



ARTIGO

Qualidade da água no estuário do rio Urussanga (SC, Brasil): um ambiente afetado pela drenagem ácida de mina

Caroline Elise Schnack¹, Carlyle Torres Bezerra de Menezes^{1*},
Gianfranco Ceni¹ e Amanda Bellettini Munari¹

Recebido: 12 de outubro de 2017

Recebido após revisão: 2 de agosto de 2018

Aceito: 6 de agosto de 2018

Disponível on-line em <http://www.ufrgs.br/scerbio/ojs/index.php/rbb/article/view/4075>

RESUMO: (Qualidade da água no estuário do rio Urussanga (SC, Brasil): um ambiente afetado pela drenagem ácida de mina). Considerando o histórico de degradação dos ambientes aquáticos na Bacia Hidrográfica do rio Urussanga (Santa Catarina, Brasil), tendo a drenagem ácida proveniente da mineração do carvão como principal fonte poluidora, o objetivo desse estudo foi analisar as variáveis físicas, químicas e biológicas associadas à qualidade da água no estuário desta Bacia Hidrográfica. As amostras foram realizadas em quatro períodos distintos (set./2011; out./2011; maio/2012; jun./2012), em três pontos da região estuarina. Os resultados registraram uma alteração significativa nos valores de pH e nas concentrações de metais pesados, tais como Ferro, Manganês e Zinco, estando esses, acima dos níveis permitidos pela legislação. Ademais, o lançamento de efluentes domésticos no leito do rio sem tratamento foi evidenciado através da análise de coliformes, o que compromete ainda mais a qualidade da água. Além da preocupação com os impactos à biodiversidade e aos serviços ecológicos do ambiente estuarino, a contaminação da água na Bacia do rio Urussanga deve ser levada em consideração através de ações mitigatórias urgentes, tendo em vista o risco à saúde da população que depende da região estuarina para alimentação e trabalho.

Palavras-chave: área de proteção ambiental, mineração de carvão, impacto ambiental.

ABSTRACT: (Water quality in the Urussanga river estuary (Santa Catarina state, southern Brazil): an environment affected by acid mine drainage). Considering the historical degradation of aquatic environments from the Urussanga river basin (Santa Catarina state, southern Brazil), especially by acid mine drainage, which is the main pollution source threat, we aimed to analyze the physical, chemical and biological variables associated with water quality in the Urussanga river estuary. Samples were collected at four periods (September 2011; October 2011; May 2012; and June 2012) from three sites of the estuarine region. We observed a significant alteration in pH and in the concentration of heavy metals such as iron, manganese and zinc, all of which were present at levels above those allowed by legislation. Additionally, coliform analysis revealed that untreated domestic effluents are being released in the riverbed, which further compromises water quality therein. Besides the concerns regarding impacts to biodiversity and ecological services in the estuarine environment, the water contamination issue in the Urussanga river basin must be addressed with urgent mitigatory measures, in view of the health risk posed to the population that depends on the estuarine region for food and work.

Keywords: coal mining, environmental impact, protected area.

INTRODUÇÃO

Os estuários são considerados ecossistemas de grande importância devido aos serviços ecológicos que proporcionam, de modo que sua alta produtividade lhes atribui a função de berçário para muitas espécies de peixes e invertebrados (Raven *et al.* 2010). Entretanto, os ambientes estuarinos apresentam alta vulnerabilidade devido à pressão antrópica, onde as práticas de drenagem, dragagem, preenchimento ou represamento resultam na destruição e perda imediata de habitats (NOAA 2007).

Ao considerarmos o aumento populacional, juntamente à estimativa de que 40% da população mundial vive na região costeira (até 100 km) (SEDAC/NASA 2007), a degradação dos recursos deverá se intensificar caso não sejam aplicadas políticas de gestão ambiental adequadas.

No Brasil, grandes avanços são necessários para melhorar as condições de qualidade dos recursos hídricos, pois o volume de esgoto tratado corresponde a somente 39% da água consumida no país (von Sperling 2016).

Além disso, há regiões que apresentam um processo avançado de degradação, alcançando o nível de ecocídio (Brosimmer 2002).

Graves exemplos destes danos ambientais podem ser evidenciados na região sul do Estado de Santa Catarina, particularmente nas bacias hidrográficas do rio Aranguá, do rio Tubarão e do rio Urussanga (Silva *et al.* 2011). O sindicato local da indústria carbonífera estima uma extração de 6 milhões de toneladas de carvão por ano, dos quais cerca de 3,5 milhões de toneladas/ano se tornam rejeito e são dispostos em aterros (Marcello *et al.* 2008, Silva & Oliveira 2015). Perfazendo um histórico de aproximadamente cem anos da atividade de mineração de carvão na região, esta atividade deixou um grande passivo ambiental, com a degradação do solo e dos recursos hídricos em escala regional, devido a geração da drenagem ácida de mina (DAM) e a disposição inadequada de rejeitos, dentre outros fatores de degradação. Somados a estes impactos, a região ainda hoje apresenta

1. Laboratório de Gestão Integrada de Ambientes Costeiros, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC). Av. Universitária, 1105, CEP 88.806-000, Criciúma, SC, Brasil.

* Autor para contato. E-mail: cbm@unesc.net

uma grande quantidade de minas abandonadas, sendo elas responsáveis por uma alta carga de efluentes ácidos lançados nos recursos hídricos (Lattuada *et al.* 2009).

Os rios desta região são considerados mortos em decorrência da DAM, resultando no baixo pH (<4,5) e nas elevadas concentrações de sulfatos e metais tóxicos, tais como Ferro e Manganês, devido à oxidação da pirita presente nos rejeitos da mineração (Silva *et al.* 2011).

Juntamente aos impactos nos recursos hídricos causados pela mineração de carvão na região, há diversas outras atividades que acentuam a degradação ambiental, atingindo inclusive o ambiente estuarino. Assim, o risco de contaminação por efluentes oriundos da agricultura (rizicultura) e pecuária (suinocultura, avicultura, bovinocultura) é muito alto (Trein 2008), tanto pelo uso de agrotóxicos (Back *et al.* 2016) quanto pelo elevado aporte de compostos nitrificantes provenientes das fezes dos animais criados (Althoff 2004). Além disso, ressalta-se como práticas poluidoras, o lançamento, sem tratamento, de esgotos domésticos e a presença de atividades industriais próximas aos corpos d'água sem o devido tratamento dos efluentes gerados (gráficas, metal-mecânicas, mineração de argila, areia e fluorita) (Trein 2008).

