

O ESTUÁRIO COMO UNIDADE DE GESTÃO COSTEIRA: UMA APLICAÇÃO NA BACIA DO RIO ITAJAÍ, SC, BRASIL

Ester W. LOITZENBAUER¹; Carlos André B. MENDES²

RESUMO

Nas áreas costeiras brasileiras, a gestão é definida em termos de unidades administrativas – o município – sem observar os sistemas físicos. Para incluir um critério físico, o presente artigo utiliza a definição de estuário dada por Kjerfve (1987), a zona de maré do rio, para definir uma zona de integração da gestão costeira e os recursos hídricos. O modelo HEC-RAS é usado para resolver as equações de Saint-Venant com a oscilação das marés astronômicas tomada como condição de contorno a jusante para dois afluentes do estuário do Rio Itajaí, SC, Brasil. A vazão afluente para o estuário foi variada: mínima, média mínima e média; dando estimativas da extensão da influência da maré (ou comprimento do estuário). A zona de integração foi definida com base no limite do estuário dado pelo fluxo mínimo. Ao comparar este resultado com áreas sob a responsabilidade administrativa dos municípios da região estuarina uma nova estrutura zonal é proposta para gestão integrada: a Zona Costeira (ZC) e a Zona de Influência Costeira (ZIC). A ZC continua sendo formada pelos municípios da zona costeira de acordo com a definição brasileira e a ZIC consiste nos municípios incluídos nos limites estuarinos pela modelagem menos municípios costeiros. A ZIC é a base da gestão integrada dos recursos hídricos e da zona costeira, formando uma zona tampão onde as políticas de recursos hídricos e das zonas costeiras devem interagir em conjunto. A aplicação da metodologia na bacia do Itajaí delimita o limite do estuário a 56,92 km a montante no Itajaí-Açu e 31,84 km no Itajaí Mirim. No Itajaí Mirim o resultado gerou apenas ZC, e nenhuma ZIC. A inclusão da linha de 50 km da costa poderia ser uma opção para incluir medidas adicionais na definição da ZIC.

Palavras-chave: Fronteiras de Gestão; Gestão Integrada de Recursos Hídricos e da Zona Costeira; HEC-RAS; Rio Itajaí.

¹ Doutora e Professora Adjunta; Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS); Campus Litoral Norte; Rua Machado de Assis, 1456, Osório, Rio Grande do Sul, Brasil; ester-loitzenbauer@uergs.edu.br, Telefone: +55 51 9271-6768.

² Pós-Doutor e Professor Adjunto; Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS); Caixa Postal 15029, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil; mendes@iph.ufrgs.br, Telefone: +55 51 3308-6743.

1. INTRODUÇÃO

A ação antrópica na zona costeira brasileira está crescendo, juntamente com intenso desenvolvimento urbano, portuário e da atividade industrial, e grande escala da exploração turística (MMA, 2008). No entanto, não só a ocupação e uso da costa a tem afetado. A ameaça do uso descontrolado da terra pode estar localizada a grandes distâncias da costa, na bacia de drenagem. Os problemas da zona costeira não podem ser resolvidos apenas com a gestão costeira, pois a costa é uma parte essencial da bacia hidrográfica (Monteiro e Marchand, 2009), interagindo funcionalmente através de fluxos de água, sedimentos e substâncias dissolvidas (Nicolodi *et al.*, 2009). Uma gestão costeira integrada eficaz requer que o problema a ser abordado seja definido dentro dos limites geográficos adequados que contenham ambas as causas e os efeitos (Boesch, 2001) e que aqueles correspondem às unidades físicas ou ecológicas da costa (Clark, 1996).

O Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC II) (Brasil, 1997) define a parte terrestre da zona costeira principalmente usando critérios administrativos, os limites municipais. Condições citadas para os municípios costeiros são: defrontantes com o mar; ou distantes até cinquenta quilômetros da linha da costa, que contemplem, em seu território, atividades ou infraestruturas de grande impacto ambiental na zona costeira. Essa definição ampla é complementada por *Relação de Municípios Abrangidos pela Faixa Terrestre da Zona Costeira*, um apêndice do PNGC II, onde há uma lista dos municípios que se encontram nesta zona para cada um dos Estados costeiros brasileiros. O mesmo apêndice, bem como o Decreto Federal nº 5.300 / 2004, estabelece a atualização anual da lista. No entanto, esta atualização não é feita regularmente e quase todos os Estados brasileiros têm dados desatualizados. A contaminação das águas costeiras e aumento da intrusão de salina são exemplos de problemas que podem surgir quando os limites da área de gerenciamento costeiro não incluem o funcionamento dos sistemas físicos, tais como bacias hidrográficas (Genz *et al.*, 2008; Loitzenbauer e Mendes, 2012).

Beatley *et al.* (2002) afirmam que a parte terrestre da zona costeira deve abranger toda a área onde o uso da terra afeta significativamente a costa e que poderia incluir toda a bacia hidrográfica que drena para águas costeiras. Bacia hidrográfica é uma área que drena as águas de precipitação para os cursos de água, seguindo os contornos físicos e características geográficas. O escoamento integra terra e água corrente na bacia, transferindo o impacto do uso do solo para as águas a jusante. Essa é a importância da abordagem da gestão de bacia - ter em conta as relações entre as terras altas e áreas a jusante e as complexidades ecológicas e hidrológicas (Beatley *et al.*, 2002). As diretivas brasileiras sobre Impacto Ambiental já observam isso, ao exigir que a área de influência de um projeto deve considerar, em todos os casos, a bacia hidrográfica em que ele está localizado (CONAMA, 1986).

O Sistema Nacional de Recursos Hídricos é institucionalmente separado do Gerenciamento Costeiro. A gestão dos recursos hídricos termina onde começa a influência do oceano, e então a gestão costeira começa. Não há consideração efetiva que a zona costeira é parte da bacia. A bacia é considerada como a área de drenagem de águas continentais, ou de água

doce (salinidade até 0,5 ‰). A gestão costeira observa a definição da zona costeira, usando os limites municipais para a gestão. Em seguida, um ambiente contínuo é fragmentado (Figura 1).

