do mar. Quando o nível do mar subiu, as suas concentrações apresentaram decaimento, sendo registrado um valor mínimo de 9,67  $\mu\text{mol/l}$  às 14h30min para o fundo na primeira preamar e na segunda preamar foi registrado um valor mínimo de 15,29  $\mu\text{mol/l}$  para superfície as 02h30min. Porém quando o estuário apresentou fluxos intensos de vazante e menor influência marinha, as concentrações do NID se elevaram, apresentando máximos para superfície de 282,1  $\mu\text{mol/l}$  às 20h30min e 198,6 para o fundo às 21h30min. Esse pico coincidiu com o mínimo de salinidade do estudo, denotando a maior influência fluvial.

Os elevados valores desses nutrientes, principalmente quando o estuário apresentou intenso fluxo de vazante e baixa salinidade, evidenciam o aporte de efluentes domésticos não tratados, que também foram descritos em Kuroshima et al. (2000). Segundo Pereira Filho et al. (2002), estudos realizados anteriormente, relatam que sempre foram observados valores elevados de NID neste estuário, onde o principal responsável é a alta concentração de  $\text{NH}_4^+$  no meio. No estudo de 1999, o valor máximo registrado foi de 169  $\mu\text{M}$ , sendo responsável por 90% da concentração total de NID, já no ano de 2020 foi registrado um máximo de  $\text{NH}_4^+$  de 277,6  $\mu\text{M}$  na superfície, responsável por 98,4 % da concentração total de NID, apresentando um aumento de 64% em relação ao ano de 1999. A alta concentração e proporção de  $\text{NH}_4^+$  em ambientes recentes está relacionada à decomposição de matéria orgânica e/ou esgotos. O lançamento de efluentes da estação de tratamento situada no município de Balneário Camboriú pode contribuir com esses valores. Além disso, o estuário mostrou hipóxia e anoxia em vários períodos durante a amostragem, na qual chegou a 0  $\text{mg/l}$  quando o nível do mar abaixou e a água fluvial predominou, contribuindo com maior proporção de  $\text{NH}_4$ . Nessa situação, a matéria orgânica é decomposta anaerobicamente, de modo que o  $\text{NO}_2$  e  $\text{NO}_3$  são consumidos, resultando em grande geração de  $\text{NH}_4$ . A anoxia, observada principalmente nos períodos de maior influência da água estuarina é mais um indício que o ambiente sofre grande aporte esgotos sem tratamento. Esse valor muito alto de  $\text{NH}_4^+$  tem potencial para afetar negativamente a qualidade da água da enseada de Balneário Camboriú.



**Figura 4:** Concentrações de superfície e fundo de (A)  $\text{PO}_4^{3-}$  ( $\mu\text{M}$ ); (B) Si ( $\mu\text{M}$ ); (C) NID ( $\mu\text{mol/l}$ ) durante um ciclo de 24 horas no estuário.

A partir da correlação linear realizada para as substâncias químicas (Tabela 1), o NID e o Si apresentaram uma forte correlação negativa em superfície e fundo. O  $\text{PO}_4^{3-}$  apresentou uma forte correlação no fundo, porém na superfície o p-valor atingiu o limite do nível de significância de 0,05, indicando que pode não existir uma relação linear entre a variável e o nível do mar. O mesmo acontece para a Cla do fundo, com um p-valor maior do que o nível de significância, indicando há inexistência de uma correlação linear, entretanto, em superfície, Cla apresenta uma correlação moderada, assim como COP em superfície e fundo.

Portanto, a maioria das substâncias de superfície e de fundo apresentaram uma correlação linear negativa com o nível do mar, ou seja, os resultados demonstram que existe uma forte influência do aumento ou diminuição do nível do mar nas concentrações das substâncias, isto é, enquanto o nível do mar é alto, as substâncias tendem a ter concentrações menores, porém quando o nível do mar é baixo, ocorrendo o predomínio da água fluvial, as concentrações são maiores nas águas do estuário do rio Camboriú, confirmando a hipótese discutida anteriormente.

A origem do excesso de nutrientes pode estar associada a: (a) lançamento do efluente tratado no estuário do Rio Camboriú, a partir da estação de tratamento de esgoto do rio Camboriú; (b) despejo de esgoto irregular no rio Camboriú; (c) aporte de efluentes agrícolas por lixiviação, visto as plantações ao longo da bacia hidrográfica do rio Camboriú; (d) indústrias localizadas ao longo do estuário; (e) concentrações naturais destes nutrientes no rio Camboriú.