A amplitude de tais impactos ambientais é de difícil mensuração, porém, sua gravidade é notória. A região do estuário, que por muitos anos possuiu uma grande diversidade de espécies aquáticas, e serviu de fonte de renda e lazer, atualmente, sofre com o excesso de dejetos e sedimentos contaminados. A população da comunidade Barra do Torneiro (Jaguaruna/SC), que no passado era essencialmente composta por famílias de pescadores artesanais, teve sua fonte de sobrevivência profundamente afetada. Houve prejuízos permanentes, tanto na balneabilidade local, quanto na pesca que era realizada no estuário. A péssima qualidade das águas resultou na escassez e insalubridade do pescado, fazendo com que atualmente a região seja utilizada apenas para o transporte de barcos ao mar, por parte dos remanescentes de pescadores artesanais que ainda sobrevivem desta atividade (Munari 2014).

A região costeira adjacente a esses ambientes teve a sua importância reforçada com a criação de uma unidade de conservação. No ano de 2000, foi criada a Área de Proteção Ambiental da Baleia Franca, que se estende desde o Sul da ilha de Florianópolis até o município de Balneário Rincão (~156.100 ha) (Brasil 2000, ICMBio 2016). Tal medida têm como principal objetivo a proteção da Baleia Franca Austral (*Eubalaena australis*), ao ser evidenciada a importância da área como sítio de reprodução e berçário da espécie (Groch 2005, Santos *et al.* 2010).

A partir deste contexto, cabe questionarmos a maneira como são desenvolvidas as atividades econômicas na região, buscando compreender como se dá o uso dos recursos naturais pela sociedade. Esta reflexão, portanto, fundamenta-se em uma maior compreensão por parte da população local sobre a qualidade da água destes ambientes e sobre os impactos negativos aos quais o ambiente está submetido (Sánchez 2008). Isso porque,

quando seu uso é inapropriado, além da saúde ambiental a saúde humana é diretamente atingida, fato este que pode esclarecer possíveis alterações na cadeia trófica e consequente alteração na pesca local (Turnell & Crispim 2014).

Considerando, portanto, todos esses aspectos, a análise das condições da qualidade dos recursos hídricos locais constitui uma importante ferramenta para definição de políticas públicas e a melhoria da qualidade de vida da comunidade residente nesse ambiente estuarino e costeiro do litoral Sul Catarinense. Nesse sentido, o presente estudo teve como objetivo avaliar as variáveis físicas, químicas e biológicas, associadas à qualidade da água no estuário da Bacia Hidrográfica do rio Urussanga, de modo a caracterizar a situação ambiental da área.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A Bacia Hidrográfica do rio Urussanga se localiza no sul do Estado de Santa Catarina. Ao todo, dez municípios são integrados pela bacia, de modo que, Cocal do Sul e Morro da Fumaça se encontram totalmente inseridos em sua área. Já Balneário Rincão, Criciúma, Içara, Jaguaruna, Pedras Grandes, Sangão, Treze de Maio e Urussanga se encontram parcialmente inseridos (Fig. 1).

A região formada pelos rios América, Carvão e Rio Deserto corresponde àquela mais impactada pelas atividades da indústria carbonífera, estes corpos d'água encontram-se gravemente contaminados. A região do Rio Maior, apesar de não ser diretamente afetada por esta atividade, termina também recebendo os seus impactos, sendo que logo após o encontro do Rio Maior com o Rio Carvão, o rio Urussanga tem o seu início em condições de grande degradação, com indicadores de baixo pH, elevada acidez e concentração de metais em níveis tóxicos, tais como Ferro, Zinco e Manganês, dentre outros (Volpato *et al.* 2017).

Assim, a carga poluidora gerada nas águas interiores da bacia atingem a região estuarina, que se sobrepõem à Área de Proteção Ambiental da Baleia Franca (APABF) (Fig. 1).

Amostragem e análise de dados

Foram realizadas quatro coletas na região estuarina do rio Urussanga (set./2011; out./2011; maio/2012; jun./2012), em três pontos, denominados: (P1) estuário marinho (~250 m da linha da praia; 28°48'05"S, 49°11'12"O), (P2) estuário médio (~800 m da linha da praia; 28°47'39"S, 49°11'39"O) e (P3) estuário fluvial (~1200 m da linha da praia; 28°47'15"S, 49°12'21"O) (Fig. 2).

Para cada ponto obteve-se os parâmetros químicos e físico-químicos da água, sendo estes: Salinidade, pH, Oxigênio Dissolvido, Clorofila α , Cor Aparente, Turbidez (UNT - Unidades Nefelométrica de Turbidez), Fósforo Total, Nitrato, Ferro Total, Alumínio Total, Manganês, Zinco, Arsênio, Chumbo, Nitrito, Mercúrio e Níquel.

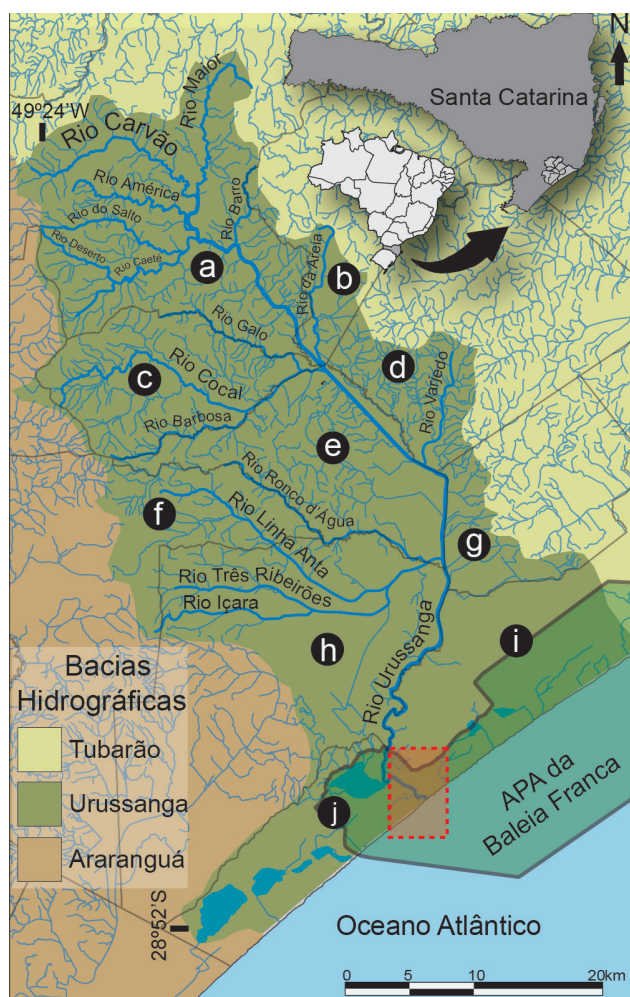


Figura 1. Bacia Hidrográfica do rio Urussanga (SC, Brasil) e respectivos municípios: (a) Urussanga, (b) Pedras Grandes, (c) Cocal do Sul, (d) Treze de Maio, (e) Morro da Fumaça, (f) Criciúma, (g) Içara, (h) Sangão, (i) Jaguaruna e (j) Balneário Rincão. Área vermelha indica região amostrada.