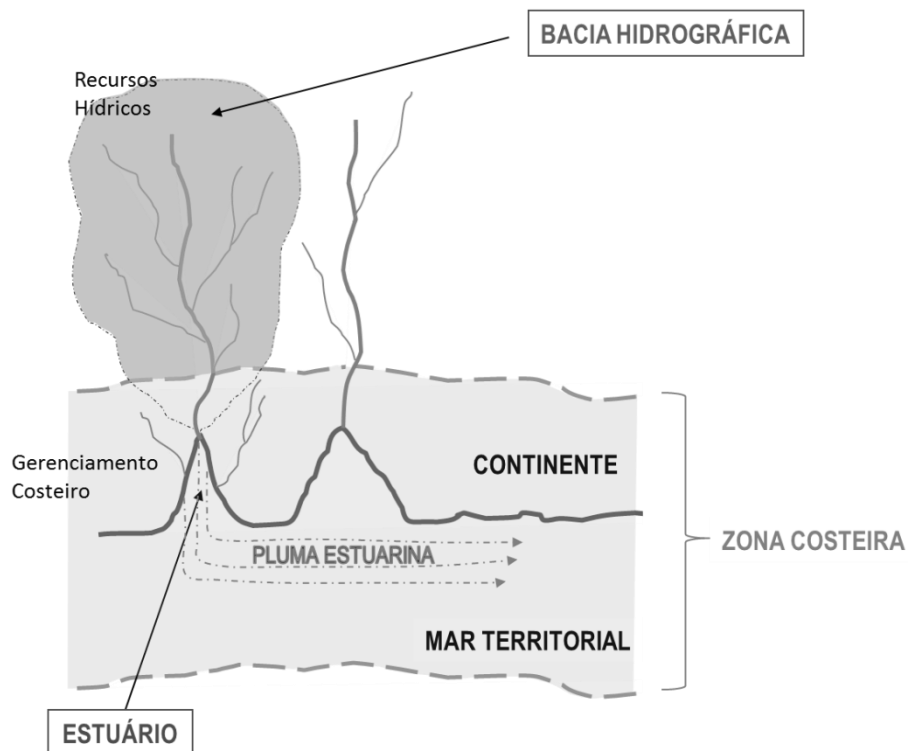


Figura 1. A divisão territorial da gestão costeira e de recursos hídricos do Brasil e a fragmentação ambiental.

Uma tentativa para a integração da gestão de recursos hídricos e da zona costeira no Brasil é a CTCOST (Câmara Técnica de Integração da Gestão das Bacias Hidrográficas e dos Sistemas Estuarinos e Zona Costeira), sob a égide do Conselho Nacional de Recursos Hídricos. A CTCOST foi criada em 2005, e desde então, alguns instrumentos de gestão de recursos hídricos têm sido analisados em relação à sua integração e aplicação na zona costeira (incluindo a definição de zonas para a gestão integrada). Contudo, não foi aprovada nenhuma resolução que estabeleça procedimentos a serem seguidos. Falta apoio institucional e político à CTCOST para que as propostas sejam implementadas e se tornem um padrão para a gestão integrada no Brasil. A definição de zonas de gestão integrada deve ser aprimorada de forma a incluir os processos físicos e ao mesmo tempo ser simples e fácil de aplicação.

Loitzenbauer e Mendes (2014) compararam as definições de zona costeira dos níveis nacional e estaduais para a Região Hidrográfica do Atlântico Sul, Brasil, mostrando que muitas vezes os Estados utilizam uma definição de zona costeira diferente da proposta a nível nacional. Alguns Estados, como Rio Grande do Sul e São Paulo, incluem o critério de bacia hidrográfica na definição da zona costeira. Outros, como Santa Catarina, além de não incluírem qualquer critério físico na definição da zona costeira, diminuem a zona costeira nacional. Por isso, os autores propõem que os Estados que não incluem critérios físicos em sua definição devem criar uma zona de influência costeira. Esta zona é baseada na

definição de estuário de Kjerfve (1987) - um critério físico - que considera parte da bacia a montante (Figura 2). Esta zona será o foco da gestão integrada dos recursos hídricos e da zona costeira, sendo localizada a montante da zona costeira (municípios costeiros do PNGC II).



Figura 2. Esquema das zonas de gestão integrada dos recursos hídricos e da zona costeira, adaptado de Kjerfve (1987) (Loitzenbauer e Mendes, 2014).

Este trabalho tem como objetivo aplicar a zona de influência costeira (ZIC), como forma de promover a gestão costeira integrada na bacia do rio Itajaí, Santa Catarina (SC), Brasil. Desde que há falta de integração no Brasil, o uso de ZIC é importante definir limites apropriados para a gestão integrada de recursos hídricos e da zona costeira, que incluem a relação de causa-efeito e critérios físicos. A definição de estuário (Kjerfve, 1987) é aplicada e o remanso devido à maré é simulado para os dois principais afluentes da bacia: Itajaí-Açu e Itajaí Mirim, utilizando o modelo hidrodinâmico HEC-RAS (U.S. Army Corps of Engineers, 2010). Posteriormente, são discutidas as implicações da ZIC para a gestão integrada.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 A bacia do Rio Itajaí

O rio Itajaí está localizado no sul do Brasil, a norte da região costeira do Estado de Santa Catarina (SC) (Figura 3). Possui área de drenagem de aproximadamente 15.500 km². A maior parte da vazão afluente ao estuário (90%) corresponde ao rio Itajaí-Açu, que flui através do Vale do Itajaí, uma região de grande importância económica (Schettini, 2002).

Para o período de 1934-1998, a média diária de descarga para o oceano do Rio Itajaí era $228 \pm 282 \text{ m}^3/\text{s}$, com um mínimo de $17 \text{ m}^3/\text{s}$ e um máximo de $5.390 \text{ m}^3/\text{s}$, que ocorreu durante o evento El Niño de 1984, um dos mais intensos na região (Schettini, 2002). O regime hidrológico varia consideravelmente ao longo do tempo, tanto por causa de seu clima (chuva é variável) e, principalmente, por causa de fatores fisiográficos (forma circular da bacia), cuja consequência é que os efeitos dos eventos de chuva são rapidamente sentidos no exutório da bacia.

