

## Dinâmica dos parâmetros oceanográficos em um estuário impactado por atividades de mineração de carvão

Tiago A. M. SILVESTRINI & Carla de Abreu D'AQUINO

Programa de Pós-graduação em Energia e Sustentabilidade, Universidade Federal de Santa Catarina. Campus Araranguá, Unidade Mato Alto. Rua Pedro João Pereira, nº 150, CEP 88.905-120, Araranguá, SC, Brasil (tiago.silvestrini@hotmail.com, carla.daquino@ufsc.com.br).

**Resumo.** O estuário do rio Araranguá, no sul de Santa Catarina recebe as águas ácidas com baixo pH de parte da bacia hidrográfica onde ocorrem atividades de exploração de carvão há mais de 100 anos, que impactam a atividade pesqueira, turismo, diversidade e quantidade de espécimes da fauna e flora local. Este trabalho teve como objetivo relacionar a vazão, a salinidade, o material particulado em suspensão e o pH de modo a descrever um modelo qualitativo que possa ser reconhecido através da variação da vazão neste estuário impactado pelas atividades de mineração de carvão. Para tal, se avaliou resultados de trabalhos anteriores, levantamentos históricos de valores de pH, além da coleta de dados entre os anos de 2018 e 2019. O comportamento hidrodinâmico do estuário explica as variações de material particulado em suspensão e pH, em um estuário que varia de parcialmente bem misturado a cunha salina, respondendo diretamente as variações de vazão. A presença do sal, atua mais fortemente ou menos fortemente neutralizando o pH, conforme o padrão de mistura. A dependência da vazão, e consequentemente da pluviometria, governa os processos de pH e material particulado em suspensão. Ficam demonstradas as condições para decantação e exportação de flocos formados em consequência do impacto por Drenagem Ácida de Mina nos recursos hídricos superficiais para a zona costeira adjacente. Os valores de pH tendem aumentar suavemente conforme se afastam das fontes de acidez, devido a: a) diluição com aportes de águas não ácidas, b) neutralização das águas ácidas com a influência da maré e, c) ação de reações químicas no trecho estuarino, permitindo a floculação e decantação de componentes mais ácidos, removendo acidez da coluna d'água. Em condições normais, o estuário desempenha um papel filtrante muito importante, recebendo águas de baixo pH através do rio Mãe Luzia e entregando a zona costeira adjacente água com pH neutro. Este trabalho incentiva a discussão sobre as relações entre impactos da atividade carbonífera no ambiente estuarino e costeiro, até então pouco apontados, subsidiando possíveis ações preventivas a poluição neste ambiente.

**Palavras-chave.** Estuário do rio Araranguá, drenagem ácida de mina, vazão.

**Abstract.** DYNAMICS OF OCEANOGRAPHIC PARAMETERS IN A COAL MINE IMPACTED ESTUARY. The Araranguá River Estuary, in the south of Santa Catarina receives acidic waters with low pH from part of the hydrographic basin where coal mining activities have been taking place for more than 100 years, which impact the fishing activity, tourism, diversity and quantity of specimens of the local fauna and flora. This work aimed to relate the flow, salinity, suspended particulate material and pH in order to describe a qualitative model that can be recognized by varying the flow in this estuary impacted by coal mining activities. To this end, the results of previous work, historical surveys of pH values, as well as data collection between the years 2018 and 2019 were evaluated. The hydrodynamic behavior of the estuary explains the variations in particulate matter in suspension and pH, in an estuary that varies from partially well mixed to saline wedge, directly responding to flow variations. The presence of salt acts more strongly or less strongly neutralizing the pH, depending on the mixing pattern. Dependence on flow, and consequently rainfall, governs the processes of pH and particulate matter in suspension. The conditions for settling and exporting flakes formed as a result of the impact by Acid Mine Drainage on surface water resources to the adjacent coastal zone are demonstrated. The pH values tend to increase slightly as they move away from sources of acidity, due to: a) dilution with non-acidic water inputs, b) neutralization of acidic waters with the influence of the tide, and c) the action of chemical reactions in the estuary stretch, allowing the flocculation and decanting of more acidic components, removing acidity from the water column. Under normal conditions, the estuary plays a very important filtering role, receiving low pH waters through the Mãe Luzia

river and delivering water with neutral pH to the adjacent coastal zone. This work encourages the discussion about the relationship between the impacts of the coal activity in the estuarine and coastal environment, hitherto little pointed out, subsidizing possible preventive actions to pollution in this environment.

**Keywords.** Araranguá river estuary, acid mine drainage, flow rate.

---

## 1 Introdução

Estuários são ambientes de transição entre os continentes e o oceano, onde as águas continentais, trazidas pelos rios encontram o mar, resultando em uma mistura das águas. Estes ecossistemas dinâmicos têm uma das maiores diversidades do mundo (Hobbie, 2000; Bianchi, 2007). Ecologicamente, as zonas costeiras estuarinas servem de berçário e criadouro para peixes marinhos, um habitat essencial para pássaros migratórios e podem servir como filtros para manter a qualidade da água (Roman & Nordstrom, 1996). A habilidade dos estuários em remover e reter materiais em suspensão e em solução tem importância prática e implicação científica (Schubel & Kennedy, 1984), já que é através deles que o material trazido pela drenagem continental alcançará o oceano. Por esta característica tendem a ser os receptáculos das substâncias naturais e de produtos da atividade do homem que ocorrem em toda bacia. Alguns destes produtos podem ocasionar a degradação da qualidade das águas do estuário (Miranda *et al.*, 2002).

O carvão catarinense vem sendo explorado desde o início dos anos 1900, com seu uso quase que exclusivo para geração termoelétrica a partir dos anos 90 (Brasil, 2005). Devido a carência de planejamento e políticas ambientais, a extração de carvão durante anos não adotou técnicas adequadas para disposição dos rejeitos oriundos da atividade, tornando-se estes um grande passivo ambiental pelo seu potencial de formação da Drenagem Ácida de Mina (DAM) (Lopes *et al.*, 2009).

O estuário do rio Araranguá está localizado no sul de Santa Catarina e parte de sua bacia hidrográfica está inserida na região carbonífera de catarinense. Assim, o mesmo recebe as águas ácidas com baixo pH da bacia hidrográfica, sendo impactado, segundo Volpato *et al.* (2017), com

a diminuição da atividade pesqueira, turismo, perda da qualidade de vida e com reflexos na economia das vilas pesqueiras tradicionais, com impactos também na diversidade e quantidade das demais espécies da fauna e flora local. A porção estuarina do rio Araranguá está inserida em duas unidades de conservação, tornando ainda mais interessante e relevante o estudo deste ambiente.

Schettini & Toldo (2006), D'Aquino *et al.* (2010), Couceiro & Schettini (2010), Barreto & Schettini (2014) e Couceiro (2015), em estudos anteriores, demonstraram a influência das águas ácidas em alguns processos estuarinos. O presente trabalho tem como objetivo relacionar os parâmetros hidrodinâmicos (vazão, salinidade, material particulado em suspensão (MPS) e pH) em um estuário impactado por Drenagem Ácida de Mina, de modo a descrever um modelo qualitativo que possa ser reconhecido através da determinação da vazão. Para tal, o presente artigo uniu os resultados de trabalhos anteriores, de levantamentos históricos dos valores de pH no estuário e novas campanhas de monitoramento de dados, realizadas entre os anos de 2018 e 2019.

## 2 Área, materiais e métodos

A bacia hidrográfica do rio Araranguá localiza-se no sul catarinense, e tem uma área de drenagem de aproximadamente 3.039 km<sup>2</sup>, com um comprimento total de rios em torno de 5.021 km. O rio Araranguá recebe esta denominação após a junção das águas dos rios Itoupava e Mãe Luzia. Sendo os afluentes mais importantes do rio Itoupava os rios da Pedra, Amola Faca, Turvo e Jundiá, e do Mãe Luzia os rios Guarapari, São Bento, Cedro, Manoel Alves, Sangão e Fiorita. Após a junção das águas do Itoupava com o Mãe Luzia, o rio Araranguá recebe apenas mais um afluente considerável, próximo a sua foz, o rio

dos Porcos (Back, 2009).

Segundo D'Aquino *et al.* (2010), o estuário apresenta uma profundidade média de 7,2 m ao longo dos 27 km entre sua desembocadura e a cidade de Araranguá. O canal do rio é bem definido, com orientação geral leste-oeste, sinuosidades do tipo meandrante sem a presença de bancos de areia ou planícies intermareais. Sua foz desloca-se paralelamente a linha de costa por cerca de 7 km antes de desaguar no mar. A largura é de 170 m próximo a desembocadura, sendo que a mesma reduz gradativamente em direção a montante chegando a 80 m na cidade de Araranguá (Fig. 1). A região é marcada pelo regime de micromarés, e sofre com a influência de frentes-frias provenientes de sul ao longo do ano.

O estuário do rio Araranguá, possui interface com importantes unidades de conservação: A Área de Proteção Ambiental (APA) da Costa de Araranguá, juntamente com a Reserva Extrativista (RESEX) do rio Araranguá, e o Monumento Natural (MONA) do Morro dos Conventos. Segundo o disposto no art. 3º da Lei 9.433/97, a qual estabeleceu a Política e Sistema Nacional de Recursos Hídricos, deve haver a gestão integrada entre bacias hidrográficas e unidades de conservação em ambientes marinhos - costeiros. Ainda, a Lei nº 5.793 de 15/01/80 define os estuários como áreas de proteção especial, e devem ser assim consideradas por tratarem-se de áreas sensíveis à poluição ambiental, uma vez que servem de berçário para manutenção não só da vida no rio, mas também no litoral.

## 2.1 Dados hidrodinâmicos e material particulado em suspensão

Foi realizada uma campanha para medição de correntes, nível de água, temperatura, turbidez e pH, entre os dias 11 e 13 de maio de 2006. O fundeio foi realizado a 7,5 km da desembocadura e está descrito em detalhes por D'Aquino *et al.* (2010). Durante o período de fundeio foram realizadas perfilagens verticais com auxílio de um CTD (Conductivity, Temperature, Depth, marca SAIV), ao longo do estuário, espaçados a cada quilômetro. Iniciando-se da foz até

aproximadamente 32 km em direção a montante.

Durante as campanhas de coleta de dados foram utilizados sensores ópticos (retro-espelhamento ótico, REO) e acústicos (retro-espalhamento acústico, REA) para determinação da concentração de MPS. Em laboratório foi realizada uma calibração para estabelecer as relações entre MPS presente na amostra e REA, conforme equação 1.

$$\text{MPS} = 0,588 \cdot \text{REA} - 0,006 \quad (1)$$

Seguindo o procedimento de calibração proposto e aplicado por Schettini & Zaleski (2006) no estuário do rio Itajaí-açu, o sensor acústico utilizado no fundeio teve seus valores de amplitude acústica transformados em REA e o REA transformado em MPS.

O esquema de decomposição do transporte advectivo aplicado neste estudo é descrito em detalhes por Miranda *et al.* (2002). O transporte de sedimentos em suspensão  $T_c$  é decomposto considerando-se a homogeneidade lateral do estuário, o transporte de MPS médio  $T_c$  para um ou mais ciclos de maré é representado pela equação 2.

$$T_c = \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^h uC \, dz \, dt \quad (2)$$

Onde o fluxo de volume de material particulado em suspensão é integrado no tempo e no espaço. Ainda, conforme Miranda *et al.* (2002), esta equação pode ser decomposta em termos dispersivos e advectivos dos quais, sete são os termos principais e podem ser descritos como (A) descarga fluvial, (B) deriva de Stokes, (C) correlação de maré, (D) circulação gravitacional, (E) bombeamento de maré, (F) cisalhamento de maré e (G) transporte residual. Neste trabalho foi convencionado que os valores de velocidades negativos representam água saindo do estuário, relação mantida para o cálculo do transporte de MPS.