A mensuração de tais elementos seguiu os protocolos apresentados por APHA (2005).

Em laboratório também foram realizadas análises bacteriológicas das amostras de água, obtidas pela contagem de Coliformes Totais e Coliformes Termotolerantes, seguindo, do mesmo modo, metodologia protocolada por APHA (2005). Os resultados microbiológicos foram comparados com o critério sanitário estabelecido por Silva (2000) (Tab. 1).

Em seguida, os resultados obtidos nas análises foram graficamente formatados e confrontados com os padrões considerados pela legislação brasileira (CONAMA 2001, 2005). Adicionalmente, obteve-se a matriz de correlação entre os parâmetros físico-químicos e microbiológicos registrados, de modo a verificar o grau de associação destes. Para isso, utilizou-se o Coeficiente de Spearman (R) e significância de 95% (Software BIOESTAT 5.0). Em decorrência do menor número de amostras para Clorofila α e para Zinco, ambos parâmetros foram submetidos a análises de correlação separadamente. A correlação de Spearman apresenta resultados que variam entre -1 e 1, para os quais o sinal representa a direção da relação e



Figura 2. Distribuição dos pontos amostrais para análise da qualidade da água na região estuarina do rio Urussanga. Área urbana destacada corresponde à Vila Barra do Torneiro (Jaguaruna/SC). Abreviações: P1, estuário marinho; P2, estuário médio; P3, estuário fluvial. Fonte: Google Earth® (26/09/2011).

os valores indicam sua magnitude. A interpretação dos resultados envolveu, primeiramente, o destaque das correlações estatisticamente significativas e, em seguida, adotou-se a classificação de magnitude considerando: correlação moderada (0,5 a 0,7), correlação forte (>0,7 a 0,9) e correlação muito forte (>0,9 a 1), tanto para valores positivos quanto para negativos.

RESULTADOS

Análises físico-químicas

Todos os pontos apresentaram salinidade superior a 0,5‰ em pelo menos uma campanha amostral, e Salinidade inferior a 30‰ em todas campanhas (Fig. 3A). Assim, foram adotados como base interpretativa às características físico-químicas locais os parâmetros de qualidade para águas salobras Classe 1, conforme previsto na legislação brasileira (CONAMA 2005).

Em nenhum momento as águas estuarinas locais

Tabela 1. Classificação da qualidade da água estuarina com base nos indicadores bacteriológicos de acordo com SILVA (2000). Abreviatura: NMP, Número mais provável.

Coliformes	Classificação de Qualidade		
	Boa	Aceitável	Má
Totais (NMP.100 mL ⁻¹)	<5000 em 80% das amostras	<10000 em 95% das amostras	>10000 em 5% das amostras
Termotolerantes (NMP.100 mL ⁻¹)	<100 em 80% das amostras	<2000 em 95% das amostras	>2000 em 5% das amostras

apresentaram valores de pH adequados à legislação (Fig. 3B). Evidenciou-se somente valores inferiores ao limite mínimo de 6,5, sendo que os menores valores de pH registrados no estuário ocorreram em set./2011 (variando de 4 a 4,1).

Em nenhum momento os valores de Oxigênio Dissolvido foram inferiores a 5,0 mg.L⁻¹, respeitando assim, a exigência legal (Fig. 3C). O estuário médio apresentou o menor e o maior valor de Oxigênio Dissolvido (5,4 e 8,6 mg.L⁻¹, respectivamente).

Quanto à Clorofila α , foram obtidas amostras somente para três das quatro incursões a campo realizadas (set./2011 ausente). Registrou-se um valor médio de 2,9 $\mu\text{g.L}^{-1}$ de Clorofila α entre todos os pontos durante o estudo, porém, houve variação de 0,14 $\mu\text{g.L}^{-1}$ até 15,2 $\mu\text{g.L}^{-1}$, referentes ao estuário médio (out./2011) e ao estuário fluvial (jun./2012), respectivamente (Fig. 3D).

O valor máximo para o parâmetro Cor Aparente foi registrado no estuário fluvial (jun./2012) com o valor de 148 mg.L⁻¹ PtCo, enquanto que o menor valor, 30 mg.L⁻¹ ocorreu no estuário médio (out./2011) (Fig. 3E). A análise de Turbidez registrou ambos menor (2,8 UNT) e maior (17,5 UNT) valores no estuário fluvial, out./2011 e jun./2012 respectivamente (Fig. 3F).

Quanto à análise de Fósforo Total, todas as amostras ficaram dentro dos padrões preconizados na legislação (máximo de 0,124 mg.L⁻¹) (Fig. 3G). O menor valor de Fósforo Total ocorreu no estuário fluvial em jun./2012 (0,006 mg.L⁻¹), enquanto que o maior valor ocorreu no

estuário marinho do mesmo período (0,03 mg.L⁻¹).

A quantidade de Nitrato registrada nos sítios de coleta esteve abaixo de 0,4 mg.L⁻¹, valor definido como máximo pela legislação, em todas as amostras (Fig. 3H). O maior valor registrado ocorreu no estuário médio (0,3 mg.L⁻¹) em set./2011. Enquanto que em diversos momentos a quantidade de Nitrato nas amostras apresentou valores abaixo do limite analítico utilizado (<0,1 mg.L⁻¹).

Todas as amostras apresentaram valor igual ou superior ao máximo definido pela legislação para Ferro Total (0,3 mg.L⁻¹) (Fig. 3I). A amostragem realizada em maio/2012 apresentou os maiores valores para cada ponto, de modo que, registrou-se o maior desses no estuário fluvial (5,32 mg.L⁻¹). A análise de Alumínio Total teve maior valor registrado no estuário fluvial (out./2011), chegando a 6,2 mg.L⁻¹. Já o menor valor ocorreu no estuário marinho em jun./2012 (1,4 mg.L⁻¹) (Fig. 3J).

Todas as amostras apresentaram valor de Manganês superior ao máximo definido pela legislação (0,1 mg.L⁻¹) (Fig. 3K). Os menores valores ocorreram concomitantemente nos três sítios em set./2011, variando de 0,32 a 0,33 mg.L⁻¹. Os três pontos do estuário registraram seus maiores valores de Manganês em out./2011 e maio/2012, variando entre 0,55 a 0,61 mg.L⁻¹.

