
Processos Hidrológicos e Hidrodinâmicos da Lagoa Mirim

Hydrology and Hydrodynamics of Mirim Lagoon

Heline Alves de Oliveira¹, Elisa Helena Leão Fernandes², Osmar Olinto Möller Jr.³,
Gilberto Loguercio Collares⁴

¹ Universidade Federal de Rio Grande (FURG), Instituto de Oceanografia, Laboratório de Oceanografia Costeira e Estuarina. Rio Grande, RS.

heline.ao@gmail.com

² Universidade Federal de Rio Grande (FURG), Instituto de Oceanografia, Laboratório de Oceanografia Costeira e Estuarina. Rio Grande, RS.

e.fernandes@furg.br

³ Universidade Federal de Rio Grande (FURG), Instituto de Oceanografia, Laboratório de Oceanografia Costeira e Estuarina. Rio Grande, RS.

dfsomj@furg.br

⁴ Universidade Federal de Pelotas, Engenharia Hídrica

collares@ufpel.tche.br

Recebido: 18/12/13 - Revisado: 21/04/14 - Aceito: 27/08/14

RESUMO

A Lagoa Mirim está localizada no extremo Sul do Brasil e a Leste do Uruguai, e forma com a Lagoa dos Patos o maior complexo lagunar da América do Sul. A conexão entre os dois sistemas ocorre através de um canal natural, chamado de Canal de São Gonçalo. O objetivo deste trabalho foi caracterizar o regime hidrológico de alguns dos principais afluentes da Lagoa Mirim, bem como estudar a variabilidade espacial e temporal dos principais fatores que controlam a sua hidrodinâmica. Através das séries temporais de nível e de dados de vazão do Canal de São Gonçalo, foi possível produzir uma curva-chave e estimar a série temporal de vazão da Lagoa Mirim para a Lagoa dos Patos (para o período de 1 janeiro de 2009 a 31 de dezembro de 2011). O escoamento médio da Lagoa Mirim para a Lagoa dos Patos está em torno de $600 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Também foram analisadas as séries temporais de três tributários da Bacia da Lagoa Mirim: Rio Cebollati, Rio Tacuarí e Rio Piratini. A partir do modelo analítico de desníveis e das séries temporais de vazão, foi possível observar que os processos hidrodinâmicos na Lagoa Mirim são modulados principalmente pela descarga fluvial dos seus afluentes, e secundariamente pelos efeitos do vento. Além disso, as variações de nível que ocorrem por longos períodos de tempo indicam que a Lagoa Mirim atua como um grande reservatório de água.

Palavras Chave: Hidrologia. Estimativa de vazão. Curva-Chave. Lagoa Mirim. Canal de São Gonçalo.

ABSTRACT

The Mirim Lagoon is located between southern Brazil and eastern Uruguay, and combined with the Patos Lagoon forms the largest lagoon complex of South America. These systems are connected with the Atlantic Ocean through a natural channel, called São Gonçalo Channel. The main objectives of this study are to characterize the hydrological variability of the main Mirim Lagoon tributaries, as well as to study the spatial and temporal variability of the main factors controlling the lagoon hydrodynamics. Based on water level time series and flow data, it was possible to estimate a freshwater discharge time series from the Mirim Lagoon towards the Patos Lagoon (for the period between 1st January 2009 to 31st December 2011) and also produce a rating curve. The mean flow from the ML to the Patos Lagoon is $600 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. The time series of the main tributaries of Mirim Lagoon (Cebollati, Tacuari and Piratini rivers) were also analyzed. A combination between an analytical model of slopes and freshwater discharge time series, indicated that the Mirim Lagoon hydrodynamics is modulated by two main factors: mainly by the river discharge of its tributaries, and secondly by the wind effect. The long-term water level variations indicate that ML acts as a large water reservoir.

Keywords: Hydrology. Estimated flow. Rating curve. Mirim Lagoon. São Gonçalo Channel.

INTRODUÇÃO

Os ambientes costeiros correspondem às áreas de transição entre os continentes e os oceanos, sofrendo influências tanto do ambiente marinho, como do continental (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002). As lagunas costeiras por sua vez, são sistemas marinhos rasos, geralmente orientadas paralelamente à costa, separadas do oceano por uma barreira e interligadas ao oceano, pelo menos intermitentemente, por um ou mais canais. São os ambientes costeiros mais comuns, ocupando 13% das áreas litorâneas do mundo (KJERFVE, 1986), sendo forçadas pela descarga fluvial, pelo estresse do vento, pelas marés, pelo balanço entre evaporação e precipitação e pelo calor da superfície. Dependendo do balanço hídrico da região, essas lagunas podem apresentar salinidades variando de completamente doce à hipersalina. Este é um fator importante na distribuição da fauna de uma lagoa, além de gerar zonas de sedimentação diferenciadas em função dos gradientes de densidade (KJERFVE, 1994). O entendimento da dinâmica destes ambientes é fundamental para o estabelecimento de políticas adequadas de gerenciamento e manejo dos seus recursos hídricos (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002).

A Lagoa Mirim e o complexo de áreas úmidas ao seu entorno, formam uma das principais bacias hidrográficas transfronteiriças da América do Sul, possuindo importância econômica e ecológica para o Estado do Rio Grande do Sul e para o Uruguai. Na década de 70, diversos estudos promovidos pelos Governos Brasileiro e Uruguaio foram desenvolvidos pela UNDP/FAO/CLM (*United Nations Development Program/Food Agricultural Organization/ Comissão da Lagoa Mirim*) e publicadas como boletins técnicos e notas técnicas, apresentando resumos climatológicos, dados sobre os regimes de chuvas, evaporação, níveis e descargas (SUDESUL, 1974). Contudo, assim como acontece hoje, a rede de coleta de dados não era efetiva ao longo de toda a bacia hidrográfica. A SUDESUL (Superintendência do Desenvolvimento da Região Sul) estudou a disponibilidade hídrica da bacia e o balanço hídrico da Lagoa Mirim, e dividiu a região em zonas características. Por fim, foi elaborado o plano diretor básico para o desenvolvimento da Bacia da Lagoa Mirim (SUDESUL, 1974). Machado (2002) estudou a qualidade da água no Canal de São Gonçalo. Este autor também compilou dados de precipitação e calculou séries históricas de vazão, observando que a Lagoa Mirim e o Canal de São Gonçalo se alternam entre uma alta disponibilidade hídrica e períodos de déficit hídrico (principalmente de novembro a março), sendo esse déficit mais acentuado em períodos de dez anos (MACHADO, 2007). Com o objetivo de estudar a circulação hidrodinâmica na Lagoa Mirim, Xavier (2002) aplicou o modelo numérico SisBAHIA 3D, simulando trocas de massas de água induzidas pelo campo de vento e estimando a dispersão do esgoto sanitário na margem próxima à cidade de Santa Vitória do Palmar. Mais recentemente, uma pesquisa realizada por Hirata, Möller e Mata (2010) mostrou que mudanças de longo período na Lagoa Mirim estão fortemente associadas aos fenômenos de El Niño-Oscilação Sul.

Estes estudos, entretanto, apresentam uma série de limitações, deixando ainda uma lacuna a ser preenchida em relação ao entendimento sobre o comportamento hidrológico

e hidrodinâmico da Lagoa Mirim. Dentro deste contexto, este trabalho tem como objetivos caracterizar o regime hidrológico dos rios Cebollati, Tacuarí e Piratini, afluentes da Bacia da Lagoa Mirim, estimar a descarga da Lagoa Mirim para a Lagoa dos Patos, calcular o tempo de residência das suas águas e estudar a variabilidade espacial e temporal dos principais processos que controlam a hidrodinâmica da Lagoa Mirim.

Entender esses processos é de fundamental importância para a compreensão da distribuição e variabilidade da concentração de substâncias naturais (nutrientes, clorofila, material em suspensão), de poluentes, dos processos de erosão e transporte de sedimentos, e a distribuição e variabilidade da fauna e flora local. Além da relevância do ponto de vista ambiental, o conhecimento detalhado da dinâmica da Lagoa Mirim é de interesse econômico e estratégico para o Brasil e para o Uruguai, pois dela depende a utilização de suas águas para irrigação e para o potencial transporte hidroviário de mercadorias como combustíveis, madeira, e principalmente arroz, através da chamada Hidrovia do MERCOSUL.