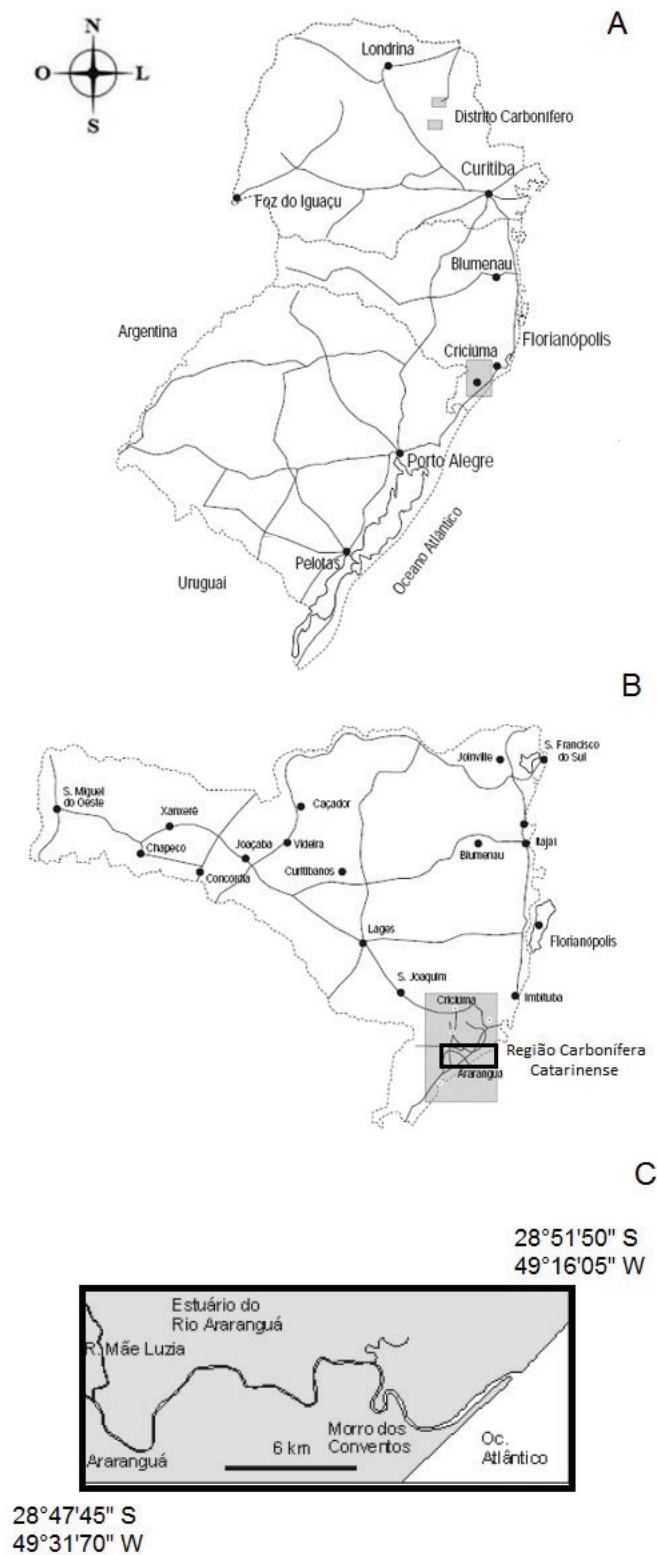


Figura 1. Mapa de localização. A) Área de estudo localizada na Região Sul do Brasil. B) Área de estudo localizada no estado de Santa Catarina. C) Estuário do rio Araranguá, na região carbonífera de Santa Catarina, Brasil. Região compreendida entre as coordenadas 28°54'45" 49°31'70" e 28°51'50" 49°16'05".

Figure 1. Location map. A) Study area located in the Southern Region of Brazil. B) Study area located in the state of Santa Catarina. C) Estuary of the Araranguá River, in the coal region of Santa Catarina, Brazil. Region between the coordinates 28° 54'45" 49°31'70" and 28°51'50" 49°16'05".

## 2.2 Posicionamento da cunha salina e vazão

Com o objetivo de caracterizar o avanço da salinidade no estuário do rio Araranguá em diferentes regimes de descarga fluvial, foram realizadas nos meses de julho a dezembro de 2010, oito campanhas de perfis verticais ao longo ao estuário, durante períodos de maré de sizígia incluindo os dois afluentes, rios Itoupava e Mãe Luzia. Dados oceanográficos de salinidade, temperatura, pressão, cota do rio e variáveis meteorológicas foram coletados em cada campanha. Para realização dos perfis foi utilizado um jet-ski, um GPS Garmin XL12TM e uma sonda tipo CTD marca ALEC modelo ASTD 687. Perfis verticais de salinidade, temperatura e pressão foram realizados a em cada ponto, onde o equipamento era submergido até o fundo, sendo este programado para armazenar dados em intervalo de 1 segundo (Coelho & D'Aquino, 2011).

## 2.3 Monitoramento dos parâmetros de qualidade da água

As medições em campo para determinação dos valores de pH e salinidade em superfície no estuário do rio Araranguá durante o período de 1 ano hidrológico, ocorreram em 7 pontos do estuário, distribuídos no alto-médio estuário, baixo estuário e zona costeira adjacente (Fig. 2). Totalizaram-se 52 campanhas realizadas de julho de 2018 a julho de 2019, semanalmente. Durante este período, dados de vazão instantânea dos rios foram obtidos em 3 estações fluviopluiométricas existentes operadas pela ANA, pluviometria da últimas 12 h, 24 h, 72 h, 7 dias e 14 dias nas mesmas 3 estações. Em 3 estações pluviométricas existentes operadas pela EPAGRI/CIRAM foram coletadas as informações de direção e intensidade dos ventos, condições e altura de maré na zona costeira.

Valores de pH e salinidade foram obtidos por leitura direta nos recipientes de coleta com equipamento Medidor multiparâmetro portátil Marca AKSO modelo AK87. A coleta das amostras de água se deu em superfície, através de um coletor plástico de 1 litro acoplado a haste alongável de 2 m. As estações fluviométricas-

pluviométricas utilizadas para coleta de dados foram "Forquilha" (84820000), "Foz do Manoel Alves" (84853000) e "Ermo" (84949800). As estações pluviométricas foram "Serrinha" (1009), "Timbé do Sul" (2462) e "Araranguá - INMET" (4201406114H). A coleta de dados de vento foi da Base de Observação Oceano Atmosfera (BOOA/UFSC - 1066) e os dados referentes à altura de maré medida e maré astronômica do marégrafo instalado na Plataforma de Pesca Praia do Rincão. Além disso foram levantados todos os dados relevantes referentes a bacia hidrográfica e o comportamento da vazão (através do site HIDROWEB, da ANA, Agência Nacional de Águas).

Durante as campanhas de monitoramento foram observados alguns parâmetros qualitativos como a presença de flocos metálicos, sua distribuição, bem como a transparência da água. Essas informações foram registradas em todos os pontos e em todas as campanhas afim de complementar a discussão.

## 3 Resultados

### 3.1 Investigação das propriedades hidrodinâmicas e MPS

O estuário do rio Araranguá é classificado como de cunha salina, altamente estratificado conforme D'Aquino *et al.* (2010). Estes autores discutiram o padrão de correntes e a hidrodinâmica do estuário após a passagem de uma onda de cheia. Barreto *et al.* (2011), descreveram a resposta do MPS em suspensão ao regime transiente de descarga fluvial. No presente estudo serão mostrados os resultados do cálculo integrado do transporte de MPS, em dois momentos diferentes. No início da campanha, quando estava ocorrendo a passagem da onda de cheia (primeiras 25 h) e no período final, quando o regime de marés se reestabeleceu através da presença da circulação gravitacional (últimas 25 h).

O período amostral para o estuário do rio Araranguá foi de 50 h favorecendo a observação de mais de um ciclo de maré (Fig. 3). Durante as primeiras 25 h de experimento nota-se um grande domínio fluvial no estuário marcado pelas intensas correntes de vazante. No entanto

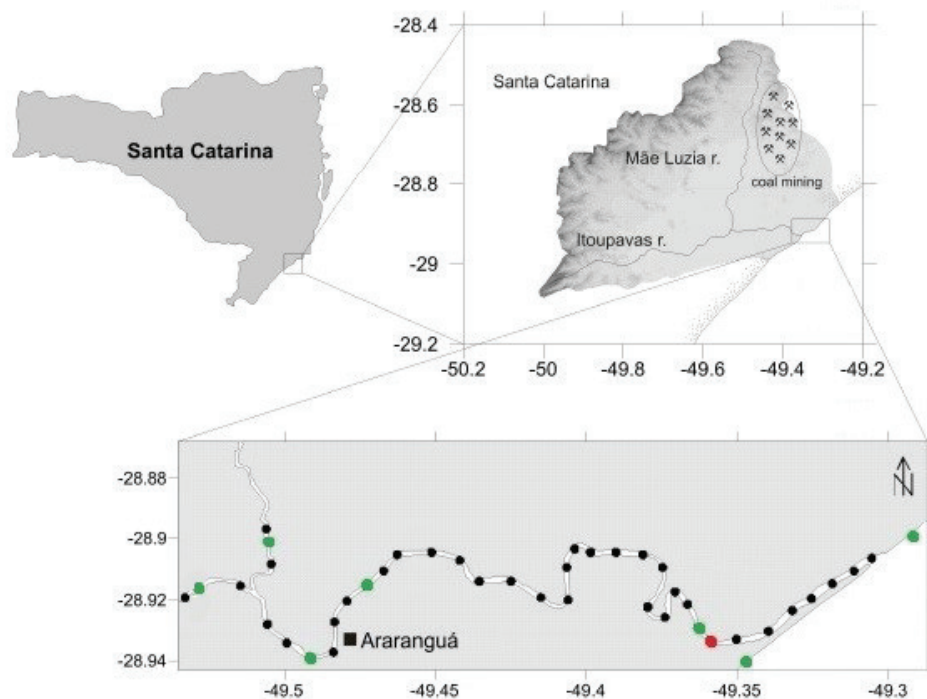


Figura 2. Mapa de localização dos pontos amostrais. Em verde, pontos amostrais de Silvestrini, 2020. Em vermelho, fundeio realizado por D'Aquino, 2010. Em preto, pontos onde foram realizadas perfilagens verticais, ao longo do estuário, espaçados a cada quilômetro, por Coelho & D'Aquino, 2011 (modificado de D'Aquino, 2010).

Figure 2. Map of the location of the sampling points. In green, Silvestrini's sampling points, 2020. In red, anchoring made by D'Aquino, 2006. In black, points where vertical profiles were made, along the estuary, spaced every kilometer, by Coelho & D'Aquino, 2011 (modified from D'Aquino, 2010).

o estuário vinha de um período de estiagem e apresentava um comportamento parcialmente misturado em termos de salinidade, segundo Barreto *et al.* (2011) nesse período o estuário apresentou baixa concentração de sedimentos em suspensão. O final deste período é marcado por uma enchente que domina toda coluna de água, com posterior estabelecimento da circulação gravitacional no estuário (Fig. 3A).

Com isso, a partir da 25 hora de medição, há um incremento nos valores de REA e concentração de MPS junto ao fundo (Fig. 3B e C) acompanhando os períodos de maior velocidade de enchente. A porção superior da coluna de água nesse período apresenta concentrações material particulado em suspensão baixas e sem variações, indicando conforme Barreto *et al.* (2011) que o estuário estava operando no modo de importação de sedimentos nesta parte do experimento.

Os mecanismos de transporte de material particulado em suspensão integrados para um ciclo de maré mostram a contribuição de cada forçante hidrodinâmica no processo de transporte. A tabela 1 apresenta os termos do transporte de MPS para o estuário do rio Araranguá, calculado separadamente para as primeiras 25 h de campanha e para as últimas 25 h, em função do regime fluvial diferenciado.