O parâmetro Zinco foi avaliado apenas nas amostras de set./2011 e out./2011. Ainda assim, evidenciou-se valor acima do máximo previsto na legislação (0,09 mg.L⁻¹), no sítio denominado estuário fluvial (out./2011), chegando a 0,1 mg.L⁻¹ (Fig. 3L).

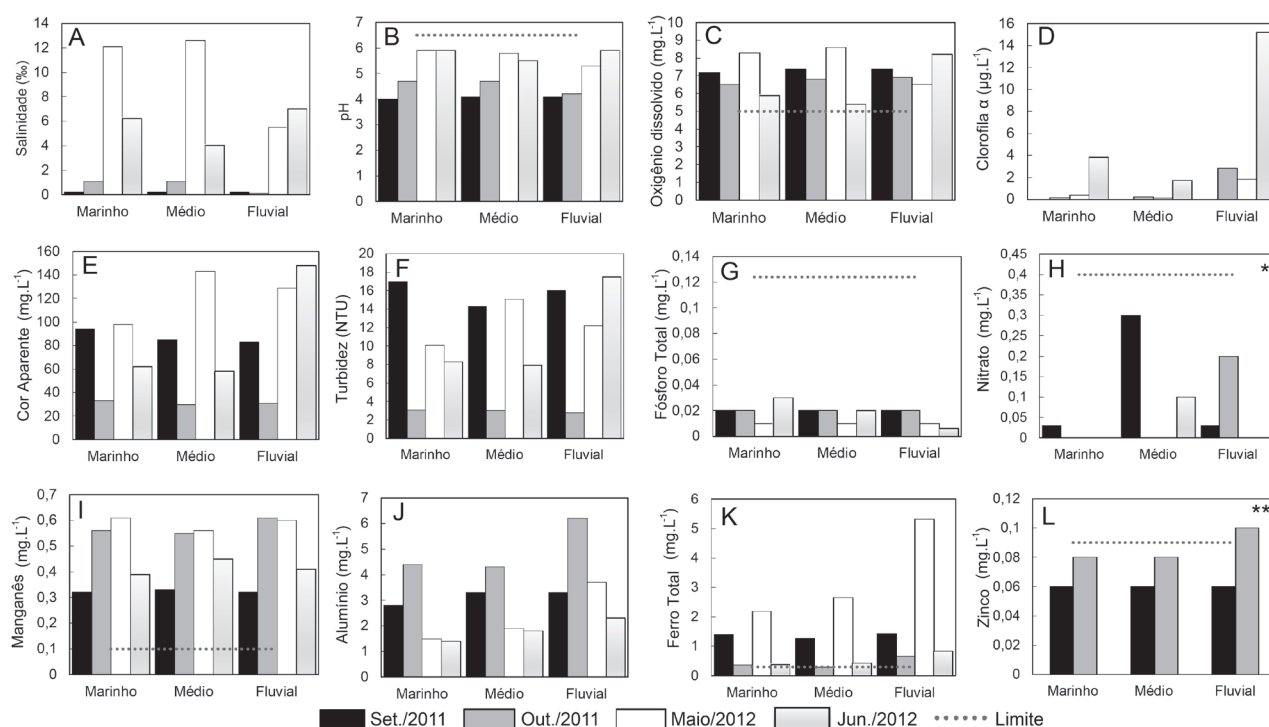


Figura 3. Parâmetros físico-químicos da água no estuário do rio Urussanga. (A) Salinidade, (B) pH, (C) Oxigênio Dissolvido, (D) Clorofila α , (E) Cor Aparente, (F) Turbidez, (G) Fósforo Total, (H) Nitrato, (I) Ferro Total, (J) Alumínio Total, (K) Manganês e (L) Zinco. Dados ausentes: *set.2011 e **maio/2012; jun.2012. Linha tracejada representa o limite mínimo do parâmetro físico-químico considerado pela legislação brasileira.

Os resultados das análises de Arsênio, Chumbo, Nítrito, Mercúrio e Níquel apresentaram valores abaixo do limite analítico do método utilizado para todas as amostras ($<0,001 \text{ mg.L}^{-1}$, $<0,001 \text{ mg.L}^{-1}$, $<0,1 \text{ mg.L}^{-1}$, $<0,001 \text{ mg.L}^{-1}$ e $<0,01 \text{ mg.L}^{-1}$, respectivamente).

Análise de coliformes

Considerando o critério sanitário, das 12 amostras realizadas na região estuarina (quatro períodos distintos e três sítios), as análises bacteriológicas ($n=24$) apresentaram qualidade boa (Tab. 1) em 87,5% dos casos (Fig. 4). Somente o sítio definido como estuário fluvial apresentou qualidade inferior, primeiramente no período de maio/2012, quando atingiu $16000 \text{ NMP.100mL}^{-1}$ (má qualidade) tanto para Coliformes Totais (Fig. 4A), quanto para Coliformes Termotolerantes (Fig. 4B). Em seguida, no período de jun./2012, a contagem de Coliformes Termotolerantes enquadrou a amostra como aceitável por ter excedido $100 \text{ NMP.100L}^{-1}$.

Quanto ao critério de balneabilidade previsto na legislação brasileira, as águas tiveram classificação excelente em sua maioria, exceto no estuário fluvial

durante maio/2012, quando superou 2500 Coliformes Termotolerantes (Fig. 4B).

Matriz de correlação

A análise obtida através da matriz de correlação, apresentada na Tabela 2, revelou que apenas o Ferro Total teve associação às amostras de Temperatura da Água, exibindo correlação negativa e moderada. Já a Salinidade, apresentou correlação com quatro parâmetros, primeiramente, uma forte correlação positiva com pH, seguida por correlações moderadas com Fósforo Total (negativa), Cor Aparente (positiva) e Alumínio Total (negativa). O Alumínio Total exibiu correlação negativa e moderada também com o pH.

O Oxigênio Dissolvido apresentou correlação moderada com dois parâmetros, Fósforo Total (negativa) e Cor Aparente (positiva). A distinção entre esses dois últimos parâmetros citados, Fósforo Total e Cor Aparente, foi evidenciada, inclusive, sob uma correlação negativa forte. Outra correlação forte, porém positiva, ocorreu entre os parâmetros Cor Aparente e Turbidez, de modo que o primeiro também esteve positivamente correlacionado com Ferro Total (magnitude moderada). Já o parâmetro Turbidez, foi o único a apresentar correlação com Manganês, sendo esta negativa e moderada.

O único parâmetro abiótico a se correlacionar com parâmetros bióticos foi o Ferro Total, que estabeleceu correlação positiva forte com ambos agrupamentos de Coliformes, que por sua vez, apresentaram uma correlação positiva muito forte entre si.