Área de Estudo

A Lagoa Mirim está localizada entre as latitudes 32°09' e 33°37'S e longitudes 52°35' e 53°59'W, e apresenta área superficial de aproximadamente 3.749 km², dos quais um terço está localizado em território uruguaio e dois terços em território brasileiro (e.g. VIEIRA; RANGEL, 1984, 1988). A Lagoa Mirim é o segundo maior corpo hídrico com características lacustres do Brasil, e está ligada à Lagoa dos Patos formando o maior sistema lagunar da América do Sul. A conexão entre os dois sistemas ocorre através de um canal natural de 76 km de comprimento, chamado de Canal de São Gonçalo (CSG) (e.g. VIEIRA; RANGEL, 1984, 1988).

A Lagoa Mirim é alimentada por uma ampla malha hidrográfica e por abundantes precipitações na bacia de recepção, com nível oscilando entre 2 m e 3 m, e produzindo alagamento nas planícies aluviais. O volume da lagoa pode chegar a 17×10⁹ m³ e varia em função das condições hidrológicas e da vazão do Canal de São Gonçalo (e.g. VIEIRA; RANGEL, 1988). Antes da década de 1970, em situações de baixo aporte fluvial, ocorria entrada de água salobra da Lagoa dos Patos para a Lagoa Mirim através do CSG, impedindo a utilização de suas águas para abastecimento público e irrigação. Assim, em 1977, foi construída uma Barragem-Eclusa no Canal de São Gonçalo, localizada a três quilômetros da cidade de Pelotas, impossibilitando a entrada de água salgada em aproximadamente 80% do canal e em toda a área da Lagoa Mirim (GOUVÊA; ZARNOT; ALBA, 2010).

A Lagoa Mirim localiza-se em uma região complexa, tanto pela sua importância política, por ser uma lagoa binacional, como pelas atividades econômicas ligadas à agricultura, à indústria e à pecuária. O principal uso das águas da Lagoa Mirim consiste nas extrações diretas para a irrigação das lavouras de arroz, tanto em território brasileiro como no uruguaio. O Estado do Rio Grande do Sul é responsável por 50% da produção nacional de arroz, o que representa 3,1% do PIB do Rio Grande do Sul (IRGA, 2006). As águas da Lagoa Mirim também são utilizadas como fonte de água potável para as populações que

a circundam, inclusive para os municípios de Rio Grande e Pelotas (SEMA, 2006).

MATERIAIS E MÉTODOS

Coleta de Dados

Medidas de precipitação e registros horários de nível da água foram coletadas pela Agência de Desenvolvimento da Lagoa Mirim (ALM), em estações localizadas na Barragem-Eclusa do Canal de São Gonçalo, em Santa Izabel, município de Arroio Grande, e em Santa Vitória do Palmar (Figura 1). Os dados de nível, coletados quatro vezes ao dia, foram transformados em médias diárias. Os dados de precipitação foram medidos por meio de pluviômetros, e o nível da água foi medido por meio de régua limimétrica referenciadas e niveladas.



Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo e das estações de coletas de dados (pontos em vermelho)

Devido à falta de dados de ventos na região da Lagoa Mirim, as medidas de direção e intensidade de ventos utilizadas foram obtidas junto à Estação Meteorológica dos Práticos da Barra do Rio Grande (Figura 1), assumindo que o vento medido na estação seja representativo do que ocorre em toda a bacia e/ou, que também possa ser usado como uma aproximação aceitável para os estudos desenvolvidos. Para este estudo foram calculadas as médias diárias de vento a partir de dados horários de janeiro de 2009 a dezembro de 2011.

Na estação de Santa Izabel foram realizadas 13 campanhas de medição de vazão com perfilador acústico de correntes por Doppler (ADP) Sontek, de 1,0 MHz de frequência, dotado de um sistema traçador de fundo (*bottom tracking*). As campanhas foram realizadas em situações de alta, média e baixa descarga do Canal São Gonçalo.

Descarga Fluvial

Para quantificar a contribuição de alguns dos principais tributários da Bacia da Lagoa Mirim, foram utilizados os dados de vazão obtidos na página da Agência Nacional de Águas (ANA – www.ana.gov.br). Assim, foi possível analisar séries temporais diárias para os seguintes tributários: Rio Cebollati, Rio Tacuarí e Rio Piratini. A Tabela 2 apresenta o nome e o código das estações e o período de amostragem dos dados.

Tabela 2 – Nome, código das estações e período de amostragem dos dados

Rio	Estação	Código	Período
Piratini	Cerro Chato	88575000	1977 a 2011
Piratini	Passo do Ricardo	88680000	1962 a 1983
Cebollati	Paso Averias	89400000	2000 a 2008
Tacuarí	Paso Dragon	89150000	2000 a 2008

No caso do Rio Piratini, as descargas de 1984 a 2011 foram estimadas através do método de regionalização de vazões, partindo do pressuposto de que postos de bacias com características semelhantes apresentam as mesmas tendências e podem ser correlacionados (TUCCI, 1997). Assim, foi feita a regressão linear das estações Cerro Chato e Passo do Ricardo entre janeiro de 1977 e dezembro de 1983 (Equação 1).

$$Q_{\text{Piratini}} = 1,889 \times Q_{\text{Cerro Chato}} + 20,0416 \quad (1)$$

Estimativa de Descarga da Lagoa Mirim

A medição de vazão é um processo caro, impedindo que as medições sejam feitas com frequência. Assim, normalmente as medições são realizadas com o objetivo de determinar a relação entre os níveis e a vazão de uma seção. Essa relação cota-descarga (relação h/Q), denominada curva-chave, é um método clássico e relativamente barato se estimar vazões diárias. Para gerar uma curva-chave representativa é necessário realizar medições de vazão em situações vazões altas, médias e baixas (e.g. COLLISCHONN; TÁSSIA, 2011; TUCCI, 1997).

Assim, para estimar a descarga da Lagoa Mirim através do Canal de São Gonçalo foi utilizada a relação polinomial cota-descarga entre os registros horários de nível e as medidas de vazão efetuadas na estação de Santa Izabel.

Tempo de Descarga da Lagoa Mirim

Para estudar o tempo de permanência das águas no interior da Lagoa Mirim, foi calculado o tempo de descarga (t_d), que segundo Miranda, Castro e Kjerfve (2002) pode ser definido como a razão entre a taxa de renovação de todo o volume de água doce do sistema (V) e a descarga fluvial (I) e a fração (f) de água doce do sistema dada por $(S_0 - S_x)/S_0$ onde S_0 é a salinidade observada na costa, S_x a salinidade do local em

questão (Equação 2). Assim:

$$t_q = f \frac{V}{I} \quad (2)$$

Como atualmente não acontece mistura das águas da Lagoa Mirim com águas estuarinas, no cálculo do tempo de descarga o termo f foi desprezado. O volume da Lagoa Mirim foi obtido através do produto da área da Lagoa ($3,749 \times 10^9 \text{ m}^2$) pela profundidade média (4,5 m).

Influência de eventos ENOS

Eventos de El Niño são anomalias do sistema climático e representam uma alteração no sistema oceano-atmosfera no Oceano Pacífico. O El Niño é caracterizado pelo aquecimento anômalo das águas do Pacífico e enfraquecimento dos ventos alísios na região equatorial, enquanto o La Niña corresponde o esfriamento anômalo das águas do Pacífico e aumento dos ventos alísios na região equatorial. Com o aquecimento (resfriamento) do oceano e com o enfraquecimento (intensificação) dos ventos, começam a ser observadas mudanças da circulação da atmosfera nos níveis baixos e altos, determinando mudanças nos padrões de transporte de umidade, e portanto variações na distribuição das chuvas em regiões tropicais e de latitudes médias e altas (e.g. OLIVEIRA, 2001; WANG et al., 2012).

O fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS) representa de forma mais genérica o fenômeno de interação atmosfera-oceano associado a alterações dos padrões normais da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) e dos ventos alísios na região do Pacífico Equatorial, entre a Costa Peruana e no Pacífico oeste próximo à Austrália. Os padrões anômalos dos fenômenos de ENOS estão ligados às anomalias climáticas em várias partes do globo e se manifestam em diversas variáveis como temperatura, precipitação, pressão ao nível médio do mar, entre outras. Diversos estudos mostram que no Sul do Brasil anomalias de precipitação estão correlacionados aos ciclos de ENOS, sendo períodos muito (pouco) chuvosos associados a eventos de El Niño (La Niña) (e.g. GRIMM; BARROS; DOYLE, 2000; GRIMM; FERRAZ; GOMES, 1998; RAO; HADA, 1990).

Para estudar a influência dos eventos ENOS nas séries temporais de precipitação e consequentemente nas de vazão dos tributários da LM, foram utilizados dados de IOS disponível na página do *Australian Bureau of Meteorology* (<http://www.bom.gov.au/clima/glossary/soi.shtml>). O Índice de Oscilação Sul (IOS), utilizado para quantificar o fenômeno, representa a diferença entre a pressão ao nível do mar entre o Pacífico Central (Taiti) e o Pacífico do Oeste (Darwin/Austrália). Valores negativos do IOS indicam a ocorrência de El Niño, enquanto valores positivos indicam a La Niña (e.g. PHILANDER, 1990; WANG et al., 2012).

Estudo da Influência do Vento

Devido ao seu eixo de orientação, a batimetria sem variações significativas e a pequena profundidade em relação à área de superfície, o vento é um dos fatores mais importantes na circulação da Lagoa Mirim. Assim, para estudar a influência do vento longitudinal na variabilidade hidrodinâmica da Lagoa,

foi aplicado um modelo analítico linear (POLLAK, 1960) que a partir da tensão de cisalhamento do vento, estimou os desníveis entre as extremidades norte (Santa Izabel) e sul (Santa Vitória do Palmar) da Lagoa.

A relação entre as mudanças de nível e a forçante meteorológica, considerando estado estacionário e negligenciando os termos não-lineares, a pressão atmosférica e a rotação da Terra, pode ser expressa como (Equação 3):

$$\frac{n_1 \cdot \tau_y}{\rho_w \cdot H_0} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

onde τ_y é a tensão de cisalhamento do vento, n_1 é o parâmetro de adimensional de efeitos turbulentos, ρ_w é a densidade da água, g é a aceleração da gravidade, H_0 é a profundidade média da lagoa, $\partial \eta$ é a variação dos níveis de água, e ∂y é a distância entre as duas estações. A tensão de cisalhamento pode ser obtida através da Equação 4:

$$\tau_y = \rho_a C_d |V| v \quad (4)$$

onde ρ_a é a densidade do ar (1.25 Kg m^{-3}), C_d é o coeficiente de cisalhamento do vento (2.5×10^{-3}), v é a velocidade média do vento longitudinal e $|V|$ é o módulo de velocidade do vento. A tabela 1 sumariza os valores constantes utilizados para o modelo de desnível.

Tabela 1 – Constantes utilizadas no modelo analítico de desnível

Parâmetros	Valor
H_0	6.5 m
g	$9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
∂y	173.217 m
n_1	0.4

Análise dos Resultados

Para a melhor compreensão da variabilidade temporal, foi realizada uma análise espectral das séries temporais estudadas. Os espectros foram gerados através da transformada rápida de Fourier (FFT), exibindo a densidade da energia espectral (S_{yy}) em função da frequência (f) ou $\log(f)$ (EMERY; THOMSON, 1997).

A variabilidade das séries de níveis e de desníveis foram também estudadas com análises de EOF (*Empirical Orthogonal Function*), que fornece informações da variabilidade temporal das séries de maneira estatística (EMERY; THOMPSON, 1997). As análises do espectro energético foram realizadas com o uso de ondaletas (*wavelets*), que permite decompor e descrever outras funções no domínio da frequência, possibilitando analisar estas funções em diferentes escalas de frequência e de tempo, simultaneamente (MARQUES, 2009). Para as análises foram utilizadas ondaletas do tipo Morlet.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Precipitação

As médias diárias de precipitação nas estações Barragem-Eclusa, Santa Izabel e Santa Vitória do Palmar no período 1 de janeiro de 2009 a 31 de dezembro de 2011 são apresentadas na figura 2. Os dados indicam que apenas o ano de 2011 apresentou um regime pluviométrico típico de clima subtropical, ou seja, maiores precipitações entre os meses de junho e setembro. Anomalias de precipitação na região sudeste da América do Sul estão associadas a eventos de El Niño e La Niña (GRIMM; FERREZ; GOMES, 1998; KILADIS; DIAZ, 1989; ROPELEWSKI; HALPERT, 1987), e foram observadas em 2009 e 2010.

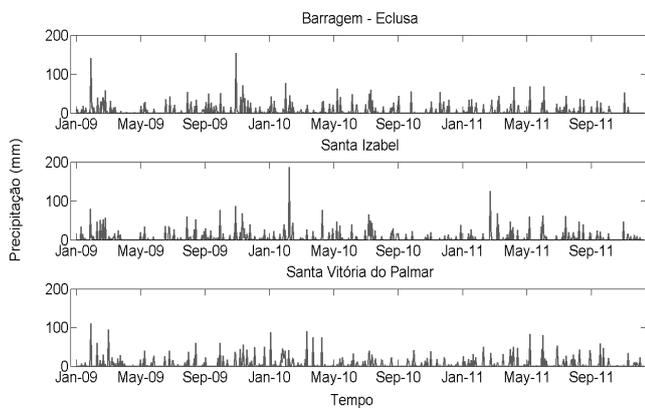


Figura 2 - Série temporal de precipitação diária nas estações Barragem-Eclusa, Santa Izabel e Santa Vitória do Palmar

A comparação entre as médias mensais de precipitação das três estações e o Índice de Oscilação Sul mostra que nos períodos correspondentes a fase positiva do Índice (eventos de La Niña) ocorreu uma diminuição da precipitação, exceto nos meses de janeiro e fevereiro de 2009, quando as taxas de precipitação foram superiores à média calculada para todo o período (Figura 3).

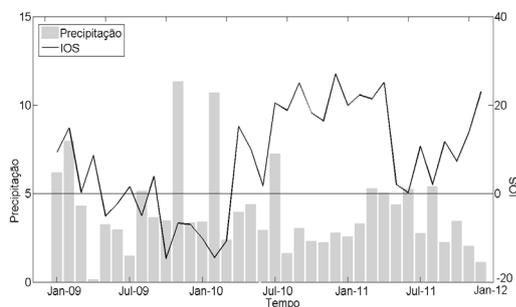


Figura 3 - Médias mensais do índice de oscilação sul (IOS) e de precipitação na Baía da Lagoa Mirim. Valores negativos de IOS correspondem a eventos de El Niño e os valores positivos a eventos de La Niña

Por outro lado, os extremos de precipitação registrados em novembro de 2009 e fevereiro de 2010 estão relacionados aos

extremos da fase negativa do IOS, essa tendência de aumento da precipitação na região Sul em períodos de El Niño também foram observadas por outros autores (GRIMM; BARROS; DOYLE, 2000; GRIMM; FERREZ; GOMES, 1998; RAO; HADA, 1990; ROPELEWSKI; HALPERT, 1987). Após esse período, houve uma diminuição nas taxas de precipitação. Essas anomalias positivas de precipitação durante a primavera em eventos El Niño, e a tendência à seca após esses fenômenos também foram observados em trabalhos publicados por Grimm, Barros e Doyle (2000), Grimm, Ferraz e Gomes (1998) e Rao e Hada (1990).

