



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE – FURG**  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA  
FÍSICA, QUÍMICA E GEOLÓGICA.

**Variabilidade dos Fluxos de Sedimentos em  
Suspensão para a Lagoa dos Patos e os  
Processos de Trocas com o Oceano Adjacente**

**BÁRBARA MICHELLY JUNG**

Orientador: Dr. Osmar Olinto Möller Jr.  
Co-Orientador: Dra. Elisa Helena Leão Fernandes.

RIO GRANDE  
Fevereiro de 2017

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE – FURG**  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA  
FÍSICA, QUÍMICA E GEOLÓGICA.

**Variabilidade dos Fluxos de Sedimentos em  
Suspensão para a Lagoa dos Patos e os  
Processos de Trocas com o Oceano Adjacente**

por

**Bárbara Michelly Jung**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica da Universidade Federal do Rio Grande, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre.

**Rio Grande, RS – Brasil**

**Julho 2017**

À minha família, pelo apoio e amor incondicional.

# Agradecimentos

Gostaria de primeiramente agradecer à minha esposa e minha filha pela paciência e pela compreensão em entender e aceitar a minha ausência e por estar sempre ao meu lado em todas as circunstâncias. Obrigada meu amor por sempre me incentivar e me apoiar em todos os momentos, por ouvir minhas inúmeras reclamações e me entender em cada uma delas. Obrigada por me dar suporte quando eu tenho uma crise e quero ir embora do planeta, e obrigada por me incentivar depois dizendo que eu posso dominar o mundo! Obrigada por sonhar os meus sonhos comigo.

Agradeço imensamente aos meus pais, principalmente por toda ajuda e apoio que tive sempre em toda a minha vida. Se eu estou aqui hoje é porque vocês me ensinaram que eu sempre posso mais! Obrigada por sempre acreditarem em mim! Obrigada ao meu irmão e família que nunca deixaram de acreditar em mim e me apoiar a seguir meus sonhos! Agradeço também aos meus amigos que sempre acreditaram em mim e sempre tiveram as palavras certas para me falar em cada momento difícil. Aos meus colegas de laboratório e de mestrado pela ajuda em diversos momentos, pelas brincadeiras, pelos papos sérios e pelos momentos de descontração. Obrigada por toda a parceria nestes anos, mostrando que a ciência é algo para ser desenvolvido no coletivo, e não no individual. Caminhando junto nós chegamos mais longe!

Quero agradecer também aos meus orientadores, Osmar e Elisa. Obrigada por me permitirem trilhar este caminho e concluir meus objetivos. Obrigada Elisa por todas as palavras de apoio que me destes, não só ao longo deste mestrado, mas ao longo de todo meu caminho acadêmico. Tuas palavras me servem como guia, obrigada! Obrigada Osmar pelas oportunidades e aprendizado ao longo destes anos. Obrigada a todos os professores com quem tive a honra de aprender, obrigada por dividirem seu conhecimento permitindo multiplicar os meus. Agradeço também a FINEP pelo financiamento dos projetos TRANSAQUA ([www.transaqua.furg.br](http://www.transaqua.furg.br)), através do Convênio 01.11.0141.01 e REHMANSÁ (convênio 01.12.0064.00).

## **Pensamento**

**O período de maior ganho em conhecimento e experiência é o período mais difícil da vida de alguém – Dalai Lama.**

# Sumário

<b>Lista de Acrônimos e Símbolos .....</b>	<b>i</b>
<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>iii</b>
<b>Lista de Tabelas.....</b>	<b>v</b>
<b>Resumo .....</b>	<b>vi</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>vii</b>
<b>Capítulo 1 - Introdução .....</b>	<b>01</b>
1.1 Descrição da Área de Estudo.....	02
1.1.1 Rio Guaíba .....	05
1.1.2 Rio Camaquã .....	07
1.1.3 Canal do São Gonçalo(CSG) .....	08
1.2 Dinâmica da Lagoa dos Patos (LP) .....	09
1.3 Estuário da Lagoa dos Patos (ELP) .....	10
1.4 Estrutura do Trabalho .....	12
<b>Capítulo 2 - Objetivos .....</b>	<b>13</b>
2.1 Objetivo Geral .....	13
2.2 Objetivo Específico .....	13
<b>Capítulo 3 - Material e Métodos .....</b>	<b>14</b>
3.1 Dados de Vazão e Sedimento em Suspensão .....	14
3.1.1 Fluxos de água e de sedimento em suspensão para a LP .....	14
3.1.2 Trocas com o Oceano .....	15
3.2 Análises Estatísticas .....	15
3.2.1 Análises de Correlação .....	15
3.3 Curva-Chave de Sedimento .....	16
3.4 Variabilidade .....	17
<b>Capítulo 4 - Resultados e Discussões .....</b>	<b>20</b>
<b>Capítulo 5 - Considerações Finais.....</b>	<b>57</b>
<b>Capítulo 6 - Referências Bibliográficas .....</b>	<b>60</b>

# Lista de Acrônimos e Símbolos

ALM – Agência da Lagoa Mirim.

ANA – Agência Nacional de Águas.

C – Variável da concentração de sedimentos em suspensão.

CA – Canal de Acesso.

CSG – Canal do São Gonçalo.

CSS – Concentração de Sedimento em Suspensão.

CF – Correction Factor.

$C_i^{obs}$  – Concentration of observed data.

$C_i^{mean}$  – Mean of observed data concentration.

$C_i^{sim}$  – Concentration of simulated data.

DMAE – Departamento Municipal de Água e Esgoto.

ELP – Estuário Lagoa dos Patos.

ENSO – El Niño-Southern Oscillation.

$i$  – index.

IOS – Índice de Oscilação Sul.

Km<sup>2</sup> – Quilometro quadrado. Unidade de Área.

LAR – Least Absolut Residual.

LP – Lagoa dos Patos.

LM – Lagoa Mirim.

m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> — Metros cúbicos por segundo. Unidade de fluxo de vazão.

mg.L<sup>-1</sup> – Miligramas por Litro. Unidade de volume de sedimento em suspensão.

$\mu$  – média da variável.

N – Número de observações.

NE – Nordeste.

NSE – Nash-Sutcliffe Efficiency coefficient.

$\rho$  – Coeficiente de Correlação de Pearson's.

PBIAS – Percent of bias.

$\psi$  – função de uma Ondaleta mãe.

PL – Patos Lagoon.

Q – River Discharge.

R – Pearson's correlation coefficient.

RMSE – Root Mean Square Error.

RSR – RMSE-observations Standard deviation Ratio.

s – termo de escala de ondaleta.

SEPLAG-RS – Secretaria de Planejamento e Gestão do Rio Grande do Sul.

SEMA – Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Rio Grande do Sul.

SGC – São Gonçalo Channel.

$\sigma$  – desvio padrão.

SSC – Suspended Sediment Concentrations.

SW – Sudoeste.

t – variável de tempo.

ton – toneladas.

t.ano<sup>-1</sup> – toneladas por ano.

t.h<sup>-1</sup> – toneladas por hora.

$\tau$  – Termos de translação de ondaletas.

WCT – Transformada de Ondaleta Contínua.

ZMT – Zona de Máxima Turbidez.



# Lista de Figuras

Figura 1 - Composição sedimentológica da LP (adaptado por Calliari et. al, 2009 de Toldo Jr., 1994). Enumeração da localização dos principais afluentes: 1)Complexo Rio Guaíba; 2) Rio Camaquã; 3) Canal do São Gonçalo.... Pág. 04

Figura 2- Bacia Hidrográfica do Guaíba/RS. Fonte: SEMA/2012.....Pág. 06

Figura 3- Bacia Hidrográfica dos rios Camaquã e Lagoa Mirim (porção do território nacional brasileiro) - São Gonçalo/RS. Fonte: SEMA/2008..... Pág. 09

Figura 4. Representação de diferentes ondaletas: (a) Morlet;(b) Paul; (c) Mexican Hat. Figuras da esquerda representando a parte real (linha sólida), e a parte imaginária (linha pontilhada) para as características das ondaletas no domínio do tempo. As figuras da direita representam as ondaletas no domínio de frequência. Adaptada de Torrance & Compo,1998..... Pág. 19

Figura 5. Pluma do CSG no interior do ELP a partir de imagens ou fotos. A): Foto em missão Skylab tirada da região estuarina da Lagoa dos Patos em 1973 onde a pluma do CSG aparece de forma distinta em função da coloração mais escura dos sedimentos que carrega em suspensão. Fonte: Herz, 1977. B: Imagem Landsat de 6 de Julho de 1987 onde a pluma do CSG apresenta o mesmo comportamento, mas agora toma todo o Canal de Acesso à Lagoa dos Patos; C: Imagem Landsat de 18 de Novembro de 2013 onde a pluma apresenta a mesma dinâmica que os casos A e B contribuindo para a formação da pluma da Lagoa dos Patos (obtida de Costa, 2016).....59

## **Artigo 1: Patos Lagoon Suspended Sediment Budget: a Sediment Rating-Curve Comparative Approach**

Figura 1 - Patos Lagoon and its main tributaries. Different color scales show the different drainage basins, identifying the tributaries by numbers. 1. Guaíba Complex; 2. Camaquã River; 3. São Goncalo Channel (SGC)..... Pág. 25

Figura 2 - All data (left) and monthly average (right) rating-curves: (a) Guaíba all data rating-curve; (b) Guaíba monthly data rating-curve; (c) Camaquã all data rating-curve; (d) Camaquã monthly data rating-curve; (e) SGC's all data rating-curve..... Pág. 31

Figura 3 - Observed vs. Calculated SSC for (a) Guaíba (b) Camaquã and (c) SGC using best rating curve approach..... Pág. 35

## **Artigo 2: Variabilidade do Balanço de Sedimento em Suspensão da Lagoa dos Patos: Principais Afluentes e Trocas com o Oceano Adjacente.**