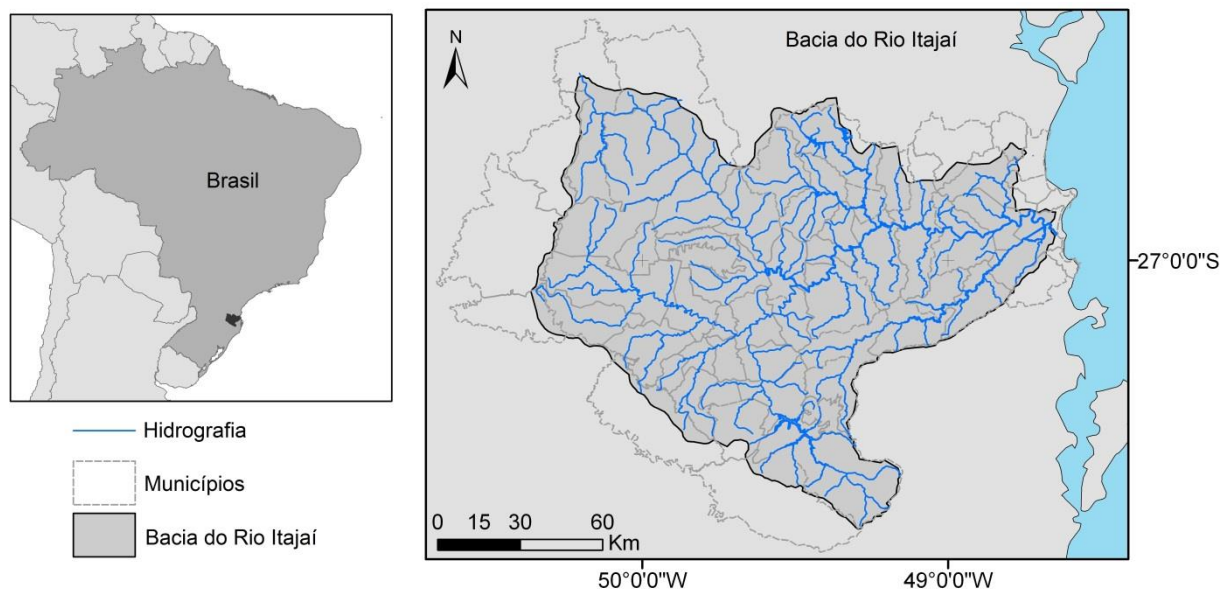


Figura 3. Bacia do Rio Itajaí, SC, Brasil.

No município de Itajaí, a cerca de 8 km da foz do rio, o rio Itajaí-Açu se une ao Itajaí Mirim (com cerca de 10% da vazão total) e a jusante deste ponto, o rio é chamado de Rio Itajaí. A foz no Oceano Atlântico encontra-se a $26^{\circ}54,7\text{S}$ e $048^{\circ}38,1\text{W}$, no limite entre os municípios de Itajaí e Navegantes. O estuário atravessa uma planície costeira em forma de funil começando na cidade de Blumenau e se abrindo para o oceano. Este trecho é essencialmente plano, com uma inclinação de 0,03%. O estuário se estende por cerca de 70 quilômetros com uma superfície de água estimada em 14 km^2 . Este limite do estuário foi definido com base no efeito de maré sentido na estação de medição de vazão de Blumenau (Schettini, 2002), e inclui o efeito de maré astronômica e meteorológica.

O regime de marés astronômicas é do tipo micro maré mista, com predomínio de maré semi-diurna. A altura média da maré na foz é 0,8 m, com um mínimo de 0,3 m durante quadratura e um máximo de 1,2 m durante a maré sizígia. Medeiros (2003) menciona que a propagação da onda de maré mantém o intervalo nos primeiros 7 km do estuário, e há uma defasagem entre os períodos de vazante e enchente de 25 minutos. No entanto, não foi encontrado nenhum estudo sobre a propagação da onda de maré no estuário, nem se é uma onda progressiva ou estacionária.

2.2 O modelo

Modelos hidrodinâmicos com base nas equações de Saint-Venant tem a capacidade de simular de forma precisa um amplo espectro de características de propagação. A derivação completa das equações de Saint-Venant permite simular a propagação de ondas cinemáticas a jusante, e continuam a ser válidos sob os efeitos de remanso a jusante, ou quando há a propagação de uma onda a montante, por exemplo, no caso de marés e tempestades.

Um modelo que resolve as equações completas de Saint-Venant é o HEC RAS 4.1.0 (US Army Corps of Engineers, 2010), o modelo hidrodinâmico usado para simular o efeito de remanso causado pela maré na foz do rio Itajaí. O HEC-RAS é um modelo bem conhecido que pode representar com sucesso o remanso (US Army Corps of Engineers, 2010). O módulo de vazão não permanente do HEC-RAS resolve as equações de Saint Venant de massa (1) e dinâmica (2) sob a forma de equações diferenciais parciais:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_1 = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q.V}{\partial x} + g.A.\left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f\right) = 0 \quad (2)$$

em que: Q - vazão do rio ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$);
 A - área de secção transversal molhada do rio (m^2);
 q_1 - entrada lateral ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$);
 z - nível da água no rio (m);
 g - aceleração da gravidade ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$);
 t - tempo (s);
 x - distância longitudinal ao longo do rio (m);
 Sf - declividade da linha de energia (m).