O Nitrato não apresentou correlação significativa com nenhum parâmetro. Do mesmo modo, as análises de correlação para Clorofila α e Zinco, realizadas separadamente, não demonstram correlação com nenhum outro parâmetro estudado.

DISCUSSÃO

O baixo valor de pH, elevada acidez e concentração elevada de metais tóxicos das águas dos rios da região, sobretudo, devido à elevada carga de drenagem ácida recebida de minas de carvão, que possuem elevadas concentrações em Ferro e Manganês, dentre outros metais, são características das extensas áreas de passivos ambientais deixados pela carboníferas na região Sul de Santa Catarina (Castilhos *et al.* 2010). A presença da baixa acidez no estuário do rio Urussanga, trazida pelas águas interiores, foi evidenciada por Volpato *et al.* (2017) e reforçada no presente estudo.

Ainda à montante, região do Rio Carvão, as condições mais ácidas de suas águas apresentam alta solubilidade dos metais pesados. Esse fenômeno agrava os problemas de contaminação tóxica pela liberação de elementos químicos tóxicos adsorvidos nos sedimentos (Zhen-Gang 2008).

Ao atingir regiões de maior pH, devido à entrada da água do oceano (Tab. 2), há precipitação de metais traço, promovendo a formação de oxi-hidróxidos de metais, tais

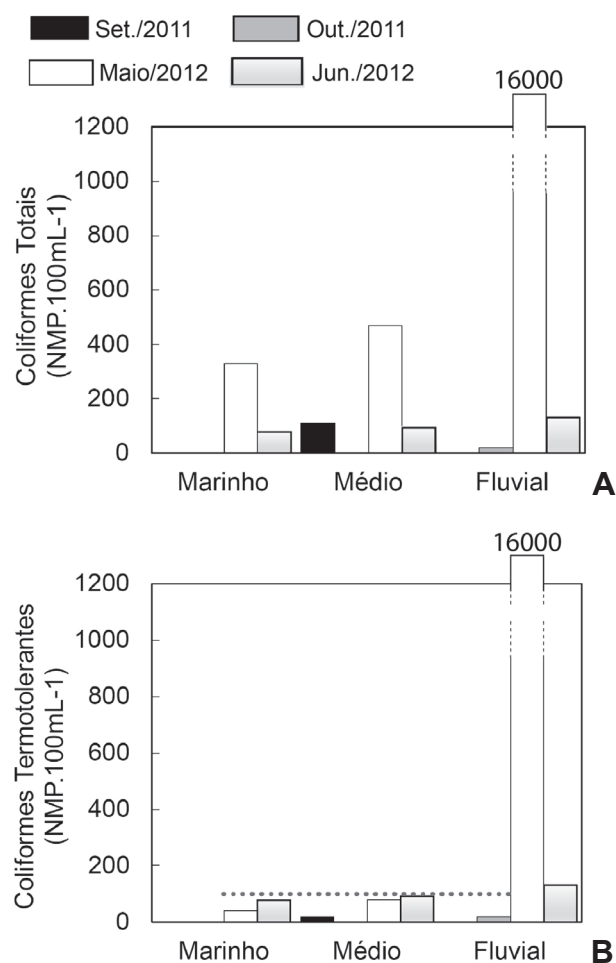


Figura 4. Valores de Coliformes Totais (A) e Coliformes Termotolerantes (B) registrados em três pontos do estuário do rio Urussanga, Santa Catarina, em quatro campanhas amostrais.

Tabela 2. Matriz de correlação de Spearman (R) entre os parâmetros abióticos e bióticos amostrados no estuário do rio Urussanga, Santa Catarina, em três pontos distintos (estuário fluvial, médio e marinho) durante quatro campanhas de amostragens (N=12). Abreviaturas: °C, Temperatura da Água; Sal., Salinidade; OD, Oxigênio Dissolvido; PT, Fósforo Total; NO₃⁻, Nitrato; PtCo, Cor Aparente; UNT, Turbidez; Fe, Ferro Total; Al, Alumínio Total; Mn, Manganês; C1, Coliformes Termotolerantes; C2, Coliformes Totais. Valores em negrito apresentam correlação significativa.

	°C	Sal.	pH	OD	P	NO ₃ ⁻	PtCo	UNT	Fe	Al	Mn	C1	C2
°C													
Sal.	-0,50												
pH	-0,20	0,87											
OD	-0,25	0,47	0,11										
P	0,23	-0,57	-0,39	-0,68									
NO ₃ ⁻	0,08	-0,46	-0,52	-0,10	0,25								
PtCo	-0,49	0,61	0,44	0,62	-0,75	-0,26							
UNT	-0,46	0,24	0,05	0,53	-0,42	-0,06	0,84						
Fe	-0,68	0,39	0,18	0,24	-0,56	-0,19	0,64	0,38					
Al	0,51	-0,66	-0,67	-0,15	0,14	0,36	-0,52	-0,51	-0,08				
Mn	-0,01	0,39	0,34	0,06	-0,38	-0,22	-0,11	-0,59	0,31	0,31			
C1	-0,34	0,09	0,12	-0,19	-0,33	-0,17	0,35	0,09	0,85	0,13	0,33		
C2	-0,36	0,11	0,13	-0,17	-0,35	-0,18	0,36	0,09	0,86	0,12	0,34	1	

como o Ferro e o Manganês, resultado de processos de co-precipitação e floculação. Durante a floculação, metais e nutrientes dissolvidos na água podem co-precipitar ou serem adsorvidos na superfície de partículas minerais de argila, originando a chamada Zona de Turbidez Máxima (Campos 2010). Nesse contexto, os indicadores encontrados para os parâmetros Cor Aparente e Turbidez refletem as interações entre os aspectos físico-químicos e biogeoquímicos atuantes no ambiente estuarino.

Metais como Manganês, Ferro, Cobre e Zinco são nutrientes essenciais, porém quando os níveis de exposição e concentração forem suficientemente altos, esses metais tornam-se tóxicos para os organismos aquáticos e para o homem (Leite *et al.* 2004).

A principal fonte de Ferro dos solos para as águas da região sugere que esse elemento é um dos principais produtos da lixiviação de solos tropicais, além de um subproduto do processo de oxidação da pirita oriunda da mineração de carvão (Castilhos *et al.* 2010). Não obstante, a exposição deste material ao longo do leito do rio e o aporte de drenagem ácida de mina ainda são muito comuns na região. Estudos pretéritos já indicavam que a presença do Ferro está associada ao transporte de sedimentos contaminados por efluentes da mineração de carvão, que são transportados por grandes distâncias no interior das bacias hidrográficas (Menezes *et al.* 2009). O Ferro é um elemento químico essencial para vários processos biológicos, atuando por exemplo na ativação de enzimas relacionadas à fotossíntese e à respiração (Ramos-Silva 2011). O excesso de Ferro pode causar graves danos tanto aos ecossistemas, quanto à saúde dos seres humanos, bem como outros metais tais como o Manganês e o Zinco (Salgado 1996), todos presentes em elevadas concentrações nos rios da região afetados pela mineração de carvão. Fu *et al.* (2017) chamam atenção para uma maior sensibilidade dos organismos aquáticos ao Zinco na água do que os humanos.