- Figura 1 - Distribuição das bacias hidrológicas que alimentam a LP. (1) Guaíba; (2) Camaquã; (3) CSG; (4) Canal de Acesso. Adaptada de Jung et al. (2017, no prelo) ..... Pág. 44
- Figura 2 - Séries temporais de vazão e CSS dos principais afluentes da LP. (a) Série temporal histórica do Complexo rio Guaíba. (b) Série temporal histórica do rio Camaquã. (c) Série temporal histórica para o CSG..... Pág. 45
- Figura 3 - Séries temporais do fluxo de sedimento em suspensão dos principais afluentes da LP. (a) Série temporal histórica do Complexo rio Guaíba. (b) Série temporal histórica do rio Camaquã. (c) Série temporal histórica para o CSG. Linhas em verde representam o valor médio do fluxo..... Pág. 46
- Figura 4 - Séries temporais do fluxo de sedimento em suspensão para a região do Canal de Acesso. Linha em verde representa o valor médio do fluxo..... Pág. 48
- Figura 5 - Série Temporal de CSS para o canal de acesso, representando a distribuição temporal de CSS para as camadas de fundo e superfície. Linhas tracejadas em vermelho representam a média de CSS de fundo e superfície..... Pág. 48
- Figura 6 - Análise da variabilidade do fluxo de sedimento em suspensão através das Ondaletas para os diferentes tributários da LP e para a região do Canal de Acesso. (a) Variabilidade do fluxo para o Guaíba; (b) variabilidade do fluxo para o rio Camaquã; (c) variabilidade do fluxo para o CSG; (d) variabilidade do fluxo para o Canal de Acesso do Porto de Rio Grande. ....Pág. 49
- Figura 7 - Média climatológica para (a) CSS e (b) fluxo dos afluentes da LP. Variabilidade sazonal do rio Guaíba, Camaquã e o CSG..... Pág. 50
- Figura 8 - Linhas de tendências para os principais tributários da LP. (a) Rio Guaíba; (b) Rio Camaquã e (c) CSG. As linhas pontilhadas em preto representam a série temporal histórica de CSS. As cores das linhas de tendência em vermelho, azul e magenta estão representando as linhas de tendências positivas, negativas e estáticas, respectivamente..... Pág. 51
- Figura 9 - Índice de Oscilação Sul para o período de 1990 até 2013. Região circulada em vermelho corresponde à década de 90, apresentando predominância de eventos negativos (El Niño). Região circulada em azul representa período atual com predominância de índices positivos (La Niña)..... Pág. 52

# Lista de Tabelas

## **Artigo 1: Patos Lagoon Suspended Sediment Budget: a Sediment Rating-Curve Comparative Approach**

Tabela 1 - Calibration and Validation Criteria, adapted from Moriasi et al. (2007)..... Pág. 29

Tabela 2 - Suspended Sediment vs. River Flow Correlation ..... Pág. 30

Tabela 3 - Sediment Rating-Curves Statistical Parameters ..... Pág. 32

## **Artigo 2: Variabilidade do Balanço de Sedimento em Suspensão da Lagoa dos Patos: Principais Afluentes e Trocas com o Oceano Adjacente.**

Tabela 1 - Balanço sedimentar da Lagoa dos Patos. Entradas e saída de CSS pelos principais afluentes e pela desembocadura do ELP..... Pág. 46

Tabela 2 - Valores de Exportação de sedimento em suspensão encontrados na literatura para os afluentes da LP..... Pág. 47

# Resumo

O objetivo principal deste trabalho foi determinar a variabilidade temporal do aporte de sedimentos em suspensão dos principais afluentes da Lagoa dos Patos (LP) e analisar o balanço sedimentar com a região costeira adjacente. Foram utilizados dados de descarga fluvial para os rios Jacuí, Taquari, Camaquã e para o Canal do São Gonçalo (CSG), e dados de vazão e sedimento em suspensão para a região estuarina. Diferentes metodologias de curvas-chave de sedimento em suspensão foram testadas para os diferentes afluentes, bem como foram aplicados métodos estatísticos e análises espectrais visando determinar a variabilidade dos fluxos de entrada e saída de sedimento em suspensão. Como primeiro resultado foi avaliado o desempenho das curvas-chaves em reproduzir os valores de sedimento em suspensão, onde o método não linear apresentou os melhores valores. Através destas curvas-chaves foi possível construir as séries temporais históricas de concentração de sedimento em suspensão para as análises dos objetivos específicos. As taxas de exportação encontradas foram na ordem de  $2.91 \times 10^6 \text{ ton.ano}^{-1}$  para o rio Guaíba, de  $0.53 \times 10^6 \text{ ton.ano}^{-1}$  para o rio Camaquã e de  $2.5 \times 10^6 \text{ ton.ano}^{-1}$  para o CSG. Essas exportações correspondem a um fluxo médio diário de aproximadamente  $24300 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$  de sedimento em suspensão que chega à LP. Em contrapartida, na região estuarina encontramos uma taxa de exportação na ordem dos  $11 \times 10^6 \text{ ton.ano}^{-1}$  com fluxo médio diário de aproximadamente  $19500 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$ . Essas taxas apresentaram variabilidades que passam do período de dias, para sazonal e interanual. Eventos extremos como El Niño influenciam diretamente no aumento da exportação de sedimento em suspensão para a região costeira. Foi possível concluir com este trabalho que existe um balanço sedimentar plausível entre a LP e o Oceano, porém sua complexidade abrange outros fatores como a presença de lama fluída no fundo do canal estuarino, Zonas de Máxima Turbidez, ressuspensão de sedimento, floculação, entre outros fatores secundários.

**Palavras-Chave:** Balanço Sedimentar, Lagoa dos Patos, Variabilidade Temporal, Variabilidade Espacial, Concentração de Sedimento em Suspensão.

# Abstract

The main purpose of this study was to determine the suspended sediment temporal variability in the Patos Lagoon main tributaries and to analyze the system suspended sediment budget. River discharge data were used for the Jacuí, Taquari and Camaquã rivers and for the São Gonçalo Channel (SGC). Discharge and suspended sediment data from the estuarine region were also used for the analysis. Several suspended sediment rating-curves were tested for each tributary, as well as statistical methods and spectral analyzes were applied to each area to determine their variability. The non-linear rating curve approach resulted in the most consistent method for the suspended sediment time series reconstruction. From the historical sediment time series, the Guaíba River presented an exporting rate of  $2.91 \times 10^6$  ton.year<sup>-1</sup>, the Camaquã River a rate of  $0.53 \times 10^6$  ton.year<sup>-1</sup>, and  $2.5 \times 10^6$  ton.year<sup>-1</sup> for the SGC. These rates correspond to a suspended sediment daily average flow of 19500 m<sup>3</sup>.day<sup>-1</sup>, arriving in the Patos Lagoon. On the other hand, in the estuarine region, it was found an exporting rate of  $11 \times 10^6$  ton.year<sup>-1</sup>, with a daily average flow of 27600 m<sup>3</sup>.day<sup>-1</sup> towards the coast. Extreme events related to El Niño cycles, increase the suspended sediment transport by increasing river discharge rates. It was possible to conclude from this research that there is a reasonable suspended sediment budget between the Patos Lagoon and the coast. There is, however, some complexity that includes secondary factors such as the presence of fluid mud at the estuarine bottom channel, the Turbidity Maximum Zones, sediment resuspension, sediment flocculation, among others, being necessary further research to encompass all aspects of Patos Lagoon sediment budget.

**Keywords: Sediment Budget, Patos Lagoon, Temporal Variability, Spatial Variability, Suspended Sediment Concentration.**

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

**P**ara a compreensão de um ambiente como um todo, para principalmente aplicações de possíveis medidas de prevenção e de mitigação de regiões impactadas é necessário primeiramente entender como o ambiente funciona, qual a origem dos sedimentos que ali estão e como eles se comportam ao longo do tempo. Diversos exemplos podem ser citados da complexidade do comportamento desses ambientes. Zhang et al. (1990), no estuário do rio Huanghe (Amarelo) na China, analisaram seus diversos tributários e suas contribuições sedimentares. A bacia de drenagem que alimenta este estuário apresenta diferentes características ao longo do percurso dos seus rios. Os autores verificaram que as peculiaridades atribuídas à bacia de drenagem como regiões mais elevadas, regiões desérticas e as de pouca vegetação contribuem consideravelmente para o aumento do sedimento em suspensão devido à erosão e lixiviação do sedimento. Esses aumentos, porém, não foram atribuídos à capacidade de vazão de cada afluente, uma vez que o autor verificou que o afluente com maior contribuição de água doce era responsável por apenas 10% do sedimento em suspensão. Rios com menores vazões devem ser sempre levado em consideração uma vez que a capacidade de exportação de sedimento pode não estar atribuída à vazão do afluente e sim as características da sua bacia de drenagem. Outro fator apontado pelos autores é a característica da desembocadura que ao ser alterado pode modificar a distribuição do sedimento na região costeira, aumentando ou diminuindo sua redistribuição ou apenas aumentando suas taxas de deposição.

Dessa forma, o estudo da bacia de drenagem que alimenta os estuários com descarga de água doce e sedimentos é essencial para avaliar o ambiente como

um todo. Howarth et al. (1991), aplicou um modelo numérico no rio Hudson, nos Estados Unidos para avaliar fatores como a utilização do solo da bacia hidrológica e da urbanização para o aporte de carbono orgânico e sedimentos para o estuário. Os resultados indicaram que além do efeito direto do aumento da densidade populacional para o aumento dos fluxos desses materiais, há também a ligação direta entre eventos pontuais de precipitação intensa com volumes intensos de carbono orgânico e sedimentos. Os autores concluíram que, para a manutenção e controle dos fluxos de carbono orgânico, os eventos diários extremos e os padrões sazonais são mais determinantes que os volumes totais anuais.

Apesar da sua importância este é um tema que até hoje não foi completamente entendido na LP. Vários trabalhos foram desenvolvidos mostrando a variação da concentração de sedimentos em suspensão ao longo da LP e, principalmente em sua região estuarina (Hartmann, 1996), porém sem os fluxos de entrada, via os principais afluentes, e os processos de troca com a zona costeira adjacente fossem quantificados. Este tipo de pesquisa é de extrema importância para a LP uma vez que sua complexidade e sua variabilidade estão diretamente ligadas a processos que ocorrem em mais da metade do estado do RS. A base de dados formada em termos de fluxos de sedimentos em suspensão para o interior da LP e a forma como eles são trocados com a área costeira proposta nesse trabalho, servirão de base para estudos de modelagem numérica que, por vezes trabalham com valores constantes ou climatológicos.