O termo da descarga fluvial (A) foi o termo mais significativo no transporte de MPS estuário afora, seguido da correlação de maré (C). O termo A representa um mecanismo exportador e o fato de apresentar maior importância reflete o escoamento de água doce sobre a cunha, e a capacidade de lançar na zona costeira adjacente todo MPS transportado. Apesar disso, conforme demonstrado por Barreto *et al.* (2011) a fase inicial do transporte de sedimentos em suspensão, tal qual as correntes, foi dominada pelo processo

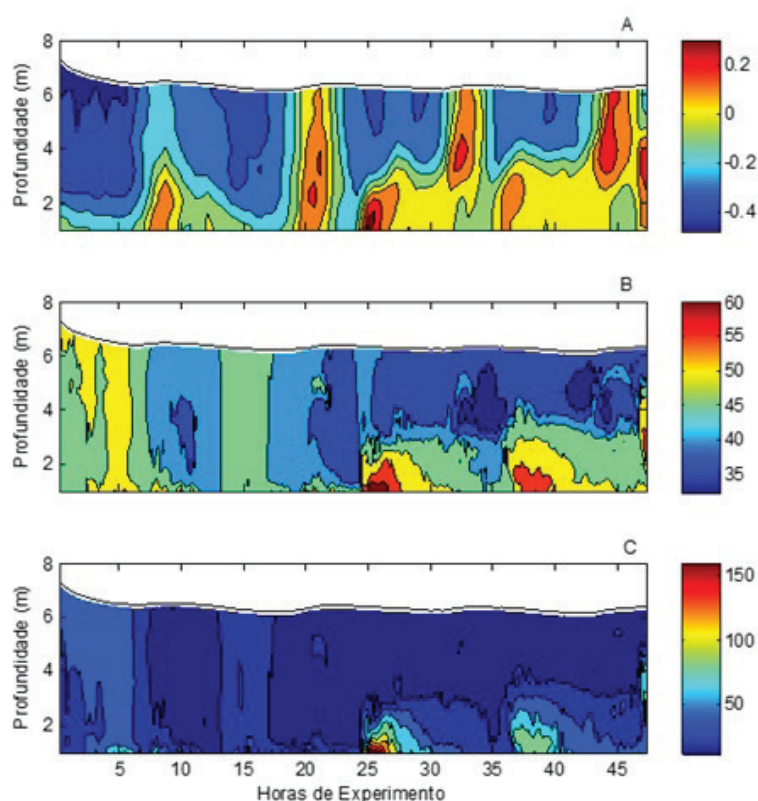


Figura 3. Distribuições temporais e vertical de correntes (A) em  $m.s^{-1}$ , REA (B) em dB, e MPS (C) em  $mg.l^{-1}$ , para o estuário do rio Araranguá no período de realização da campanha exploratória em maio de 2006.

Figure 3. Temporal and vertical distributions of currents (A) in  $m.s^{-1}$ , REA (B) in dB, and MPS (C) in  $mg.l^{-1}$ , for the Araranguá river estuary during the period of the exploratory campaign in May 2006.

Tabela 1. Termos do transporte de MPS ( $kg.m^{-1}.s^{-1}$ ) para o estuário dos rio Araranguá (dividido nas primeiras e últimas 25 h de campanha, o sinal negativo representa processos estuário afora, e os positivos estuário adentro).

Table 1. MPS transport terms ( $kg.m^{-1}.s^{-1}$ ) to the Araranguá river estuary (divided into the first and last 25 hours of the campaign, the negative sign represents estuary processes outside, and the positive estuary inside).

| Parcelas do transporte       | 1-25 h        | 2-25 h       |
|------------------------------|---------------|--------------|
| A – Descarga fluvial         | - 27,0        | -15,0        |
| B – Transporte de Stokes     | -0,4          | -0-05        |
| C – Correlação de maré       | - 4,9         | -2,0         |
| D – Circulação gravitacional | 5,1           | 0,8          |
| E – Bombeamento de maré      | 3,1           | 6,4          |
| F – Cisalhamento de maré     | - 0,1         | 0,0          |
| G – Flutuações do vento      | - 0,08        | 0,02         |
| <b>Somatório</b>             | <b>- 24,3</b> | <b>- 9,8</b> |
| <b>Transporte resultante</b> | <b>- 24,6</b> | <b>- 9,8</b> |

advectivo fluvial, com regime barotrópico. Com a diminuição do papel da descarga como forçante principal do escoamento, o efeito da circulação gravitacional passou a ser mais notável (regime baroclínico), resultando em exportação na camada superficial e importação na camada de fundo.

O transporte resultante no estuário foi sentido vazante (negativo), com valores de 24,6 e 9,8 kg. m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup> para as primeiras e últimas 25 h no Araranguá. Considerando o transporte no sentido estuário adentro a parcela referente a circulação gravitacional (D) foi a mais significativa para os dois períodos. Destaca-se ainda, que o estuário do rio Araranguá apresenta o termo do bombeamento de maré (E), com sentido estuário adentro, crescendo de importância no período das últimas 25 h, após a passagem da onda de cheia. Quando se observou maiores concentrações de sedimentos em suspensão próximos ao fundo (Fig. 3 C).

### 3.2 Cunha salina e vazão

A tabela 2 apresenta um resumo das campanhas de amostragem. Os maiores valores de vazão registrados ocorreram nas campanhas II e III, seguidos da campanha VIII. Os maiores valores de salinidade média observados foram registrados na campanha VII e IV, em torno de 20. O estuário do rio Araranguá apresentou na maioria das campanhas uma cunha salina bem definida. A figura 4 apresenta a salinidade ao longo do estuário do rio Araranguá adentrando o rio Itoupava. Nas campanhas II e III foram registrados maiores valores de vazão 31,52 e 23,93 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, observa-se uma forte influência da descarga fluvial fazendo com que a água salina

permanecesse junto à foz com menor penetração da cunha salina estuário adentro (Fig. 4).

Na campanha IV foi registrada uma vazão de 3,3 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> sendo a menor de todas as campanhas. Pode observar que o ambiente está altamente estratificado até o último ponto, sendo assim não foi possível registrar o avanço máximo da cunha o qual apresentou uma salinidade média de 19,58 PSU.

Coelho & D'Aquino (2011) propuseram uma relação entre a vazão e o avanço da cunha salina descrito pela equação 3:

$$EC = 47,94 * \exp^{(-0,06008 * X)} \quad (3)$$

Onde EC é a excursão da cunha salina, e representa o quanto a cunha avança em quilômetros estuário adentro. E x é a vazão m.s<sup>-1</sup>. O estuário demonstrou ser altamente estratificado e com uma cunha salina bem definida. O gradiente longitudinal e vertical de sal varia conforme a descarga fluvial. Em condições de vazões menores que 5,0 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> a extensão da cunha a montante chegou a 35 km, entretanto para condições de maiores de vazão acima de 33,0 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> a extensão da cunha diminui chegando a 5 km da foz.

### 3.3 Monitoramento do pH

Uma síntese dos registros de pH com a totalidade dos valores amostrados no período de julho de 2018 a julho de 2019 é apresentada na figura 5. Os valores registrados para a região costeira (Rincão e Morro dos Conventos), assim como para o rio Itoupava são os mais constantes, apresentando pequena variabilidade entre os dados. Na região costeira, o valor médio fica

Tabela 2. Datas das campanhas e valores de maré, vazão (Araranguá) e salinidade média (Itoupava e Mãe Luzia).  
Table 2. Dates of the campaigns and values of tide, flow (Araranguá) and average salinity (Itoupava and Mãe Luzia).

| Coleta | Data       | Maré (m) | Vazão (m <sup>3</sup> /s) | Salinidade Média Itoupava (PSU) | Salinidade Média Mãe Luzia (PSU) |
|--------|------------|----------|---------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| I      | 12/07/2010 | 0,8      | 7,10                      | 16,9                            | -                                |
| II     | 26/07/2010 | 0,7      | 31,52                     | 1,14                            | 1,42                             |
| III    | 09/08/2010 | 0,8      | 23,93                     | 1,77                            | 1,84                             |
| IV     | 25/08/2010 | 0,7      | 3,30                      | 19,58                           | 19,77                            |
| V      | 24/09/2010 | 0,6      | 10,28                     | 18,31                           | 18,73                            |
| VI     | 05/10/2010 | 0,6      | 11,55                     | 4,75                            | 5,15                             |
| VII    | 23/10/2010 | 0,5      | 7,48                      | 19,62                           | 20,75                            |
| VIII   | 07/12/2010 | 0,5      | 21,21                     | 3,01                            | 3,40                             |

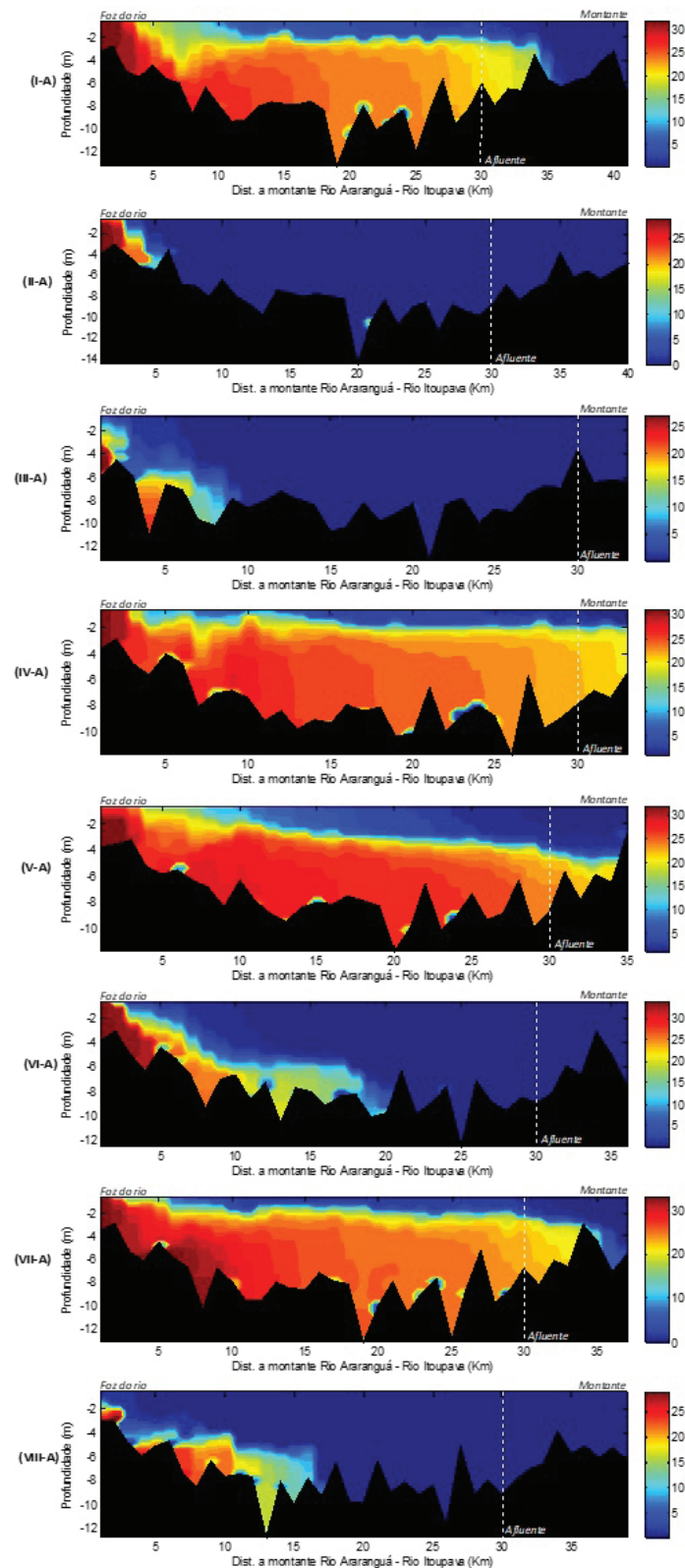


Figura 4. Distribuição vertical e longitudinal de salinidade (PSU) sentido da foz do rio a montante para as 8 campanhas. As abscissas apresentam o comprimento do rio e as ordenadas a profundidade. As cores mais quentes (vermelho, laranja, amarelo) demonstram maiores concentrações de sais e cores mais frias (azul, ciano, verde) menores concentrações (água fluvial) e a cor preta o leito do rio. O Rio Araranguá está demonstrado até o km 30, após este ponto encontra-se a junção entre o Rio Itoupava e Mãe Luzia (modificado de Coelho & D'Aquino, 2011.)

