

## Calibração e Validação do Módulo de Correntologia do Modelo IPH-A para a Laguna dos Patos (RS / Brasil)

Rosane Barbosa Lopes Cavalcante\*, Carlos André Bulhões Mendes\*

rosanecavalcante@gmail.com; mendes@iph.ufrgs.br

Recebido: 15/08/13 - revisado: 23/11/13 - aceito: 24/03/14

---

### RESUMO

Na Laguna dos Patos, a exemplo do usualmente observado em lagoas costeiras, o crescimento populacional e o desenvolvimento econômico no seu entorno têm levantado importantes questões relativas aos impactos negativos dessas atividades no corpo hídrico. Um bom conhecimento dos processos hidrodinâmicos envolvidos é essencial para responder estas questões e melhorar a gestão dos recursos hídricos locais. Neste contexto, este trabalho apresenta uma análise de sensibilidade, a calibração e validação do módulo hidrodinâmico do modelo IPH-A na Laguna dos Patos, a fim de que o mesmo possa ser posteriormente utilizado como ferramenta de auxílio à gestão integrada deste corpo d'água. A variação de nível dos postos fluviométricos disponíveis para a Laguna dos Patos e Lago Guaíba foram representadas satisfatoriamente, exceto para a região estuarina, onde os parâmetros calibrados devem ser utilizados com cautela. Combinado a fácil utilização do modelo IPH-A e disponibilidade dos dados necessários, o modelo apresenta-se como uma importante ferramenta a ser utilizada na gestão deste corpo hídrico. Como continuação deste trabalho será analisada, a simulação de dispersão de poluentes pelo modelo, de modo a integrar os aspectos quantitativos e qualitativos.

**Palavras-chave:** Modelo hidrodinâmico; Laguna dos Patos; Análise de sensibilidade.

---

### INTRODUÇÃO

Os modelos matemáticos e programas computacionais que permitem a realização de estudos específicos são uma importante ferramenta técnica na avaliação do estado de um corpo hídrico e no auxílio à tomada de decisões.

Os modelos de qualidade de água representam o fluxo hidrodinâmico do corpo hídrico analisado e o movimento e transformação dos parâmetros de qualidade de água analisados. Estes modelos permitem associar as fontes de poluição, a hidrodinâmica do sistema e o estado final do corpo receptor, a exemplo dos trabalhos realizados por Santos et al. (2008), Niencheski e Baumgarten (2007), Janeiro et al. (2008) e Marques et al. (2006). Entre as razões que justificam a elaboração e uso destes modelos, Pereira (2003) cita: compreender melhor o destino e transporte de substâncias químicas; prognosticar condições futuras sobre vários cenários que recebem cargas ou alternativas de ações gerenciais; e preencher as lacunas de informações disponíveis e onde os dados reais são de difícil medição.

Há centenas de modelos matemáticos de corpos d'água. Bahadur et al. (2013) analisaram 65 destes modelos para análise de contaminação de águas e os classificaram de acordo com o ambiente modelado, o grau de análise, disponibilidade, variabilidade temporal, resolução espacial, processos simulados e suporte. Em adição a estes, há também modelos de qualidade de água desenvolvidos no Brasil, a exemplo do SisBahia (<http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/>); IPH-Eco (<https://sites.google.com/site/iphecomodel/home>); e o modelo IPH-A, utilizado no presente estudo.

As lagoas costeiras são amplamente reconhecidas como sendo particularmente vulneráveis à eutrofização e às mudanças ambientais futuras (LLORET et al., 2008), agravadas pela alta taxa de crescimento populacional e desenvolvimento econômico observado no seu entorno.

Na Laguna dos Patos, situada no sul do Brasil e considerada a maior lagoa costeira estrangulada do mundo (KJERFVE, 1986), importantes questões relativas aos usos benéficos, redução dos impactos negativos de atividades humanas e potenciais mudanças na laguna necessitam de um bom conhecimento dos processos hidrodinâmicos para serem respondidas (FERNANDES, 2001).

---

\*Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH / UFRGS)

Diversos trabalhos avaliaram a circulação na Laguna dos Patos utilizando diferentes modelos. Entretanto, alguns dos modelos utilizados não ofereciam a possibilidade de facilmente incorporar na hidrodinâmica modelos de qualidade da água (FERNANDES, 2001). Ademais, algumas regiões da laguna foram pouco estudadas, a exemplo da região nordeste da lagoa e sua ligação com a Lagoa do Casamento. A gestão integrada dessa região em particular será objeto de estudo de uma etapa posterior deste trabalho.

Neste contexto, este trabalho apresenta uma análise de sensibilidade, a calibração e validação do módulo hidrodinâmico do modelo IPH-A na Laguna dos Patos, a fim de que o mesmo possa ser posteriormente utilizado como ferramenta de auxílio à gestão integrada deste corpo d'água. Algumas das condições de contorno usualmente empregadas na simulação da hidrodinâmica da laguna também foram avaliadas: a consideração ou não da contribuição do rio Camaquã e diferentes condições na boca do estuário.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Laguna dos Patos

A Laguna dos Patos, maior lagoa costeira do Brasil com aproximadamente 10360 km<sup>2</sup>, está localizada no leste do Rio Grande do Sul, entre 30° e 32° de latitude sul (Figura 1).

Esta laguna é responsável pela drenagem hídrica de quase 200000 km<sup>2</sup>, com uma população de aproximadamente sete milhões de habitantes. O principal tributário é o lago Guaíba (alimentado pelo sistema fluvial Jacuí-Taquari), responsável por aproximadamente 58% do volume de água que aporta ao sistema, seguido do rio Camaquã (13,2%) e do canal de São Gonçalo que conecta a Laguna dos Patos com a Lagoa Mirim (28,8%) (BORDAS et al., 1984 apud HARTMANN; SCHETINI, 1991). Considerando estes três tributários, a descarga média de água doce da Lagoa dos Patos atinge 2.400 m<sup>3</sup>/s (VAZ et al., 2006).

A laguna possui eixo principal no sentido nordeste-sudoeste, alinhado a costa, com 250 km de extensão e largura média de 40 km. A conexão ao oceano Atlântico é por meio de um único e permanente canal, o canal de Rio Grande. A topografia de fundo é suave, com profundidade média de 5 m e margens rasas, estando as regiões mais profundas confinadas às zonas centrais (Figura 2).

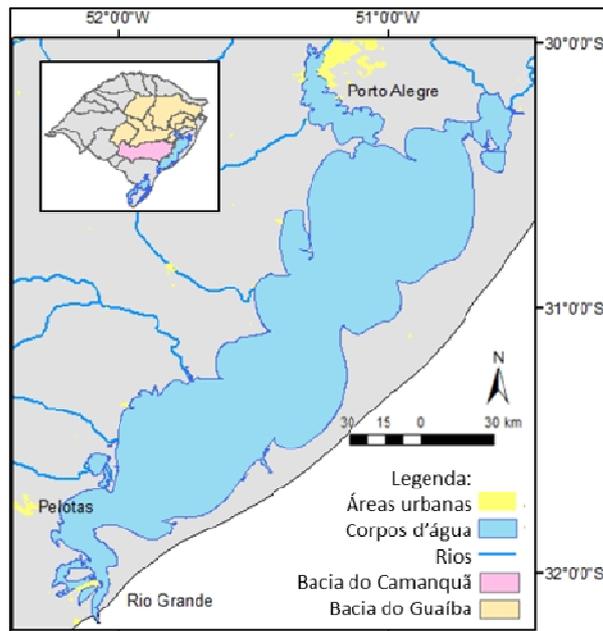


Figura 1 - Localização da Laguna dos Patos e bacia de contribuição dos principais afluentes.