### **1.1. Descrição da Área de Estudo**

Lagoa dos Patos (LP) é uma laguna localizada na região sul do Brasil, localizada entre 30°S - 32°15'S e 50° 30'W - 52°15'W, do tipo estrangulada, conectada ao oceano através de um canal de cerca de 20 km de extensão sendo considerado estreito (1-2 km) quando comparado com a largura média deste corpo de água. De acordo com Toldo Jr. (1994) adaptado por Calliari et al. (2009), a sedimentologia da LP é dominada principalmente por silte e argila (Fig.1). Na extensão dos seus 240 km a LP pode ser dividida em duas partes de

acordo com sua batimetria, onde em sua parte mais rasa, nas margens, a composição é basicamente areia, e a região mais profunda é dominada por sedimentos lamosos (Toldo Jr., 1991; Toldo Jr. et al., 2000).

Esta heterogeneidade sedimentar ao longo da laguna ocorre principalmente pela presença de diferentes contribuintes, onde, entre seus principais estão: o complexo do Rio Guaíba, que recebe as águas, principalmente, dos rios Taquari e Jacuí; o rio Camaquã; e o Canal do São Gonçalo (CSG)(Fig. 1), que liga a Lagoa Mirim (LM) à Lagoa dos Patos.



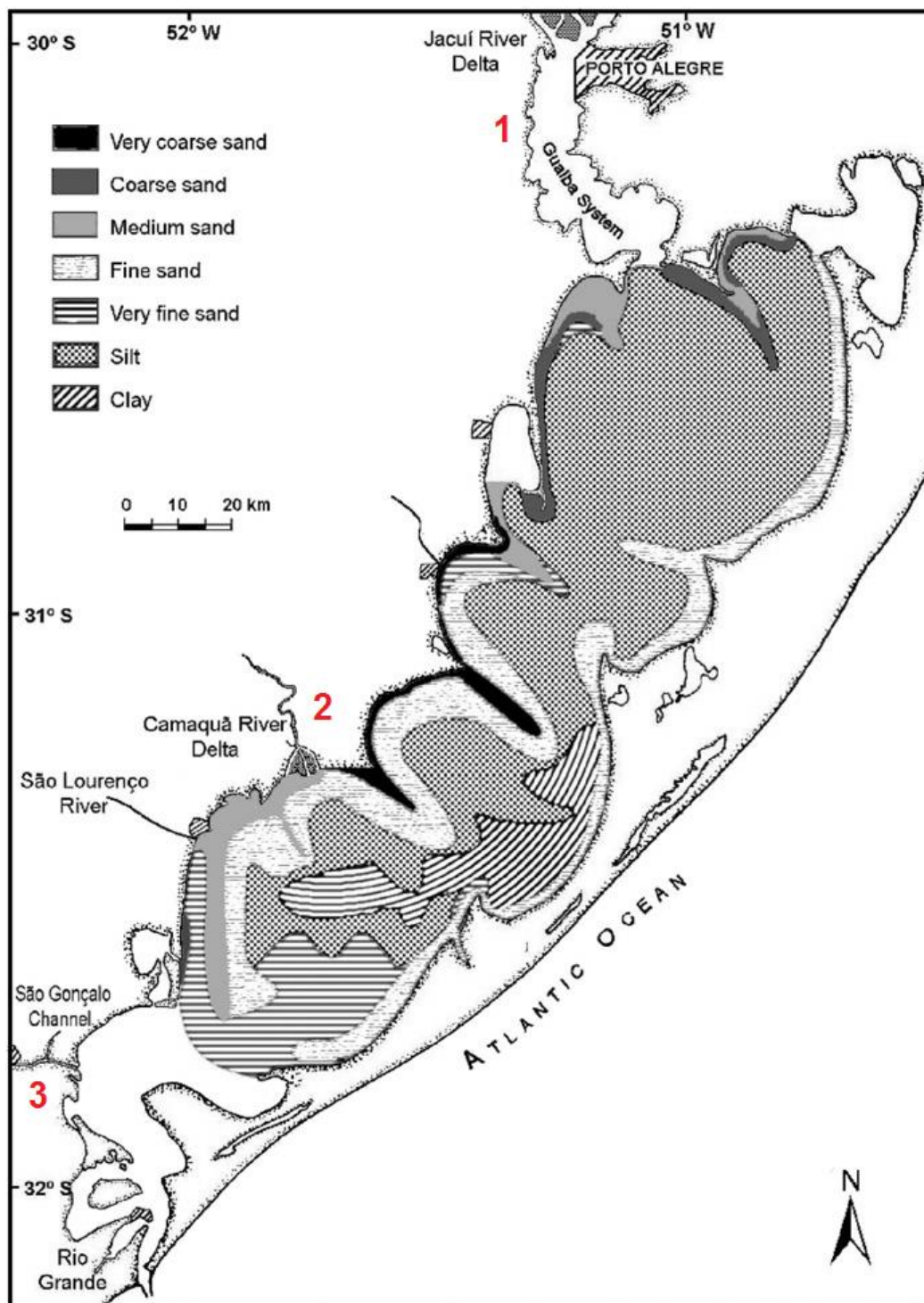


Figura 1- Composição sedimentológica da LP (adaptado por Calliari et al., 2009 de Toldo Jr., 1994). Enumeração da localização dos principais afluentes: 1) Complexo Rio Guaíba; 2) Rio Camaquã; 3) Canal São Gonçalo.

O sedimento que chega à LP é carregado principalmente por via fluvial através de transporte de material em suspensão. Por vias secundárias podem-se citar a

lixiviação das bacias de drenagem que costeiam a laguna e a via aérea em menores proporções. A bacia de drenagem que alimenta a LP é de aproximadamente 200.000km<sup>2</sup> onde, em sua maior parte, está a bacia do rio Guaíba com 62% da descarga média anual e como menores contribuintes estão a bacia do rio Camaquã 11% e o Canal do São Gonçalo com 27% da descarga total (Vaz et al., 2006). Esses sistemas composto por rios e um canal apresentam descarga fluvial variável de acordo com a estação do ano (Möller Jr., 1996) e podem transportar grandes concentrações de sedimentos em suspensão. Parte dos sedimentos que entram na LP são aí depositados contribuindo para as altas taxas de sedimentação observadas por Toldo et al. (2006), e parte é carregado em direção ao mar.

### **1.1.1. Rio Guaíba**

Ao norte da região da LP encontra-se seu principal tributário; o complexo Guaíba é composto por cinco rios principais, o Jacuí, o Taquari, o Gravataí, o rio dos Sinos e o rio Caí. Os rios Jacuí e o Taquari são responsáveis por 85% da vazão total do complexo Guaíba que deságua na LP (Herz, 1977). A vazão média encontrada para o complexo Guaíba por diferentes autores está na faixa dos 1300 a 2000  $m^3 \cdot s^{-1}$ , podendo atingir valores máximos de até 15.000  $m^3 \cdot s^{-1}$  em períodos de grande pluviosidade (Marques, 2005; Vaz et al., 2006; Kirchhof, 2015). Conforme o art. 26 da Constituição Federal o rio Guaíba é considerado um bem natural do Rio Grande do Sul, e como tal deve ser preservado e seus recursos devem ser explorados com consciência e responsabilidade. A Bacia Hidrográfica que envolve o Rio Guaíba (Fig.2) representa cerca 1/3 do estado do Rio Grande do Sul, com a densidade populacional representando 2/3 do estado. Desta forma, à vista do desenvolvimento populacional, seus recursos são utilizados principalmente para atividades agropecuárias e agroindustriais. Como consequência a vazão do rio, bem como o transporte de suas propriedades, são influenciados por diversos fatores principalmente antrópicos, como os descritos pela Secretaria de Planejamento e Gestão do Estado (SEPLAG-RS). Entre os principais estão os desmatamentos, remoção de camadas de solo, desagregação de material rochoso e alteração de cursos de água, erosão

agrícola pela ausência de utilização de práticas de conservação, entre outros, que acabam refletindo no aporte de sedimentos em suspensão para o interior da LP.



Figura 2- Bacia Hidrográfica do Guaíba/RS. Fonte: SEMA/2012.

A presença de diversas barragens ao longo dos rios que abastecem o complexo do Guaíba também interfere não só na vazão dos rios, mas principalmente no transporte de sedimento em suspensão. De acordo com Andrade Neto et al. (2012), que analisaram a soma da vazão do rio Jacuí, Cai e Sinos, e dados de turbidez disponibilizados pelo Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE) de Porto Alegre, existe uma variabilidade sazonal no aporte do sedimento em suspensão do Guaíba. De acordo com o autor na estação de inverno, onde ocorre um aumento na pluviosidade, existe um maior

aporte de sedimento em suspensão. No verão, onde a vazão é menor, o aporte de sedimento em suspensão também diminui. Kirchhof (2015) analisou a contribuição de sedimentos terrígenos do Complexo do Guaíba para a LP com dados coletados e identificou comportamentos similares, porém em taxas de concentração de sedimento em suspensão maiores que a encontrada por Andrade Neto et al. (2012). Essa diferenciação foi justificada pelo autor como decorrente de uma subestimativa dos dados disponibilizados pelo DMAE. O autor relaciona isto ao fato dos dados do DMAE serem pontuais e estarem localizados na margem que apresentou os menores valores de concentração de sedimento em suspensão (CSS), o que desta forma não podem ser utilizados para a representação da secção total da vazão do tributário. Os valores encontrados por ele estão na faixa de 50 a 54  $mg.L^{-1}$  contra 35  $mg.L^{-1}$  dos dados do DMAE. Essas taxas de contribuição de sedimento em suspensão caracterizam o rio Guaíba como um exportador de sedimentos em suspensão para a LP (Kirchhof, 2015).