Figure 4. Represent the vertical and longitudinal distribution of salinity (psu) towards the mouth of the river upstream for the 8 campaigns. In the abscissas it presents the length of the river and in the ordinates the depth. The warmer colors show higher concentrations of salts and colder colors lower concentrations (river water) and the black color the riverbed. The Araranguá River is demonstrated until km 30, after this point is the junction between the Itoupava River and Mãe Luzia (modified from Coelho & D'Aquino, 2011).

próximo a 8,0 unidades e, no rio Itoupava próximo a 7,0.

Observa-se que o ponto Mãe Luzia apresenta um pH mínimo 3,24 e máximo 5,63. Ou seja, por todo período amostrado permaneceu com pH inferior a 6,0. Ficando abaixo do que é considerado o limite inferior para rios de Classe II Conforme Resolução CONAMA 357/2005 Conforme esta resolução, as águas dos rios Mãe Luzia e Araranguá, Classe II, deveriam ser destinadas: a) ao abastecimento para consumo humano após tratamento; b) a proteção das comunidades aquáticas; c) a recreação; d) a irrigação de culturas agrícolas e; e) aquicultura e pesca, estando em desacordo com os parâmetros mínimos para seu uso pretendido em todas as campanhas.

Na figura 6, é apresentada a distribuição dos dados de pH ao longo do período avaliado, enquanto na figura 7 é apresentado o histograma de frequência para os dados de pH em superfície e por segmentação do estuário. A figura 7A apresenta a distribuição total dos dados de pH considerando apenas pontos no interior do estuário ( $n = 52$  campanhas  $\times$  5 pontos = 260). Verifica-se distribuição de padrão normal, com maioria dos dados entre 5,5 e 7,5.

Os pontos BR 101 e Fazenda apresentaram uma distribuição dos dados de pH semelhante, com 50 % dos dados nestes pontos entre 5,2 e 6,2. No ponto Balsa, pHs médios mais altos que nos pontos BR 101 e Fazenda, no entanto, 50 % dos dados entre 5,9 e 6,5, muito próximos ou superiores ao limite inferior da legislação para rios de Classe II ( $pH = 6,0$ ). No entanto, 25 % dos dados ficaram abaixo de 5,8, sendo o pH mínimo verificado em 5,3.

Realizou-se a segmentação da distribuição de pH por estação do ano (Fig. 8), onde observa-se que no inverno e primavera há uma maior distribuição dos dados, apresentando valores mais extremos. Uma ocorrência maior de valores de pH mais ácidos é verificada na primavera, período no qual as chuvas foram mais frequentes e melhores distribuídas. O outono em 2019, foi a estação mais chuvosa do ano, superando os índices pluviométricos do verão, 659,4 mm versus 558,4 mm respectivamente. Apenas durante o mês de maio/2019, a estação pluviométrica de

Araranguá registrou 414 mm bem distribuídos, enquanto a normal para o período é 66,5 mm. Em virtude desta alta pluviosidade, o fator diluição prevaleceu ao avanço da cunha salina e provocou a elevação dos valores de pH.

O agrupamento dos dados por estação do ano pouco se modificou em relação a análise do conjunto total. Na zona costeira, o pH permanece sempre próximo a 8,0. No estuário inferior, representado pelo Ponto Balsa as maiores ocorrências foram pH variando de 5,5 a 7,0, muito em virtude da ação das águas salinas, que elevam o pH. O estuário superior apresentou ocorrências bem distribuídas com valores entre 4,5 a 7,0. Esta variação no estuário superior, reflete as condições de pluviosidade na bacia. Neste setor, pH maiores ocorrem em virtude da diluição ocasionada pela pluviosidade em um primeiro momento, vindo a apresentar valores menores de pH em um segundo momento, quando a vazão estabiliza e a carga ácida carregada das áreas mineradas reflete no pH.

A figura 9 apresenta os valores de pH no Ponto Mãe Luzia em função da pluviometria de 72 h. Apesar de um baixo coeficiente de determinação, foi observado que durante a "onda de cheia" ocasionada pelas chuvas, o pH tende a aumentar, pelo fator diluição. Mas após a passagem da onda de cheia, é que são verificados os menores pH resultantes da acidez carregada durante a chuva passada. Com a microbacia hidrográfica do Mãe Luzia apresentando um Tempo de Concentração de mais de 165 h, conforme Santa Catarina (1997), a situação representada pela chuva de 72 h no ponto Mãe Luzia refere-se ainda a passagem da "onda de cheia", indo a encontro ao tempo de concentração apresentado.

A figura 10 apresenta os valores de vazão registrados ao longo do tempo de campanha na estação ERMO (rio Itoupava), a pluviometria e coletas realizadas estão destacadas com pontos vermelhos. Observa-se que as campanhas conseguiram abranger diferentes regimes fluviais. O rio Itoupava abrange a parte da bacia hidrográfica que não está sob influência da mineração, no entanto a sua vazão contribui com a diluição da carga trazida pelo rio Mãe Luzia.

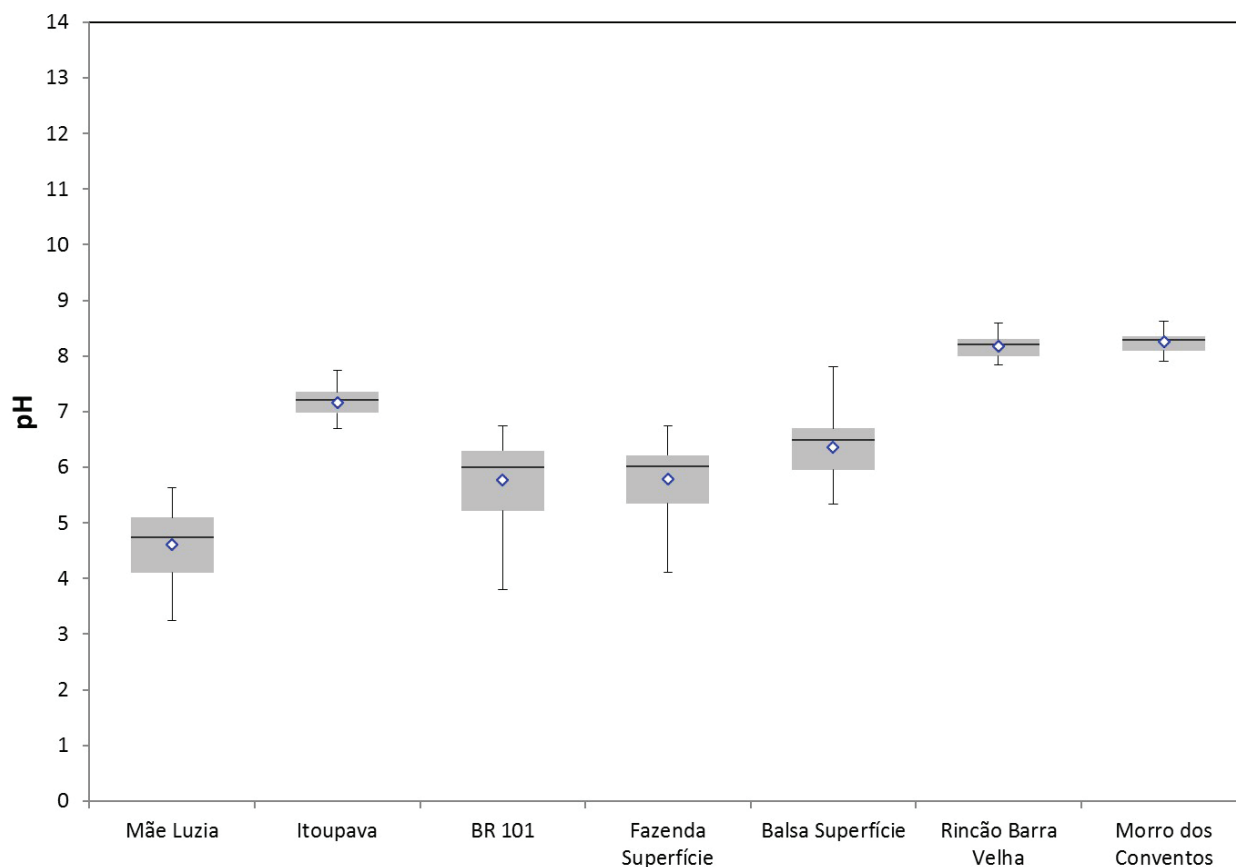


Figura 5. Distribuição total dos dados de pH no presente estudo.  
 Figure 5. Total distribution of pH data in the present study.

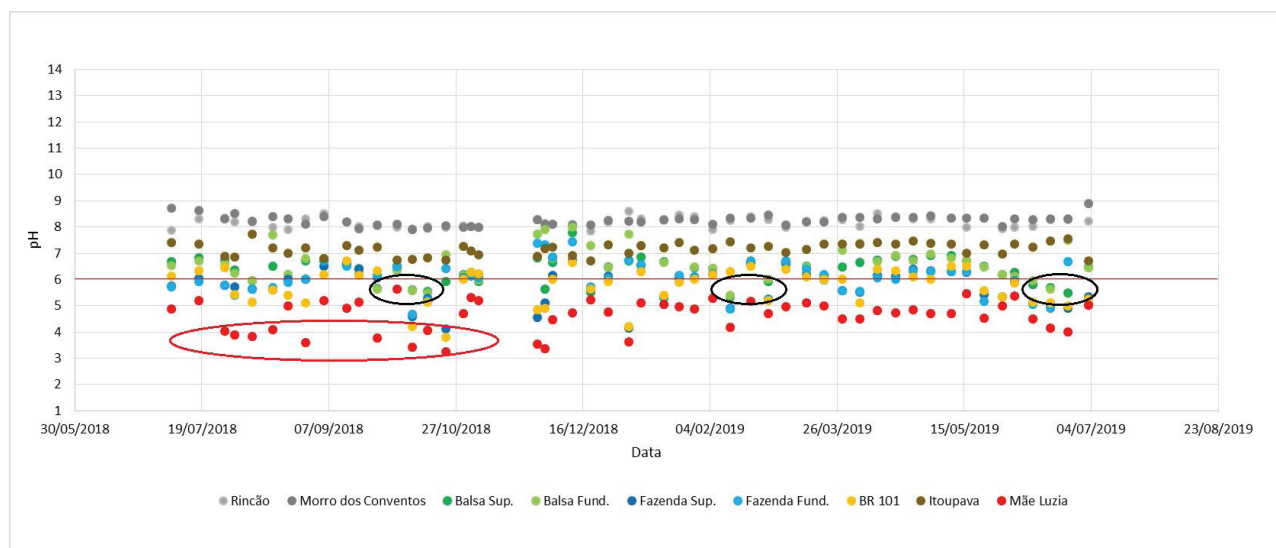


Figura 6 - Distribuição temporal dos dados de pH. Nos círculos em preto períodos em que o pH ficou abaixo de 6,0 no ponto Balsa Meio. No círculo vermelho, valores de pH mais baixos verificados no ponto Mãe Luzia. A linha vermelha indica os valores mínimos aceitáveis para pH em rios de classe II, conforme resolução CONAMA 357/2005 (CONAMA, 2005).

Figure 6 - Temporal distribution of pH data. In black circles periods when the pH was below 6.0 at the Balsa Meio point. In the red circle, lower pH values verified at the Mãe Luzia point. The red line indicates the minimum acceptable values for pH in class II rivers, according to CONAMA resolution 357/2005 (CONAMA, 2005).