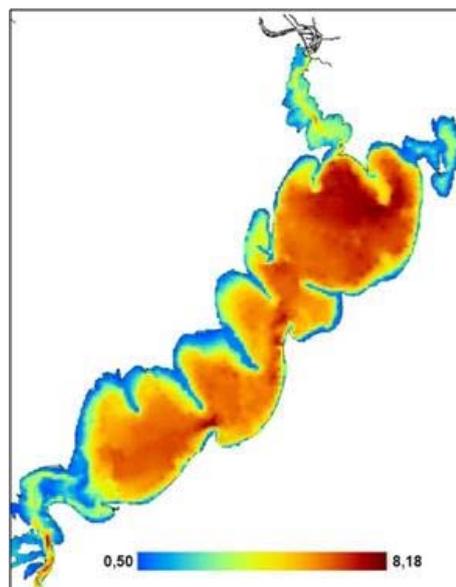


Figura 2 - Batimetria (em metros) da Laguna dos Patos inserida no modelo IPH-A.

A necessidade de estudos nesta região é, em parte, gerada pelo alto interesse ambiental e econômico (turística, de navegação, pesca artesanal e para irrigação) e pelos efeitos em sua maioria negativos da interferência humana. A laguna recebe significativas entradas antropogênicas resultantes do grande aumento da população, industrialização, e

das grandes áreas plantadas com arroz e soja na bacia hidrográfica.

Diversos trabalhos avaliaram a circulação na Lagoa dos Patos utilizando diferentes modelos numéricos bi e tridimensionais, diferentes domínios, períodos ou cenários específicos de análise, a exemplo de Möller et al. (1996), Möller et al. (2001), Castelão e Möller (2003), Fernandes et al. (2002), Pereira (2003), Castelão e Möller (2006), e Janeiro et al. (2008).

Os resultados destes trabalhos indicam que durante a maior parte do ano a circulação é conduzida pelo vento, enquanto as entradas dos rios desempenham o papel principal durante o pico de cheia anual no final do inverno. A maré e as oscilações de longo período originadas no oceano são filtradas na região do canal de acesso.

O efeito do vento é bastante importante, devido à grande dimensão e à orientação do eixo longitudinal da lagoa (nordeste-sudoeste), coincidente com a direção predominante dos ventos. O vento nordeste, gera um transporte de águas em direção ao sul, o que causa uma depressão no nível do corpo lagunar na parte norte e uma elevação na parte sul, gerando um gradiente de pressão em direção ao oceano e favorecendo a saída da água da lagoa. A resposta à ação do vento sudoeste é oposta à encontrada sob a ação do vento nordeste.

No sentido transversal, o balanço é aproximadamente geostrófico, com desvios nas regiões rasas onde o estresse de fundo traz uma contribuição significativa (CASTELÃO e MÖLLER, 2006).

### O sistema IPH-A

O sistema IPH-A permite a simulação do escoamento e transporte de massa para corpos d'água rasos, a exemplo da área de estudo. Os dados necessários são usualmente disponíveis, é de fácil utilização e conta com uma interface amigável que permite a visualização dos principais resultados de forma pontual ou distribuída no corpo hídrico, apresentando bom potencial para utilização como auxílio à decisão.

O modelo foi sendo aperfeiçoado nos estudos realizados em estuários e lagoas: lago Guaíba, lagoa dos Patos, rio da Prata, rio Uruguai e lagoa Setúbal (Argentina) (BORCHE, 1996). O modelo foi utilizado com sucesso em diversos estudos em corpos d'água rasos, a exemplo da: lagoa Itapeva (LOPARDO, 2002), lago Guaíba (PAZ et al., 2005), banhado do Taim/RS (PAZ et al.; 2003) e açude de Apipucos/PE (ARAÚJO e TAVARES, 2001). Ressalta-se que os aspectos de estratificação e salinidade não

são representados pelo modelo. Anão representação desses processos não compromete a presente aplicação na Lagoa dos Patos, visto que o enfoque é a circulação no corpo principal da lagoa, predominantemente conduzida pelo vento e vazão afluente.

Apesar das limitações do sistema, os bons resultados obtidos na modelagem de outros corpos d'água rasos, a experiência do modelador, o fato de já existir uma aplicação do sistema para a área de estudo e o sistema permitir análises que serão úteis em etapas posteriores do trabalho foram determinantes na escolha do modelo.

No presente estudo, o módulo hidrodinâmico do modelo foi calibrado e validado para a Lagoa dos Patos, maior lagoa costeira do Brasil.

### Módulo hidrodinâmico

O modelo é bidimensional horizontal, com malha quadrada, aplicável em simulações em que as dimensões horizontais sejam fortemente predominantes sobre as dimensões verticais e em que se possa desprezar a estratificação, a exemplo do que normalmente é verificado em lagoas costeiras rasas.

O método utilizado para a resolução numérica das equações que definem o escoamento é baseado na técnica de diferenças finitas, semi-implícita de direções alternadas. Embora existam métodos mais robustos, valores de intervalo de tempo e tamanho de malha que resultem em baixos números de Courant tornam pouco provável a ocorrência de perturbações significativas com origem na discretização numérica para este esquema (SILVEIRA, 1986), apresentando-se como uma boa opção para simulação bidimensional de corpos d'água rasos. Uma descrição do esquema e discretização numérica do modelo podem ser vistas em Borche (1996). As equações da continuidade e dinâmica integradas na vertical consideram a perda de carga junto ao fundo, a ação do vento na superfície, a força de Coriolis e a difusão turbulenta:

$$\frac{\partial h'}{\partial t} + \frac{\partial HU}{\partial x} + \frac{\partial HV}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - \Omega V + g \frac{\partial h'}{\partial x} \\ + \frac{gU\sqrt{U^2 + V^2}}{C_h^2 H} - \frac{\tau_{sx}}{\rho H} - \epsilon \nabla^2 U \\ = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + \Omega U + g \frac{\partial h'}{\partial y} + \frac{gV\sqrt{U^2 + V^2}}{C_h^2 H} - \frac{\tau_{sy}}{\rho H} - \epsilon \nabla^2 V = 0 \quad (3)$$

Onde  $U$  e  $V$  = componentes do vetor velocidade nas direções  $x$  e  $y$ ;  $h'$  = nível medido a partir de um plano de referência fixo;  $H$  = profundidade total;  $\Omega$  = aceleração de coriolis;  $\tau_{sx}$  e  $\tau_{sy}$  = componentes da tensão de cisalhamento na superfície;  $C_h$  = coeficiente de Chezy;  $\epsilon$  = coeficiente de dissipação turbulenta. O coeficiente de Chezy é utilizado para cálculo do coeficiente de atrito do fundo,  $cf$ :  $cf = g/C_h$ . A tensão de cisalhamento na superfície é considerada proporcional ao quadrado da velocidade do vento e ao coeficiente de atrito do vento (coeficiente adimensional de arraste do vento multiplicado pela densidade relativa do ar).

Para aplicação do modelo de circulação são necessários os seguintes dados de entrada:

- configuração geométrica: contorno e batimetria;
- condições de contorno para cada simulação: níveis, velocidades ou vazões nas fronteiras abertas;
- velocidade e direção do vento;
- dados do modelo: intervalo de tempo de cálculo, tamanho da malha, nível inicial e latitude;
- parâmetros de ajuste do modelo: coeficiente de Chézy, usado no cálculo da perda de carga junto ao fundo; coeficiente de atrito do vento; e coeficiente de viscosidade turbulenta.

### Batimetria e contorno

A batimetria e contorno foram obtidos do modelo da Laguna dos Patos e Lago Guaíba desenvolvido por Borche (material não publicado). Os dados batimétricos foram obtidos através da digitalização da carta náutica de número 2140 da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (DHN, 1968 e atualizações). Exceto por uma recente alteração na boca do estuário, com consequências na circulação na região costeira adjacente (FERNANDES et al., 2002), nenhuma alteração importante foi encontrada nas atualizações do DHN ou em sites de navegação. Também não há registro do crescimento de bancos arenosos (DILLENBURG e TOLDO JR., 1990, apud, TOLDO JR. et al., 2006),

que exercem expressiva influência na circulação do corpo lagunar, nem foi observado crescimento dos pontais arenosos em comparação com imagens de satélite recentes. Visto que a maior parte do topo dos bancos arenosos está a uma profundidade de 1m (TOLDO JR., 1991), adotou-se uma profundidade média de 0,5m para as células nesta situação.