A declividade da linha de energia é representada pela equação de Manning (3):

$$S_f = \frac{Q.|Q|.n^2}{R^{\frac{4}{3}}.A^2} = \frac{Q.|Q|}{K_c^2} \quad (3)$$

em que: n - coeficiente de rugosidade Manning (adimensional);
 R - raio hidráulico da seção (razão entre área A e perímetro molhado P) (m^2);
 K_c - condutância hidráulica ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$);

O coeficiente de rugosidade Manning (n) representa o atrito ao longo do leito do rio e inclui o efeito da forma do canal e da vegetação. As equações acima são aproximadas e resolvidas

por um esquema implícito de diferenças finitas de quatro pontos. Mais detalhes sobre o esquema implícito e as aproximações podem ser encontrados em Fread (1993) e US Army Corps of Engineers (2010).

Para as condições iniciais, foram utilizados os dados geométricos (A e P) e os coeficientes de rugosidade (n) das secções transversais, e o fluxo inicial (Q) na secção a montante. A condição de contorno a montante foi o hidrograma de entrada e a condição de contorno a jusante foi à variação do nível devido à maré (h).

2.3 Aplicação do Modelo

Os dois principais afluentes do rio Itajaí: Itajaí-Açu e Itajaí Mirim foram simulados. Uma vez que não há dados de seção transversal e de vazão dos outros pequenos afluentes do rio, nenhum outro foi incluído nas simulações. Seções transversais, níveis e vazão foram obtidos a partir do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (ANA/HIDROWEB) (Figura 4). As seções transversais foram ajustadas pela elevação da estação, uma vez que estas não foram referenciadas ao nível do mar. Para aumentar o número de estações, algumas seções transversais foram interpoladas entre as estações e ajustadas pela elevação do ponto no mapa MNT (Modelo Numérico do Terreno).

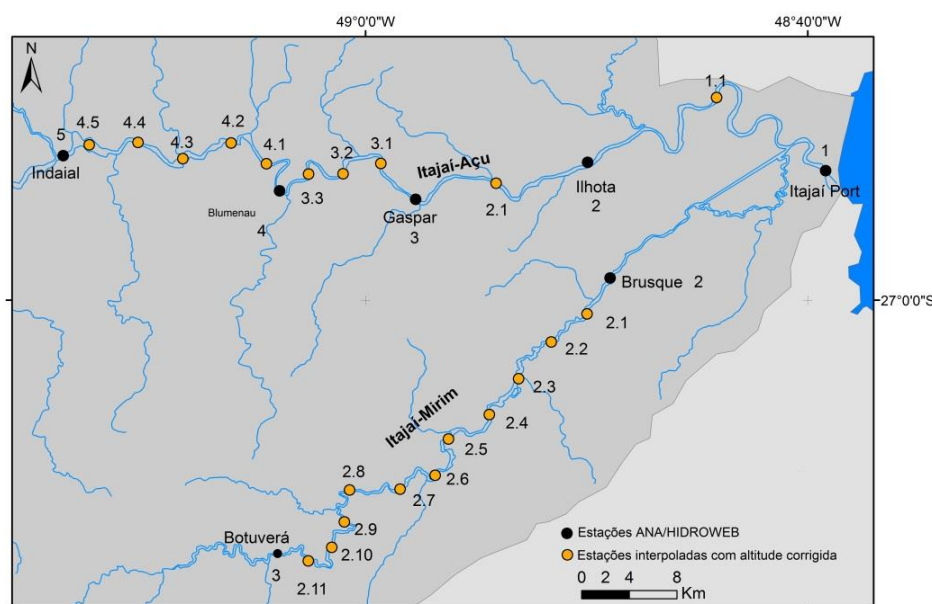


Figura 4. Os rios Itajaí-Açu e Itajaí Mirim com as estações utilizadas e os pontos interpolados com elevação ajustados pelo MNT.

A seção de Indaial para o rio Itajaí-Açu e a estação Botuverá para o Itajaí Mirim (Figura 4) foram usados como limites a montante com base em Schettini (2002). A simulação inclui três cenários de vazão a montante: mínima, média das mínimas mensais (média mínima) e mínima registrada. A vazão foi utilizada constante no tempo para melhor representar os efeitos de remanso. A estação de Indaial tem uma série de dados a partir de 01/01/1929 a

01/12/2004, com uma vazão média de 222,47 m³/s, a vazão mínima mensal de 87,62 m³/s e a vazão mínima de 12,53 m³/s. A estação de Botuverá tem uma série de dados a partir de 01/01/1978 até 01/08/1992, com vazão média de 18,71m³/s, vazão mínima mensal de 9,78 m³/s e vazão mínima de 3,48 m³/s.

Como condição de contorno a jusante, foi utilizada a variação do nível da água na foz do estuário devido a maré, obtida nas tabelas de marés horária calculados para o Porto de Itajaí durante 08 de janeiro e 15 de Janeiro de 2012, o período de maré sizígia, fornecidas pela Marinha do Brasil (2012). O período de maré de sizígia foi utilizado a fim de obter os maiores níveis decorrente das marés astronômicas no estuário.

O limite do remanso da maré (ou limite do estuário de Kjerfve) foi calculado como o ponto onde a oscilação da água entre os níveis mínimo e máximo simulados foi maior do que 0,1 m. Este ponto foi utilizado para a análise em Sistemas de Geoprocessamento (SIG). Os municípios situados a jusante desse ponto menos os municípios costeiros foram considerados como zona de influência costeira (ZIC). Posteriormente, esta área foi comparada aos municípios pertencentes à bacia de drenagem, os municípios costeiros e a faixa 50 km da costa mencionado no PNGC II.

2.4 Calibração do modelo

As simulações precisam de adequada escala espacial para evitar oscilações numéricas e erros na matriz solução causados por grandes intervalos de calculo. Assim, a escala espacial foi definida por interpolação entre as seções. Por tentativa e erro, a escala espacial foi diminuída até que a perda de energia entre duas estações foi pequena o suficiente para manter a estabilidade do modelo. Para Itajaí-Açu, foi utilizada uma estação a cada 1000 m entre a estação no Porto de Itajaí (1) e Gaspar (3), e cada 200m entre as estações de Gaspar (3) e Indaial (5). Para o Itajaí Mirim, foi utilizada uma estação a cada 1000 m entre a estação Porto de Itajaí (1) e estação interpolada (2.3), a cada 100m entre as estações (2.3) e (2.9) e cada 25m entre a estação (2.9) e Botuverá (3). O passo de tempo usado para ambos os afluentes foi 1h. O resultado é consistente com U.S. Army Corps of Engineers (2010), que afirma que nas partes mais íngremes dos rios exigem mais seções transversais.