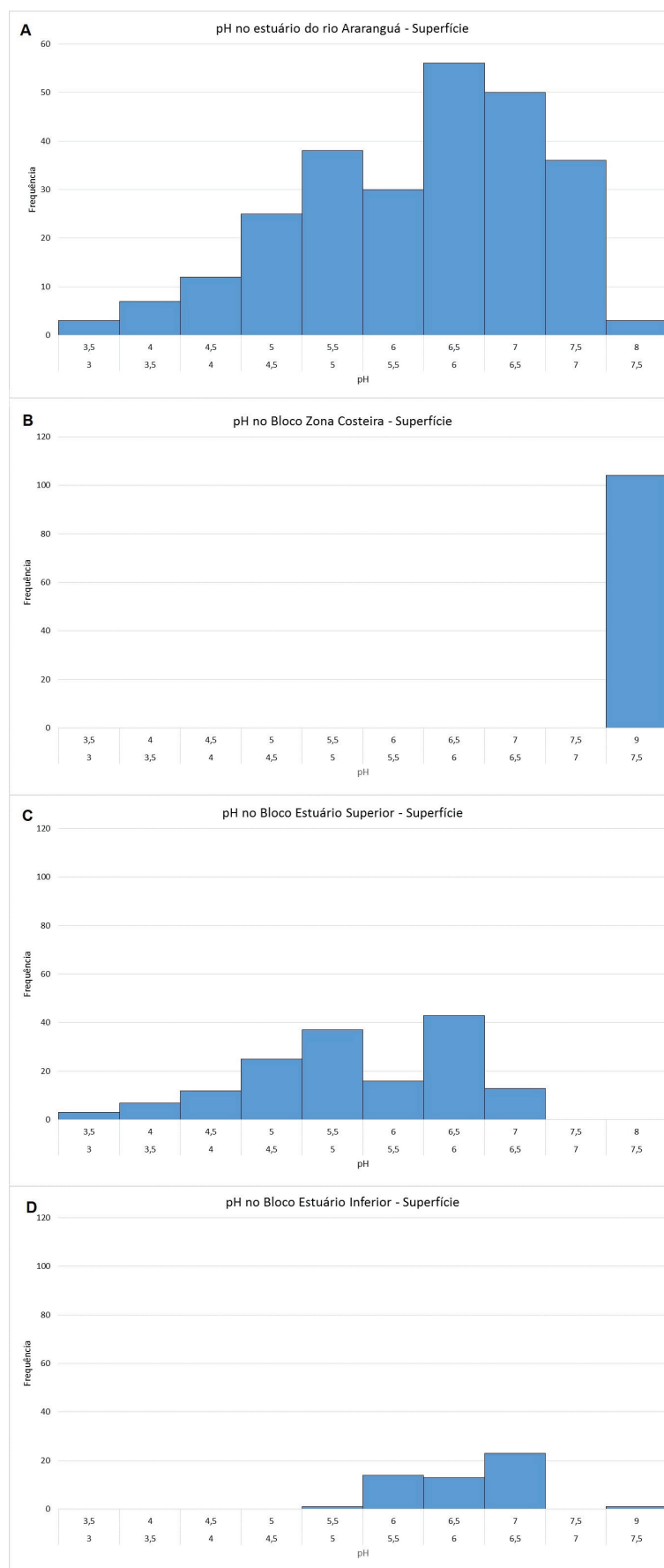


Figura 7 - Distribuição de frequência dos dados de pH no estuário do rio Araranguá. A) Considerando a totalidade dos pontos em superfície. B/C/D) Histogramas de distribuição de frequências por setor estuarino e zona costeira.  
 Figure 7 - Frequency distribution of pH data in the Araranguá river estuary. A) Considering the totality of points on the surface. B/C/D) Histograms of frequency distribution by estuarine sector and coastal zon

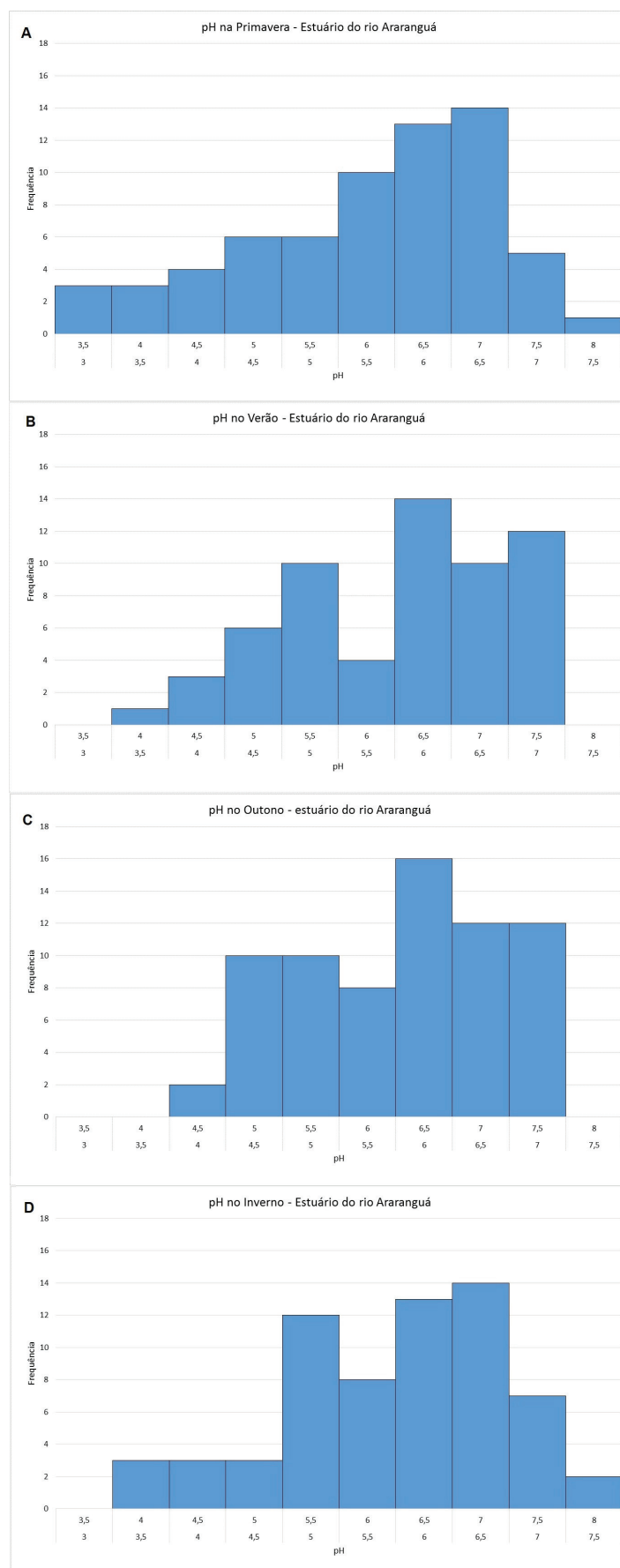


Figura 8. Histogramas de distribuição de frequências de pH por estação do ano. A) Primavera. B) Verão. C) Outono. D) Inverno.

Figure 8. Histograms of frequency distribution by season. A) Spring. B) Summer. C) Autumn. D) Winter.

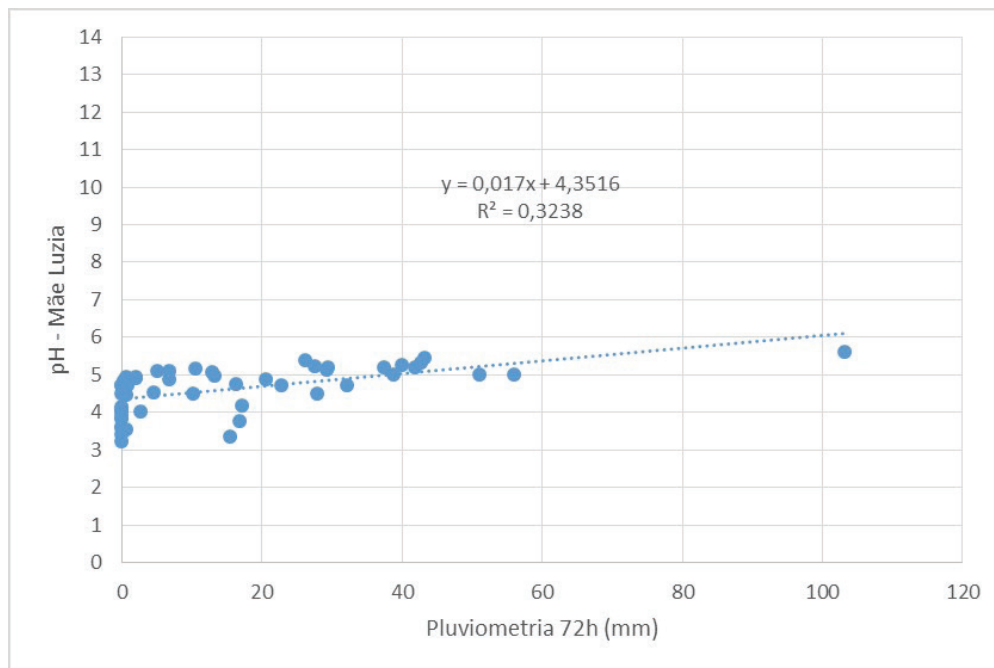


Figura 9. Relação pH Mãe Luzia x Pluviometria 72h Forquilha.  
Figure 9. pH Relationship Mãe Luzia x Rainfall 72h Forquilha.

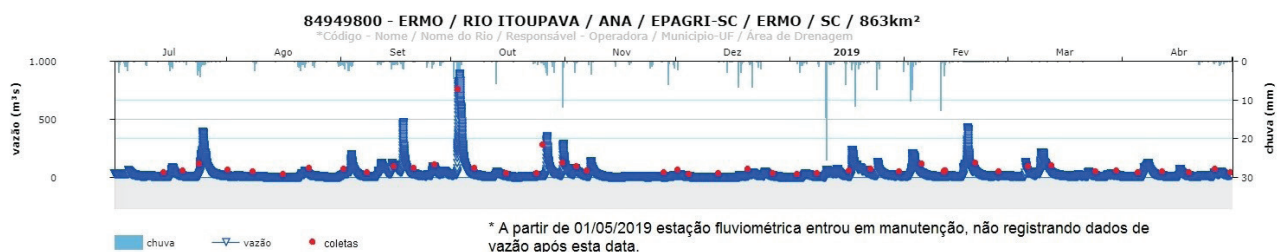


Figura 10. Vazão registrada ao longo do tempo na estação ERMO (rio Itoupava), pluviometria e coletas realizadas para medição e registro de pH/Salinidade (ANA,2020).  
Figure 10. Flow recorded over time at the ERMO station (Itoupava River), pluviometry and collections performed for pH / Salinity measurement and recording (ANA,2020).

#### 4 Discussão

Uma das particularidades observadas no Rio Araranguá, inclusive na sua porção estuarina foi o pH. No início do experimento realizado em 2006, com a situação verticalmente homogênea, a salinidade observada na superfície foi 10 PSU, neste período os valores de pH não alcançaram 6. No decorrer do experimento, o pH chegou a 4,4, acompanhando a diminuição da salinidade (D'Aquino *et al.* 2010). Na literatura outros autores, como Alexandre (2000), Scheibe & Buss (1993, 1997), Santa Catarina (1997) e Krebs (2004), observaram baixos valores de pH no Rio Araranguá, porém não na sua porção estuarina.

O comportamento hidrodinâmico do estuário explica as variações de MPS e pH, como descrito em D'Aquino *et al.* (2010), o estuário varia de parcialmente bem misturado a cunha salina, respondendo diretamente as variações de vazão (Fig. 4). De forma semelhante, a pluviometria incidindo sobre as áreas impactadas pela mineração, carrega quantidades de acidez e metais para as drenagens, proporcionalmente a sua intensidade (Alexandre, 2000). No ambiente estuarino, a presença do sal, atua mais fortemente ou menos fortemente neutralizando o pH, conforme o padrão de mistura do ambiente estuarino. Desta forma, os pontos localizados mais próximos a foz, com forte atuação de águas

mais salinas, apresentam pH de maiores valores.