### **1.1.2. Rio Camaquã**

A bacia de drenagem do Camaquã (Fig.3) abrange uma área de 21.657 km<sup>2</sup> e possui vazão média em torno de 400 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> na região central da LP com distribuição sazonal, apresentando os maiores valores nas estações de inverno onde a precipitação é maior (Vaz, 2003; Vaz et al., 2006). Grande parte dos sedimentos em suspensão que converge para a LP é consequência de erosão e intemperismo químico (Vieira & Rangel, 1988) das margens do rio. O rio Camaquã localiza-se em uma região de relevo muito antigo com estrutura rochosa sedimentar. Consequentemente, exerce um papel importante no processo de denudação das rochas do embasamento cristalino ao longo do seu percurso, transportando principalmente sedimento arenoso (Silva, 2009). Os sedimentos carregados em direção à LP são então caracterizados como sedimentos clásticos de origem continental, em particular sedimentos quartzosos, oriundos do Escudo Sul Riograndense que é formado por derrames basálticos (Villwock & Martins, 1972).

### 1.1.3. Canal do São Gonçalo (CSG)

O canal do São Gonçalo é um canal com 76 km de extensão tem a função de ligar a Lagoa Mirim (LM) à LP (Fig.3). Essa ligação forma o maior sistema lagunar da América do Sul (Vieira & Rangel, 1984,1988). A LM está localizada na Bacia Hidrográfica Piratini - São Gonçalo - Mangueira, e tem o rio Piratini como o seu principal afluente. A vazão média estimada para o CSG é de  $590 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , com alterações sazonais contribuindo para fortes processos de erosão de margens e disponibilizando o sedimento para o ambiente (Oliveira et al.,2015).

De acordo com Fia et al. (2009) essa região apresenta intensa atividade agrícola principalmente por cultivos de arroz, onde o CSG e a LM servem como principal canal de irrigação dessas lavouras. De acordo com o Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB, 2016) da região há um consumo médio anual de aproximadamente  $45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  da vazão LM-LP utilizado para irrigação. Conseqüentemente esse curso de água recebe concentrações intensas de compostos químicos e orgânicos. A presença das lavouras nas margens de rios facilita então a entrada de sedimentos para o corpo de água principalmente através da lixiviação por efeito da precipitação.

De acordo com Vieira (1982), o CSG apresenta ao longo de seu leito tanto sedimentos grosseiros (areia) como também sedimentos finos (silte e argila). Próximo ao encontro das águas da LM e LP há o efeito da floculação devido à presença de água mais salina da LP. Esse efeito aumenta a concentração de finos, caracterizando uma camada de lama fluida na região mais profunda do canal. Na área mais afastada da desembocadura (próximo à LM) o autor verificou, porém, que o comportamento se inverte. Os sedimentos mais finos são encontrados nas margens rasas do canal, e os sedimentos mais grosseiros depositados na região profunda do canal, o que caracteriza o canal com alta hidrodinâmica. A LM, através do CSG, tem seu fluxo predominante para a LP, carreando então o sedimento em suspensão disponível. Ao longo do canal existe a presença de uma barragem artificial que impede a penetração da água salgada do Estuário Lagoa dos Patos (ELP) para a LM, e somente em períodos de grande acumulação de água (inverno e primavera) essa barragem é aberta (Garcia, 1998).



Figura 3- Bacia Hidrográfica dos rios Camaquã e Lagoa Mirim (porção do território nacional brasileiro) - São Gonçalo/RS. Fonte: SEMA/2008.

## 1.2. Dinâmica da Lagoa dos Patos (LP)

Os diferentes tipos de sedimentos que entram na LP pelos seus tributários são então transportados em direção ao oceano. A hidrodinâmica ao longo da LP é determinada principalmente pelo regime de vento, e pela descarga fluvial. Devido a sua extensa área superficial, a LP apresenta uma pista de vento de tamanho suficiente para a atuação de processos dirigidos pelo vento local, gerando desníveis, que influenciam o tempo de residência e o transporte de sedimentos em suspensão dentro da LP. Estudos realizados por Möller Jr. et al. (1996), Möller Jr. (1996) e Möller Jr. et al. (2001) mostram que essa dinâmica é temporalmente coligada com os sistemas frontais, respondendo ao mecanismo de oscilação denominado “set up/set down”, correspondentes a desnivelamentos entre as extremidades da laguna.

Devido à extensa pista de vento da LP, quando ventos de NE predominam na região ocorre um empilhamento de água em sua porção sul, aumentando o

nível na região do estuário. Em conjunto, há a atuação do vento remoto via transporte de Ekman que na região costeira, transporta água à esquerda da direção do vento no Hemisfério Sul, facilitando a saída de água do estuário, e conseqüentemente a exportação de sedimento em suspensão para a costa. Quando a direção do vento muda para SO o cenário se inverte. Ventos do quadrante sul elevam o nível de água na região costeira pelo transporte de Ekman, impulsionando a água para o interior do sistema lagunar formando uma corrente que dificulta a saída de água do estuário (Castelão & Möller Jr., 2003). Esses sistemas frontais ocorrem com maior frequência no inverno, apresentando período médio de 6 dias (Stech & Lorenzzetti 1992), e no verão com um período médio de 11 dias (Möller Jr, 1996). Além desses mecanismos de enchente e vazante que exportam o sedimento em suspensão para o oceano, ocorrem ainda na região costeira processos de ressuspensão de sedimento por ondas, não avaliados até o momento.

O rio Guaíba contribui em sua maioria com sedimentos lamosos, o rio Camaquã com arenosos e o CSG em sua desembocadura com, principalmente, sedimentos finos (Toldo Jr., 1994). A parte do sedimento em suspensão que não sedimenta dentro do corpo lagunar segue em direção ao oceano. Os fluxos de sedimentos em suspensão têm por característica transportar nutrientes provenientes da bacia de drenagem continental para a região estuarina, atingindo organismos em diferentes níveis tróficos, sendo que essa função positiva quando em excesso torna-se um problema principalmente para a produção primária (Gupta & Chakrapani, 2005). Isso ocorre quando a concentração de sedimento em suspensão atinge níveis altos, reduzindo a capacidade de penetração de luz na coluna de água, o que dificulta e/ou impede os organismos fotossintetizantes de se desenvolverem, causando efeitos negativos não só para os produtores primários, mas também para todos os níveis tróficos dependentes.

### **1.3. Estuário da Lagoa dos Patos (ELP)**

A região de encontro das águas do oceano com a água doce é chamada de estuário e esse encontro tem diversas conseqüências devido à diferença de

características entre essas águas. De acordo com Möller Jr. et al. (2001), existe uma variação comportamental desta região determinada pela interação entre a intensidade e direção do vento e a vazão. Em baixas descargas, ventos de Sul associados às passagens de frentes forçam águas salgadas para o interior da área estuarina. Em contrapartida em estações chuvosas, somente ventos extremamente fortes são capazes de reverter o fluxo de saída da LP. De acordo com Marques & Möller Jr. (2009) o ELP tende a ser salgado no primeiro semestre e de baixa salinidade no segundo. Isso ocorre devido às altas taxas de precipitação nas bacias hidrológicas que deságuam na LP nas estações de inverno/início da primavera (Vaz et al., 2006) e da dominância de ventos de NE na primavera. A salinização de um estuário pode resultar em formação ou não de zonas de turbidez máxima, que contribuem para aumentar a concentração de sedimento em suspensão (CSS) através da floculação. A zona de máxima turbidez é caracterizada pela alta concentração de sedimento em suspensão no limite da intrusão salina muito acima dos limites esperados para a região do estuário (Postma, 1967). Essa região é formada pela reação do encontro da descarga de água doce com a cunha salina e seu deslocamento será controlado pela circulação estuarina, dominado pela força da vazão e a variação da maré (Postma, 1967; Dyer 1988, 1995, Geyer, 1993). Essa interação facilita a floculação e deposição do sedimento. Os sedimentos que não se depositam nessa região são transportados com a corrente dominante, podendo ocorrer ao longo do trecho a ressuspensão do sedimento depositado com o arrasto da cunha salina rente ao fundo, colocando-os em suspensão novamente e iniciando um novo ciclo de deposição (Fernandes, 2001). Logo, em períodos de altas descargas estuários são exportadores de sedimentos finos e, retentores de sedimentos em baixa descarga.

A alta descarga de sedimentos finos contribui para a formação de depósitos lamosos ao longo da face da praia do Cassino (Calliari et al., 2009). A literatura aponta diversos exemplos de estuários que, por exportarem altas taxas de sedimentos contribuem para a formação de praias lamosas, como o Rio Huanghe na China, o rio Amazonas, o Rio Fly na Nova Guiné, o Rio Waipaoa na Nova Zelândia, entre outros (Healy & Wang, 2002).



#### **1.4. Estrutura do Trabalho**

Esta dissertação está dividida em seis capítulos, intitulados: Introdução, Objetivos, Material e Métodos, Resultados e Discussões, Considerações Finais e Referências Bibliográficas.

O Primeiro capítulo tem como intuito apresentar ao leitor os diferentes ambientes estudados neste trabalho, bem como uma breve caracterização de cada ambiente e da sua importância para o estudo. O segundo capítulo trata de apresentar os objetivos, geral e específicos, do trabalho em questão.

O terceiro capítulo da dissertação abrange toda a metodologia utilizada no âmbito de se construir as séries históricas de sedimento em suspensão para a análise do balanço sedimentar da LP e suas variabilidades. Parte deste capítulo está redigido em forma de artigo e está apresentado na seção dos “Resultados e Discussões”.

O quarto capítulo apresenta os resultados do trabalho em formato de dois artigos na intenção de publicar e disponibilizar para a comunidade científica os resultados obtidos. O primeiro apresenta o resultado das diferentes curvas-chave testadas para a construção de séries históricas através de regressões com a melhor correlação e menor estimativa de erro. O segundo artigo foi elaborado, abordando os resultados do balanço sedimentar obtido para a LP juntamente com a exportação pelo CA na região do estuário e a variabilidade associadas. A conclusão do trabalho, oriundo do objetivo geral da dissertação é apresentada no quinto capítulo, juntamente com as considerações finais. O último capítulo da dissertação lista as referências bibliográficas utilizadas e citadas no corpo deste trabalho.