O único parâmetro livre nas equações de Saint-Venant é o coeficiente de rugosidade de Manning (n). Como comumente adotada em aplicações de escala regional, este parâmetro foi assumido como longitudinalmente uniforme ao longo do trecho do rio simulado. A calibração do coeficiente foi feita apenas no canal principal, uma vez que foi simulado apenas vazões mínimas e médias. O processo foi realizado por tentativa e erro, visando maximizar o ajuste entre as vazões simuladas e níveis de água observados nas estações Botuverá (para Itajaí Mirim) e Indaial (para Itajaí-Açu). O processo de calibração foi feito para cada afluente e cada cenário de vazão, obtendo um n para cada cenário.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Calibração Modelo

No Rio Itajaí Mirim, o coeficiente n que melhor se encaixa para a vazão média (18,71 m³/s) foi 0,030. Nos outros dois cenários, o melhor ajuste seria com um n menor que 0,030 e esses valores não são representativos das características físicas da bacia. Com base nisso, optou-se por utilizar um n igual a 0,030 em todos os cenários para o afluente Itajaí Mirim.

No Itajaí-Açu, para ajustar as velocidades e profundidades com os respectivos dados de vazão para todos os cenários, o valor n deveria ser superior a 0,10, o que não tem sentido físico para a área de estudo com base em Dingman (2008). US Army Corps of Engineers (2010) adverte para não forçar uma calibração para se encaixar com valores irrealistas de n . Assim, adotou-se um valor de n de 0,05, já que o valor foi usado antes para rio Itajaí-Açu (Medeiros, 2003; Santos e Pinheiro, 2002).

A Tabela 1 mostra os resultados do processo de calibração comparando os valores modelados e observados.

Tabela 1. Resultado da calibração para os rios Itajaí-Açu e Itajaí Mirim, onde existem dados disponíveis e o coeficiente de Manning (n) obtido. NA=nível da água; sd=sem dados.

Parâmetro	Itajaí-Açu			Itajaí Mirim	
	Indaial	Blumenau	Gaspar	Botuverá	Brusque
Vazão média (m ³ .s ⁻¹)		222,47		18,71	
NA modelado (m)	3,19	3,63	4,10	1,63	1,43
NA observado (m)	3,98	3,95	3,96	1,64	1,37
Δh (m)	-0,79	-0,32	0,14	-0,01	0,06
n	0,050	0,050	0,050	0,030	0,030
Vazão média mínima (m ³ .s ⁻¹)		87,62		9,78	
NA modelado (m)	2,31	2,23	2,89	1,19	1,09
NA observado (m)	3,67	3,20	3,15	0,75	0,96
Δh (m)	-1,36	-0,97	-0,26	0,44	0,13
n	0,050	0,050	0,050	0,030	0,030
Vazão mínima (m ³ .s ⁻¹)		12,53		3,48	
NA modelado (m)	1,27	0,98	2,12	0,71	0,71
NA observado (m)	3,00	sd	sd	0,64	0,85
Δh (m)	-1,73	-	-	0,07	-0,14
n	0,050	0,050	0,050	0,030	0,030

3.2 Resultados do modelo

Para o rio Itajaí-Açu, a vazão média (222,47 m³/s) gerou 52,18 km de penetração, a média mínima (87,62 m³/s), 55,63 km e a mínima absoluta, 56,92 km. Para o rio Itajaí Mirim, a vazão média (18,71 m³/s) gerou 31,06 km de penetração, a média mínima (9,78 m³/s), 31,45 km e a mínima absoluta (3,48 m³/s), 31,84 km. Os perfis da linha de água da simulação são apresentados na Figura 5.

Pelos resultados das simulações, quanto maior a vazão do rio, menor a influência da maré. Por conseguinte, o amortecimento da onda de maré é maior na vazão máxima, que permite a menor penetração (Savenije, 2005). Isto está de acordo com os resultados relatados por diversos autores (incluindo Cai *et al.* (2014) e Unnikrishnan *et al.* (1997)) que identificam a vazão de água doce como o principal fator limitante da propagação da maré em um estuário.

O rio Itajaí Mirim ainda não está bem estudado e medidas de campo seriam necessárias para melhor validação do modelo. Neste estudo, nenhuma medida de campo foi feita, portanto os resultados para este afluente são inconclusivos. Mesmo assim, este artigo faz uma primeira análise da penetração das marés no rio e ele pode ser útil para justificar medidas de campo na área. A simulação mostrou que a vazão tem pouca influência sobre a penetração da maré, uma vez que as entradas simuladas produziram resultados semelhantes (menos de 800 m de diferença). Uma hipótese para explicar este fato pode ser a declividade do fundo. A grande maioria dos estudos sobre marés em estuários são focados em estuários aluviais onde não existe uma declividade de fundo significativa (Savenije, 2005), e os principais fatores que afetam a propagação da maré são convergência e atrito com o fundo (Savenije e Veling, 2005). No entanto, a inclinação pode ser um fator importante que limita o efeito das marés, impondo uma barreira física que amortece a onda de maré (Jay, 1991), embora haja escassez de estudos em estuários com topografia acidentada. Mais pesquisas sobre propagação da maré no estuário do rio Itajaí Açu são necessárias.