O Alumínio Total pode estar associado à maior da acidez dos solos, como resultado do processo de lixivia-

ção mineral mais intensa em regiões carboníferas. Vale ressaltar que as concentrações consideradas são as de Ferro Total e Alumínio Total e, portanto, são diretamente vinculadas ao material particulado em suspensão. Por esse motivo, as concentrações de Alumínio Total são tão elevadas, via de regra esse elemento apresenta concentrações na fração dissolvida muito baixas nas águas fluviais (Castilhos *et al.* 2010). Para este trabalho foram realizadas análises para determinação das concentrações em Alumínio Total, porém os valores de referência da legislação fazem alusão a Alumínio Total Dissolvido. Nesse caso, o valor máximo definido pela Resolução CONAMA 357/05, é de 0,1 mg.L⁻¹ para águas salobras de Classe 1. As concentrações do Alumínio Total Dissolvido em águas com pH próximo a neutro geralmente estão entre 0,001 e 0,05 mg.L⁻¹, mas aumentam para 0,5 – 1 mg.L⁻¹ em águas mais ácidas ou ricas em matéria orgânica, devido a solubilização desse elemento, podendo chegar a valores acima de 90 mg.L⁻¹ em águas extremamente acidificadas afetadas por drenagem ácida de mineração (CETESB 2012).

Considerando que uma atribuição segura do estado trófico dos corpos d'água tenha dentre suas prerrogativas uma média anual robusta (número amostral suficiente e frequência sazonalmente distribuída) (Tundisi & Tundisi 2011, Baumgarten & Paixão 2013), ressalta-se que a área de estudo necessita de monitoramento periódico, tanto para a definição apropriada de seu estado trófico, quanto para a contínua observação dos demais parâmetros físicoquímicos de qualidade da água aqui apresentados. Contudo, as baixas concentrações de Clorofila *a* e Fósforo Total (< 2,5 mg.L⁻¹ e <50 µg.L⁻¹, respectivamente) sugerem um estado oligotrófico para o estuário do Rio Urussanga. Nessas condições, quando ocorre a diminuição de nutrientes nos fluxos fluviais, em especial de Fósforo, além da redução da disponibilidade deste nutriente, pode haver alteração da produtividade biológica do ecossistema estuarino, pois o Fósforo é o principal fator limitante na produtividade de águas continentais

(Esteves 1988), bem como, em ambientes estuarinos, onde varia entre fator limitante principal e secundário com o Nitrogênio (Zhen-Gang 2008).

O Oxigênio Dissolvido (OD) é de essencial importância para os organismos aeróbicos aquáticos, sendo considerado como a principal variável para a caracterização dos efeitos da poluição das águas por elementos orgânicos. Além de afetar a vida aquática, este parâmetro afeta também os processos biogeoquímicos (Vasconcelos & Souza 2011). O maior valor de Oxigênio Dissolvido registrado (maio/2012) pode estar associado à situação de maré baixa, ou seja, com maior vazão do rio. Já o aumento de Oxigênio Dissolvido no estuário fluvial em jun./2012, se sobrepõe ao incremento do nível da água nesse ponto comparado a meses anteriores. Adicionalmente, a alta intensidade luminosa, também pode ter favorecido a produção fotossintética do estuário (vide dados de Clorofila α ; Fig. 3D) e consequente disponibilidade de Oxigênio Dissolvido para o meio.

A análise de Coliformes evidencia o lançamento de efluentes domésticos no leito do rio sem tratamento, ocorrendo muitas vezes de forma clandestina. Esse fato se torna ainda mais preocupante, pois a água do estuário é utilizada na dessedentação de animais e para a recreação durante o verão e períodos com temperaturas elevadas. Apesar de a maioria das amostras se apresentarem adequadas perante a legislação, a situação observada em jun./2012 é alarmante. Assim, devem ser realizados estudos com maior esforço amostral buscando avaliação e manejo adequados da qualidade sanitária do estuário.

Considerando que a região citada abrange bacias hidrográficas costeiras, toda a carga de poluentes gerada pela atividade antrópica é drenada para a região estuarina e, consequentemente, lançada ao oceano. No estuário da Bacia Hidrográfica do rio Urussanga os problemas históricos de degradação ambiental se tornam ainda mais expressivos. Na década de 1970 ocorreu uma extensa dragagem e retificação de parte do rio Urussanga, de modo que, tanto a região estuarina, quanto seu leito foram modificados para dar maior vazão ao rio em épocas de cheia (Sant'ana 2008). Logo, o rio retificado acaba trazendo mais facilmente toda a carga poluidora ao longo da bacia até seu estuário.

A presença de metais em concentrações acima da legislação ambiental e em níveis tóxicos no estuário do Rio Urussanga (ex. Ferro, Manganês, Zinco) expõem a grave contaminação na qual o ambiente está submetido, anunciando seu estado de degradação e perda da biodiversidade. Os elevados níveis desses elementos no ambiente, têm sua configuração potencializada pela alta acidez das águas (Menezes *et al.* 2009). Seus efeitos genotóxicos são capazes de interferir em processos de reparação do DNA (aumentando a taxa de mutações), de modificar a composição genética das populações expostas, de reduzir o tamanho populacional e podem alterar a troca de indivíduos migrantes entre populações (Belfiore & Anderson 2001, Kim *et al.* 2003, Mussali-Galante *et al.* 2014).

Junto à redução do potencial genético das populações

(Banci *et al.* 2017), sistemas multitróficos são desestruturados com o desaparecimento das espécies e perda de suas funções ecológicas (Petchey *et al.* 2004).

Landers (2016) mostrou os efeitos da drenagem ácida de minas na fauna aquática do Rio Blackfoot no estado de Montana (EUA). A pesquisa concluiu que a contaminação ácida e de metais pesados teve efeitos diretos na estrutura da comunidade de invertebrados aquáticos, tanto na redução de abundância, quanto na modificação de sua composição. Foi possível demonstrar ainda, que tais impactos influenciaram na disponibilidade de alimento e facilitaram a transferência de metais para níveis tróficos superiores (peixes).