A grade utilizada é quadrada com lado de 1 km. Para melhor enquadramento de todo o sistema, os eixos do sistema de coordenadas foram rotacionados num ângulo de sete graus no sentido horário. Embora grades ortogonais estruturadas não sejam suficientemente flexíveis para ajustar contornos complexos e usualmente resulte em um número de elementos maior quando comparado com grades não estruturadas, a adoção da malha de 1 km rotacionada apresentou boa adequação ao contorno do sistema, boa estabilidade com o intervalo de tempo adotado e baixo tempo de simulação. Um acoplamento pode ser utilizado para refinamentos locais em regiões específicas de interesse.

### Condições de contorno

Como condições de contorno foram utilizadas o nível d'água na entrada do Lago Guaíba (estação fluviométrica Ilha da Pintada) em todas as simulações e a vazão do rio Camaquã (estação fluviométrica Passo do Mendonça), a fim de representar as principais vazões afluentes a Laguna dos Patos. Quanto à condição de contorno de jusante, foram testadas na fase de análise de sensibilidade e calibração do modelo as seguintes condições:

- Nível d'água no exutório do estuário, adotado como igual ao nível medido no posto fluviométrico Rio Grande. Este posto está localizado a aproximadamente 20 km da entrada do canal, o que pode introduzir alguma distorção. Entretanto, conforme ressaltado por Moller et al. (2001), esta consideração permite a análise do efeito do vento remoto. Para esta condição, o modelo foi simulado com e sem a contribuição do rio Camaquã, a fim de analisar sua importância para a circulação lagunar. A relevância
- Nível d'água no posto fluviométrico Rio Grande, não representando o trecho final do estuário.
- Vazão no exutório do estuário, adotado como igual à vazão medida no posto fluviométrico Rio Grande.

- o Vazão no posto fluviométrico Rio Grande, não representando o trecho final do estuário.

A influência do canal de São Gonçalo, cujo fluxo é controlado pela operação da barragem do Centurião não foi avaliada no presente estudo, podendo ter influência no nível médio da laguna e na circulação estuarina, principalmente.

Os dados utilizados foram obtidos no Sistema de Informações Hidrológicas Hidroweb (<http://www.hidroweb.com.br>) da Agência Nacional de Águas (ANA), no qual a área de estudo está incluída na sub-bacia 87. A ANA é a responsável por todos os postos citados, enquanto a CPRM é a operadora. Demais informações dos postos fluviométricos são apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1 - Postos fluviométricos disponíveis.**

Código	Nome	Rio	Latitude; Longitude
87905000	Passo do Mendonça	Rio Camaquã	-31:00:43; -52:03:09
87980000	Rio Grande / Regatas	Lagoa dos Patos	-32:01:48; -52:04:40
87450005	Ilha da Pintada	Rio Guaíba	-30:01:50; -51:15:07

### Velocidade e direção de vento

As velocidades e direções dos ventos foram obtidas do Instituto Nacional de Meteorologia para o posto Rio Grande (código 83995, latitude -32,03°, longitude -52,11°), com dados medidos às 0, 12 e 18 horas. A fim de compatibilizar com o intervalo de tempo de cálculo adotado, foi considerada uma variação linear entre cada dois valores medidos. A mesma rotação aplicada ao contorno e batimetria foi aplicada aos valores de vento utilizados para manter a compatibilidade entre os dados. Não foi adotado fator de aumento da tensão de cisalhamento do vento na superfície da lagoa.

### Parâmetros de simulação e condições iniciais

As condições iniciais consideradas correspondem à velocidade igual a zero e nível d'água constante ao longo do sistema. O modelo foi integrado com passos de tempo de 180 segundos, obtendo um número de Courant de 1,78, tornando pouco provável a ocorrência de perturbações signifi-

ficativas com origem na discretização numérica para o esquema de integração por caminhos alternados de Leendertse (SILVEIRA, 1986). Os valores de vento, nível e vazão medidos foram interpolados linearmente para corresponder ao intervalo de tempo de cálculo.

### Análise de sensibilidade, calibração e validação

A análise de sensibilidade dos parâmetros e calibração do modelo foram realizadas para o período de dezembro de 2010 a dezembro de 2011. Embora o modelo tenha passado a representar bem o comportamento do sistema em menos de uma semana, o mês de dezembro de 2010 foi considerado como período de ajuste e não foi utilizado na análise dos resultados.

Os valores de variação dos parâmetros adotados para análise de sensibilidade e calibração do modelo foram definidos com base nos valores observados na literatura (Tabela 2). A Tabela 3 apresenta um resumo dos valores utilizados.

**Tabela 2 - Valores dos parâmetros de ajuste do modelo encontrados na literatura.**

Coeficiente de viscosidade turbulenta (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )	30	Pereira (2003)	L. dos Patos.
	10	Fernandes(2001); Lopardo (2002); Paz et al. (2003).	L. dos Patos; Laguna Itapeva; Banhado do Taim
5 a 15	White (1974)*	Literatura	
Coeficiente de atrito do vento (.10 <sup>-6</sup> )	1,5 a 4	Borche (1996)	Literatura
	1 a 4	Paz et al.(2005)	Lago Guaíba
	2,5	Paz et al.(2005)	Lago Guaíba
	4,2	Lopardo (2002)	L. dos Patos
	3	Paz et al. (2003)	Banhado do Taim
2 a 4	Wu (1982)*	Literatura	
Rugosidade de fundo (Chezy) (m <sup>1/2</sup> .s <sup>-1</sup> )	60	Lopardo (2002)	L. dos Patos
	50	Fernandes (2001)	L. dos Patos
	50 a 70	Chow (1959)*	Literatura

\*apud Fragozo Jr. (2009)

O coeficiente de Chezy foi fornecido diretamente e considerado constante e uniforme para toda a lagoa. É sabido que, em princípio, estes valores apresentam variações. O uso de valores uniformes, entretanto, é bastante comum em modelos numéricos e apresentam bons resultados, a exemplo

das aplicações dos trabalhos apresentados na Tabela 2. Por exemplo, para a região estuarina da laguna, Fernandes (2001) observou que embora não essencial, a consideração da variação do atrito de fundo com o sedimento de fundo melhorou a reprodução dos dados observados pelo modelo. Devido à baixa sensibilidade do modelo às variações do coeficiente de viscosidade turbulenta dentro dos limites usualmente utilizados, conforme apresentado posteriormente, a consideração de variação deste parâmetro provavelmente não alteraria significativamente os resultados obtidos.

**Tabela 3 - Valores estabelecidos para a análise de sensibilidade do modelo.**

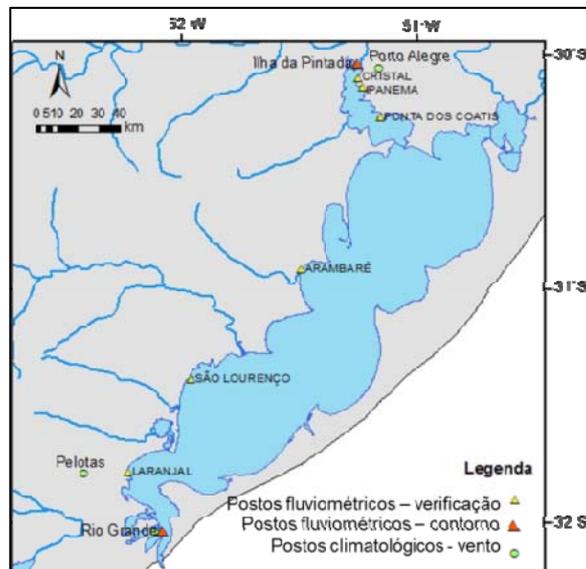
Parâmetro	Valor de referência	Variação
Elevação inicial (m)	0,55	0,55
Intervalo de tempo (s)	180	180
Coefficiente de Chezy (m <sup>1/2</sup> .s <sup>-1</sup> )	60	50, 60 e 70
Atrito do vento (.10 <sup>6</sup> )	3,5	2,5, 3,0, 3,5 e 4
Viscosidade (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )	10	5, 10, 20 e 30
Período de ajuste	Dez. 2010	
Período de análise	2011	

**Tabela 4 - Postos fluviométricos no Guaíba (1) e na Laguna dos Patos (2) que serão utilizados na verificação do modelo hidrodinâmico.**

Código	Nome	Latitude	Longitude
87460007	Cristal (1)	-30:05:32	-51:15:01
87460120	Ipanema (1)	-30:08:02	-51:14:02
87500020	Ponta os Coatis (1)	-30:15:32	-51:09:20
87540000	Arambaré (2)	-30:54:23	-51:29:32
87921000	São Lourenço (2)	-31:22:39	-51:57:35
87955000	Laranjal (2)	-31:46:20	-52:13:31

Para a calibração, os resultados do modelo foram comparados com os níveis fluviométricos dos postos no Guaíba e na Laguna dos Patos com dados disponíveis para o período considerado (Tabela 4). Destaca-se que o posto São Lourenço apresentou falhas durante quase todo o período de julho a outubro de 2011.