Vento

A análise do espectro de potência da série temporal da componente longitudinal do vento, mostra o domínio de oscilações com frequência de 7 e 14 dias (Figura 4), que caracterizam o período de passagens de frentes frias na região (*e.g.* MÖLLER et al., 2001). O espectro da série temporal de precipitação da Lagoa Mirim (não apresentado) apresenta variabilidade semelhante, indicando, como esperado, que a ocorrência de precipitação na região está associada a passagens de frentes frias.

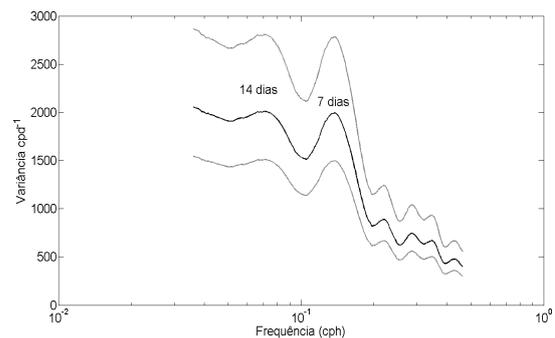


Figura 4 - Espectro de potência da série temporal de vento. Os períodos identificados estão associados aos picos relevantes. As linhas cinza superiores e inferiores representam o intervalo de 95% de confiança do espectro

Níveis

A figura 5 ilustra os níveis médios medidos na Lagoa Mirim e na Barragem-Eclusa do Canal de São Gonçalo. As cotas medidas na Barragem apresentam menor variabilidade que o restante da Lagoa Mirim, o que pode acontecer por dois motivos: a) Barragem está localizada no Canal de São Gonçalo que é estreito e menos sujeito à ação dos ventos; b) devido ao afunilamento da geometria da Lagoa na região do canal de escoamento, a água é acumulada na Lagoa Mirim.

São observados dois padrões diferentes nas séries temporais: a) níveis positivos (acima da média mensal) de novembro de 2009 a setembro de 2010 e entre maio e setembro de 2011; b) níveis negativos (abaixo da média mensal) nos intervalos de tempo restantes. Esses padrões estão associados, em pequenas escalas de tempo, com a precipitação registrada no período (Figura 6 (a)), isso é, níveis positivos associados à alta precipitação

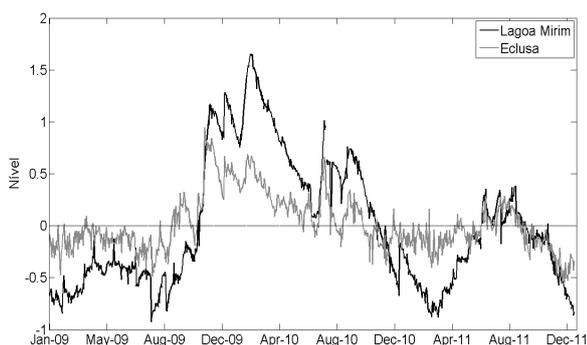


Figura 5—Médias diárias de níveis medidos na Lagoa Mirim e na Barragem-Eclusa

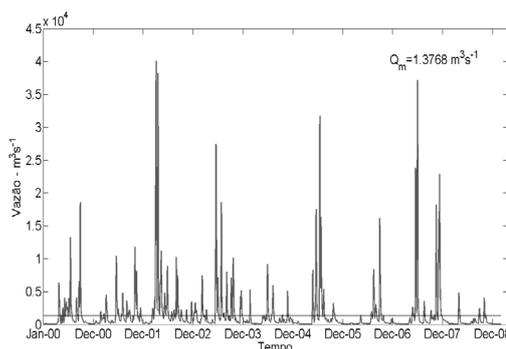


Figura 7 - Série temporal de vazões diárias do Rio Cebollati para o período de janeiro de 2000 a janeiro de 2009 e a média calculada para todo período

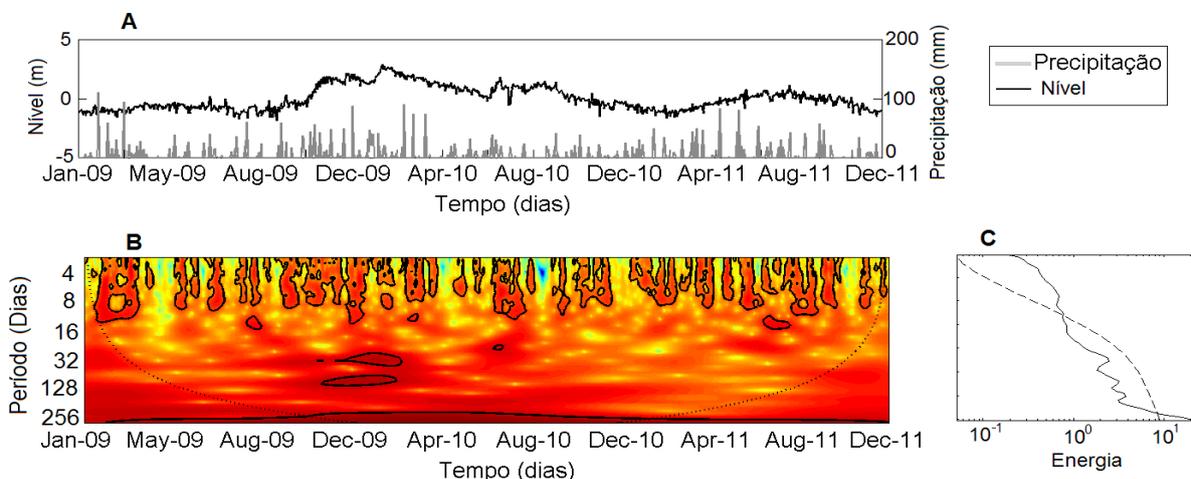


Figura 6 – (a) Séries temporais de nível médio e de precipitação na Estação de Santa Vitória do Palmar. (b)Espectro cruzado de energia utilizando ondaleta de Morlet. Linhas pretas indicam o nível de 95% de confiança e a linha pontilhada preta indica o cone de influência.(c)Espectro de potência cruzada global das séries temporais. A linha pontilhada indica o nível de 95% de confiança

e cotas negativas ligadas à períodos de estiagem. A correlação cruzada por Ondaleta de Morlet entre os níveis e as taxas de precipitação na estação de Santa Vitória do Palmar mostra uma alta correlação entre essas duas variáveis com período variando entre 4 e 16 dias (Figura 6 (c)), indicando que em pequenas escalas temporais os níveis são regulados pelas taxas de precipitação.

Descarga Fluvial

A série temporal de descargas diárias do Rio Cebollati é apresentada na figura 7. A média calculada para todo o período é de $1.377 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Nos meses de setembro de 2000, maio de 2002, janeiro de 2003 e julho de 2005 e 2007 foram registradas vazões até 30 vezes maiores que a média para todo o período. Os picos atingem valores superiores a $30.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

A série temporal de descargas diárias do Rio Tacuarí é apresentada na figura 8. A descarga média diária calculada para todo período foi de $586,19 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. É possível observar mais uma

vez a ocorrência de picos de descargas até 30 vezes maiores que a média calculada para todo o período em setembro de 2000 e 2001, junho e julho de 2002, julho de 2005, outubro e novembro de 2006 e julho de 2007.

As séries temporais de vazão do Rio Cebollati e Tacuarí mostram a sazonalidade do regime hídrico da região, com as maiores descargas ocorrendo entre a metade do outono e início da primavera. Nesses dois tributários ocorreram picos de vazão que chegaram a ser 30 vezes maiores que a média para todo o período. Esses dados foram obtidos na página da ANA, contudo devem ser estudados com cautela, pois os máximos de vazão encontrados no Rio Cebollati são comparáveis ou superiores à média do Rio da Prata, que é de $23.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (e.g. PIOLA; ROMERO; ZAJACZOVSKI, 2008) e mais de dez vezes superiores à descarga da Bacia da Lagoa dos Patos (VAZ; MÖLLER; ALMEIDA, 2006).