**Tabela 1:** Valores resultantes de superfície e fundo da correlação linear entre as substâncias químicas e o nível do mar, onde o P está associado ao nível de significância de 0,05 e o R ao coeficiente de correlação de Pearson. Valores de R próximos a 0 – inexistência de correlação; Valores próximos a -1 e 1, forte correlação negativa ou positiva.

Superfície					
	NID	Cla	COP	Si	$\text{PO}_4^{3-}$
R	- 0,87	- 0,51	- 0,47	- 0,63	-0,39
P	0,00	0,00	0,01	0,00	0,05
Fundo					
	NID	Cla	COP	Si	$\text{PO}_4^{3-}$
R	- 0,72	- 0,26	- 0,41	- 0,76	- 0,74
P	0,00	0,21	0,04	0,00	0,00

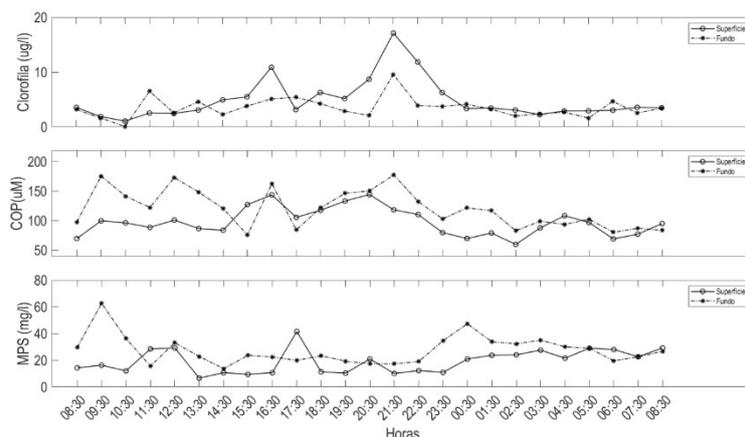
### Clorofila-a, COP e MPS

Conforme pode ser observado na Figura 5A, a Cla apresenta o mesmo comportamento dos nutrientes inorgânicos, visto que ela também acompanhou de maneira inversa o nível do mar. O valor máximo registrado foi de 17,1  $\mu\text{g/l}$  às 21h30min justamente quando o nível do mar estava no ápice da baixa-mar, apresentando um valor relativamente alto. A concentração elevada de Cla, pode estar associada às altas concentrações de nutrientes inorgânicos, visto que estimula o desenvolvimento do fitoplâncton no encontro da água estuarina com a salina, ocasionando uma alta produtividade nestas regiões (PEREIRA FILHO et al., 2002). Nesse caso, provavelmente essa biomassa foi formada na porção mais interna do estuário, em função da elevada concentração de nutrientes, sendo observada no horário pela maior influência da água fluvial, no momento.

O Carbono orgânico particulado (COP) (Figura 5B) apresentou maiores concentrações na camada de fundo, apresentando máximos de 177,3  $\mu\text{M}$  às 21h30min no ápice da baixa-mar e valores mínimos de 59,66

uM registrados às 02h30min, no ápice na preamar. Sendo possível observar que no momento de maior descarga fluvial ocorrem as maiores concentrações de COP.

O material particulado em suspensão (MPS) (Figura 5C), também apresentou maiores concentrações na camada de fundo, onde atingiu máximo de 62,57 mg/L às 09h30min e mínimo de 6,6 mg/L, registrado às 13h30min. Sendo possível observar novamente um comportamento influenciado pelo nível do mar e pela descarga fluvial, onde seus valores máximos foram no pico da baixa-mar e os mínimos no pico da preamar. As maiores concentrações no fundo têm influência das correntes de fundo, as quais provocam a ressuspensão dos sedimentos, aumentando o MPS e por consequência aumentando a turbidez, como pode ser observado na Figura 3C.



**Figura 5:** Concentrações de superfície e fundo de (A) Clorofila-a (ug/l); (B) Carbono Orgânico Particulado (uM); (C) Material Particulado em Suspensão (mg/l) durante um ciclo de 25 horas no estuário.