A Figura 3 apresenta a localização dos postos climatológicos e fluviométricos utilizados. Ressalta-se a ausência de postos de monitoramento na costa oeste, na região mais profunda e na região nordeste da laguna.



**Figura 3 - Localização dos postos climatológicos e fluviométricos utilizados.**

A validação do modelo foi feita utilizando os mesmos parâmetros do modelo calibrado para 2011, para todo o ano de 2012 e analisando os critérios de avaliação descritos a seguir.

**CrITÉRIOS de avaliação de desempenho do modelo**

Para a comparação entre os dados simulados pelo modelo e os dados medidos, foram utilizadas as seguintes ferramentas estatísticas: coeficiente de correlação (r), o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS), log-Nash Sutcliffe (LNS), porcentagem BIAS (pbias) e erro relativo percentual médio (e), calculados respectivamente pelas seguintes equações:

$$r = \frac{\sum (Est_i - \overline{Est}) \cdot (Obs_i - \overline{Obs})}{\sqrt{\sum (Est_i - \overline{Est})^2 \cdot \sum (Obs_i - \overline{Obs})^2}} \tag{4}$$

$$NS = 1 - \frac{\sum (Est_i - Obs_i)^2}{\sum (Obs_i - \overline{Obs})^2} \tag{5}$$

$$LNS = 1 - \frac{\sum (\log (Est_i) - \log (Obs_i))^2}{\sum (\log (Obs_i) - \log (\overline{Obs}))^2} \tag{6}$$

$$pbias = \frac{\sum (Obs_i - Est_i)}{\sum Obs_i} \cdot 100 \quad (7)$$

$$e = \frac{1}{N} \cdot \left[ \sum \left( \frac{Est_i - Obs_i}{Obs_i} \right)^2 \right]^{1/2} \cdot 100 \quad (8)$$

Onde  $i$  corresponde aos intervalos de tempo com dados observados;  $Est_i$  e  $Obs_i$  correspondem, respectivamente, aos dados estimados pelo modelo e observados no tempo  $i$ ;  $\overline{Est}$  e  $\overline{Obs}$  corresponde às médias destes valores, e  $N$  corresponde ao número de observações.

A Tabela 5 apresenta os limites de classificação de cada um dos parâmetros estatísticos utilizados neste estudo como critérios de avaliação do modelo, definidos com base nos valores apresentados por Pimentel et al. (2012) para estudos em bacias hidrográficas, visto que não foi encontrado valores de referência específicos para modelagem de lagos.

**Tabela 5 - Limites de classificação para os parâmetros estatísticos utilizados na avaliação do modelo.**

Limites de classificação	r <sup>a</sup>	NS <sup>b</sup> / LNS <sup>a</sup>	pbias <sup>b</sup>	e <sup>c</sup>
Muito Bom	75 - 100%	75 - 100%	< 10%	< 5%
Bom	65 - 75%	65 - 75%	10 - 15%	5 - 10%
Satisfatório	50 - 65%	50 - 65%	15 - 25%	10 - 20%
Não satisfatório	≤ 50%	≤ 50%	≥ 25%	≥ 20%

Fonte: Adaptado de Pimentel et al. (2012).

a: Proposto pelo autor; b: Proposto por Moriasi et al. (2007);

c: Proposto por Brito (2012).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

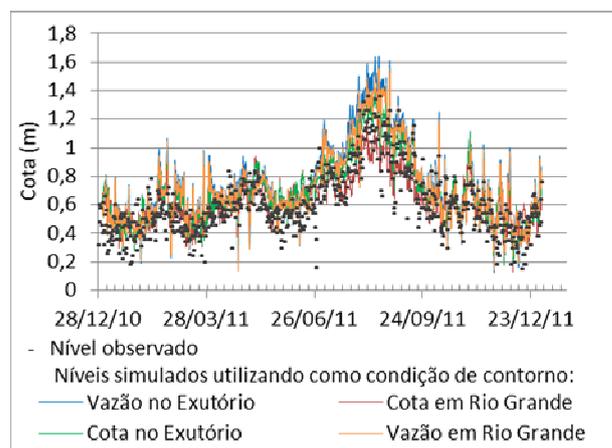
Para a análise dos resultados apresentados a seguir, ressalta-se que na observação dos dados de cota dos postos fluviométricos analisados foi verificada a diferença entre o nível zero das régua. Após uma análise dos dados observados e comparação com valores calculados, as diferenças entre o zero

das régua de Arambaré, São Lourenço e Laranjal e do posto Ilha da Pintada (utilizado como condição de contorno) foram estimadas em 0,12 m, 0,15 m e 0,08 m. Os gráficos a seguir são apresentados com estas correções nos valores observados.

### Análise das condições de contorno

A Figura 4 a Figura 6 apresentam os resultados dos níveis simulados nos postos fluviométricos de Laranjal, Arambaré e Ponta dos Coatis, respectivamente, para as diferentes condições de contorno adotadas no estuário (cotas ou vazões em Rio Grande ou na boca do estuário). Os resultados para o posto São Lourenço não foram apresentados devido ao grande número de falhas no ano de 2011, principalmente na época de cheia onde os resultados mais diferem. Os postos de Ipanema e Cristal apresentaram resultados semelhantes ao do posto Ponta dos Coatis, porém com diferença de níveis simulados ainda menores que a deste.

Observa-se que a utilização de diferentes condições de contorno acarreta em diferenças significativas nos níveis simulados. Esta diferença é maior na região estuarina, devido à proximidade com a condição de contorno alterada, diminuindo conforme se avança a montante da laguna, sendo pequena na região do Lago Guaíba. Também é maior no período de cheia, com a utilização da cota observada em Rio Grande gerando valores menores que os observados e que os demais simulados.



**Figura 4 - Nível observado e simulado em Laranjal em 2011 para as condições de contorno analisadas.**

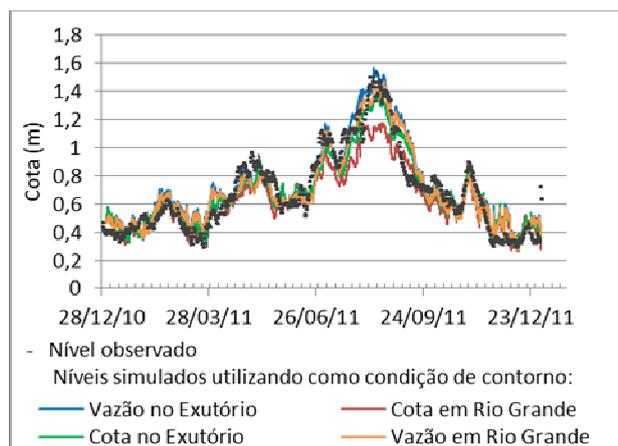


Figura 5 - Nível observado e simulado em Arambaré em 2011 para as condições de contorno analisadas.

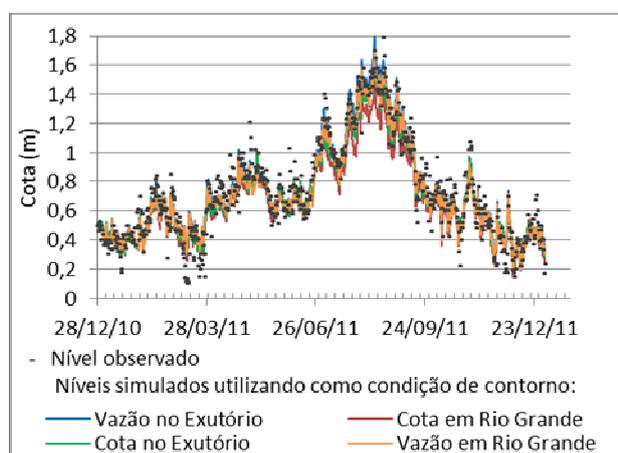


Figura 6 - Nível observado e simulado em Ponta dos Coatis em 2011 para as condições de contorno analisadas.