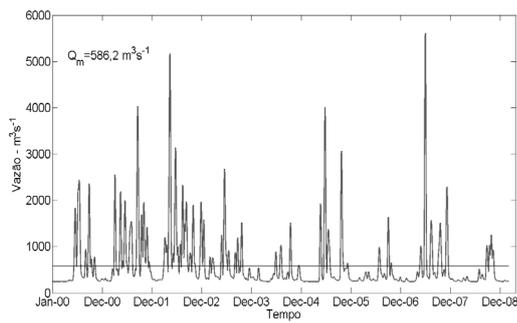


Figura 8 - Série temporal de vazões diárias do Rio Tacuarí para o período de 1 de janeiro de 2000 a 31 de janeiro de 2009 e a média calculada para todo período

De maneira geral, são observados picos de vazão nos meses de junho, julho, agosto, setembro e novembro. Em estudos realizados nos rios Jacuí e Taquari, RS, Bordas et al. (1984) encontraram picos de vazão nos meses de outubro e Vaz (2003) e Vaz, Möller e Almeida (2006) descrevem descargas máximas entre julho e agosto.

A comparação entre as descargas dos Rios Tacuarí e Cebollati com o IOS é representada na figura 9.

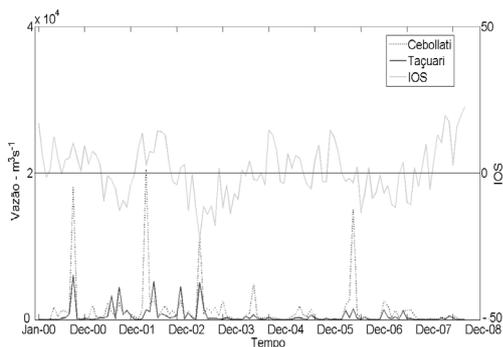


Figura 9 - Médias mensais de vazão dos Rios Cebollati e Tacuarí e do Índice de Oscilação Sul. Valores negativos de IOS correspondem a eventos de El Niño e os valores positivos a eventos de La Niña

Meses de outono e inverno, sob a influência de El Niño, tendem a ser mais chuvosos. Entretanto, as descargas máximas em setembro de 2000 e agosto de 2003 ocorrem sob a influência de La Niña. Grimm, Ferraz e Gomes (1998) mostraram que podem ocorrer anomalias positivas de precipitação no inverno dos anos que sucedem eventos de El Niño.

As análises espectrais dos Rios Cebollati e Tacuarí apresentaram resultados muito semelhantes, assim o espectro do Rio Tacuarí foi omitido. A maior parte da variância ocorre na frequência de 6 meses, seguido da frequência mensal (Figura 10). A frequência semestral está associada ao padrão do clima subtropical da região, que está classificada, segundo a classificação de Köppen (1984), como tipo C_f_a , com o verão e inverno bem definidos.

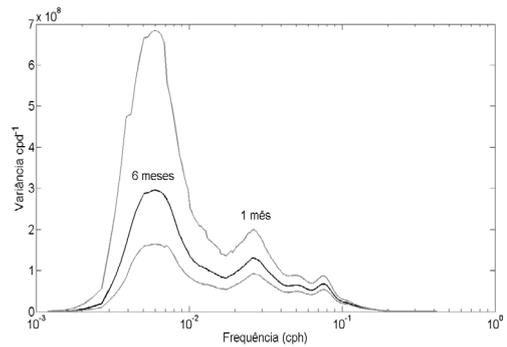


Figura 10 - Espectro de potência da série temporal de descarga fluvial do Rio Cebollati para o período de janeiro de 2000 a janeiro de 2009. Os períodos identificados estão associados aos picos relevantes. As linhas cinza superiores e inferiores representam o intervalo de 95% de confiança do espectro

Através das séries temporais disponíveis para as estações Cerro Chato e Passo do Ricardo foi possível estimar a descarga fluvial do Rio Piratini no período de janeiro de 1962 a janeiro de 2011 (Figura 11).

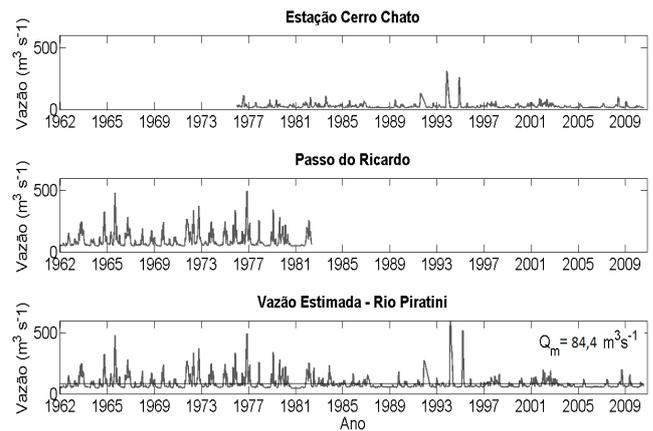


Figura 11 - Séries temporais de descarga nas estações de Cerro Chato e Passo do Ricardo. Série temporal de vazão estimada para o Rio Piratini

O coeficiente de correlação calculado entre janeiro de 1976 a dezembro de 1982 foi igual a 0,86, possibilitando a estimativa através do método de regionalização de vazões. A tendência linear calculada para a série de vazão apresenta uma diminuição de $20 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Esse resultado difere dos encontrados por outros autores em outros rios. Tendências positivas foram encontradas por Robertson e Mechoso (1998) nas vazões dos Rios Paraná e Paraguai e por Genta, Perez-Iribarren e Mechoso (1998) quando estudaram as séries temporais de vazão dos Rios Uruguai, Paraguai, Negro e Paraná. Provavelmente o método utilizado para estimar a vazão tenha criado essa tendência negativa, uma vez que o coeficiente de correlação encontrado, embora aceitável, não foi alto.

Para a série temporal do Rio Piratini, o espectro de potência também mostra o domínio da frequência semestral, caracterizando o regime climático da região (Figura 12).

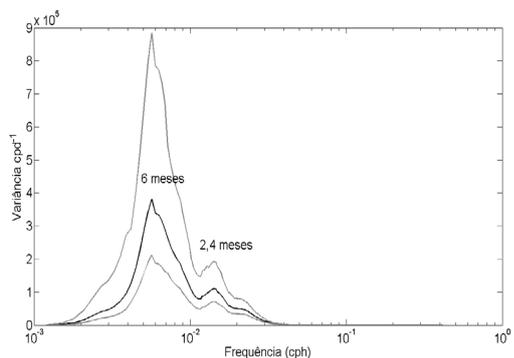


Figura 12 - Espectro de potência da série temporal de descarga fluvial do Rio Piratini para o período de janeiro de 1962 a fevereiro de 2011. Os períodos identificados estão associados aos picos relevantes. As linhas cinza superiores e inferiores representam o intervalo de 95% de confiança do espectro

Estimativa de Descarga da Lagoa Mirim

A estimativa de descarga da Lagoa Mirim foi realizada através da correlação entre as vazões e os níveis de água medidos em Santa Izabel. A Equação que melhor representa a descarga foi encontrada através da regressão polinomial de segunda ordem, com alto coeficiente de determinação (R^2), igual a 0,91 (Figura 13).

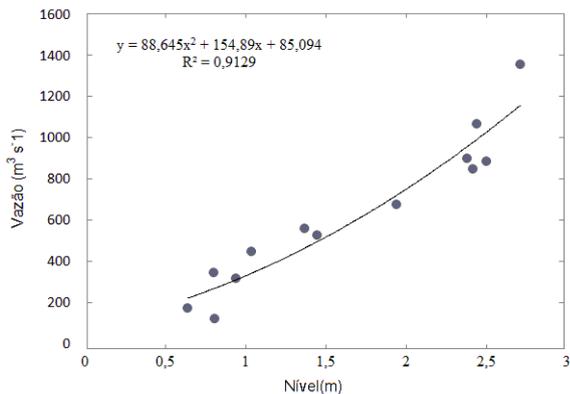


Figura 13 – Curva de correlação entre os níveis observados e as vazões medidas em Santa Izabel

A série temporal de vazão da Lagoa Mirim para a Lagoa dos Patos estimada para o período entre Janeiro de 2009 e Dezembro de 2011, através da equação acima e da série temporal de níveis de água em Santa Izabel, pode ser observada na figura 14.