### Transporte de nutrientes

O cálculo do transporte de nutrientes foi realizado a partir dos dados de velocidade da corrente, concentração de nutrientes e área da seção transversal. Os resultados indicaram uma exportação no sentido do estuário para a enseada para todos os nutrientes em um ciclo de maré de sizígia (Tabela 2). O NID foi a substância que apresentou maior transporte, fato esperado já que o estuário apresentou concentrações muito altas deste nutriente quando não havia influência marinha significativa. Isto pode estar associado às ações antrópicas como despejo irregular do esgoto e o lançamento de efluente da estação de tratamento de esgoto do município. O aumento das concentrações de NID principalmente do  $\text{NH}_4^+$ , está relacionado à aporte antropogênico (PEREIRA FILHO et al., 2003), nutrientes como COP e Si também apresentaram valores significativos para transporte, em que também pode estar associado a origens antrópicas. Já o  $\text{PO}_4^{3-}$  foi o que apresentou menor valor de transporte quando comparado às outras substâncias.

A razão N:P do transporte total em dois ciclos de maré no estuário foi de 21,6, superior a razão proposta por Redfield (1958) de 16:1. Esta alta razão pode estar associada a alta concentração de NID no ambiente e baixa concentração de  $\text{PO}_4^{3-}$ , sugerindo que o fosfato seja o nutriente limitante da produtividade primária (SOUZA et al., 2009).

Quando comparados a estudos anteriores realizados por Pereira Filho et al. (2002), o transporte total no período de maré de sizígia no ano de 2020 foi maior para todos os parâmetros analisados, fato já

esperado, visto que o estuário em 1999 já sofria com a pressão antrópica, a qual foi intensificada ao longo do tempo pelo aumento da população. De 1999 para 2020 o NID teve aumento de 169 %, o  $\text{PO}_4^{3-}$  de 255 %, o Si de 223 %, e o COP de 2478 %. As substâncias químicas em geral foram exportadas do estuário para enseada (Tabela 2), comportamento que se assemelha ao observado no ano de 1999, com exceção a Clorofila, que na época apresentou um comportamento distinto dos demais, sendo importada da enseada para o estuário.

**Tabela 2:** Transporte total dos parâmetros químicos em 2 ciclos de maré. Os valores indicam a exportação dos nutrientes.

Parâmetros	COP (mol/2ciclos)	$\text{PO}_4^{3-}$ (mol/2ciclos)	Cla (g/2ciclos)	Si (mol/2ciclos)	NID (mol/2ciclos)
Transporte total	$4,9 \cdot 10^4$	$3,2 \cdot 10^3$	$2,9 \cdot 10^3$	$3,2 \cdot 10^4$	$7,0 \cdot 10^4$

## CONCLUSÕES

O estuário do rio Camboriú apresentou maiores concentrações de nutrientes, quando comparado ao estudo anterior, realizado 21 anos antes, em 1999, por Pereira Filho et al. (2002), onde já era indicado um processo de eutrofização nesse ambiente. O presente estudo identificou que as concentrações dos nutrientes aumentaram de forma significativa com o passar dos anos, resultando em um estuário ainda mais eutrofizado.

O presente estudo também determinou a relação inversa das concentrações de nutrientes com o nível do mar, ou seja, as maiores concentrações das substâncias ocorreram no instante com menor nível d'água (baixa-mar) e fluxo de vazante. Isso evidencia o aporte de nutrientes por via fluvial, proveniente da descarga continental.

As altas concentrações de nutrientes, principalmente do  $\text{NH}_4^+$ , sugerem um aporte de efluentes domésticos não tratados ou parcialmente tratados dos municípios à montante, que afetam negativamente a qualidade da água próximo a desembocadura do estuário.

O transporte total de nutrientes evidenciou uma exportação de todas as substâncias analisadas ao longo de dois ciclos de maré (25 h). Distintos valores de exportação entre os parâmetros foram determinados, onde o NID apresentou maior valor de exportação, fato esperado já que as concentrações foram elevadas no estuário.

As elevadas concentrações de nutrientes verificadas, associadas ao transporte relacionado aos fluxos de vazante tem potencial para influenciar na qualidade da água da enseada de Balneário Camboriú.

Estes são os primeiros resultados de um estudo que visou uma caracterização da atual condição ambiental do estuário do rio Camboriú, baseado em um curto experimento de campo. São necessários estudos de longo prazo e contínuos, para o monitoramento das variáveis analisadas, tanto no estuário quanto na enseada. Uma vez que, foi identificado um aumento no transporte de todos os nutrientes do estuário para a enseada de Balneário Camboriú.