# Capítulo 2

## OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo Geral

Analisar a variabilidade temporal do aporte de sedimento em suspensão dos principais afluentes da LP e estimar as trocas com o oceano adjacente através do seu canal de acesso.

### 2.2. Objetivo Específico

- Determinar a melhor curva-chave para estimativa da concentração de sedimento em suspensão para cada um dos principais afluentes da Lagoa dos Patos (Rio Guaíba, Rio Camaquã e Canal São Gonçalo).
- Construir uma série histórica da concentração de sedimento em suspensão para esses afluentes e analisar sua contribuição para a Lagoa dos Patos.
- Estimar a exportação de sedimento em suspensão da Lagoa dos Patos para a região costeira adjacente
- Analisar a variabilidade temporal do balanço de sedimento em suspensão da Lagoa dos Patos

# Capítulo 3

## MATERIAL E MÉTODOS

**E**ste capítulo está dividido em três partes principais com a finalidade de abranger toda a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho. A primeira parte descreve a fonte dos dados de vazão fluvial e sedimento em suspensão utilizados e o tratamento estatístico realizado. A segunda parte está redigida em forma de um artigo e apresentada de maneira integral no Capítulo 4, que descreve toda a metodologia utilizada para a construção das séries históricas de fluxos de sedimentos em suspensão dos principais afluentes da LP através do método de curvas-chave. Neste foi realizado a comparação de diferentes curvas-chave disponíveis na literatura como objetivo de utilizar a curva que apresentasse os melhores resultados para cada ambiente separadamente. Na terceira parte será descrita a outra parte da metodologia utilizada no desenvolvimento dos demais objetivos do trabalho.

### **3.1. Dados de Vazão e Sedimento em Suspensão**

#### **3.1.1. Fluxos de água e de sedimento em suspensão para a LP**

Os dados de vazão do Complexo Guaíba (rios Jacuí e Taquarí) e do rio Camaquã foram obtidos através das séries históricas disponíveis na Agência Nacional de Águas (ANA) ([www.ana.gov.br](http://www.ana.gov.br)). Os dados compreendem o período de 1964 a 2015. Períodos com interrupção das séries foram preenchidos através das equações de regressão linear propostas por Vaz et al. (2006). Com relação aos dados de sedimentos em suspensão, as fontes de dados são: a Agência Nacional de Águas e os dados publicados por Baisch (1994), que abrangem uma série de aproximadamente dois anos, entre Janeiro de 1988 à Junho de 1990.

Para os dados do Canal do São Gonçalo serão utilizadas as séries de nível obtidas junto à Agência da Lagoa Mirim (ALM) e transformados em descarga líquida através de um modelo analítico de nível proposto por Oliveira et al. (2012). O período dos dados vai de 1992 a 2013. Os dados de sedimento em suspensão foram obtidos através de 15 campanhas de medições feitas neste canal com um perfilador acústico de correntes já calibrado para estimar concentração de sedimento em suspensão (Ávila. 2013; Ávila et al., 2014), durante o período de Janeiro 2009 à Dezembro de 2011.

### **3.1.2. Trocas com o Oceano**

Para fechar o balanço de entrada e saída de sedimentos em suspensão da LP, na região de encontro do ELP com o Oceano Atlântico foram utilizadas as séries temporais de velocidade, direção de correntes e de concentração de sedimento em suspensão. Esses dados foram obtidos no período entre Abril de 2010 à Janeiro de 2012 através de um perfilador acústico de correntes fundeado no Canal de Acesso ao Porto do Rio Grande, fundeado a profundidade de 16 m. Os dados foram registrados de forma horária e, através do método aplicado por Ávila et al (2014) foram estimadas as concentrações horárias de sedimento em suspensão em dez níveis da coluna de água. Os dados de vazão foram obtidos pela ANA para o mesmo período.

## **3.2. Análises Estatísticas**

### **3.2.1. Análise de Correlação**

A primeira análise a ser feita ao trabalhar com séries temporais de duas variáveis é construir um diagrama de dispersão para verificar as possíveis dependências entre as duas, no caso, entre os dados de vazão dos principais afluentes e suas concentrações de sedimento em suspensão. Na sequência, aplicamos um parâmetro estatístico para quantificar a relação entre as duas variáveis. Essa quantificação é feita através de coeficientes de correlação, que irão determinar o grau de associação entre as duas variáveis. Essa variável é chamada de  $R$  e apresenta valores entre -1 e +1. Se o valor de  $R=0$  significa que não há correlação entre as duas variáveis apresentadas. Uma correlação

positiva significa que as duas variáveis se alteram juntas, ou seja, elas aumentam e diminuem uma de acordo com a outra, sendo maior essa interatividade quanto mais próximo de +1. A correlação negativa indica que elas variam em sentidos opostos, sendo maior a correlação contrária quanto mais próxima de -1. Essas associações de correlação podem ser lineares ou não lineares, assim valores de  $R=0$  podem não significar independência total das variáveis. Isso ocorre devido à complexidade dos dados, que podem apresentar interrelação mais complexa do que a linear (Naghattini & Pinto, 2007).

O coeficiente de correlação utilizado foi o de Pearson (Eq.1), que é um dos métodos estatísticos mais utilizados (Rodgers & Nicewander, 1988), medindo o grau de intercorrelação entre duas variáveis. O principal objetivo desta análise é quantificar a influência de uma variável dependente do tempo com a outra (Mudelsee, 2003). Essa correlação consiste numa transformação linear das variáveis, descrevendo "R" como um somatório centrado e padronizado do produto cruzado entre duas variáveis. O coeficiente de Pearson's pode ser descrito como:

$$R(A, B) = \frac{1}{N - 1} \sum_{i=1}^N \left( \frac{A_i - \mu_A}{\sigma_A} \right) \left( \frac{B_i - \mu_B}{\sigma_B} \right) \quad (1)$$

onde, cada constante (A,B) tem um número  $N$  de observações,  $\mu$  e  $\sigma$  representam a média e o desvio padrão de cada variável, respectivamente.

### 3.3. Curva-Chave de Sedimento

Para a construção de séries temporais históricas de sedimento em suspensão, um dos métodos mais utilizados na academia é a curva-chave de sedimento em suspensão, que é criada através da regressão dos dados de vazão e concentração de sedimento em suspensão (Horowitz, 2003). Foi utilizado e testado quatro diferentes curvas-chave, duas equações lineares e duas não lineares. Diferentes métodos estatísticos foram utilizados para a calibração e validação das curvas. A equação obtida através das regressões que apresentou a melhor eficácia e menor erro foi utilizada para a construção das

séries temporais de fluxos de sedimentos. A metodologia desenvolvida e testada está apresentada em forma de artigo no Capítulo 4.

### **3.4. Variabilidade**

Para a análise da variabilidade das propriedades ao longo do tempo utiliza-se a análise espectral, que consiste em decompor a série de dados em componentes de frequência. Existem diferentes metodologias para separar as diferentes frequências presentes na série temporal. Um exemplo deste tipo de análise espectral clássica é a análise de Fourier ou Transformada de Fourier que analisa a contribuição de cada constituinte harmônico que compõe o sinal total. Em contrapartida, podemos também utilizar uma forma mais complexa de análise de sinais, como a Análise de Ondaletas, que decompõe um sinal por meio de escalas (dilatação e compressão) e translação de uma ondaleta original, ou ondaleta mãe (Dantas, 2009; Santos et al., 2013).

As ondaletas são funções matemáticas que separam a série de dados em diferentes domínios de frequência, visando extrair cada componente em uma resolução adequada à sua escala. A análise de Ondaleta apresenta vantagens sobre as análises espectrais clássicas porque permite analisar a periodicidade de eventos em diferentes escalas de tempo e permite identificar no tempo os espectros de frequência com maior potência. Desta forma ela se torna uma das principais ferramentas para analisar variações locais de potências em séries temporais (Santos et al., 2013).

Existem inúmeras aplicabilidades das ondaletas em séries temporais, e cada série temporal tem que ser tratada de maneira específica de acordo com as suas características. Desta maneira existem dois tipos de funções de ondaletas que podem ser utilizados: as Discretas e as Contínuas (Farge 1992). A ondaleta discreta mais comumente utilizada é a de Haar (1910), que também é uma das pioneiras. Ela consiste na representação de uma ondaleta ortogonal que apesar de mais simples permite identificar os comportamentos particulares de cada frequência em um sinal discreto (Bolzan, 2004)

As ondaletas mais utilizadas pelos pesquisadores são as ondaletas contínuas, pois elas trabalham com as variações não lineares entre as frequências, ou seja, existe uma relação entre as diferentes frequências e a série temporal, e as ondaletas contínuas permitem buscar essas relações continuamente (Bolzan, 2004). A análise de ondaleta contínua permite que uma ondaleta mãe ( $\psi$ ), oriunda de uma função  $f(t)$  e tamanhos conhecidos, percorra uma série temporal não estacionária mapeando suas mudanças de propriedades (Daubechies 1990). Ela pode ser definida por:

$$WCT_f^\psi(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t - \tau}{s}\right) dt \quad (2)$$

esses parâmetros da WCT (Continuous Wavelet Transform) são dados por  $\tau$  e  $s$  que são os termos de translação e escala, respectivamente da série temporal analisada  $f(t)$ . A translação determina a posição que a janela de análise assume através do sinal, e a escala determina o comprimento desta janela. Desta forma, a ondaleta mãe ( $\psi$ ) está relacionada a uma janela conhecida que percorrerá a série temporal dos dados identificando as oscilações (Torrence & Compo, 1998). A função da ondaleta mãe vai variar de acordo com as especificidades da série temporal a ser analisada, pois cada ondaleta tem suas peculiaridades e suas características, sendo necessário analisar previamente o comportamento dos dados para a melhor escolha da ondaleta a ser utilizada. Existem na literatura diferentes tipos de ondaletas, i.e. Paul, Morlet, Mexican Hat, dentre outras (Figura 4).