Os resultados para a condição de contorno sem o rio Camaquã foram bastante semelhantes aos resultados com sua inclusão, indicando a predominância do aporte majoritário do Guaíba na circulação da Lagoa. A vazão do rio Camaquã causa uma influência apenas local na circulação de água da laguna (Figura 7), além de proporcionar um aumento geral do nível no corpo lagunar. Para a condição de máxima vazão do Camaquã medida em 2011, o aumento de nível medido foi de aproximadamente 0,05 m (Figura 8).

Com base na melhor adequação entre os dados observados e simulados, optou-se por utilizar como condição de contorno o nível medido no posto Rio Grande no encontro do estuário com o oceano

no e incluir a vazão do Camaquã em todas as demais simulações.

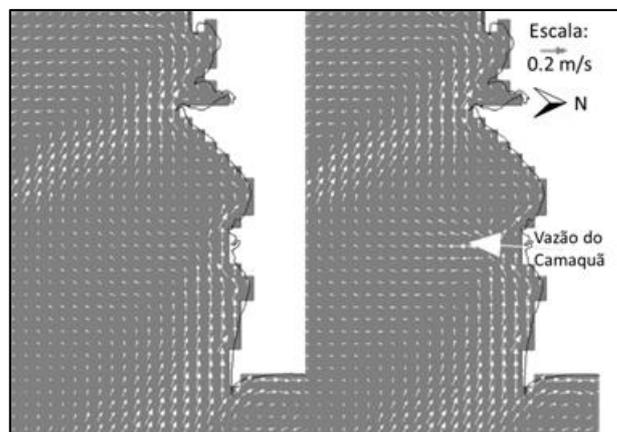


Figura 7 - Influência da inclusão no modelo da vazão do rio Camaquã na circulação da região central da Laguna dos Patos para a vazão máxima do Camaquã em 2011 (31/07/2011).

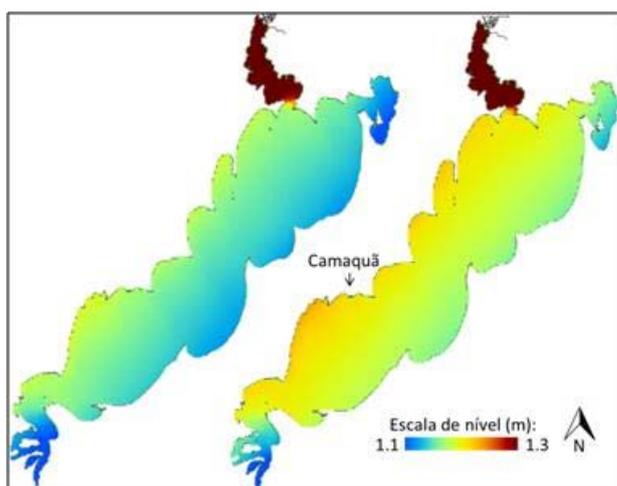
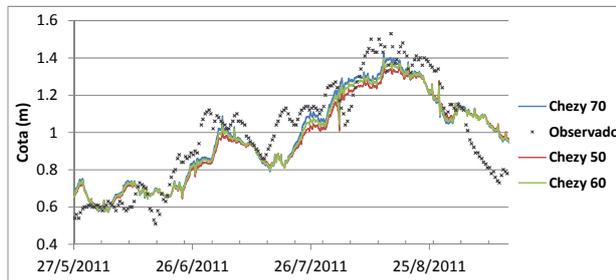


Figura 8 - Influência da inclusão no modelo da vazão do rio Camaquã nos níveis da Laguna dos Patos para a vazão máxima do Camaquã em 2011 (31/07/2011).

### Análise de sensibilidade Coeficiente de Chezy

Mantendo-se constantes os demais parâmetros do modelo, o nível d'água aumentou com o aumento do coeficiente de Chezy, especialmente no pico de cheias. Este comportamento é apresentado na Figura 9 para o posto Arambaré. Os demais postos apresentaram o mesmo comportamento. Ressalta-se que os valores observados na Figura 9 são mos-

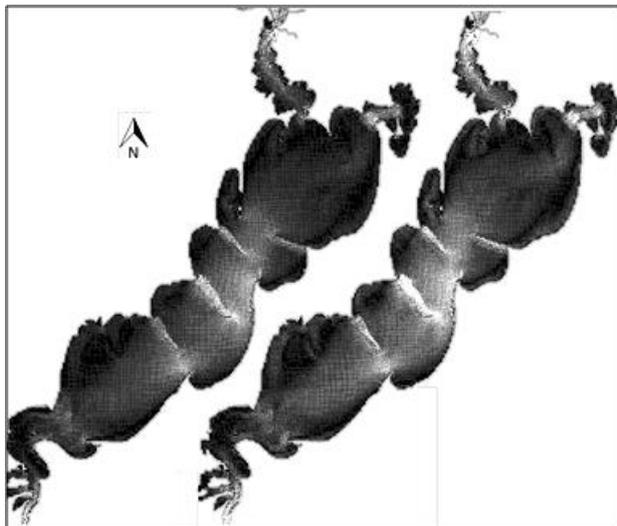
trados apenas para referência, visto que a análise de sensibilidade do modelo foi feita anteriormente a calibração.



**Figura 9 - Efeito da variação do coeficiente de Chezy ( $m^{1/2}.s^{-1}$ ) utilizado no cálculo do atrito de fundo em Arambaré.**

A máxima diferença entre os valores calculados com  $Chezy=70 m^{1/2}.s^{-1}$  e  $Chezy=50 m^{1/2}.s^{-1}$  foi de 9 cm para os postos situados na Laguna dos Patos e de 6 ou 7 cm para os postos do lago Guaíba.

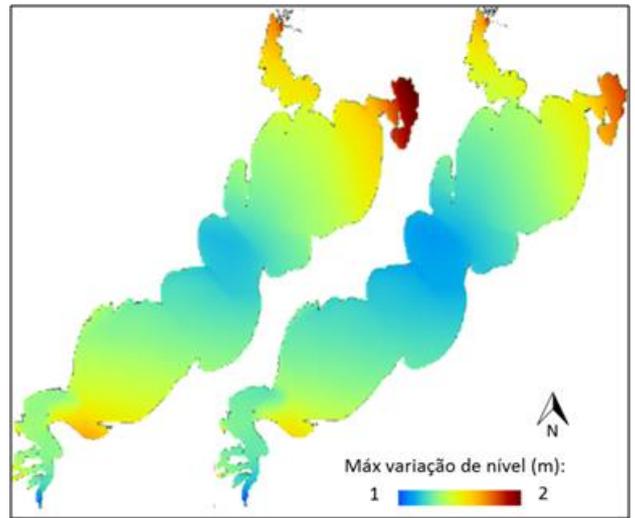
Os padrões de circulação obtidos para as intensidades de rugosidade do fundo analisadas foram bastante semelhantes. A magnitude da velocidade (Figura 10) aumentaram com o incremento do parâmetro Chezy, sendo mais evidente nos locais com maiores velocidades como nos estreitamentos e sobre os bancos de areia. O aumento da rugosidade também provocou uma maior variação de nível na lagoa (Figura 11).



**Figura 10 - Intensidade da velocidade na Lagoa dos Patos obtida para 31/12/12 com Chezy igual a 50 (esquerda) e a 70 (direita).**

### Coeficiente de viscosidade turbulenta

Para os valores utilizados de coeficiente de viscosidade turbulenta, este parâmetro exerceu pouca influência nos resultados. A diferença de cota máxima medida entre o coeficiente de viscosidade de  $5 m^2.s^{-1}$  e de  $30 m^2.s^{-1}$  foi de apenas 1 cm. Estes resultados corroboram com os verificados por Fernandes (2001), indicando que a viscosidade turbulenta tem pequeno efeito sobre a circulação lagunar, que aparenta ser principalmente controlada por processos topográficos e advectivos.