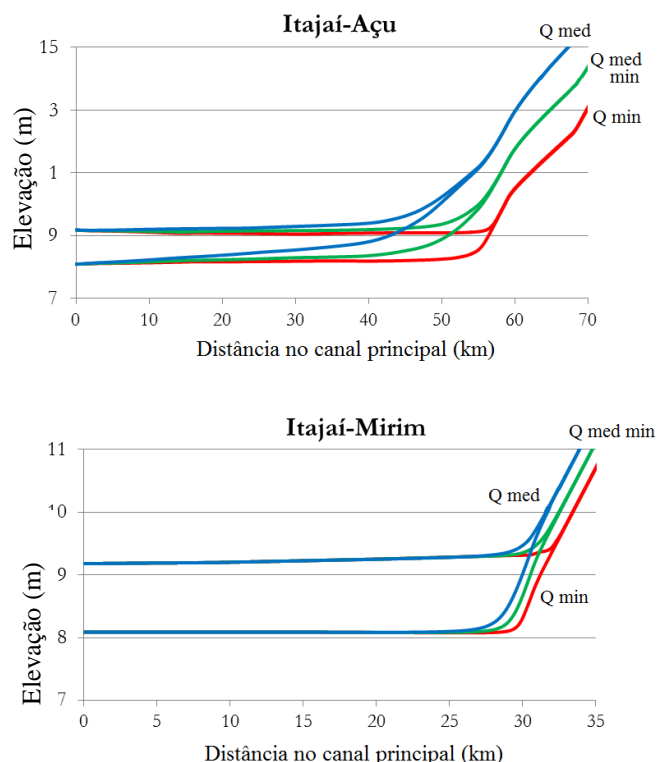


Figura 5. Níveis de água mínimo e máximo para as três vazões simuladas: média (Q med), média mínima (Q med min) e mínima (Q min) para os rios Itajaí-Açu e Itajaí Mirim.

3.3 Zona de Influência Costeira (ZIC)

Como a zona costeira terrestre no Brasil leva em conta a dinâmica física, a definição estuário de Kjerfve (1987) é um meio de observar as relações de causa-efeito entre o uso da terra na bacia hidrográfica e das condições ambientais costeiras através da delimitação da zona de influência costeira (ZIC). Esta zona terá uma estratégia de gestão diferente para fazer a sua gestão mais fácil. Não estando sujeita às implicações de ser parte da zona costeira (algumas legislações específicas), a ZIC é uma área fora da zona costeira, onde o uso de recursos hídricos (tanto em quantidade como em qualidade) na bacia deve considerar a relação de causa-efeito à zona costeira.

A ZIC consiste nos municípios que se encontram dentro dos limites do estuário (simulação de maré), excluindo os municípios considerados municípios costeiros pela legislação brasileira. A Figura 6 apresenta a ZIC, os municípios costeiros e a linha de 50 km da costa. Esta linha representa os municípios que poderiam ser parte da zona costeira se eles tiverem localizados em seu território atividades ou infraestrutura de grande impacto ambiental, de acordo com o PNGC II.

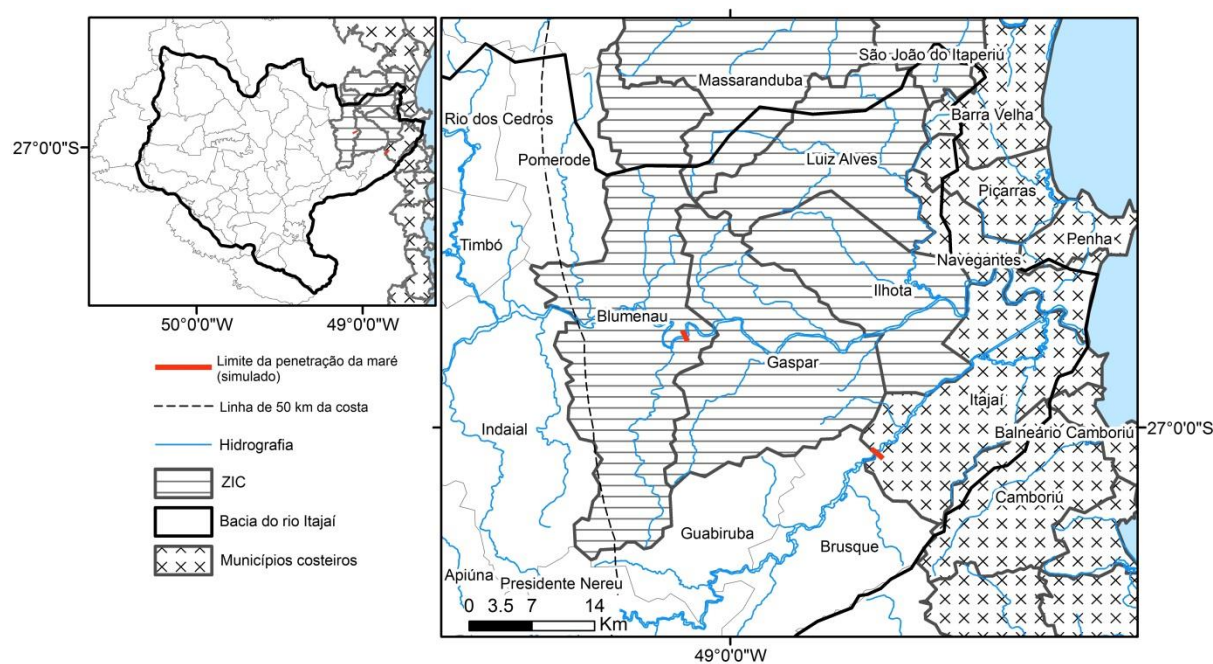


Figura 6. Delimitação da zona costeira (municípios costeiros) e da zona de influência costeira (ZIC), definida com base no limite estuário, para a bacia do rio Itajaí, SC, Brasil.

Na bacia em estudo, os municípios de Piçarras, Penha, Navegantes, Itajaí, Barra Velha, Balneário Camboriú e Camboriú pertencem à zona costeira. Se a influência da maré for utilizada para definir uma ZIC, os municípios de Massaranduba, São João do Itaperiú, Luiz Alves, Gaspar e Ilhota farão parte desta (Figura 6). Se for considerada a linha de 50 km paralela a costa os municípios de Brusque, Guabiruba (no ramo Itajaí Mirim), Blumenau e Pomerode serão parte da ZIC. Esta opção parece mais razoável na primeira vista, uma vez

que irá produzir um ZIC na sub-bacia do Itajaí Mirim - o que não seria gerado através da simulação.