Ressalta-se aqui que a característica bioacumuladora dos metais pesados no decorrer de uma cadeia trófica ou teia trófica tem efeito mais pronunciado nas espécies de alto nível trófico (Neff 2002). No caso do ambiente aquático, peixes com hábito alimentar piscívoro podem ser um exemplo. Porém, a contaminação por metais pesados em quantidades elevadas já pode ser evidenciada em organismos detritívoros, como constatado por Pinheiro *et al.* (2012) em uma área de mangue do litoral paulista. Os autores registraram valores de Cromo nos músculos do caranguejo-uçá (*Ucides cordatus*), crustáceo de importância comercial, em níveis três vezes superiores àqueles permitidos pela legislação brasileira, sendo então, perigosos para o consumo humano.

O caso mais representativo dos efeitos tóxicos de metais pesados em seres humanos ocorreu na ilha de Kyushu, Japão, na década de 1950. O consumo de peixes contaminados com Mercúrio, presente no ambiente via efluentes industriais não tratados, ocasionou uma enfermidade denominada Doença de Minamata, levando a óbito mais de 700 pessoas e envenenando mais de 2000. Dentre as medidas de controle circunstanciais foi adotada a proibição da pesca na região (Crean & Lacambra 2013).

Nessas condições, além da preocupação com os impactos à biodiversidade e aos serviços ecológicos do ambiente estuarino, a contaminação da água no estuário do rio Urussanga deve ser enfrentada pela gestão pública como risco à saúde humana. Estes ambientes devem ser continuamente analisados e amparados por projetos de educação ambiental, buscando inclusive a orientação dos cidadãos, tendo em vista a existência de populações pesqueiras tradicionais na região, que apesar de terem deslocado sua atividade para o mar, ainda preservam, como forma de lazer, a pesca nas águas estuarinas e a captura de moluscos nas praias arenosas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de mestrado (C.E. Schnack; Processo nº: 558213/2010-3); à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pelas bolsas de Pós-doutorado (G. Ceni) e de doutorado (A.B. Munari); à Pró-Reitoria de Pós-Graduação, Pesquisa e Extensão da Universidade do Extremo Sul Catarinense, pelo financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ALTHOFF, D. A. 2004. Qualidade da água em fontes e poços no Qualidade da água em fontes e poços no Litoral Sul de Santa Catarina Litoral Sul de Santa Catarina. *Revista Agropecuária Catarinense*, 17(3): 53-56.
- APHA. 2005. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21. ed. Washington DC: American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation. 1200 p.
- BACK, Á. J., DESCHAMPS, F. C. & SANTOS, M. D. G. D. S. 2016. Ocorrência de agrotóxicos em águas usadas com irrigação de arroz no sul de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, 39: 47-58.
- BANCI, K. R. S., MORI, G. M., OLIVEIRA, M. A., PAGANELLI, F. L., PEREIRA, M. R. & PINHEIRO, M. A. A. 2017. Can environmental pollution by metals change genetic diversity? *Ucides cordatus* (Linnaeus, 1763) as a study case in Southeastern Brazilian mangroves. *Marine Pollution Bulletin*, 116: 440-447.
- BELFIORE, N. M. & ANDERSON, S. L. 2001. Effects of contaminants on genetic patterns in aquatic organisms: a review. *Mutation Research*, 489: 97-122.
- BAUMGARTEN, M. G. Z. & PAIXÃO, B. E. G. 2013. Uso do índice do estado trófico para avaliar a qualidade das águas do estuário da Lagoa dos Patos (RS). *Atlântica, Rio Grande*, 35(1): 5-22.
- BRASIL. Decreto n.º s/n, de 14 de setembro de 2000. Dispõe sobre a criação da Área de Proteção Ambiental da Baleia Franca, no Estado de Santa Catarina, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 14/09/2000.
- BROSWIMMER, F. 2002. *Ecocide: a short history of mass extinction of species*. London: Pluto Press. 204 p.
- CAMPOS, M. L. M. 2010. *Introdução à biogeoquímica de ambientes aquáticos*. Campinas: Editora Átomo. 209 p.
- CASTILHOS, Z. C., BIDONE, E. D., CESAR, R. G., EGLER, S. G., ALEXANDRE, N. Z., BIANCHINI, M. & NASCIMENTO, T. 2010. *Metodologia para o monitoramento da qualidade das águas da Bacia Carbonífera Sul Catarinense: ferramenta para gestão em poluição ambiental*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT. 105 p.
- CETESB – Alumínio Total: *Ficha de Informação Toxicológica*. 2012. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/laboratorios/fit/aluminio.pdf>>. Acesso em: 12 mar. 2012.
- CONAMA. Resolução CONAMA n. 274, de 29 de novembro de 2000. Regulamenta as condições de balneabilidade para a saúde e o bem-estar humano, bem como as condições necessárias à recreação de contato primário. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 08/01/2001.
- CONAMA. Resolução CONAMA n. 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18/03/2005.
- CREAN, K. & LACAMBRA, C. 2013. From population ecology to socio-economic and human health issues. In: LAWRENCE, A. & HEMINGWAY, K. (Eds.). *Effects of pollution on fish: molecular effects and population responses*. Oxford: Wiley-Blackwell. p. 289-318.
- ESTEVES, F. D. A. 1988. *Fundamentos de Limnologia*. Rio de Janeiro: Interface. 226 p.
- FU, Z., GUO, W., DANG, Z., HU, Q., WU, F., FENG, C., ZHAO, X., MENG, W., XING, B. & GIESY, J. P. 2017. Refocusing on Nonpriority Toxic Metals in the Aquatic Environment in China. *Environmental Science & Technology*, 51(6): 3117-3118.
- GROCH, K. R. 2005. *Biologia Populacional e Ecologia Comportamental da Baleia Franca Austral, Eubalaena australis (Desmoulins, 1822), CETACEA, Mysticeti, no litoral sul do Brasil*. 168 f. Tese (Doutorado em Biologia Animal) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- ICMBIO – Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. 2016. *Área de Proteção Ambiental da Baleia Franca*. Disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br/apabaleiafranca>>. Acesso em: 15 mai. 2016.
- KIM, S.-J., RODRIGUEZ-LANETTY, M., SUH, J.-H. & SONG, J.-I. 2003. Emergent effects of heavy metal pollution at a population level: *Littorina brevicula* a study case. *Marine Pollution Bulletin* 46: 74-80.
- LANDERS, J. E. 2016. *Aquatic food webs and heavy metal contamination in the upper Blackfoot River, Montana*. Dissertação (Master of Science in Environmental Studies) - University of Montana, Missoula, 2016.
- LATTUADA, R. M., MENEZES, C. T. B., PAVEI, P. T., PERALBA, M. C. R. & DOS SANTOS, J. H. Z. 2009. Determination of metals by total reflection X-ray fluorescence and evaluation of toxicity of a river impacted by coal mining in the south of Brazil. *Journal of Hazardous Materials*, 163(2): 531-537.
- LEITE, M. A., DORNFELD, C. B. & ESPÍNDOLA, E. L. G. 2004. Análise da concentração de metais na água do reservatório de Salto Grande: diagnóstico ambiental e saúde pública. In: AIDIS. (Org.). CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL, 29., 2004, San Juan, Porto Rico. Anais... San Juan: CEPIS. p. 1-6.
- MARCELLO, R. R., GALATO, S., PETERSON, M., RIELLA, H. G. & BERNARDIN, A. M. 2008. Inorganic pigments made from the recycling of coal mine drainage treatment sludge. *Journal of Environmental Management*, 88(4): 1280-1284.
- MENEZES, C. T. B., LATTUADA, R. M. & PAVEI, P. T. 2009. Estudos de Sedimentos Aquáticos Contaminados por Metais Pesados e Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos Oriundos da Mineração de Carvão. In: MILIOLI, G., SANTOS, R. & CITADINI-ZANETTE, V. (Eds.). *Mineração de Carvão, Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável no Sul de Santa Catarina: uma Abordagem Interdisciplinar*. Curitiba: Juruá Editora. p. 71-89.
- MUNARI, A. B. 2014. *Diagnóstico socioambiental participativo no contexto do ecodesenvolvimento territorial: estudo de caso na comunidade de Barra do Torneiro, Jaguaruna, Santa Catarina*. 50 f. Trabalho de Conclusão (Curso de Engenharia Ambiental). Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2014.
- MUSSALI-GALANTE, P., TOVAR-SÁNCHEZ, E., VALVERDE, M. & ROJAS, E. 2014. Genetic structure and diversity of animal populations exposed to metal pollution. In: WHITACRE, D. M. (Ed.). *Reviews of environmental contamination and toxicology: volume 227*. New York: Springer. p. 79-106.
- NEFF, J. M. 2002. *Bioaccumulation in marine organisms: effects of contaminants from oil well produced water*. Oxford: Elsevier Science. 452 p.
- NOAA. 2007. Human Disturbances to Estuaries. Disponível em: <http://oceanservice.noaa.gov/education/kits/estuaries/estuaries09_humandisturb.html>. Acesso em: 19 jun. 2016.
- PETCHEY, O. L., DOWNING, A. L., MITTELBACH, G. G., PERSSON, L., STEINER, C. F., WARREN P. H. & WOODWARD, G. 2004. Species loss and the structure and functioning of multitrophic aquatic systems. *Oikos*, 104: 467-478.
- PINHEIRO, M. A. A., SILVA, P. P. G., DUARTE, L. F. A., ALMEIDA, A. A. & ZANOTTO, F. P. 2012. Accumulation of six metals in the mangrove crab *Ucides cordatus* (Crustacea: Decapoda) and its food source, the red mangrove *Rhizophora mangle* (Angiosperma: Rhizophoraceae). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 81: 114-121.
- RAMOS-SILVA, C. A. 2011. *Oceanografia química*. Rio de Janeiro: Interciência. 218 p.
- RAVEN, P. H., BERG, L. R. & HASSENZAHN, D. M. 2010. *Environment*. 7. ed. Jefferson City: John Wiley & Sons. 656 p.
- SALGADO, P. E. T. 1996. Toxicologia dos Metais. In: OGA, S. (Ed.). *Fundamentos de Toxicologia*. São Paulo: Atheneu. p. 154-172.
- SÁNCHEZ, L. H. 2008. *Avaliação de impactos ambientais: conceitos e métodos*. São Paulo: Oficina de Textos. 495 p.
- SANT'ANA, W. D. O. 2008. *Qualidade dos recursos hídricos subterrâneos na bacia do rio Urussanga, SC*. 187 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- SANTOS, F. C., RODRIGUES, J., CORREA, A. A. & GROCH, K. R. 2010. Comportamento de pares de fêmea-filhote *Eubalaena australis*