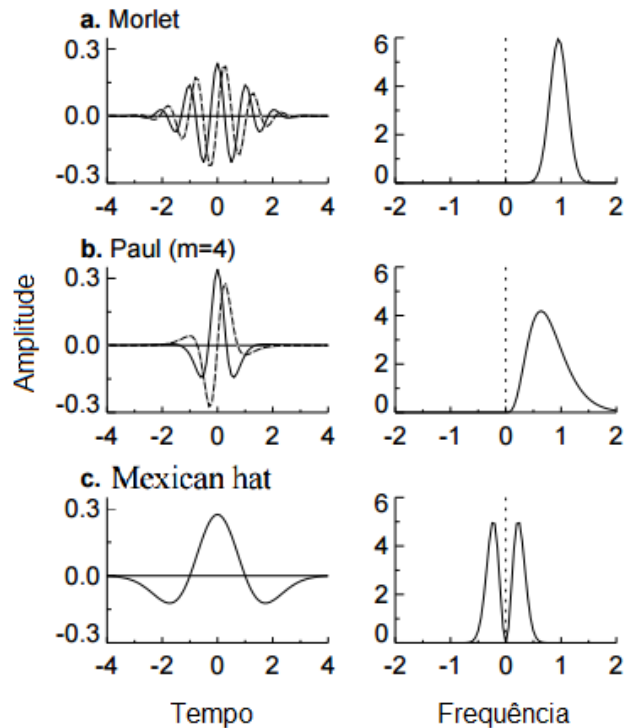


Figura 4. Representação de diferentes ondaletas: (a) Morlet;(b) Paul; (c) Mexican Hat. Figuras da esquerda representando a parte real (linha sólida), e a parte imaginária (linha pontilhada) para as características das ondaletas no domínio do tempo. As figuras da direita representam as ondaletas no domínio de frequência. Adaptada de Torrance & Compo,1998.

Cada ondaleta abrange vantagens diferentes, como maior precisão no domínio da frequência (Morlet), no tempo (Paul), no espaço-espectral (Mexican Hat) (Torrance & Compo, 1998; Santos et al. 2013). Para a série temporal de CSS foi utilizada a ondaleta de Morlet, uma vez que ela se mostrou mais eficaz e é a mais indicada para representar as oscilações não estacionárias do sinal, uma vez que ela apresenta um detalhamento melhor por apresentar uma janela mais ampla de oscilações.



# Capítulo 4

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

**E**ste capítulo foi dividido em duas partes, apresentadas em formato de artigo. O primeiro artigo descreve os resultados obtidos da aplicação das diferentes metodologias encontradas na literatura para as curvas-chave que foram desenvolvidas e testadas para os diferentes afluentes deste estudo. Este será submetido à revista *Journal of Hydrology* em formato de artigo intitulado “Patos Lagoon Suspended Sediment Budget: a Sediment Rating Curve Comparative Approach”, apresentado na sequência. O segundo artigo, representa então os resultados obtidos através da criação das séries históricas de CSS a partir dos dados de vazão disponíveis, através da aplicação da curva-chave de sedimento em suspensão que apresentou melhor resultado para cada afluente como proposto pela metodologia descrita no primeiro artigo. Os dados consistem então em 51 anos de dados para o rio Guaíba, limitando-se entre Maio de 1964 à Fevereiro de 2015. Para o rio Camaquã foram analisados 50 anos de dados, entre Maio de 1964 à Outubro de 2014. Para o CSG obtivemos uma série de 21 anos, entre o período de Janeiro de 1992 à Dezembro de 2013. Os resultados obtidos estão descritos no artigo intitulado “Variabilidade do Balanço de Sedimento em Suspensão da Lagoa dos Patos: Principais Afluentes e Trocas com o Oceano Adjacente”, a ser submetido na *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, disponibilizado em seguida.

# Patos Lagoon Suspended Sediment Budget: a Sediment Rating-Curve Comparative Approach

Barbara M. Jung<sup>a1</sup>, Osmar O. Möller Jr<sup>a</sup>, Elisa H.L. Fernandes<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Laboratório de Oceanografia Costeira e Estuarina, Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande - FURG, RS, Brazil.

<sup>1</sup>[ibarbarajung@gmail.com](mailto:ibarbarajung@gmail.com)

---

## Abstract

Suspended sediment rating-curves are a low cost and reliable tool used all around the world to estimate river suspended sediment concentrations (SSC) based on a linear or a non-linear regression with a second variable, such as the river discharge. The aim of this research is to carry out an evaluation of four different suspended sediment rating-curves for each of the main Patos Lagoon (PL) tributaries. Statistical parameters such as the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (*NSE*), *PBIAS* and a standardized *RMSE*, referred as *RSR* (*RMSE*-observations Standard Deviation Ratio), were used to calibrate and validate the suspended sediment rating-curves. Results indicated that for all major PL tributaries, the non-linear approach presented the best results, and proved to be an effective tool to estimate the PL tributaries SSC. The tested curves showed low bias and high accuracy when estimating monthly or annual contributions. For higher temporal resolution, a new evaluation of the suspended sediment rating-curve is required.

Keywords: River Suspended Sediment; Rating-Curve; Patos Lagoon; Regression Analysis.

---

## 1. Introduction

The riverine suspended sediment transport capacity is variable, and many environmental and anthropic factors may account for this feature. From one side, the river morphology and ability to erode and carry sediment is important and from the other side, there are anthropogenic effects, such as dams and canals, which end up influencing and/or blocking the transport of suspended sediment downstream the river. Among the main observed impacts are the water quality loss due to the interaction between water and sediment, siltation of reservoirs, ports and channels, soil loss due to erosion, and problems in recreational and ecological activities in the region (Walling,

1977b). Therefore, understanding the environment behavior is fundamental to the ecological and economical development of each region.

On the other hand, it is hard to establish a pattern to the riverine behavior. One of the main difficulties in studying the riverine capacity of suspended sediment transport and its variability is the lack of long time series of Suspended Sediment Concentration (SSC). This happens due to the difficulties in maintaining permanent stations along the rivers. For almost the rivers, however, there is a relationship between variables such as water discharge, SSC, water level, depth and current velocity, among others (Carvalho, 2008).

Several authors from the early 20<sup>th</sup> century, as Barnes (1939) and Miller (1951), used regressions to build rating-curves that represent the correlation between variables. One of the pioneers in using rating-curves for SSC were Campbell & Bauder (1940) through a parabolic equation correlating the river discharge and the concentration of silt in the Red River, in the United States. The authors attributed this correlation to sediment natural transport laws in channels and their slopes. One of the main arguments for the use of this methodology was the ability to build historical time series prior of existing SSC data, and decrease the cost of collecting in situ samples of suspended sediment.

There are several linear and non-linear regression equations available, and for every method, there are built-in associated errors. Thus, along with the assessment of the best method for each environment, it is also necessary to estimate the errors resulting from each regression equation used. Several authors have tested and estimated the expected errors of these methods. Crowder et al. (2007) tested the differences of a linear and a non-linear approach for the Mississippi River Basin. The authors pointed out that one must take into consideration the river curve behavior if the load-discharge relationship is convex, linear or concave, which result in a different approach for a better performance. This occurs mainly due to the sedimentary characteristics of each environment, which directly influences the river's sediment load capacity. Colby (1956) shows that different rivers have different correlations between the river discharge and its suspended sediment concentration. The errors for sandy rivers tend to be larger than for rivers that are dominated by silt and clay (Horowitz, 2003). Thus, each tributary must be studied separately with its own rating-curve in order to eliminate errors related to the different sediment fractions.

Another important factor that must be considered is the data-sampling interval and how they are selected for the analysis. Walling (1977b) analyzed limitations in the application of the rating-curve method for three different rivers. The author found through a linear least squares regression on log-transformed data that there are differences when using different time scales data sets. When using seasonal data for example, the estimated suspended sediment concentration presented up to 112 % overestimation in comparison with in situ data, whereas for monthly data the errors could rise to +900%. According to the author, this error is reduced by adding evaluation factors (such as the flow rate) to the regression, reducing the error up to +26 %.

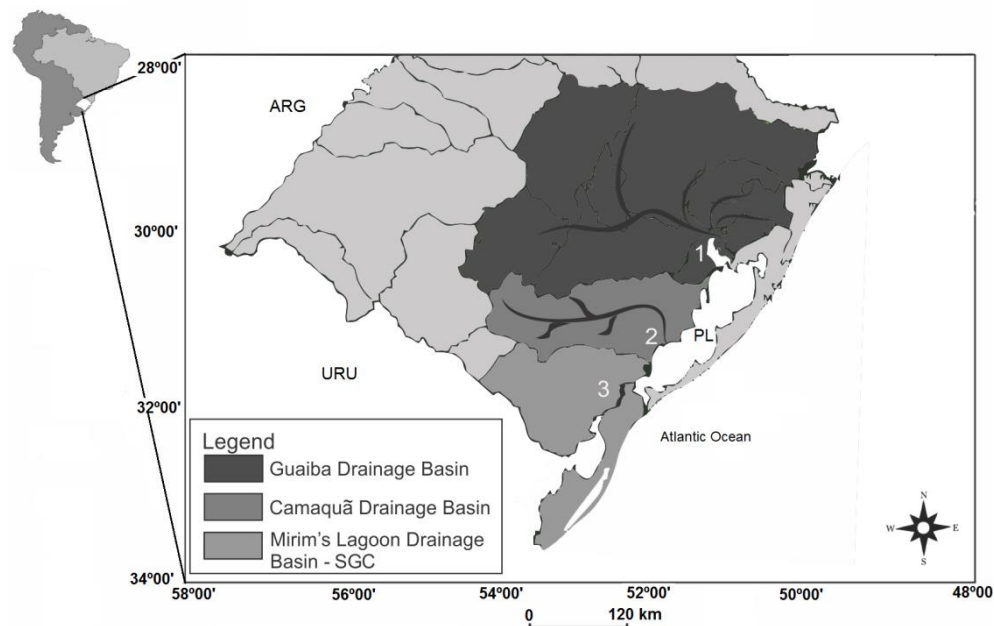
Horowitz (2003) observed a significant difference between the estimated and observed SSC data also using different sampling intervals for Mississippi River. The estimated daily SSC values presented variations between -76 up to +205 % in comparison with the observed data. For weekly SSC estimates, differences of -63 to +157 % were obtained. When looking at other time scales, the author observed differences of -43 to 58 % for monthly data, -33 to +21% for seasonal data, -12 to +8 % for annual data, and the lowest values were for 5 years SSC mean data, where errors were below 1 %. According to the author, the higher the temporal resolution considered, the greater the error of the SSC rating-curve estimative. Thus, the different sampling intervals can result in different correlation coefficients.