**Figura 11 - Máxima variação de nível para o ano de 2011 obtida com Chezy igual a 70 (esquerda) e a 50 (direita).**

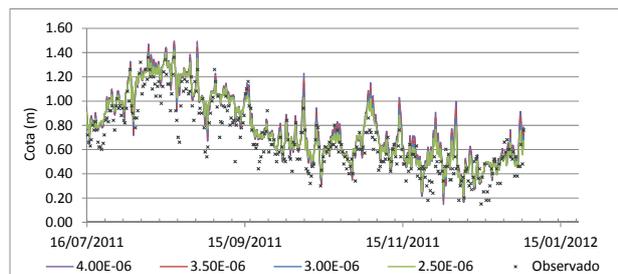
### Coeficiente de atrito do vento

De modo geral, quanto maior o coeficiente de atrito, maior a alteração dos níveis d'água da lagoa obtida. As diferenças entre os níveis d'água resultantes das simulações com diferentes valores de coeficientes de atrito do vento foram mais significativas nos extremos do eixo longitudinal da lagoa. Para um coeficiente de atrito de  $4E-06$  houve secagem dos pontos mais a nordeste da bacia para a situação de baixa vazão e vento nordeste. Para completar a simulação foi realizado um aprofundamento destas células em 0,25 m.

A diferença máxima de cota entre os níveis obtidos com os valores de  $4E-06$  e de  $2,5E-06$  foi de 21 cm no posto Laranjal. Para Arambaré e para os postos no Guaíba a diferença foi significativamente menor, atingindo o máximo de 6 cm em Arambaré e 8 cm na Ponta dos Coatis. O comportamento de

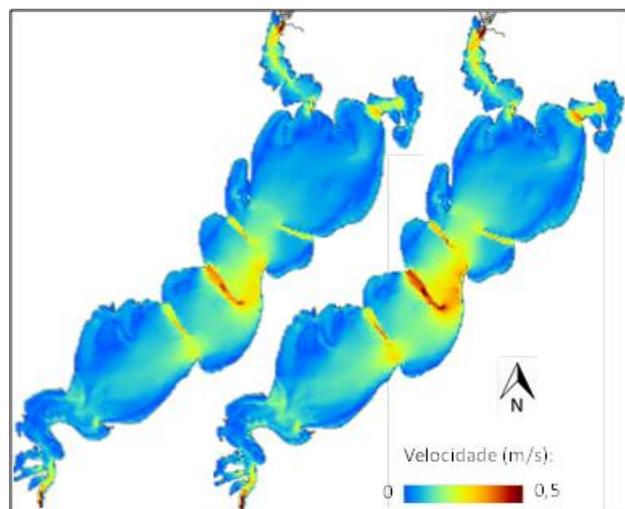
Arambaré nas simulações foi compatível com sua indicação de ponto nodal do sistema, visto que correspondeu à região do corpo lagunar onde foram observadas as menores variações de nível devido à ação do vento.

A Figura 12 apresenta os níveis calculados para o posto Laranjal utilizando os diferentes valores de coeficiente de atrito de vento analisados. Os gráficos dos demais postos não encontram-se apresentados, visto que as diferenças de cotas foram pouco visíveis.

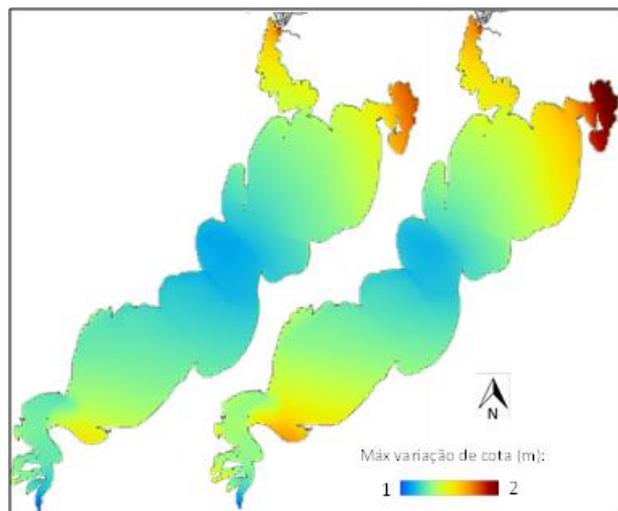


**Figura 12 - Efeito da variação do coeficiente de atrito do vento em Laranjal.**

Com o aumento do coeficiente de atrito do vento, aumenta a resposta da lagoa à ação dos ventos, provocando maiores intensidades de velocidades (Figura 13) e da variação de nível da lagoa (Figura 14).



**Figura 13 - Intensidade da velocidade na Lagoa dos Patos obtida para 31/12/12 com coeficiente de atrito do vento igual a 3,0 (esquerda) e a 4,0 (direita).**



**Figura 14 - Máxima variação de nível para o ano de 2011 obtida com coeficiente de atrito do vento igual a 3,0 (esquerda) e a 4,0 (direita).**

### Calibração

Os valores dos parâmetros obtidos após a calibração foram:

- coeficiente de Chezy=50;
- coeficiente de viscosidade turbulenta=10 m<sup>2</sup>/s; e
- constante de atrito do vento = 2,5E-06.

A comparação entre os valores observados e calculados pode ser vista no anexo A.

Os valores dos parâmetros estatísticos utilizados na avaliação de desempenho do modelo obtidos após a calibração do modelo para o ano de 2011 encontram-se na Tabela 6.

Verifica-se que a maioria dos parâmetros obtidos foram classificados como muito bom, enquanto apenas os valores do coeficiente de log-Nash-Sutcliffe para o posto de Laranjal e São Lourenço foram não satisfatórios. Estes postos são os mais próximos da região estuarina, possuindo ainda alguma oscilação devido ao efeito da maré e sendo o posto analisado mais afetado pelo efeito do vento e condições de contorno adotadas. Este resultado exige atenção quanto ao uso destes parâmetros para simulações da região sul, especialmente para vazões mínimas. Ademais, o PBias elevado para o posto fluviométrico Ipanema pode indicar diferença no zero da régua deste posto e do posto Ilha da Pintada.

**Tabela 6 - Parâmetros estatísticos de avaliação do modelo para o período de calibração.\***

	NS	LNS	c	pbias	r
Laranjal	0,63	0,30	0,90	1,77	0,84
São Lourenço	0,58	0,42	1,29	0,28	0,79
Arambaré	0,88	0,84	0,74	-4,11	0,95
Ponta dos Coatis	0,89	0,75	1,43	1,24	0,95
Ipanema	0,85	0,56	4,37	-11,02	0,95
Cristal	0,89	0,70	3,60	-0,36	0,94

\*Vermelho = não satisfatório; Preto = satisfatório e bom; Azul – Muito Bom.

Ressalta-se que os postos fluviométricos não apresentaram mesma resposta às alterações dos parâmetros de calibração, o que pode ser um indicativo de não homogeneidade da laguna. Os valores dos parâmetros escolhidos referem-se aqueles que melhor representaram a lagoa como um todo. Um peso maior foi dado ao posto de Arambaré, por ser mais próximo da região de estudo (região nordeste da Lagoa dos Patos). Os valores escolhidos proporcionaram melhorias na representação do comportamento dos postos Laranjal e São Lourenço, embora tenham sido acompanhados de pequenas reduções nos critérios de avaliação à de outros postos.

#### Validação

A comparação entre os valores observados e calculados para o ano de 2012, período de validação do modelo, pode ser vista no anexo B. A Tabela 7 resume os parâmetros estatísticos do modelo para este mesmo período.

**Tabela 7 - Parâmetros estatísticos de avaliação do modelo para o período de calibração.\***

Posto	NS	LNS	c	pbias	r
Laranjal	0,38	0,32	1,30	-2,33	0,69
São Lourenço	0,70	0,59	0,96	-3,84	0,85
Arambaré	0,72	0,70	0,62	-5,47	0,88
Ponta dos Coatis	0,82	0,78	0,77	1,75	0,91
Ipanema	0,68	0,50	2,98	-15,69	0,91
Cristal	0,73	0,66	1,47	-0,15	0,86

\* Vermelho = não satisfatório; Preto = satisfatório e bom; Azul – Muito Bom.