Mesmo com a entrada de águas salinas no estuário e da diluição provocada por aportes de águas não impactadas pela DAM pelos rios Itoupava, Manoel Alves e Cedro, o trecho estuarino é preferencialmente ácido, demonstrando que os impactos da acidez oriunda das áreas mineradas são percebidos até a foz ou exutório final da bacia hidrográfica.

Durante o desenvolvimento deste trabalho verificou-se que a dependência da vazão, e consequentemente da pluviometria, governa os processos de pH no estuário do rio Araranguá. A dinâmica de exportação de sedimentos, flocos, e águas de baixo pH para zona costeira foi de encontro com o observado por Schettini & Toldo (2006), D'Aquino *et al.* (2010) e Barreto *et al.* (2011) referente ao comportamento hidrodinâmico no estuário do rio Araranguá. Os referidos autores classificaram o estuário do rio Araranguá como estuário de cunha salina com transporte de sedimentos "dominado por enchentes relâmpago", onde sugeriram 2 modos de comportamento: i) O modo marinho, quando em períodos de baixa vazão a cunha salina adentra ao estuário, fazendo com que as marés controlem os processos de transporte, reduzindo o influxo de material particulado para costa, e restando-os no estuário e ii) O modo fluvial, quando em vazão elevada, as águas salinas são praticamente expulsas do estuário, diminuindo a retenção, aumentando os materiais particulados em suspensão, exportando-os diretamente para a plataforma interna adjacente.

Pequenos flocos de cor laranja em suspensão foram verificados praticamente em todas as campanhas, logo a partir da união da confluência do rio Mãe Luzia com os rios Cedro e Manoel Alves. Couceiro & Schettini (2010) haviam descrito que o baixo pH da água do Mãe Luzia tem efeito floculante sobre os sedimentos em suspensão, provenientes do rio Itoupava sendo que a confluência da água de ambos produz a floculação dos sedimentos em suspensão, acelerando a decantação ao longo do estuário.

O que se verificou no presente estudo, é que embora a relação estabelecida, considerando que as águas com baixo pH, ao encontrarem águas de pH neutro, iniciam a floculação e sedimentam

em seguida esteja correta, está se inicia antes ainda da confluência com o rio Itoupava, cerca de 7 km a montante do ponto descrito por Couceiro & Schettini (2010). Em praticamente todas as campanhas haviam flocos metélicos, de cor laranja já no rio Mãe Luzia, sendo que eram percebidos por vezes em suspensão também no rio Araranguá, nos pontos do médio estuário (BR 101 e Fazenda), e até no baixo estuário (ponto Balsa), conforme a intensidade das chuvas e vazão.

As vazões de permanência, são parâmetros hidrológicos importantes para mediar o comportamento fluviométrico das bacias hidrográficas. D'Aquino (2010) apresenta a relação de ocorrência entre frequência anual e vazão para o rio Itoupava, principal afluente do estuário do rio Araranguá. Foram destacadas a Q90 %, Q50 %, Q10 %, as quais representam se a vazão é igualada ou superada em 90, 50 e 10 % do tempo, respectivamente. A vazão QMLT, que se trata da vazão média de longo termo ou seja, a vazão média mais registrada na bacia. Os valores apresentados para o rio Itoupava foram: Q90 % =  $5,09 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ; Q50 % =  $27,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ; Q10 % =  $73 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  e Qmlt =  $33,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . D'Aquino (2010), sugere que o modo de transporte de material particulado em suspensão no estuário do rio Araranguá pode ser previsto através da relação entre as vazões de permanência citadas acima e a presença de cunha salina, visualizados na figura 8. Quando a vazão é maior ou igual a Qmlt: = Cunha salina + MPS: estuário atua como exportador de MPS – Modo Fluvial; quando a vazão é maior ou igual a Q10: Sem cunha salina + MPS, estuário atua como exportador de MPS – Modo Fluvial; quando a vazão menor que a Qmlt: Cunha salina intensa, estuário atua como importador de MPS – Modo Marinho; e, quando a vazão menor ou igual a Q90: Estuário: bem misturado, importador de MPS – Modo Marinho.

A tabela 3 apresenta uma síntese das ocorrências de cada um dos modos de comportamento estuarino, de acordo com as vazões de permanência apresentadas em D'Aquino (2010), durante o monitoramento do pH entre 2018 e 2019. Em condições de baixa vazão ( $Q < Q90 - 5,09 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) ocorre pouca diluição das DAM carregadas, sendo que o rio Mãe

Tabela 3. Vazões de permanência, ocorrências e modo de funcionamento do estuário do rio Araranguá. Vazões de permanência no rio Itoupava. Qmlt, Q90 %, Q50 %, Q10 % conforme D'Aquino (2010).

Table 3. Permanence flows, occurrences and mode of operation of the Araranguá river estuary. Permanence flows in Itoupava River. Qmlt, Q90 %, Q50 %, Q10 % according to D'Aquino (2010).

| Vazão de Permanência                                          | Ocorrências |           |       |        | Total | Observações             |
|---------------------------------------------------------------|-------------|-----------|-------|--------|-------|-------------------------|
|                                                               | Inverno     | Primavera | Verão | Outono |       |                         |
| Vazão $\leq$ Q90<br>(5,09 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )   | 3           | 4         | 1     | 0      | 8     | Modo Marinho Importador |
| Vazão $<$ Qmlt<br>(33,09 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )    | 7           | 7         | 8     | 13     | 35    | Modo Marinho Importador |
| Vazão $\geq$ Qmlt<br>(33,09 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ) | 3           | 0         | 3     | 1      | 7     | Modo Fluvial Exportador |
| Vazão $\geq$ Q10<br>(73,0 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )   | 0           | 2         | 0     | 0      | 2     | Modo Fluvial Exportador |

Luzia deságua no rio Araranguá pH inferiores a 4,0 em superfície. A entrada de sal no estuário fica favorecida, a acidez é neutralizada, o efeito filtrante do estuário é percebido. Poucos flocos são observados, e se presentes nestas condições apenas anteriormente ao ponto de coleta no rio Mãe Luzia. Se a situação de baixa vazão persiste por períodos superiores a 15 dias, o estuário fica parcialmente bem misturado, conforme descrito por D'Aquino *et al.* (2010). O estuário tende a importar sedimentos do oceano adjacente.

Em condições de vazão consideradas normais ( $Q < Q_{mlt} = 33,09 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ), o rio Mãe Luzia contribui com pH ácidos inferiores a 5,0 no rio Araranguá. Como observado durante o monitoramento, a presença de flocos, normalmente na forma de "bolsões" inicia-se a partir das confluências deste com os rios Cedro e Manoel Alves. Com a ocorrência de eventos pluviométricos, o pH imediatamente aumenta em virtude da diluição, porém após a passagem da "onda de cheia" ele tende a reduzir, demonstrando a carga ácida carregada.

A medida que vai se distanciando das áreas fonte, em virtude da diluição de outras contribuições não impactadas pela atividade carbonífera e também dos processos de mistura com as águas salinas, os valores de pH vão aumentando, até chegar em valores dentro da neutralidade a partir do ponto Balsa até a foz e Zona Costeira. Durante este "caminho" de elevação do pH, os metais dissolvidos precipitam,

floculam e decantam no interior do estuário. A acidez é neutralizada, e o efeito "filtrante" do estuário é percebido. A cunha salina costuma adentrar até próximo a cidade de Araranguá, ocasionando a mistura das águas a partir deste ponto a jusante.

Em condições de alta vazão ( $Q > Q_{mlt} = 33,09 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) o rio Mãe Luzia apresenta-se com pH superiores a 5,0 em virtude da diluição provocada pelos eventos pluviométricos. Porém, durante o período deste estudo esta diluição não foi capaz de elevar os valores de pH neste ponto acima de 6,0. O aumento da velocidade da corrente pode revolver o fundo arrastando e ressuspensando os flocos metálicos que se encontravam sedimentados. São encontrados flocos dispersos, por vezes preenchendo por todo a calha do rio, sendo carregados por todo o estuário. Em eventos de alta pluviometria em curto espaço de tempo (5 ocorrências durante os eventos monitorados entre 2018 e 2019) foram encontrados flocos metálicos de cor laranja na areia e zona de arrebentação da praia de Barra Velha – Balneário Rincão a norte próximo a foz. O estuário não tem tempo de residência suficiente para "neutralizar/precipitar" eventuais metais dissolvidos, acidez e flocos, exportando-os para a zona costeira junto com a carga de MPS.

Em condições de muito alta vazão ( $Q > Q_{10} = 73 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ), 2 ocorrências no ano monitorado, as condições são semelhantes de alta vazão ( $Q > Q_{mlt} = 33,09 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ). Apenas a intensidade dos fenômenos relatados aumenta, com atenção

especial para a velocidade de corrente, que revolve e solubiliza com ainda mais intensidade os flocos já depositados no sedimento de fundo, arrastando-os para a zona costeira.

Conforme a tabela 3 o estuário em 43 das 52 campanhas, operou em "Modo Marinho", se mostrando capaz de "neutralizar" e precipitar os metais/acidez oriunda da DAM de montante. O que reforça a importância deste ambiente para a qualidade da água na zona costeira. No entanto, estes contaminantes, são depositados junto ao sedimento de fundo do estuário. Se não revolvidos e "arrastados" durante o aumento da velocidade de correntes, durante atuação do "Modo Fluvial" há uma tendência de estarem acumulando no fundo do estuário, o estuário assim desempenhando um importante papel na retirada de poluentes da coluna de água. Observou-se que os valores de pH tendem aumentar suavemente conforme se afastam das áreas mineradas, ou seja, das fontes de acidez, devido a: a) diluição com aportes de águas não ácidas, b) neutralização das águas ácidas com a influência da maré e, c) ação de reações químicas no trecho estuarino, permitindo a floculação e decantação de componentes mais ácidos, removendo acidez da coluna d'água, consequentemente aumentando os valores de pH.

Destaca-se que quanto mais próxima a influência marinha, maior a variação e nos valores de pH registrados e também maior a salinidade registrada, evidenciando o papel dos processos estuarinos no controle da acidez e dos valores de pH no estuário. As maiores variabilidades de dados são registradas nos pontos BR 101 e Fazenda, pontos onde há maior inter-relação entre a posição da cunha salina e as águas ácidas de montante.

Períodos mais secos, permitem maior entrada de águas salinas, resultando em valores de pH maiores. Em contrapartida, períodos mais chuvosos, carregando uma carga maior de acidez, levam a águas com menores valores de pH nestes pontos. No entanto, devido a diluição em virtude das precipitações, os valores de pH só refletem este aporte na forma de pH mais baixo nos dias após a passagem da onda de cheia. O ponto Mãe Luzia apresentou uma maior variabilidade dos

dados de uma semana para outra no inverno e na primavera, provavelmente ocasionado pela passagem quase que semanal de frentes frias pela região neste período, as quais influenciam na vazão e consequentemente na diluição do pH. No verão e outono, no ano avaliado as mudanças apresentam-se mais "amenas" de uma semana para outra, haja vista a distribuição das chuvas ter sido mais constante. Nos pontos BR 101 e Fazenda foram observadas variações similares.

Os valores de pH no mar foram constantes durante todo período amostrado, não apresentando mudanças significantes que justificassem alguma relação entre alteração no pH e descargas ácidas do estuário na região costeira adjacente. No rio Itoupava, assim como no mar, os valores de pH também apresentaram-se constantes, não dependendo das condições de vazão ou pluviometria.

Barreto *et al.* (2011) descreveram o transporte de sedimentos no rio Araranguá em condições de descarga transiente os principais resultados indicam que com a diminuição da descarga fluvial, a hidrodinâmica e o transporte de sedimentos em suspensão passam de um regime barotrópico para um regime baroclínico, e isto ocorre de maneira abrupta. Sob condição forçada pelo regime fluvial, o transporte é predominante para fora do estuário. Sob regime forçado pela circulação gravitacional, o transporte passa a ser para fora na camada superficial e para o interior na camada de fundo. O estuário passa de exportador para importador de sedimentos em suspensão.