## REFERÊNCIAS

ABREU, J. G. N.; PEZZUTO, P. R.; RESGALLA, J. R. C.;

MENEZES, J. T.; VINTÉM, G.. Impacto ambiental e

modificações texturais dos sedimentos provocadas pela alimentação artificial da praia de Balneário Camboriú (SC). In: CONGRESSO BRASILEIRO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 9. **Anais**. Recife: ABEQUA, 2003. p.199.

AGUIAR, A. L.; LEVINSON, A. V.; CIRANO, M.; ALMEIDA, M. M.; LESSA, G. C.; ARROYAVE, J. F. P.. Ocean-estuary exchange variability in a large tropical estuary. **Continental Shelf Research**, v.172, p.33-49, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.csr.2018.11.001>

APHA; AWWA; WEF. American Public Health Association; American Water Works Association; **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 20 ed. New York: APHA; AWWA; WEF, 2018.

ARAÚJO, S. A.; SCOLARO, T. L.; REIS, F. H.; PETERMANN, R. M.. Climatologia do ecossistema Saco da Fazenda, Itajaí, SC. In: BRANCO, J. O.; LUNAR-DON-BRANCO, M. J.; BELLOTTO, V. R.. **Estuário do Rio Itajaí-Açú, Santa Catarina**: caracterização ambiental e alterações antrópicas. Itajaí: UNIVALI, 2009. p.43-62.

BOYNTON, W. R.; CEBALLOS, M. A. C.; BAILEY, E. M.; HODGKINS, C. L. S.; HUMPHREY, J. L.; TESTA, J. M.. Oxygen and nutrient exchanges at the sediment-water interface: a global synthesis and critique of estuarine and coastal data. **Estuaries and Coasts**, v.41, n.2, p.301-333, 2018.

BOYNTON, W. R.; KEMP, W. M.; KEEFE, C. W.. A comparative analysis of nutrients and other factors influencing estuarine phytoplankton production. In: KENNEDY, V. S.. **Estuarine Comparisons**. New York: Academic Press, 1982.

CLOERN, J. E.; FOSTER, S. Q.; KLECKNER, A. E.. Phytoplankton primary production in the world's estuarine-coastal ecosystems. **Biogeosciences**, n.11, p.2477-2501, 2014.

EIDAM, E. F.; SUTHERLAN, D. A.; RALSTON, D. K.; DYE, B.; CONROY, T.; SCHMITT, J.; RUGGIERO, P.; WOOD, J.. Impacts of 150 Years of Shoreline and Bathymetric Change in the Coos Estuary, Oregon, USA. **Estuaries and Coasts**, p.1-19, 2020.

ESCHRIQUE, S. A.. **Estudo do Balanço biogeoquímico dos nutrientes dissolvidos principais como indicador da influência antrópica em sistemas estuarinos do Nordeste e Sudeste do Brasil**. Tese (Doutorado em Oceanografia Química e Geológica) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

ESCHRIQUE, S. A.; COELHO, L. H. F.; BATISTA, S. S.; BRAGA, E. S.. Fósforo dissolvido como sinal de eutrofização em dois sistemas estuarinos do litoral paulista sob diferentes graus de influência antrópica. In: RESUMOS EXTENDIDOS DO CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 12; INTERNACIONAL SYMPOSIUM ENVIRONMENTAL ON GEOCHEMISTRY, 8. **Anais**. Ouro Preto, 2009.

FATMA. **Alimentação Artificial da Praia Central de Balneário Camboriú/SC**. Balneário Camboriú, 2014.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **População estimada de Balneário Camboriú**. Balneário Camboriú: IBGE, 2019.

KUROSHIMA, K.; BARREIROS, M. A. B.; RÖRIG, L. R.; SCHERER, P. F.; TERNES, C. F.; FASANARO, R.; SCHROEDER, R. A.; RIBEIRO, L.. Avaliação das Características Físicas e Químicas da Enseada de Camboriú-SC-Brasil. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27. **Anais**. 2000. p.9.

MANN, K. H.; LAZIER, J. R. N.. **Dynamics of Marine Ecosystems: biological-physical interactions in the oceans**. John Wiley & Sons, 2013.

NORIEGA, C. D.; MUNIZ, K.; ARAÚJO, M. C.; TRAVASSOS, R. K.; LEITÃO, S. N.. Fluxos de nutrientes inorgânicos dissolvidos em um estuário tropical – Barra das Jangadas – PE, Brasil. **Tropical Oceanography**, Recife, v.33, n.2, p.133-145, 2005.