Furthermore, in order to make the predictions more reliable, the rating-curve method should be related to a normal discharge regime, or be able to overcome high and low variability. According to Yang et al. (2007) years when the discharge was above average, when high flow events occur frequently, changes in the rating-curve parameters become evident. A different approach to overcome this situation is the use of a flow-weighted or a seasonal-weighted analysis for rating the SSC, which may provide a better result for these time-dependent changes (Horowitz, 2010; Asselman, 2000). Besides working with distinct sampling intervals for each river, errors can be reduced by applying correction factors to improve the accuracy of the estimates. Ferguson (1986) applied a correction factor on the rating-curve in order to reduce errors in the linear regression when using a logarithmic base, which is a widely used approach for estimating the SSC. The author states that the error increases when data is back-transformed from logarithmic basis, leading to an underestimation of 50 % in the SSC. Hence, the application of a factor related to the mean square error of the logarithmic regression was suggested to reduce this underestimation.

The use of suspended sediment rating-curves to monitor or fill in gaps of the SSC time series based on the relationship between the river discharge and its SSC is particularly useful when economical restrictions to maintain gauging stations are present. The Patos Lagoon (PL) is a good example. Located in the south of Brazil, this system presents high economical and ecological importance, but there is a lack of suspended sediment concentration data for the PL tributaries. Thus, it is not possible to evaluate the hydrosedimentological balance of the system, or to estimate how much suspended sediment is being exported throughout the Patos Lagoon Estuary to the coastal zone. This information is important because once the suspended sediment reaches the coastal zone, it can contribute for the formation of muddy deposits off Cassino Beach (Calliari et al., 2009). Based on the urgency of understanding the PL suspended sediment balance, this study aims to evaluate the best approach to calculate SSC through the suspended sediment rating-curve method for the PL three main tributaries.

### **1.1. Study Area**

The PL is considered the largest choked coastal lagoon in the world (Kjerfve, 1986), with a channel about 20 km long and quite narrow (less than 1 km at the mouth) compared to the average width of its water body (40 km). The PL main tributaries present seasonal variations on their discharge (Möller Jr. et al., 2001) and can carry high concentrations of suspended sediment. Its main tributaries are: the Guaíba River at the north, which receives waters from a complex formed by 5 rivers (among them the Taquari and Jacui rivers are responsible for 85% of all the water volume introduced into the Guaíba River (Herz, 1977)); the Camaquã River (central lagoon) and; the São Gonçalo Channel (SGC), which connects the Mirim Lagoon (ML) to the PL (Figure 1). According to Vaz et al. (2006), the monthly contribution of the three main rivers to the PL are approximately  $2400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , from which the Guaíba complex corresponds to half of it (average flow of  $1253 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).



**Figure 1: Patos Lagoon and its main tributaries. Different color scales show the different drainage basins, identifying the tributaries by numbers. 1. Guaíba Complex; 2. Camaquã River; 3. São Gonçalo Channel (SGC).**

The Guaíba drainage basin is the largest of the Rio Grande do Sul State (south of Brazil), which combined with the Camaquã river drainage, corresponds to an approximate area of 102.000 km<sup>2</sup> (Figure 1). This area is highly populated and concentrates intense industrial, agricultural and commercial activity, which has direct influence in the amount of suspended sediments carried by the rivers. The suspended sediments coming from the Guaíba River present a residence time around 108 days, with a sedimentation rate of 0.18 mm per year (Toldo Jr., 1994; Andrade Neto et al., 2012). Considering the lagoonal deposits of PL, which receive different sediments inputs such as from the Camaquã river and the SGC, there is a long-term sedimentation rate up to 0.75mm per year, increasing these rates up to 3.5 to 8.3 mm/year in the last 150 years (Toldo Jr. et al., 2000). The increasing of these rates could be attributed to deforestation in the drainage basin since the European colonization (Toldo Jr. et al., 2000). However, these rates are correlated to the freshwater residence time, which is the time required to renew the total volume of freshwater within a water body (Dyer, 1997). For the PL this time was calculated by Möller Jr. (1996) using an annual mean discharge of 1000 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, resulting in a residence time of one and a half year. According to the author, the higher the rivers discharge the smaller the PL residence time. Fernandes et al. (2002) tested it using a two-dimensional depth-averaged finite element flow model with different freshwater discharges: 5000, 8000 and 10000 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, which

resulted in residence times of 135, 85 and 68 days respectively. Thus, the residence time is controlled mainly by the river flow, and its changes influence directly the suspended sediment transport, being necessary to measure it and estimate its variability.

## 2. Methods

In order to determine the best rating-curve for each of the PL tributaries, time series of SSC and river discharge for each of them were needed. For the Guaíba and Camaquã rivers, weekly time series of SSC and freshwater discharge from 1989 to 1990 were used (Baisch, 1994). For the SGC, daily data obtained at intervals between 2009 and 2014 were used (Möller Jr. et al., 2010; Oliveira et al., 2015). Although the SGC is not characterized as a hydraulic channel such as rivers, its discharge is governed by the wind and water level difference between the ML and PL. According to Hirata et al. (2010) in the last 100 years there is a water level increase between LM and PL, which could increase the flow between them. Hence, the SGC discharge data used for the rating-curves approach were obtained through a slope-type analytical model proposed by Oliveira et al. (2015) using wind and water level time series. Different time frames were used for the calibration and validation of the four rating-curves with observed data. This approach enables the evaluation of the robustness of each rating-curve under different discharge events (Asselman, 2000). Other sources of data were consulted, as those from the National Water Agency (ANA) and the Municipal Department of Water and Sewage (DMAE), but these data sets presented too many gaps and low correlation, adding too many errors to the results.

Different rating-curve methods are found in the literature, but the most frequently used is a power function rating-curve (eg. Walling, 1974; 1977a, b; Syvitski et al., 2000; Asselman, 2000, Warrick & Rubin, 2007, Higgins et al. 2016).

$$C = aQ^b \quad (1)$$

Where C is suspended sediment concentration ( $\text{mg.L}^{-1}$ ), Q is the river discharge ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ ), a and b are coefficients based on a least squares regression. These coefficients can be related to the characteristics of the river basin such as the river topography relief, runoff, river erosive and transport power (Syvitski et al. 2000; Yang et al, 2007). According to Warrick (2015), the parameters a and b are not static and can vary with the non-linearity of suspended sediment rating-curve. For example, they can be altered by changes in the river sediment supply, river discharge rates, or both, thereby being

important to consider these fluctuations when analyzing the temporal variation of suspended sediment loads (Warrick, 2015).

Another approach for estimating suspended sediment concentrations is to add a constant ( $p$ ) to the previous method derived from a second power function (Asselman, 2000). The author tested several different rating-curves with different data assemblies using a power function with additional constant term  $p$ . The method is based on non-linear least square regression of both discharge and suspended sediment, presenting the best fit for the data:

$$C = aQ^b + p \quad (2)$$

When working with a least square fitting curve one of the main disadvantages is its sensitivity to outliers. To overcome this, a least absolute residual (*LAR*) technique was used. This method adds robustness to the regression and helps to deal with the retransformation bias (Jha & Jha, 2013). Although most researchers use these power function equations (Eq. 1 and 2), other methods can be suggested to estimate SSC (Horowitz, 2003; Asselman, 2000; Crowder et al., 2007; Warrick, 2015). A different, but widely used method is the logarithmic regression (Eq.3), which works with linear regression, a simpler and objective approach (Yang et al., 2007; Crowder et al., 2007; Warrick, 2015). The suspended sediment concentration and discharge time series are transformed in logarithmic in order to obtain the linearity, which may be considered more dynamic (Walling, 1974, 1977a, b).

$$\log(C) = \log(a) + b \log(Q) \quad (3)$$

Crawford (1991) compared the accuracy of a linear and a non-linear approach for estimating suspended sediment loads using the Big Blue River and the Wabash River data. The author argued that a linear regression represents more accurately the estimates of SSC due to the residual errors distribution behavior of the non-linear approach. Despite the advantage of being simpler, log based regressions tend to underestimate the SSC values. Thus, a correction factor (*CF*) is used for the bias introduced by the log transformation when the values are back-transformed (Ferguson, 1986; Cohn, 1995):

$$CF = \exp(2,65 \sigma^2) \quad (4)$$



The  $CF$  is related to a mean squared error of the log-transformed regression ( $\sigma^2$ ). Several authors (Glysson, 1987; Asselman, 2000; Horowitz, 2003; Crowder et al., 2007) discuss the use of different rating-curves methods to determine the best fit for each river. This research proposes to evaluate the behavior of the four rating-curve methods presented above: two non-linear, first and second power function, and two linear, with and without the  $CF$ , to determine the best approach to estimate SSC for the PL main tributaries. Rating-curves were tested considering the complete data set, and using monthly averages. Statistical models were used to verify the accuracy of each method in performing realistic predictions and the best rating-curve for each river.

Besides Pearson's correlation coefficient ( $R$ ), basic to any predictive model which describes the direct correlation between simulated and observed data, other parameters recommend by Moriasi et al. (2007) were used for both the calibration and validation of the rating-curves. They are the  $RSR$  ( $RMSE$ -observations Standard deviation Ratio), the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient ( $NSE$ ) (Nash & Sutcliffe, 1970) and the percent of Bias ( $PBIAS$ ) (Gupta et al., 1999). Another suggested factor to compare the accuracy of the rating curves in estimating SSC loads is the root-mean-square error ( $RMSE$ ) (Guo et al., 2002). This method has, however, several limitations, which induce some errors when comparing different curves. The  $RSR$  method recommended by Moriasi et al. (2007) works with a scaling/normalization factor, which uses the ratio of  $RMSE$  and the standard deviation of the observed data to establish a level of comparison between the rating-curves.