- (Desmoulins, 1822) na temporada reprodutiva de 2008, enseada de Ribanceira e Ibiraquera, Santa Catarina, Brasil. *Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde*, 14(1): 83-101.
- SEDAC/NASA. 2007. Percentage of total population living in coastal areas. Disponível em: <http://sedac.ciesin.columbia.edu/es/papers/Coastal_Zone_Pop_Method.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2017
- SILVA, L. F. O. & OLIVEIRA, M. L. S. 2015. Nanominerals and Ultrafine Particles from Brazilian Coal Fires. In: STRACHER, G. B., PRAKASH, A. & SOKOL, E. V. (Eds.). *Coal and Peat Fires: A Global Perspective*. Amsterdam: Elsevier. p. 37-55.
- SILVA, L. F. O., WOLLENSCHLAGER, M. & OLIVEIRA, M. L. S. 2011. A preliminary study of coal mining drainage and environmental health in the Santa Catarina region, Brazil. *Environmental Geochemistry and Health*, 33(1): 55-65.
- SILVA, M. C. 2000. Estuários: critérios para uma classificação ambiental. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 5(1): 25-35.
- TREIN, H. A. 2008. *A implicação antrópica na qualidade dos recursos hídricos subterrâneos da bacia hidrográfica do rio Urussanga – SC*. 149 f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Curso de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente. UNESP, Rio Claro, 2008.
- TUNDISI, J. G. & TUNDISI, T. M. 2011. *Limnology*. New York: Taylor & Francis. 888 p.
- TURNELL, M. V. & CRISPIM, M. C. B. 2014. Análise dos impactos socioambientais provocados pelo lançamento de efluentes industriais no Rio Gramame. *Gaia Scientia*, 2014: 2216-2228.
- VASCONCELOS, V. D. M. M. & SOUZA, C. F. 2011. Caracterização dos parâmetros de qualidade da água do manancial Utinga, Belém, PA, Brasil. *Ambi-Agua, Taubaté*, 6(2): 305-324.
- VOLPATO, S. B.; MENEZES, C. T. B. & SILVA, J. V. F. 2017. Environmental recovery of aquatic ecosystems in estuarine regions: studies applied for the treatment of contaminated sediments by acid mine drainage in Urussanga River Basin, in Santa Catarina, Brazil. *Engenharia sanitária e ambiental*, 22(2): 313-316.
- VON SPERLING, M. 2016. *Urban wastewater treatment in Brazil*. Technical Note n° idb-tn-970: Inter-American Development Bank. 101 p.
- ZHEN-GANG, J. 2008. *Hydrodynamics and water quality: modeling rivers, lakes, and estuaries*. New Jersey: John Wiley & Sons. 676 p.