OTTONELLI, M.. **Florações de diatomáceas epibênticas associadas a briozoários na enseada de Camboriú - SC**: características químicas da biomassa, ecofisiologia das microalgas envolvidas e hipóteses sobre as causas. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

PEREIRA FILHO, J.; RÖRIG, L. R.. Balanço de massa para nutrientes inorgânicos (N e P) no estuário do rio Itajaí-Açu, SC. **RBRH**, v.21, n.1, p.168-187, 2016.

PEREIRA FILHO, J.; SCHETTINI, C.A.F.; RÖRIG, L.; SIEGLE, E.. Intratidal Variation and Net Transport of Dissolved Inorganic Nutrients, POC and Chlorophyll a in the Camboriú River Estuary, Brazil. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v.53, n.2, p.249-257, 2001. DOI: <http://dx.doi.org/10.1006/ecss.2001.0782>

PEREIRA FILHO, J.; SPILLERE, L. C.; SCHETTINI, C. A. F.. **Dinâmica de nutrientes na região portuária do estuário do rio Itajaí-açu, SC**. Atlântica, Rio Grande, 2003.

PEREIRA FILHO, J.; SPILLERE, L. C.; SCHETTINI, C. A. F.; SILVA, L. F.. **Estuário do rio Camboriú-SC**: variação intramareal e transporte residual de nutrientes, cop e clorofila-a em condições de quadratura e sizígia. Itajaí: C.t.t. Mar - Universidade do Vale do Itajaí, 2002.

PEZZUTO, P. R.; ALVES, E. S.; NOVAES, M. J.. **Caracterização da macrofauna bêntica após as obras do aterro hidráulico na parte sul da praia central de Balneário Camboriú, SC**. Relatório final. UNIVALI/EMASA, 43, 2007.

PEZZUTO, P. R.; RESGALLA, J. R. C.; ABREU, J. G. N.; MENEZES, J. T.. Environmental impacts of the nourishment of Balneário Camboriú Beach, SC, Brazil. **Journal of Coastal Research, SI 39 (Pro-ceedings of the 8th International Coastal Symposium)**, Itajaí, p.863-868, 2006.

REDFIELD, A. C.. The Biological Control of Chemical Factors in the Environment. **Limnol, Oceanogr**, v.46, p.205-221, 1958.

RÖRIG, L. R.; OTTONELLI, M.; ITOKAZU, A. G.; MARASCHIN, M.; VITOR, H.; LINS, J.; ABREU, P. C. V.; ALMEIDA, M. T. R.; RAMLOV, F.; D'OCA, M.; RAMALHO, L. V.; DIEHL, F. L.; HORTA, P. A.; PEREIRA FILHO, J.. Blooms of bryozoans and epibenthic diatoms in an urbanized Sandy Beach (Balneário Camboriú - SC - Brazil): dynamics, possible causes and biomass characterization. **Brazilian Journal of Oceanography**, v.65, n.4, p.678-694, 2017.

SCHETTINI, C. A. F.; CARVALHO, J. L. B.; JABOR, P.. Comparative Hydrology and Suspended Matter Distribution of Four Estuaries in Santa Catarina State - Southern Brazil. In: WORKSHOP ON COMPARATIVE STUDIES OF TEMPERATE COAST ESTUARIES. **Anais**. 1996. p.29-32.

SOUZA, M. F. L.; EÇA, G. F.; SILVA, M. A. M.; AMORIM, F. A. C.; LÔBO, I. P.. Distribuição de nutrientes dissolvidos e clorofila-a no estuário do rio cachoeira, Nordeste do Brasil. **Atlântica, Rio Grande**, v.1, n.31, p.107-121, 2009.

URBAN, S. R.. **Uso do Solo na Bacia Hidrográfica do Rio Camboriú (SC) e sua Influência sobre a Qualidade da Água**. Dissertação (Doutorado em Tecnologia Ambiental) - Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí, 2008.

YUAN, R. U. I.; ZHU, J.. The effects of dredging on tidal range and saltwater intrusion in the Pearl River Estuary. **Journal of Coastal Research**, v.31, n.6, p.1357-1362, 2015.

Os autores detêm os direitos autorais de sua obra publicada. A CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03) detêm os direitos materiais dos trabalhos publicados (obras, artigos etc.). Os direitos referem-se à publicação do trabalho em qualquer parte do mundo, incluindo os direitos às renovações, expansões e disseminações da contribuição, bem como outros direitos subsidiários. Todos os trabalhos publicados eletronicamente poderão posteriormente ser publicados em coletâneas impressas ou digitais sob coordenação da Companhia Brasileira de Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.