A vazão oscilou entre os valores de $98,54 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ em janeiro de 2009 a $1503 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ em dezembro de 2009, enquanto a média calculada para o período é igual a $590,96 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Existem poucos trabalhos sobre a descarga da Lagoa Mirim. A Secretaria do Meio Ambiente do Estado do Rio Grande do Sul (SEMA, 2006), estimou a descarga anual média da Lagoa em torno de $395,91 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, com vazão mínima de $41,98 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ em janeiro. Machado (2002) calculou a descarga média do Canal de São Gonçalo e chegou a valores de $433,41 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $437,141 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, para os meses de janeiro de 2001 e julho de 2001, respectivamente.

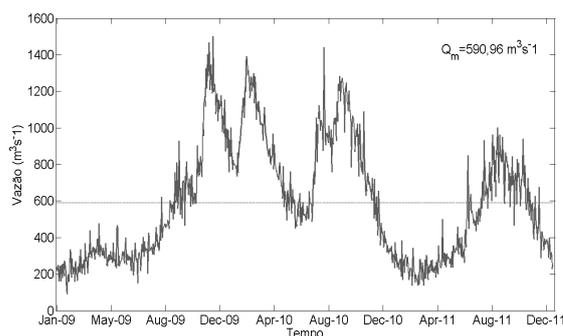


Figura 14 – Série temporal de vazão da Lagoa Mirim para a Lagoa dos Patos, estimada através dos pares cota-vazão

A curva-chave de descarga calculada para a Lagoa Mirim é apresentada na figura 15. O início e final da curva foi limitado pelas cotas máximas e mínimas (acima de 0) medidas no período de estudo e são iguais a 0,6 e 2,7m respectivamente.

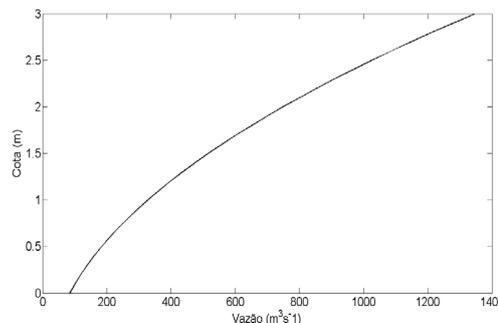


Figura 15 – Curva-chave de vazão calculada para a Lagoa Mirim

Apesar da boa correlação encontrada através dos pares cota-vazão, é importante que sejam realizadas mais campanhas para coletas de dados de vazão, para que as curvas de correlação e a curva-chave sejam calibradas, aumentando assim a qualidade das estimativas.

Como a vazão máxima dos contribuintes da Lagoa Mirim é superior a $30.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e a capacidade de descarga máxima do Canal de São Gonçalo para a Lagoa dos Patos é inferior a $2.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, a Lagoa Mirim acumula a diferença dessas descargas, atuando como um grande reservatório de água doce (SUDESUL, 1974). Convém lembrar também, que a região do Canal de São Gonçalo apresenta pequeno declive, o que pode contribuir para o baixo escoamento em direção à Lagoa dos Patos e à manutenção de níveis altos na Lagoa Mirim.

Em função dos aportes dos rios uruguaios e da fraca descarga da Lagoa Mirim em direção à Lagoa dos Patos, o tempo de descarga das águas no interior da Lagoa Mirim é alto, sendo em média de 595 dias. Considerando a maior vazão para o período, esse tempo diminui para 195 dias e aumenta para 1500 dias quando se considerada a vazão mínima encontrada (Figura 16). Estes resultados explicam as razões da manutenção de altos níveis de água por longos períodos de tempo. Além disso, fica evidente que este sistema pode apresentar sérios problemas ambientais se for submetido às ações antrópicas que gerem impactos na qualidade de suas águas.

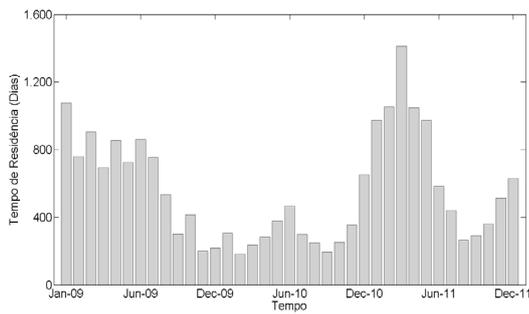


Figura16 – Tempo de descarga médio mensal para Lagoa Mirim

Estudo da influência dos ventos

Como a Lagoa Mirim possui grande área superficial e pequenas variações de batimetria, existe uma forte correlação entre a sua hidrodinâmica e os ventos locais. Essa correlação pode ser melhor observada na figura 17 (a), que ilustra os desníveis calculados entre as extremidades norte e sul da Lagoa Mirim (em preto) e a componente longitudinal do vento (em vermelho). Neste trabalho, são apresentados apenas os resultados para o ano de 2009, contudo as correlações também foram feitas para dos anos de 2010 e 2011, e apresentaram resultados semelhantes aos descritos a seguir.

Os resultados da análise por ondaleta (Figura 17 (b)) indicam que o vento longitudinal é um fator importante na circulação da Lagoa Mirim em períodos de 4 a 16 dias, atuando no transporte de água entre as extremidades da Lagoa Mirim. Ventos do quadrante sul empilham água ao norte desta lagoa, fazendo com que os níveis observados sejam maiores em Santa Izabel (N), enquanto ventos N-NE aumentam os níveis na

porção sul. Como o tempo de descarga na Lagoa Mirim é alto, essa circulação dirigida pelo vento se torna particularmente importante do ponto de vista ambiental, uma vez que a turbulência gerada pelos ventos oxigena as águas da Lagoa Mirim e redistribui os nutrientes, que são transportados pelas correntes oriundas dessa ação.

A partir das séries temporais diárias de nível e de vento, foi possível aplicar um modelo analítico de desnível para a Lagoa Mirim. Esse modelo, apesar de ser relativamente simples, tem sido aplicado com sucesso por vários autores em diversos ambientes. Marques (2005) aplicou este modelo na Lagoa dos Patos para estudar os desníveis longitudinais formados ao longo desse corpo lagunar entre a extremidade norte e sua área central sul. Pollack (1960) encontrou alta correlação entre as médias mensais do vento longitudinal e os desníveis da superfície em Chesapeake Bay, nos Estados Unidos. Alta correlação também foi encontrada na baía de Massachusetts (PARKER; PEARCE, 1975). Em 1979, Wang estudou as variações dos níveis da baía de Chesapeake em resposta a circulação barotrópica dirigida pelo vento. Também na baía de Chesapeake, Valle-Levinson (1995) mostrou que o estresse do vento produz uma resposta barotrópica na circulação residual. Wang, Cheng e Smith (1997) utilizaram as equações para mostrar a importância do vento local nas elevações da superfície e nos desníveis da Baía de São Francisco.

Neste trabalho os desníveis de janeiro de 2009 a dezembro de 2011 foram calculados pelo modelo analítico acima mencionado. De maneira geral, o modelo conseguiu simular os desníveis observados entre as estações de Santa Izabel (norte) e Santa Vitória do Palmar (sul). Assim, para melhor visualização dos resultados, na figura 18 são apresentados somente os desníveis observados e calculados para o ano de 2009.