3.4 Gestão da Zona de Influência Costeira (ZIC)

As atividades humanas nas bacias hidrográficas têm o potencial de danificar a zona costeira, e quanto mais perto estão da zona costeira, maior pode ser o dano. Por isso a importância da ZIC, uma zona de aplicação dos instrumentos de políticas de recursos hídricos que levam em conta os efeitos sobre a zona costeira. A montante da ZIC, a gestão dos recursos hídricos pode ser realizada de modo mais independente. A jusante, na ZC, a gestão costeira é tomada como de costume.

Empreendimentos dentro da ZIC terão que satisfazer critérios específicos em termos de seus efeitos sobre a zona costeira. Por exemplo, a captação de água ou descargas, através de subvenções ou de licenciamento, deve observar como ele vai afetar as águas estuarinas e costeiras. Um exemplo de sucesso dessa abordagem é o estado norte-americano do Texas, que desde 1985 tem exigido que qualquer uso que extraia água localizado até 200 milhas a montante da foz do rio (cerca de 322 quilômetros) da costa, deve satisfazer as condições de manutenção de vazão benéfico a qualquer baía ou estuário afetadas (Powell *et al.*, 2002). Extrapolando para a realidade brasileira, cada bacia deve definir esse espaço como função da definição de seu estuário ou a linha de 50 km da costa - a ZIC. A ZC e da ZIC deve ser definida no plano de bacia de cada bacia costeira. Em ambas as zonas, o uso da terra e da água deve levar em conta suas possíveis consequências para a intrusão salina e a qualidade das águas costeiras.

Se houver problemas de disponibilidade hídrica na bacia devido ao aumento da intrusão salina, a abstração máxima sustentável pode ser determinada a partir do modelo de balanço de sais, definindo um limite para a intrusão salina em função das retiradas de água. Um exemplo de tal modelo é dado por Loitzenbauer e Mendes (2012). O monitoramento periódico de salinidade é necessário para garantir que intrusão salina se mantenha dentro dos limites aceitáveis. Se a salinidade aumenta, a vazão disponível para uso pode diminuir proporcionalmente. A montante da ZIC a abordagem tradicional da gestão de recursos hídricos deve ser aplicada, ou seja, o uso vazão ambiental ($Q_{7,10}$ ou Q_{90}) para controlar as outorgas.

Na bacia do rio Itajaí, não há registros de que a salinidade tenha afetado a disponibilidade hídrica. No entanto, esta possibilidade não pode ser descartada. O plano de bacia deve, pelo menos, quantificar a probabilidade de ocorrência de aumento da intrusão salina no estuário. O plano de bacia atual não trata da bacia como um contínuo - apenas observa a existência de água salobra na bacia (águas estuarinas) através da classificação dos corpos de água.

Em termos gerais, os índices de qualidade da água na bacia do Itajaí diminuem com a distância do oceano, sendo que mais perto do oceano o pior é a qualidade (Pinheiro e Locatelli, 2006). O plano de bacia prevê medidas para controlar a qualidade da água, particularmente, o aumento da taxa de tratamento do esgoto doméstico. No entanto, há alta pressão humana na área estuarina, devido a Itajaí porto e cidade, e o plano de bacia não

considera os ecossistemas estuarinos e costeiros como os usuários de água, necessitando de boa qualidade. Para manter uma boa qualidade da água na zona costeira, os usuários localizados tanto na ZC como a montante da bacia devem ser pensados como potenciais poluidores.

No rio Itajaí Mirim, a definição de Kjerfve (1987) não permite definir uma ZIC, uma vez que a propagação da maré na bacia vai apenas até a ZC. Esse problema também se aplica a outras bacias brasileiras onde a amplitude de maré é menor do que a do estuário do rio Itajaí. A linha de 50 km da costa poderia ser útil para melhorar a definição ZIC nesses casos. Se a linha de 50 km for aplicada no Itajaí Mirim, os municípios de Brusque e Guabiruba farão parte da ZIC (Figura 6). A linha de 50 km também poderia ser aplicada para ZIC em bacias com regime de macro maré, por exemplo, na costa norte do Brasil. A propagação da maré nos casos irá criar uma ZIC de comprimento superior a 900 km, o que não teria sentido. No Itajaí-Açu, os limites da ZIC são razoáveis para incluir a relação de causa-efeito entre a bacia e a costa. Esses limites também estão muito perto da linha de 50 km.

As normas e requisitos legais para o estabelecimento da ZIC nas bacias costeiras do Brasil deve ser responsabilidade de CTCOST. Este trabalho vem como forma de auxiliar neste processo.

4. CONCLUSÕES

A metodologia apresentada tem-se provado útil para determinar os limites do estuário de Kjerfve (1987). Os resultados obtidos para o rio Itajaí-Açu mostraram-se de acordo com estudos anteriores, demonstrando que o modelo é representativo, embora medições de campo fossem torná-lo mais robusto. Os resultados do Itajaí Mirim são preliminares e as medições de campo seriam extremamente importantes para melhorar o conhecimento sobre a sub-bacia.

A parte terrestre da zona costeira brasileira não leva em conta os processos físicos nem a influência do uso do solo na bacia. Neste contexto, a definição do estuário (Kjerfve, 1987) mostrou ser parcialmente útil para a definição de uma zona de gestão integrada, onde as instituições responsáveis pela gestão de recursos hídricos e costeira podem atuar em colaboração. No rio Itajaí-Açu foi útil. No rio Itajaí Mirim a aplicação da metodologia não foi suficiente para definir uma ZIC. Neste caso, a área de integração será somente a ZC. Esta área poderia não ser suficiente para incluir todos os aspectos relevantes da ligação funcional entre a costa e na bacia. Nesse caso, a linha de 50 km da costa pode complementar os critérios do estuário. O uso da linha de 50 km da costa também poderia ser importante em bacias com regime de macro maré ou em locais com amplitude de maré menor do que na bacia do Itajaí.