Durante o monitoramento foi verificado que esse comportamento pode ser associado em parte a presença de flocos em suspensão no estuário do rio Araranguá e no seu afluente o rio Mãe Luzia. De forma que em períodos de alta vazão, os flocos não conseguem decantar no estuário, os metais estão mais diluídos, a força da corrente ressuspende e arrasta boa parte dos flocos já depositados no fundo do estuário. Couceiro & Schettini (2010) descreveram que quando a velocidade de corrente aumenta acima de  $15 \text{ cm.s}^{-1}$  os flocos são ressuspensos, carregados ou destruídos e novamente diluídos. De mesma forma, Schettini & Toldo, (2006) já havia observado relações semelhantes entre

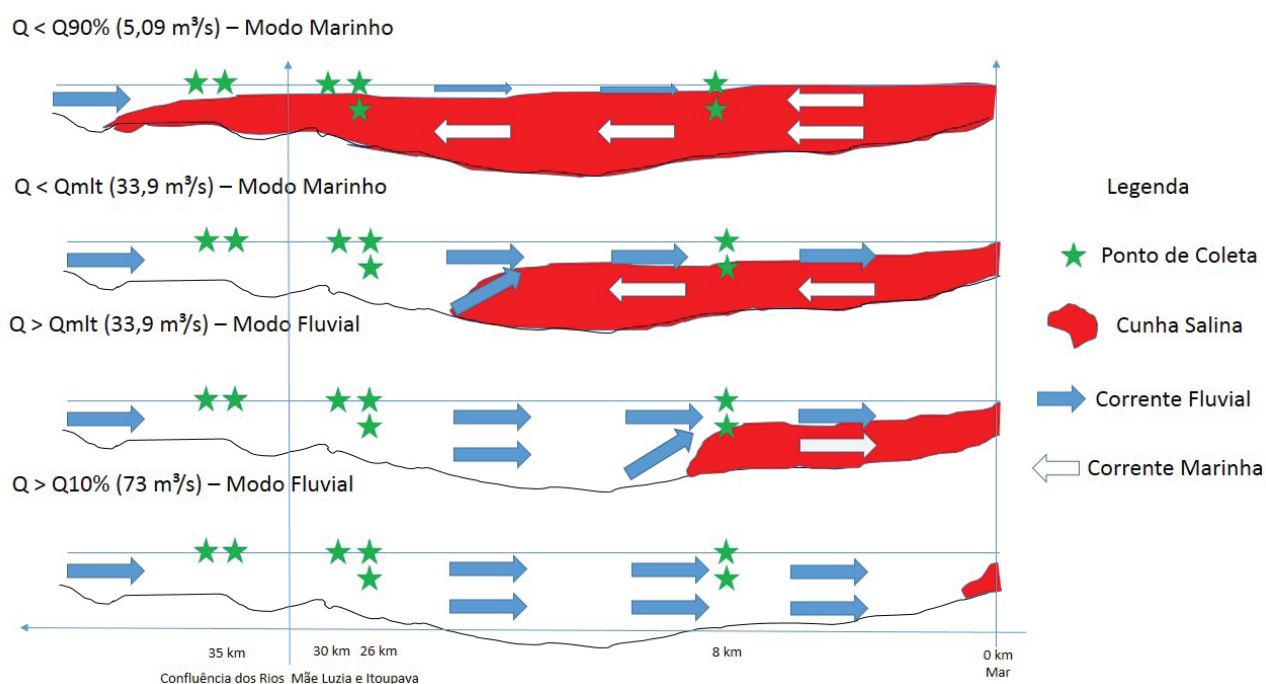


Figura 11. Modelo de transporte de material em suspensão baseado nas vazões de permanência.  
Figure 11. Model of transportation of suspended material based on permanence flows.

velocidade de escoamento provocada pelo aumento da vazão e ressuspensão de sedimentos para o rio Itajaí-Açu, também em Santa Catarina. Nestas ocasiões, chamadas por Schettini & Toldo (2006) e D'Aquino *et al.* (2010) de "enchentes relâmpago", acredita-se que juntamente com os flocos visualizados na zona de arrebenção e depositados na areia da praia, metais e acidez, ou águas de pH mais baixo estão atingindo a zona costeira.

Com isso, comparando-se os dados coletados entre 2018 e 2019, com dados históricos de pH descritos por DNPM, (1958, 1991, 1999); CETESB (1974); FATMA (1976, 1991, 1996); ECP (1982); Santa Catarina (1997); Alexandre (2000); UNESCO/DNPM/SIECESC (2004); SIECESC/SATC, DNPM, CPRM (2006) e BRASIL (2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017 e 2018), percebe-se que o pH apresenta uma suave elevação no ponto Mãe Luzia, indicando uma possível diminuição no aporte de acidez ao estuário na última década. Esta melhoria, pode estar vinculada as ações de recuperação ambiental de antigas áreas mineradas, tratamento das

drenagens ácidas de mina e melhor regramento e fiscalização das atividades de mineração que ainda operam na região, realizadas a partir do ano 2000 pelas empresas carboníferas e União Federal, motivadas por Ação Civil Pública, promovida pelo Ministério Público Federal contra as empresas carboníferas e União que exige entre outras medidas a recuperação ambiental das áreas (BRASIL, 2017).

No entanto, esta tímida diminuição ainda não apresenta reflexos significativos nos impactos da acidez sobre o ambiente estuarino, haja vista constatações deste estudo: Alta variação e amplitude dos valores de pH, com extremos próximos a 3,0 e 8,0 e grande ocorrência de flocos metálicos, de cor laranja em suspensão no estuário, atingindo inclusive a região costeira. Conforme observado neste estudo, o estuário desempenha um papel filtrante muito importante, recebendo águas de baixo pH através do rio Mãe Luzia e entregando a zona costeira adjacente água com pH neutro. A descarga fluvial domina a hidrodinâmica e o transporte de propriedades no estuário.

## 5 Conclusões

Mesmo com a influência da entrada de águas salinas no estuário e da diluição provocada por aportes de águas não impactadas pela Drenagem Ácida de Mina, o trecho estuarino avaliado é preferencialmente ácido, demonstrando que os impactos de geração de acidez das áreas mineradas são percebidos até a foz ou exutório final da bacia hidrográfica.

Verificou-se que a dependência da vazão, e consequentemente da pluviometria, governa os processos de pH e material particulado suspensão no estuário do rio Araranguá.

Conforme descrito neste trabalho, pequenos flocos metálicos de cor laranja em suspensão foram verificados praticamente em todas as campanhas, logo a partir da confluência do rio Mãe Luzia com os rios Cedro e Manoel Alves.

Verificou-se que o estuário responde ao modelo qualitativo proposto: quando a vazão for maior ou igual a  $Q_{mlt}$ , estuário com Cunha salina atuando como exportador; vazão maior ou igual a  $Q_{10}$ , estuário praticamente sem cunha salina, atuando como exportador de propriedades, ressuspende flocos e pode erodir o fundo do estuário; quando a vazão é menor que a  $Q_{mlt}$ , Cunha salina intensa, estuário atua como importador e; se a vazão for menor ou igual a  $Q_{90}$ , estuário bem misturado, bastante salgado, atuando importador de material particulado em suspensão.

Conforme observado neste estudo, o estuário desempenha um papel filtrante muito importante, recebendo águas de baixo pH através do rio Mãe Luzia e entregando a zona costeira adjacente água com pH neutro. A descarga fluvial domina a hidrodinâmica e o transporte de propriedades no estuário.

Para a confecção de um modelo quantitativo completo e para modelagem numérica do estuário em um estudo futuro recomenda-se uma coleta de dados com intervalos mínimos na escala de minutos, de todas as propriedades de interesse, das correntes, marés e ventos afim de se obter uma amostragem completa do funcionamento do estuário do rio Araranguá.

Este trabalho descreveu a relação entre

as condições de pH e material particulado em suspensão no estuário do rio Araranguá em relação as vazões e consequentemente pluviometria na bacia hidrográfica. Ainda, demonstrou as condições para decantação e exportação de flocos formados em consequência do impacto pela drenagem ácida de mina nos recursos hídricos superficiais para a zona costeira adjacente, indicando uma tímida melhora nos dados atuais de pH em comparação aos últimos anos.

A apresentação deste trabalho incentiva a discussão sobre as relações entre impactos da atividade carbonífera no ambiente estuarino e costeiro, até então pouco ou nada apontados, subsidiando por meio dos dados e do modelo qualitativo apresentado, ações preventivas a poluição e corretivas em um ambiente tão impactado. Além disso, fornece suporte por meio da divulgação de conhecimentos específicos acerca da hidrodinâmica estuarina local, a necessidade de preservação e gestão da Área de Proteção Ambiental da Costa de Araranguá e Reserva Extrativista do rio Araranguá, unidades de conservação recentemente decretadas para o local de estudo.

**Agradecimentos.** EPAGRI/CIRAM, ANA, Defesa Civil/Araranguá e ao Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade (PPGES/UFSC).

## Referências

- Alexandre, N.Z. 2000. *Análise integrada da qualidade das águas da bacia do rio Araranguá (SC)*. Florianópolis, 300p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. 2020. *Dados de Vazão e Pluviometria para Estação ERM0*. Disponível em: < <http://www.snirh.gov.br/hidrotelemetria/Mapa/>>. Acesso em: 10 mai. 2020.
- Back, A. 2009. Hidrologia e Recursos hídricos. In: Milioli, G.; Santos, R. Dos; Citadini-Zanette, V. *Mineração de carvão, meio ambiente e desenvolvimento sustentável no sul de Santa Catarina*. Curitiba. p. 41–49.