Os resultados foram no geral um pouco inferiores aos obtidos na calibração, mas seguindo a mesma distribuição, valendo aqui as mesmas observações comentadas no item de calibração. Apenas o posto Laranjal obteve resultados não satisfatórios, tanto para o coeficiente de Nash-Sutcliffe, quanto para o coeficiente log-Nash-Sutcliffe.

#### CONCLUSÕES

O modelo hidrodinâmico IPH-A apresentou resultados satisfatórios quanto à simulação do comportamento da Laguna dos Patos, exceto para a região estuarina, onde os parâmetros calibrados devem ser utilizados com cautela, especialmente no que diz respeito a valores extremos. Além disso, o estuário apresenta uma importante variação da salinidade não considerada no presente estudo.

Conforme esperado, o modelo apresentou grande sensibilidade às condições de contorno adotadas, principalmente para o período de cheias, e aos parâmetros de atrito do vento e rugosidade do fundo, considerados constantes para toda a laguna. A variação de nível dos postos fluviométricos disponíveis para a Laguna dos Patos e Lago Guaíba foram representadas satisfatoriamente, exceto para a região estuarina, onde os parâmetros calibrados devem ser utilizados com cautela.

O uso de uma batimetria atualizada, do atrito no fundo variando com a profundidade do corpo hídrico, a consideração da variação do vento sobre o corpo lagunar e o uso de dados de contorno horários, de modo a diminuir o período de interpolação linear, e a influência do canal de São Gonçalo devem ser testados em trabalhos futuros que busquem melhorar a reprodução do sistema pelo modelo.

Combinado a fácil utilização do modelo IPH-A e disponibilidade dos dados necessários, o modelo apresenta-se como uma opção de ferramenta a ser utilizada na gestão deste corpo hídrico. Como continuação deste trabalho será analisada as condições gerais de circulação da região nordeste da laguna para cenários críticos e a simulação de dispersão de poluentes pelo modelo, de modo a integrar os aspectos quantitativos e qualitativos.

#### AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela concessão de bolsa de doutorado ao primeiro autor.

## REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, A.M.; TAVARES, L. H. S. Padrões de movimentação hidrodinâmica gerada pelo vento no açude de Apipucos. In: V Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Merida - Venezuela : USTED-FI Facultad de Ingeniería, 2001. v. UNICO. p. 895-900.
- BAHADUR, R.; AMSTUTZ, D. E.; SAMUELS, W.B. Water contamination modeling – a review of the state of the science. *Journal of Water Resource and Protection*, v. 5, p. 142-155, 2013
- BORCHE, A. IPH-A: Aplicativo para modelação de estuários e lagoas – Manual de Utilização do sistema. Publicação em Recursos Hídricos Nº 33. IPH/UFRGS. 38p. 1996.
- CASTELÃO, R.M.; MÖLLER Jr., O.O. Sobre a circulação tridimensional forçada por ventos na Lagoa dos Patos. *Atlântica*, Rio Grande, v. 25, n. 2, p. 91-106, 2003.
- CASTELÃO, R. M.; MÖLLER Jr., O. O. A modeling study of Patos lagoon (Brazil) flow response to idealized wind and river discharge: dynamical analysis. *Brazilian Journal of Oceanography*, São Paulo, 54(1): 1 – 17, 2006.
- FERNANDES, E.H. Modelling the Hydrodynamics of the Patos Lagoon, Brazil. (Tese) University of Plymouth. 2001.
- FERNANDES, E.H.L.; DYER, K.L.; MOLLER, O.O.; NIENCHESKI, L.F.H. The Patos Lagoon hydrodynamics during an El Niño event (1998). *Continental Shelf Research*, v. 22, p. 1699–1713, 2002.
- HARTMANN, C.; SCHETTINI, C.A.F. Aspectos hidrológicos na desembocadura da Laguna dos Patos, RS. *Revista Brasileira de Geociências* 21 (4), p. 371-377. 1991.
- JANEIRO, J.; FERNANDES, E.; MARTINS, F.; FERNANDES, R. Wind and freshwater influence over hydrocarbon dispersal on Patos Lagoon, Brazil. *Marine Pollution Bulletin* 56, p. 650–665, 2008.
- FRAGOSO Jr., C.R. Modelagem tridimensional da estrutura trófica em ecossistemas aquáticos continentais rasos. (Tese) IPH/UFRGS, 2009.
- KJERFVE, B. Comparative oceanography of coastal lagoons. In: *Estuarine Variability*. Academic Press: 1986.
- LLORET, J.; MARÍN, A.; GUIRAO, L.M. Is coastal lagoon eutrophication likely to be aggravated by global climate change? *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 78, p. 403-412. 2008.
- LOPARDO, N. Estudo hidrodinâmico e correlação com sólidos suspensos e turbidez na Lagoa Itapeva do litoral norte do estado do Rio Grande do Sul. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, IPH/UFRGS. Porto Alegre, dezembro de 2002.
- MARQUES Jr., A.N.M.; CRAPEZ, M.A.C.; BARBOZA, C.D.N. Impact of the Icaraí Sewage Outfall in Guanabara Bay, Brazil. *Brazilian Archives of Biology and Technology*. Vol.49, n. 4 : pp. 643-650, 2006.
- MÖLLER Jr., O.O.; LORENZZENTI, J.A.; STECH, J.L.; MATA, M.M. The Patos Lagoon summertime circulation and dynamics. *Continental Shelf Research*, v. 16, n. 3, pp. 335-351, 1996.
- MÖLLER Jr., O. O.; CASTAING, P.; SALOMON, J.; LAZURE, P. The influence of local and non-local forcing effects on the subtidal circulation of Patos Lagoon. *Estuaries*, v. 24, n. 2, p. 297-311. Abril 2001.
- NIENCHESKI, L.F.; BAUMGARTEN, M.G.Z. Water Quality in Mangueira Bay: Anthropogenic and Natural Contamination. *Journal of Coastal Research*, Number 47:56-62. West Palm Beach, Florida, 2007.
- PAZ, A.R.; SCHETTINI, E.B.C.; VILLANUEVA, A.O.N. Simulação hidrodinâmica bidimensional do banhado do Taim. In: *Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Curitiba, 23 a 27 de novembro de 2003.
- PAZ, A.R.; REIS, L.G.M.; LIMA, H.V.C. Uso de modelagem hidrodinâmica visando a segmentação de corpos d'água rasos para enquadramento: o caso do Lago Guaíba (RS). In: *XVI Anais do Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. João Pessoa, 20 a 24 de novembro de 2005.
- PEREIRA, R.S. Processos que regem a qualidade da água na Lagoa dos Patos, segundo o modelo DELFT3D. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica. Fundação Universidade Federal do Rio Grande. Rio Grande: 2003. 150p.
- PIMENTEL, N.M.M.; BRITO, R.S.D.S.; FERREIRA, F.M.S.; MATOS, J.M.S.G. Monitorização por espectrofotometria da qualidade de águas residuais em sistema de drenagem – procedimento de calibração e recomendações. In *XV SILUBESA*. Belo Horizonte / MG, 2012.
- SANTOS, I.R.; COSTA, R.C.; FREITAS, U.; FILLMANN, G. Influence of Effluents from a Wastewater Treatment Plant on

Nutrient Distribution in a Coastal Creek from Southern Brazil. Braz. arch. biol. Technol, v.51 n.1, pp.153-162, Jan./Feb. 2008.

SILVEIRA, A.L.L. Modelo hidrodinâmico bidimensional com aplicação ao rio Guaíba. Dissertação. UFRGS: Porto Alegre, 1986. 237 p.

TOLDO Jr., E. Morfodinâmica da Laguna dos Patos, Rio Grande do Sul. Pesquisas em Geociências, v. 18, n. 1, p. 58-63, Set./Dez., 1991. Disponível em: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/21362>. Acesso em: set. 2013.