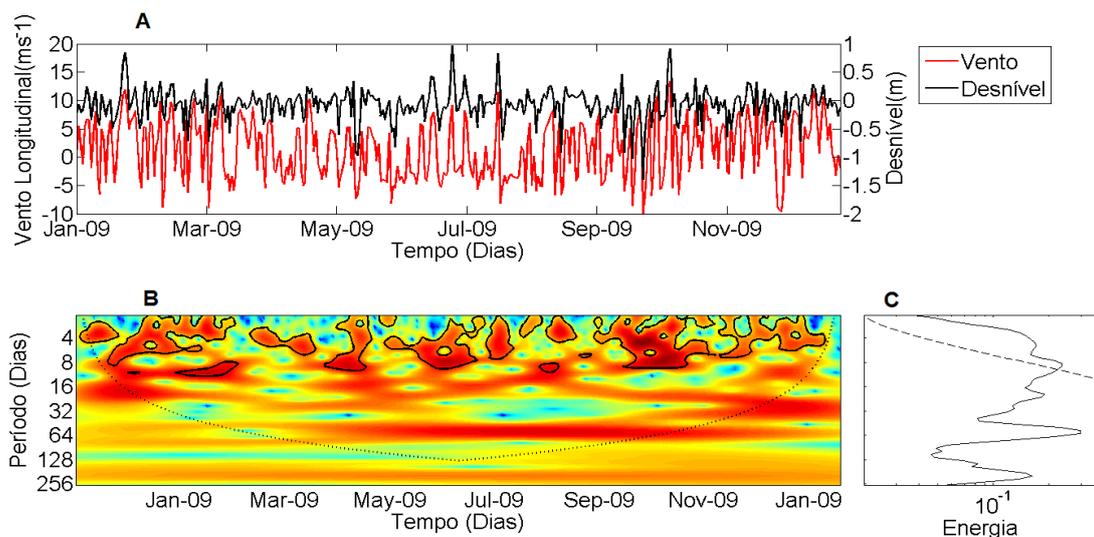


Figura 17 - (a) Séries temporais de desníveis entre as extremidades Norte e Sul da Lagoa Mirim e da intensidade da componente longitudinal do vento. (b) Espectro cruzado de energia utilizando ondaleta de Morlet. Linhas pretas indicam o nível de 95% de confiança e a linha pontilhada preta indica o cone de influência. (c) Espectro de potência cruzada global das séries temporais. A linha pontilhada indica o nível de 95% de confiança

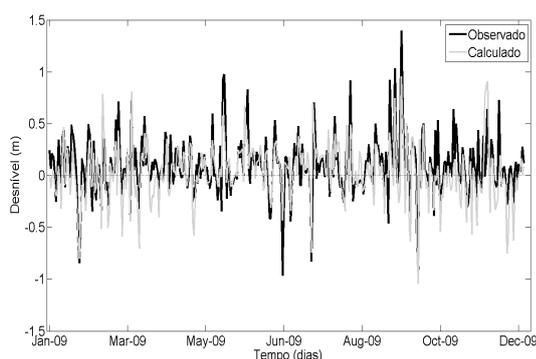


Figura 18 – Séries temporais de desníveis entre Santa Izabel e Santa Vitória do Palmar, calculados através do modelo analítico para o período de 01 janeiro de 2009 a 31 dezembro de 2009

O modelo conseguiu simular os desníveis observados na Lagoa Mirim com coeficiente de determinação (R^2) de 0,89. Entretanto os resultados indicam que o modelo analítico apresenta uma deficiência em reproduzir situações de desnível acentuado. Quando os desníveis são negativos, os dados modelados têm amplitudes maiores, e o inverso ocorre quando os desníveis são positivos (Figura 19).

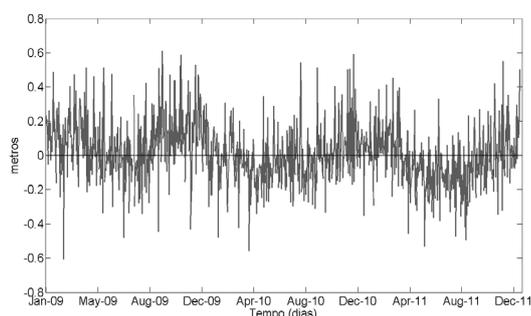


Figura 19 –Diferença entre os desníveis observados e os calculados pelo modelo analítico

Em alguns períodos, o modelo reproduz níveis maiores em Santa Izabel do que em Santa Vitória do Palmar. Essa diferença pode ser explicada pela existência de importantes rios na porção sul da Lagoa Mirim que, em situações de alta descarga, aumentam também o nível em Santa Vitória do Palmar. Situação similar havia sido observada por Marques (2005) com relação à parte norte da Lagoa dos Patos, onde desemboca a bacia drenada pelo Rio Guaíba.

Os resultados deste trabalho indicam que este sistema lagunar apresenta um comportamento diferenciado, pois recebe o aporte considerável de vários corpos hídricos de uma importante bacia hidrográfica binacional, enquanto o escoamento acontece apenas pelo Canal de São Gonçalo. Os níveis de água na Lagoa Mirim são controlados pela descarga dos rios em escalas temporais sazonais, e pelo vento em escalas temporais menores (até 15 dias). O escoamento desse sistema em direção à Lagoa dos Patos ainda depende dos níveis das águas nessa laguna. A entrada de água do mar, em eventos de ventos de SO podem

aumentar o nível na Lagoa dos Patos, represando, ou mesmo invertendo os fluxos para o interior da Lagoa Mirim. Antes da construção da barragem eclusa, em épocas de baixas descargas fluviais, havia a entrada de água salgada para a Lagoa Mirim.

Assim, pode-se concluir que o vento na Lagoa Mirim age apenas como uma forçante local, gerando desníveis entre extremidades e condicionando correntes e vórtices (giros) em sentidos opostos, conforme sua direção.

CONCLUSÕES

A partir de dados da Agencia Nacional de Águas foi possível construir séries temporais de descarga para os Rios Tacuarí e Cebollati e estimar uma série temporal de 49 anos para o Rio Piratini utilizando dados de duas estações diferentes. Além disso, com base em dados de vazão e uma série temporal de níveis medidos, foi estimada a descarga da Lagoa Mirim e foi produzida uma curva-chave.

O aporte de água estimado na Lagoa Mirim pelos seus afluentes no período estudado é muito maior que a vazão estimada do Canal de São Gonçalo para a Lagoa dos Patos, indicando que a Lagoa Mirim atua como um grande reservatório de água doce. Isso também pode ser observado através dos tempos de descarga médios calculados para a Lagoa Mirim. O alto aporte fluvial e a baixa descarga faz com que os tempos de descarga da Lagoa Mirim sejam muito altos variando entre 195 e 1500 dias.

O modelo analítico mostrou ser eficiente para o cálculo do desnível entre as suas extremidades da Lagoa Mirim, entretanto ele simula níveis mais altos em Santa Izabel do que em Santa Vitória do Palmar. Essas diferenças podem estar associadas ao aporte fluvial dos rios na porção sul da Lagoa Mirim.

Os processos hidrodinâmicos na Lagoa Mirim são modulados por dois fatores principais: a descarga fluvial de seus afluentes determina o volume de água da Lagoa Mirim, enquanto o vento, em escala de vento sinótica, controla a circulação de água nesse sistema. O efeito da conexão da Lagoa dos Patos e Mirim através do Canal de São Gonçalo e os processos de inversão de fluxo, nunca foram estudados e merecem uma atenção maior com a aplicação de técnicas de modelagem numérica em uma grade que englobe os dois sistemas. Esse é o próximo passo deste estudo.

AGRADECIMENTOS

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Ensino Superior) pela concessão da bolsa de mestrado do primeiro autor. A FINEP pelo financiamento dos projetos TRANSAQUA (www.transaqua.furg.br), através do Convênio 01.11.0141.01 e REHMANSÁ (convênio 01.12.0064.00), e ao CNPq pelos processos 551436/2011-5 (EHF), 308274/2011-3 (EHF), 302231/2010-2 (OMJ).

À Secretaria de Meio Ambiente do Estado do Rio Grande do Sul pelo financiamento do projeto Estudos Hidrodinâmicos do Canal de São Gonçalo na Área do Pró-Mar-de-Dentro (convênio SEMA/FAURG/FURG/UFPEL).