- Barreto, G.A.M. & Schettini, C.A.F. 2014. Papel da maré e da descarga fluvial na circulação do estuário do Rio Araranguá. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 19(3): 7-17.
- Barreto, G. A. M., D'Aquino, C. A. & Schettini, C. A. F. 2011. Transporte de sedimentos em suspensão em um estuário altamente estratificado sob condições de descarga fluvial transiente. *Pesquisas em Geociências (online)*, v. 38, p. 225.
- BRASIL. Justiça Federal 4ª Região. 2005. *Histórico da Ação Civil Pública do Carvão*. Portal da Ação Civil Pública do Carvão. Disponível em: <<http://www.jfsc.jus.br/acpdocarvao/>>. Acesso em: 25 set. 2011.
- BRASIL. Grupo Técnico de Assessoramento ao Cumprimento da Sentença. 2007. *1º Relatório de Monitoramento dos Indicadores Ambientais da Bacia Carbonífera do Estado de Santa Catarina*. Processo nº. 2000.72.04.002543-9. Justiça Federal. 1ª Vara Federal de Criciúma, SC. Criciúma. 201p. Disponível em: <[http://www.siecesc.com.br/meio\\_ambiente/arquivos-GTA](http://www.siecesc.com.br/meio_ambiente/arquivos-GTA)>. Acesso em 01 de jun. 2018.
- BRASIL. Grupo Técnico de Assessoramento ao Cumprimento da Sentença. 2008. *2º Relatório de Monitoramento dos Indicadores Ambientais da Bacia Carbonífera do Estado de Santa Catarina*. Processo nº. 2000.72.04.002543-9. Justiça Federal. 1ª Vara Federal de Criciúma, SC. Criciúma. 240 p. Disponível em: <[http://www.siecesc.com.br/meio\\_ambiente/arquivos-GTA](http://www.siecesc.com.br/meio_ambiente/arquivos-GTA)>. Acesso em 01 de jun. 2018.
- BRASIL. Grupo Técnico de Assessoramento ao Cumprimento da Sentença. 2009. *3º Relatório de Monitoramento dos Indicadores Ambientais da Bacia Carbonífera do Estado de Santa Catarina*. Processo nº. 2000.72.04.002543-9. Justiça Federal. 1ª Vara Federal de Criciúma, SC. Criciúma. 312 p. Disponível em: <[http://www.siecesc.com.br/meio\\_ambiente/arquivos-GTA](http://www.siecesc.com.br/meio_ambiente/arquivos-GTA)>. Acesso em 01 de jun. 2018.
- BRASIL. Grupo Técnico de Assessoramento ao Cumprimento da Sentença. 2010. *4º Relatório de Monitoramento dos Indicadores Ambientais da Bacia Carbonífera do Estado de Santa Catarina*. Processo nº. 2000.72.04.002543-9. Justiça Federal. 1ª Vara Federal de Criciúma, SC. Criciúma. 318 p. Disponível em: <[http://www.siecesc.com.br/meio\\_ambiente/arquivos-GTA](http://www.siecesc.com.br/meio_ambiente/arquivos-GTA)>. Acesso em 01 de jun. 2018.
- BRASIL. Grupo Técnico de Assessoramento ao Cumprimento da Sentença. 2011. *5º Relatório de Monitoramento dos Indicadores Ambientais da Bacia Carbonífera do Estado de Santa Catarina*. Processo nº. 2000.72.04.002543-9. Justiça Federal. 1ª Vara Federal de Criciúma, SC. Criciúma. 333 p. Disponível em: <[http://www.siecesc.com.br/meio\\_ambiente/arquivos-GTA](http://www.siecesc.com.br/meio_ambiente/arquivos-GTA)>. Acesso em 01 de jun. 2018.
- BRASIL. Grupo Técnico de Assessoramento ao Cumprimento da Sentença. 2012. *6º Relatório de Monitoramento dos Indicadores Ambientais da Bacia Carbonífera do Estado de Santa Catarina*. Processo nº. 2000.72.04.002543-9. Justiça Federal. 1ª Vara Federal de Criciúma, SC. Criciúma. 218 p. Disponível em: <[http://www.siecesc.com.br/meio\\_ambiente/arquivos-GTA](http://www.siecesc.com.br/meio_ambiente/arquivos-GTA)>. Acesso em 01 de jun. 2018.
- BRASIL. Grupo Técnico de Assessoramento ao Cumprimento da Sentença. 2013. *7º Relatório de Monitoramento dos Indicadores Ambientais da Bacia Carbonífera do Estado de Santa Catarina*. Processo nº. 2000.72.04.002543-9. Justiça Federal. 1ª Vara Federal de Criciúma, SC. Criciúma. 254 p. Disponível em: <[http://www.siecesc.com.br/meio\\_ambiente/arquivos-GTA](http://www.siecesc.com.br/meio_ambiente/arquivos-GTA)>. Acesso em 01 de jun. 2018.
- BRASIL. Grupo Técnico de Assessoramento ao Cumprimento da Sentença. 2014. *8º Relatório de Monitoramento dos Indicadores Ambientais da Bacia Carbonífera do Estado de Santa Catarina*. Processo nº. 2000.72.04.002543-9. Justiça Federal. 1ª Vara Federal de Criciúma, SC. Criciúma. 284 p. Disponível em: <[http://www.siecesc.com.br/meio\\_ambiente/arquivos-GTA](http://www.siecesc.com.br/meio_ambiente/arquivos-GTA)>. Acesso em 01 de jun. 2018.
- BRASIL. Grupo Técnico de Assessoramento ao Cumprimento da Sentença. 2015. *9º Relatório de Monitoramento dos Indicadores Ambientais da Bacia Carbonífera do Estado de Santa Catarina*. Processo nº. 2000.72.04.002543-9. Justiça Federal. 1ª Vara Federal de Criciúma, SC. Criciúma. 317 p. Disponível em: <[http://www.siecesc.com.br/meio\\_ambiente/arquivos-GTA](http://www.siecesc.com.br/meio_ambiente/arquivos-GTA)>. Acesso em 01 de jun. 2018.
- BRASIL. Grupo Técnico de Assessoramento ao Cumprimento da Sentença. 2016. *10º*

- Relatório de Monitoramento dos Indicadores Ambientais da Bacia Carbonífera do Estado de Santa Catarina. Processo nº. 2000.72.04.002543-9. Justiça Federal. 1ª Vara Federal de Criciúma, SC. Criciúma. 272 p. Disponível em: <[http://www.siecesc.com.br/meio\\_ambiente/arquivos-GTA](http://www.siecesc.com.br/meio_ambiente/arquivos-GTA)>. Acesso em 01 de jun. 2018.*
- BRASIL. Grupo Técnico de Assessoramento ao Cumprimento da Sentença. 2017. 11º *Relatório de Monitoramento dos Indicadores Ambientais da Bacia Carbonífera do Estado de Santa Catarina. Processo nº. 2000.72.04.002543-9. Justiça Federal. 1ª Vara Federal de Criciúma, SC. Criciúma. 308 p. Disponível em: <[http://www.siecesc.com.br/meio\\_ambiente/arquivos-GTA](http://www.siecesc.com.br/meio_ambiente/arquivos-GTA)>. Acesso em 01 de jun. 2018.*
- BRASIL. Grupo Técnico de Assessoramento ao Cumprimento da Sentença. 2018. 12º *Relatório de Monitoramento dos Indicadores Ambientais da Bacia Carbonífera do Estado de Santa Catarina. Processo nº. 2000.72.04.002543-9. Justiça Federal. 1ª Vara Federal de Criciúma, SC. Criciúma. 374 p. Disponível em: <[http://www.siecesc.com.br/meio\\_ambiente/arquivos-GTA](http://www.siecesc.com.br/meio_ambiente/arquivos-GTA)>. Acesso em 01 de mai. 2019.*
- Bianchi, T.S. 2007. *Biogeochemistry of estuaries*. New York, OXFORD University Press, 706p.
- CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. 1974. *Estudo preliminar da bacia do rio Araranguá*. São Paulo, CETESB. n.p.
- Coelho, M. C. & D'Aquino, C. A. 2011. Identificação da cunha salina no estuário do rio Araranguá, SC. In: XIV COLACMAR, 2011, Balneário Camboriú. *Anais do XIV COLACMAR* (CD-ROM). Porto Alegre, p. 1-3.
- Couceiro, M. A. A. 2015. *Dinâmica de sedimentos coesivos em um estuário altamente estratificado: rio Araranguá, SC*. 184p. Tese de doutorado. Programa de Pós-graduação em Oceanografia, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Couceiro, M. A. A. & Schettini, C. A. F. 2010. Estudo da dinâmica dos sedimentos em suspensão do estuário do rio Araranguá (SC): Possíveis efeitos da drenagem ácida da atividade de mineração de carvão. *Geociências*, v. 29(2): 251–266.
- D'Aquino, C. A., Pereira Filho, J. & Schettini, C. A. F. 2010. Fluvial modulation of hydrodynamics and salt transport in a highly stratified estuary. *Brazilian Journal of Oceanography*, v. 58(2): 165–175.
- D'Aquino, C. A. 2010. *Processos de transporte e retenção de sedimentos finos em estuários dominados por rios*. 132 p. Tese de doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. 1958. *A faixa costeira meridional de Santa Catarina*. Brasil, Rio de Janeiro. 104 p.
- DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. 1999. Diagnóstico da qualidade das águas na bacia do rio Araranguá. In: *Controle da poluição hídrica decorrente da mineração do carvão. Relatório Final*. São Paulo, 172p.
- DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. 1991. *Estudo da poluição na região carbonífera de Criciúma, SC. Uma consideração sobre medidas para controle de poluição*. São Paulo, 126p.
- ECP – Engenheiros Consultores e Projetistas & FATMA – Fundação do Meio Ambiente. 1982. *Programa de conservação e recuperação ambiental da região sul de Santa Catarina: Projeto A – Monitoramento Ambiental*. Florianópolis. 58 p.
- FATMA - Fundação do Meio Ambiente. 1976. *Levantamento da qualidade das águas de Forquilha Grande, município de Araranguá, SC. Relatório Preliminar*. Não publicado, 18p.
- FATMA - Fundação do Meio Ambiente. 1991. *Qualidade dos recursos hídricos da bacia do rio Araranguá. Parecer técnico*. Criciúma: CERSU/FATMA, 7p.
- FATMA - Fundação do Meio Ambiente. 1996. *Monitoramento da qualidade dos recursos hídricos da bacia do rio Araranguá*. Criciúma, SC. 20 p.
- Hobbie, J. 2000. Estuarine science: the key to progress in coastal ecological research. In: HOBBIÉ, J. (Ed) *Estuarine science: a synthetic approach to research and practice*. Washington, DC, Island Press, p. 1-16.

- Krebs, A.S.J. 2004. *Contribuição ao conhecimento dos recursos hídricos subterrâneos da bacia hidrográfica do rio Araranguá, SC*. Tese de doutorado. Programa de Pós Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC. 375 p.
- Lopes, R. P., Santo, E. L. & Galatto, S. L. 2009. Mineração de carvão em Santa Catarina: Geologia, geoquímica e impactos ambientais. In: Milioli, G.; Santos, R. Dos; Citadini-Zanette, V. *Mineração de carvão, meio ambiente e desenvolvimento sustentável no sul de Santa Catarina*. Curitiba: Juruá, p. 51–70.
- Miranda, L. B., Castro, B. M. & Kjerfve, B. 2002. *Princípios de Oceanografia Física de estuários*. São Paulo: EDUSP. 414 p.
- Roman, C.T. & Nordstrom, K.F. 1996. Environments, processes and interactions of estuarine shores. In: Roman, C.T. & Nordstrom, K.F. *Estuarine Shores: evolution, environments and human alterations*. England, John Wiley and Sons, pp.1-12.
- Santa Catarina. 1997. *Plano de gestão e gerenciamento da bacia do rio Araranguá: zoneamento da disponibilidade e da qualidade dos recursos hídricos*. EPAGRI – Climerh, EEUrussanga, Nesc/Nupea/Nupeam/CPRM. Florianópolis, 217 p.
- Scheibe, L. F; & Buss, M. D. 1993. O desenvolvimento e a qualidade ambiental da região sul catarinense. In: *Encontro Nac. Est. Sobre Meio Ambiente (ENESMA)*, 4, Cuiabá. UFMT, Cuiabá, v. 1: 397 – 402.
- Scheibe, L. F. et al. 1997. Diagnóstico ambiental do município de Timbé do Sul. In: *V semana da pesquisa*. UFSC, Florianópolis, SC. n.p.
- Schettini, C. A. F. & Toldo, E. 2006. Fine sediment transport modes in the Itajai-Açu estuary, Southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, v. 2004(39): 515–519.
- Schettini, C.A.F. & Zaleski, A. R. 2006. A Utilização de Perfiladores Acústicos de Corrente por efeito Doppler na Determinação do Material Particulado em Suspensão na Água: Aplicações. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 11: 201-208.
- Schubel, J.R. & Kennedy, V.S. 1984. The estuary as a filter: an introduction. In: Kennedy, V.S. *The estuary as a filter*. Orlando, Academic Press, INC., pp.15-26.
- SIECESC/SATC, DNPM, CPRM - Sindicato da Indústria de Extração de Carvão de SC/ Sociedade de Assistência aos Trabalhadores do Carvão, Departamento Nacional de Produção Mineral, Companhia de Pesquisas em Recursos Minerais. 2006. *Relatório de Monitoramento das Águas da Bacia Carbonífera de Santa Catarina - 11º a 15º Campanhas de Monitoramento*. Criciúma, SC. 16p.
- UNESC, DNPM, SIECESC. Universidade do extremo sul catarinense, Departamento Nacional de Produção Mineral, Sindicato da Indústria de Extração de Carvão de SC. 2004. *Relatório de Monitoramento das Águas da Bacia Carbonífera de Santa Catarina - 1ª a 10ª Campanhas de Monitoramento*. Criciúma, SC. 22p.
- Volpato, S. B., Menezes, C. T. B. & Silva, J. V. F. 2017. Recuperação ambiental de ecossistemas aquáticos em regiões estuarinas: estudos aplicados para o tratamento de sedimentos contaminados pela drenagem ácida de mina na Bacia Hidrográfica do Rio Urussanga, Santa Catarina. In: *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 22(2): 313–316.