TOLDO Jr., E.E.; DILLENBURG, S.R.; CORRÊA, I.C.S.; ALMEIDA, L.E.S.B.; WESCHENFELDER, J.; GRUBER, N.L.S. Sedimentação de longo e curto período na Lagoa dos Patos, Sul do Brasil. Pesquisa em Geociências, v. 33, n. 2, p. 79-86, 2006.

VAZ, A. C.; MÖLLER Jr., O. O.; ALMEIDA T. L. Análise quantitativa das descargas dos rios afluentes da Lagoa dos Patos. Atlântica, v. 28, n. 1, p. 13-23. Rio Grande, 2006.

**Calibration And Validation Of The Hydrodynamic Model IPH-A For Patos Lagoon (RS / Brazil)**

**ABSTRACT**

*In Patos Lagoon, population growth and economic development have raised important issues regarding the negative impacts of these activities in the water body. Good knowledge of the hydrodynamic processes is essential to answer these questions and improve the water resources management. In this context, this paper presents a sensitivity analysis, calibration and validation of the hydrodynamic model IPH-A in Patos Lagoon, aiming at the future use of this tool for the integrated management of this water body. The model showed great sensitivity to the boundary conditions adopted, and to the parameters of wind stress and surface roughness. The level variation of fluviometric stations in Patos Lagoon and Lake Guaíba were simulated satisfactorily, except for the estuary, where the calibrated parameters should be used with caution. As the IPH-A is an easy-to-use model, and required data is often available, the model can be an important tool to be used in the management of this water body. In a continuation of this study, the simulation of pollutant dispersion in the model will be analyzed in order to integrate the quantitative and qualitative aspects.*

**Key-words:** Hydrodynamic model; Patos Lagoon; sensitivity analysis.

**ANEXO A- RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DO MODELO PARA O ANO DE 2011**

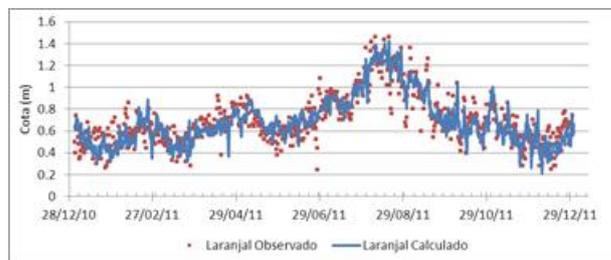


Figura A. 1 - Níveis observados e calculados após a calibração do modelo (2011) em Laranjal.



Figura A. 2 - Níveis observados e calculados após a calibração do modelo (2011) em São Lourenço.

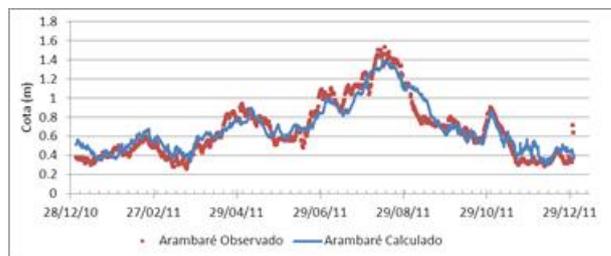


Figura A. 3 - Níveis observados e calculados após a calibração do modelo (2011) em Arambaré.



Figura A. 4 - Níveis observados e calculados após a calibração do modelo (2011) em Ponta dos Coatis.

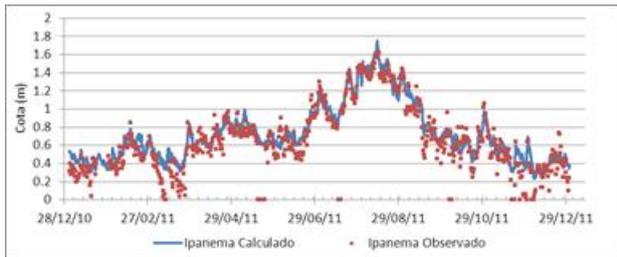


Figura A. 5 - Níveis observados e calculados após a calibração do modelo (2011) em Ipanema.

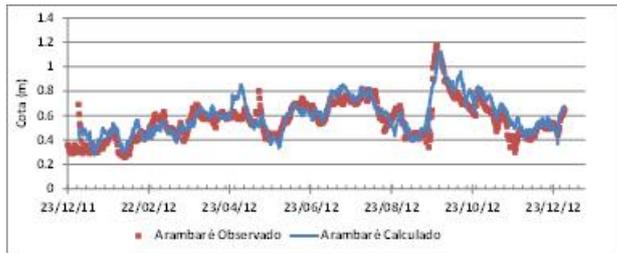


Figura B. 3 - Níveis observados e calculados na validação do modelo (2012) em Arambaré.

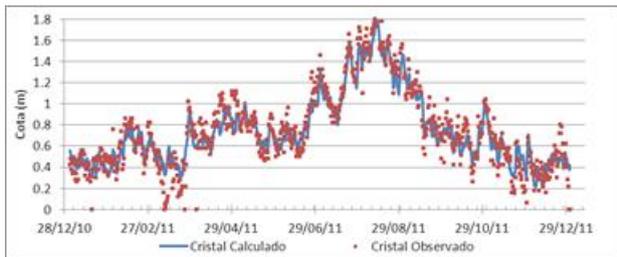


Figura A. 6 - Níveis observados e calculados após a calibração do modelo (2011) em Cristal.



Figura B. 4 - Níveis observados e calculados na validação do modelo (2012) em Ponta dos Coatis.

**ANEXO B - RESULTADOS DA VALIDAÇÃO DO MODELO PARA O ANO DE 2012**

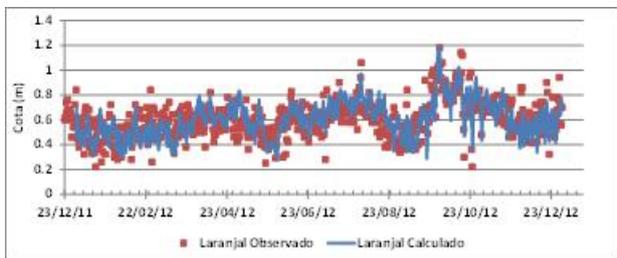


Figura B. 1 - Níveis observados e calculados na validação do modelo (2012) em Laranjal.

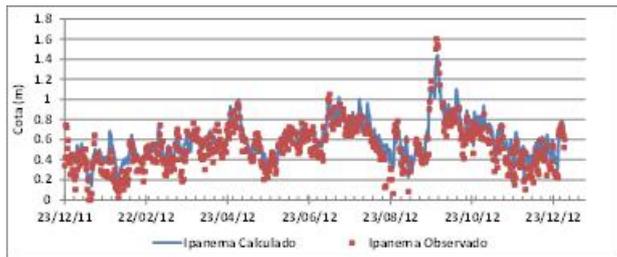


Figura B. 5 - Níveis observados e calculados na validação do modelo (2012) em Ipanema.

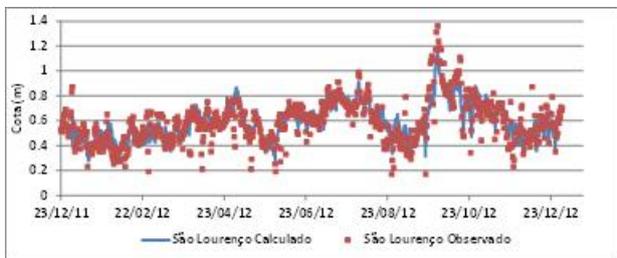


Figura B. 2 - Níveis observados e calculados na validação do modelo (2012) em São Lourenço.

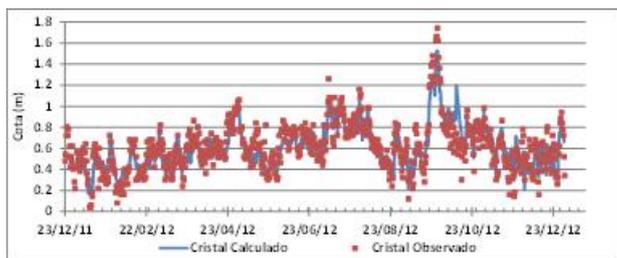


Figura B. 6 - Níveis observados e calculados na validação do modelo (2012) em Cristal.