REFERÊNCIAS

- BORDAS M. P.; CASALAS, A. B.; SILVEIRA, A.; GONÇALVES, M. Circulação e dispersão em sistemas costeiros e oceânicos. Caso da Lagoa dos Patos. Porto Alegre: Universidade Rio Grande do Sul, 1984. (Relatório Técnico IPH/UFRGS).
- COLLISCHONN, W.; TÁSSIA, R. Introduzindo a hidrologia. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Rio Grande do Sul, 2011. Apostila.
- EMERY, W. J.; THOMSON, R. E. Data analysis methods in physical oceanography. Oxford: Pergamon Press, 1997.
- GENTA, J. L.; PEREZ-IRIBARREN, G.; MECHOSO, C. R. A recent increasing trend in the streamflow of rivers in Southeastern South America. *Journal of Climate*, v. 11, n. 11, p. 2858-2862, Nov. 1998.
- GOUVÊA, T.; ZARNOT, D. H.; ALBA, J. M. F. Caracterização geoambiental e histórico do processo de desenvolvimento da bacia da Lagoa Mirim. In: FILIPPINI ALBA, J. M. (Ed.). Sustentabilidade socioambiental da bacia da Lagoa Mirim. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2010. p. 19-30.
- GRIMM, A. M.; BARROS, V. R.; DOYLE, M. E. Climate variability in southern south America associated with El Niño and La Niña events. *American Meteorological Society*, v. 13, n. 1, p. 35-57, Jan. 2000.
- GRIMM, A. M.; FERRAZ, S. E. T.; GOMES, J. Precipitation anomalies in Southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. *Journal of Climate*, v. 11, n. 1, p. 2863-2880, Nov. 1998.
- HIRATA, F. E.; MÖLLER, O. O.; MATA, M. M. Regime shifts, trends and interannual variations of water level in Mirim Lagoon, southern Brazil. *Pan-American Journal of Aquatics Sciences*, v. 5, n. 2, p. 254-266, 2010.
- IRGA - Instituto Rio Grandense do Arroz. Arroz irrigado – safra 2005/2006 – produção municipal. 2006. Disponível em: <<http://www.irga.rs.gov.br/arquivos/20070117104152.pdf>>. Acesso em: 13 ago. 2007. Esse link está sem acesso.
- KJERFVE, B. Coastal Lagoons. In: KJERFVE, B. (Ed.). Coastal lagoon processes. [S.l.]: Elsevier, 1994. p. 1-8. (Elsevier Oceanography Series, 60).
- KJERFVE, B. Comparative Oceanography of Coastal Lagoons. In: WOLF, D. A. (Ed.). Estuarine variability. New York: Academic Press, 1986. p. 63-81.
- KILADIS, G. N.; DIAZ, H. F. Global Climatic Anomalies Associated with Extremes in the Southern Oscillation. *Journal of Climate*, v. 2, n. 9, p. 1069-1090, Sept. 1989.
- KOPPEN, W. Climatologia com um estudo de los climas de la Tierra. Tradução de Pedro R. H. Peres. México: Fondo de Cultura Económica, 1984.
- MACHADO, G. Demanda e disponibilidade hídrica no sistema Lagoa Mirim-São Gonçalo – Rio Grande do Sul. *Revista Discente Expressões Geográficas*, n. 3, p. 61-82, maio 2007.
- MACHADO, G. Qualidade das águas no Canal de São Gonçalo – Rio Grande do Sul – Brasil. 2002. 170 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.
- MARQUES, W. C. Estudo da dinâmica da pluma costeira da Lagoa dos Patos. 2009. 284 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Rio Grande, Rio Grande, RS. 2009.
- MARQUES, W. C. Padrões de variabilidade temporal nas forçantes da circulação e seus efeitos na dinâmica da Lagoa dos Patos, Rio Grande do Sul – Brasil. 2005. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Rio Grande, Rio Grande, RS. 2005.
- MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; KJERFVE, B. Princípios de oceanografia física de estuários. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2002. 414p.
- MÖLLER, O. O.; CASTING, P.; SALOMON, J. C.; 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. Apr. 2001.
- OLIVEIRA, G. S. O El Niño e você. São José dos Campos, SP: Transtec, 2001.
- PARKER, B. B.; PEARCE, B. R. The response of Massachusetts bay to wind stress. 1975. 107 f. Dissertation (Master) - Massachusetts Institute of Technology, 1975.
- PHILANDER, G. El Niño, La Niña, and the South Oscillation. London: Academic Press, 1990.
- PIOLA, A. R.; ROMERO, S. I.; ZAJACZKOVSKI, U. Space-time variability of the Plata plume inferred from ocean color. *Continental Shelf Research*, v. 28, n. 13, p. 1556-1567, July 2008.
- POLLAK, M. J. Space-time variability of the Plata plume inferred from ocean color Wind set-up and shear-stress coefficient in Chesapeake Bay. *Journal of Geophysical Research*, v. 65, n. 10, p. 3383-3389, Oct. 1960.
- RAO, V. B.; HADA, K. Characteristics of Rainfall over Brazil: Annual Variations and Connections with the Southern Oscillations. *Theoretical And Applied Climatology*, v. 42, n. 2, p. 81-91, 1990:.
- ROBERTSON, A. W.; MECHOSO, C. R. Interannual and decadal cycles in river flows of Southeastern South America. *Journal of Climate*, v. 11, n. 10, p. 2570-2581, 1998.

- ROPELEWSKI, C. F.; HALPERT, M. S. Global and regional scale precipitation associated with the El Niño/South Oscillation. *Monthly Weather Review*, v. 115, n. 8, p. 1606-1626, 1987.
- SEMA – Secretaria do Meio Ambiente do Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Secretaria do Meio Ambiente do Estado do Rio Grande do SUL, 2006. Disponível em: <<http://www.sema.rs.gov.br/sema/jsp/rhcommrim.jsp>>. Acesso em: 23 ago. 2010.
- SCHMIDT, C. C. O Emprego do Modelo ELCIRC na Simulação Computacional da Hidrodinâmica e do Transporte de Corpos de Águas. 2004. 90 f. Monografia (Bacharelado em Informática) - Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, PR, 2004.
- SUDESUL. Plano de desenvolvimento da Bacia da Lagoa Mirim. Porto Alegre: SUDESUL, 1974.
- TUCCI, C. E. M. Regionalização de Vazões. In: TUCCI, C. E. M. (Ed.). *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre: Editora da Universidade: ABRH, 1997. p. 573-619.
- VALLE-LEVINSON, A. Observations of barotropic and baroclinic exchanges in the lower Chesapeake Bay. *Continental Shelf Research*, v. 15, n. 13, , p. 1631-1647, Nov. 1995.
- VALLE-LEVINSON, A.; WONG, K.; BOSLEY, K. T. Observations of the wind-induced exchange at the entrance to Chesapeake Bay. *Journal of Marine Research*, v. 59, n. 3, p. 391-416, May 2001.
- VAZ, A. C. 2003. Efeito da descarga de água doce em processos ocorrentes no estuário da Lagoa dos Patos. 2003. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade Federal de Rio Grande, Rio Grande, 2003.
- VAZ, A. C.; MÖLLER, O. O.; ALMEIDA, T. L. Análise quantitativa da descarga dos rios afluentes da Lagoa dos Patos. *Revista Atlântica*, v. 28, n. 1, p. 13-23, 2006.
- VIEIRA, E. F.; RANGEL, S. R. S. Rio Grande do Sul: geografia física e vegetação. Porto Alegre: Sagra, 1984.
- VIEIRA, E. F.; RANGEL, S. R. S. Planície Costeira do Rio Grande do Sul: geografia física, vegetação e dinâmica sócio-demográfica. Porto Alegre: Sagra, 1988.
- XAVIER, A. S. Estudo da circulação hidrodinâmica da Lagoa Mirim, RS. 2002. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Rio Grande, Rio Grande, RS, 2002.
- WANG, D. Wind-Drive Circulation in the Chesapeake Bay, Winter 1975. *Journal of Physical Oceanography*, v. 9, n. 3, p. 564-572, May 1979.
- WANG, J.; CHENG, R. T.; SMITH, P. C. Seasonal Sea-level Variations in San Francisco Bay in Response to Atmospheric Forcing, 1980. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 45, n. 1, p. 39-52, 1997.
- WANG. C.; DESER, C.; YU, J-Y.; DINEZIO, P.; CLEMENT, A. El Niño and Southern Oscillation (ENSO): a review. *Coral Reefs of the Eastern Pacific*, p. 3-19, 2012.