A concessão de uso da água nas zonas costeiras deve ser padronizado para todas as bacias brasileiras. Conflitos existentes ao longo das diferentes esferas gestão, e o problema dos fluxos de entrada reduzidos de água doce para o estuário, pode ser gerenciado através da identificação da ZIC. As zonas propostas neste trabalho também podem ser úteis a nível

nacional brasileiro, especialmente no CTCOST, uma vez que definem as áreas de gestão integrada de uma forma mais simples e prática.

A metodologia tem a limitação de produzir uma ZIC que às vezes é muito pequena (caso do Itajaí Mirim) para incluir as relações de causa-efeito, ou, muito grande (bacias com amplitude de macro marés), o que torna a gestão muito complexa e cara. Propomos mesclar os resultados da modelagem com a linha de 50 km da costa para dar uma zona mais representativa e de fácil aplicação, sempre observando os limites das bacias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Beatley, T., Brower, D.J., Schwab, A.K. (2002). *An Introduction to Coastal Zone Management*. Island Press. Washington, EUA.

Brasil. (1997). *Resolução CIRM Nº 005. Aprova o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro II (PNGC II)*.

<http://www.dern.ufes.br/gc/Plano%20Nacional%20de%20Gerenciamento%20Costeiro%20II.pdf> (acedido em 7 de fevereiro de 2014).

Boesch D.F. (2001). Chesapeake Bay and Mississippi Delta. In *Science and Integrated Coastal Management*. Ed. B.V. Bodungen and R.K. Tuener, Dahlen University Press.

Cai, H.; Savenije, H.H.G.; Jiang, C. (2014). Analytical approach for predicting fresh water discharge in an estuary on tidal water level observations. *Hydrology and Earth System Sciences* 18, 4153-4168.

CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente. (1986). *Resolução Conama nº 001. Provê critérios básicos e diretrizes para a avaliação de impacto ambiental*. <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res0186.html> (acedido em 7 de fevereiro de 2014).

Clark, J.R. (1996). *Coastal Zone Management Handbook*. Lewis Publishers. New York, NY, EUA.

Dingman, S.L. (2008). *Physical Hydrology*. 2nd Ed. Waveland Press, Inc. Long Grove, EUA.

Fread D.L. (1993). Flow Routing. In *Handbook of Hydrology*, Ed. D.R. Maidment. McGraw-Hill, Inc., EUA.

Jay, D. A. (1991). Green's law revisited: Tidal long-wave propagation in channels with strong topography, *Journal of Geophysical Research* 96(C11), 20585-20598.

Genz, F., Lessa, G.C., Cirano, M. (2008). Vazão Mínima para Estuários: Um estudo de cano no Rio Paraguaçu/BA. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 13(3), 73-82.

Kjerfve B. (1987). Estuarine Geomorfology and Physical Oceanography. In *Estuarine Ecology*. Ed. J.W. Day Jr., C.H.A.S. Hall, W.M. Kemp, A. Yáñez-Aranciba. Wiley, New York.

Loitzenbauer, E., Mendes, C.A.B. (2012). Salinity dynamics as a tool for water resources management in coastal zones: An application in the Tramandaí River basin, southern Brazil. *Ocean and Coastal Management* 55, 52-62.

Loitzenbauer, E., Mendes, C.A.B. (2014). A faixa terrestre da zona costeira e os recursos hídricos na Região Hidrográfica do Atlântico Sul. *Revista de Gestão Costeira Integrada* 14(1), 81-84.

Marinha do Brasil. (2012). *Tábua de Maré*. <http://www.mar.mil.br/dhn/chm/tabuas/index.htm>. (acedido em 13 de janeiro de 2014).

Medeiros, A.D. (2003). *A influência da maré e batimetria sobre a intrusão salina no estuário do rio Itajaí-Açu*. Dissertação de Mestrado em Engenharia. COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Rio de Janeiro.

MMA - Ministério do Meio Ambiente. (2008). *Macrodiagnóstico da zona costeira e marinha do Brasil*. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, Brasil.

Monteiro, P.M.S., Marchand, M. (2009). *Catchment2Coast: A systems approach to coupled river-coastal ecosystem science and management*. Deltares Select Series Vol. 2. IOS Press, Amsterdam, the Netherlands.

Nicolodi, J.L., Zamboni, A., Barroso, G.F. (2009). Gestão Integrada de Bacias Hidrográficas e Zonas Costeiras no Brasil: Implicações para a Região Hidrográfica da Bacia do Rio Amazonas. *Revista de Gestão Costeira Integrada* 9(2): 9-32.

Pinheiro, A., Locatelli, N. D. (2006). Evoluções espaciais e temporais da qualidade da água dos mananciais superficiais na bacia do Itajaí. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 11(3), 71-77.

Powell, G.L., Matsumoto, J., Brock, D.A. (2002). Methods for Determining minimum freshwater inflow needs of Texas Bays and Estuaries. *Estuaries* 25(6B), 1262-1274.

Santos, G.F., Pinheiro, A. (2002). Transformações geomorfológicas e fluviais devido à canalização do rio Itajaí-Açu entre os municípios de Blumenau e Gaspar (SC). *Revista Brasileira de Geomorfologia* 3(1), 1-9.

Schettini, C. A. (2002). Caracterização física do estuário do rio Itajaí-Açu. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 7(1), 123-142.

Savenije, H.H.G. (2005). *Salinity and Tides in Alluvial Estuaries*. Elsevier, Amsterdam.

Savenije, H.H.G., Veling, E. J. M. (2005). Relation between tidal damping and wave celerity in estuaries. *Journal of Geophysical Research* 110 (C04007).

U.S. Army Corp of Engineers. (2010). *HEC-RAS River Analysis System. User's Manual*. http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_4.1_Users_Manual.pdf (acedido em 10 de março de 2014).

Unnikrishnan, A.S., Shetye, S.R., Gouveia, A.D. (1997). Tidal Propagation in the Mandovi-Zuari Estuarine Network, West Coast of India: Impact of freshwater Influx. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 45, 737-744.