The  $NSE$  is related to a goodness-of-fit index and evaluates the magnitude of the residual variance (noise) of the predicted value compared to the measured data variance (Nash & Sutcliffe, 1970). This coefficient indicates how well the simulated data represents the observed data (Eq. 3), and can be described as:

$$NSE = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (C_i^{obs} - C_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (C_i^{obs} - C_i^{mean})^2} \right] \quad (5)$$

Where,  $C_i^{obs}$  is relative to the SSC observed data relative to the same index  $i$  of SSC simulated data ( $C_i^{sim}$ ). The  $C_i^{mean}$  is the mean SSC observed data from  $n$  observations. Values can range from  $-\infty$  to  $+1$ , where values close to  $+1$  are considered as an optimal value, those between  $0.0$  and  $+1.0$  are acceptable, and those values smaller than  $0.0$  means that the noise from the model overlaps the real data. In other words, for values close to zero the model is inefficient in reproducing the reality and the

use of an average value is more efficient to represent the local SSC value (Moriasi et al., 2007). As an evaluation criterion, the *NSE* has an ideal value ranging close to +1.

The *PBIAS* gives an idea about the range of the prediction. It measures the tendency of the simulated data being higher or lower than the observed data, giving an indication of the model performance:

$$PBIAS = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (C_i^{obs} - C_i^{sim}) * 100}{\sum_{i=1}^n (C_i^{obs})} \right] \quad (6)$$

An optimal value for *PBIAS* is 0.0. Positive values indicate underestimation, and negative values indicate overestimation of the simulated data compared to the observed data (Gupta et al., 1999). For the rating-curves calibration and validation it was used the Moriasi et al. (2007) evaluation criteria, which classify the curves performance as “Very Good”, “Good”, “Satisfactory” and “Unsatisfactory”. The ranges of each criterion are presented in Table 1.

**Table 1: Calibration and Validation Criteria, adapted from Moriasi et al. (2007)**

	<b>RSR</b>	<b>NSE</b>	<b>PBIAS</b>
<b>Very Good</b>	0 to 0.5	0.75 to 1.0	< ± 15
<b>Good</b>	0.5 to 0.6	0.65 to 0.75	±10 to ± 30
<b>Satisfactory</b>	0.6 to 0.7	0.5 to 0.65	± 30 to ± 55
<b>Unsatisfactory</b>	> 0.7	< 0.5	>± 55

### 3. Results and Discussion

In order to build a regression curve to estimated SSC from the discharge data, the data was first tested to check their correlation. For all data sets, the Pearson's correlation coefficient between the discharge and the SSC data was determinate with a 0.05 level of significance. Differences between correlation for log-based transformed data were also calculated (Table 2), ranging from 67% to 95%. For all data sets, the correlation between the discharge and the SSC data was higher than 70%, with exception of the Camaquã River that presented values under 50%.

For both Guaíba and Camaquã rivers, the use of monthly averaged data increased the correlation between the SSC and river discharge time series. This behavior is expected because monthly averages remove high frequency variability of the data set.

These correlations are in agreement with literature for other areas (Walling, 1977a; Chen et al., 2001). Monthly averages were not calculated for the SGC due to the lack of data.

**Table 2: Suspended Sediment vs. River Flow Correlation**

	Pearson's Corr SSC vs. Discharge	
	Normal	Log Based
Guaíba - All Data	0.7581	0.7661
Guaíba - Monthly Average	0.9596	0.9528
Camaquã - All Data	0.4659	0.6761
Camaquã - Monthly Average	0.8675	0.8442
SGC - All Data	0.7927	0.886

After determining the correlation between the freshwater discharge and the SSC time series, considering both, the full data sets and the monthly averaged data, the next step is to investigate the response of each rating-curve method in predicting the SSC for the main PL tributaries (Fig.2).

Curves 1 and 2 are based on non-linear regression, with and without a constant term ( $p$ ), respectively. Curves 3 and 4 are linear regressions in logarithmic bases, with and without the CF factor, respectively. The curves were established and calibrated using a year-long data set of each tributary, and validated with the following year data set (Table 3). The statistical parameters were used for both, calibration and validation, in order to achieve the highest accuracy. Results indicate that most of the curves present a concave shape, and their behavior is mostly similar, fitting the data scattering (Fig2).

The Guaíba rating-curves presented the best agreement with measurements, where the four different curves (Figure 2a and 2b) present similar behavior, for both all data set and monthly averaged data. The Camaquã rating-curves presented a different behavior. For higher discharges, the curves tend to diverge in particular ways (Fig. 2c, 2d.). For discharges lower than  $700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , however, the rating-curves can be applied. Most of the SGC curves tend to overlap, with exception of Curve 4, which diverges exponentially along with the discharge changes as a result of an unsatisfactory calibration of the method (Fig. 2e). As those found for Asselman (2000), the power function regression visually seems to better fit the data in all cases. The  $a$ ,  $b$ ,  $p$ , and CF parameters used to build each rating-curve are presented in table 3.

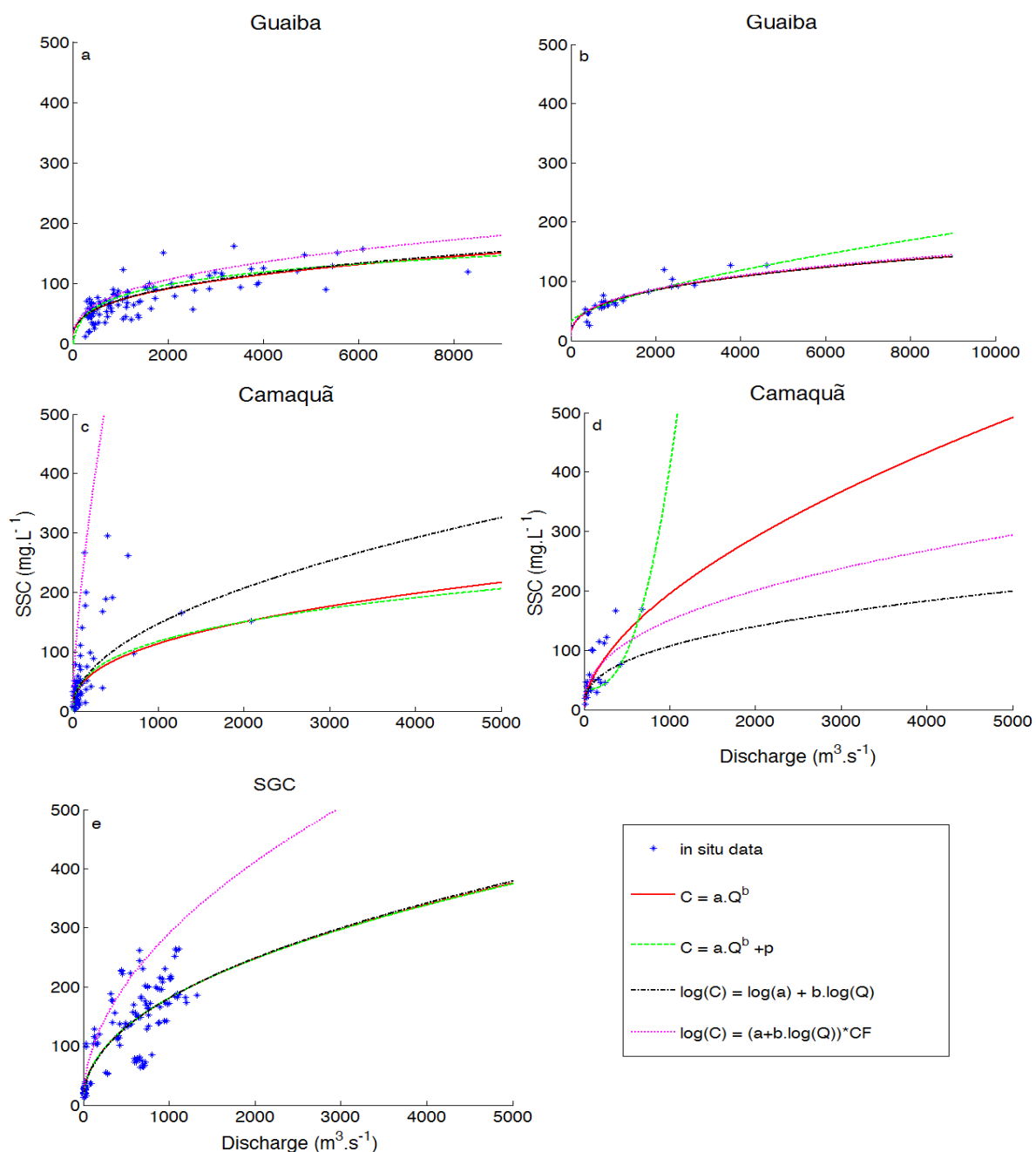


Figure 2: All data (left) and monthly average (right) rating-curves: (a) Guaíba all data rating-curve; (b) Guaíba monthly data rating-curve; (c) Camaquã all data rating-curve; (d) Camaquã monthly data rating-curve; (e) SGC's all data rating-curve;

In order to quantify the fit of each rating-curve to the measured data, statistical parameters were calculated during the calibration procedure (Table 3). In Table 3, the best curves are highlighted in bold, and the unsatisfactory values are underlined. Results indicated that monthly averages produced a better fit for Guaíba and Camaquã suspended sediment rating-curve. According to Asselman (2000), when organizing the

data into longer time scales of variability, such as seasonal, high and low discharge, and annual loads, the efficiency of the rating-curves increase and the suspended sediment concentration prediction become more accurate. That can be seen in the Guaíba rating-curves, which monthly averages bias tends to be lower than All Data set.

Along with the *PBIAS*, the *RSR* represent the error input from the rating-curve method to the calculated data. The lowest the value of these parameters, the more efficient is the rating-curve approach. The curves that did not present at least a "Satisfactory" classification for calibration were not validated (Table 3).

**Table 3: Sediment Rating-Curves Statistical Parameters**

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>p</i>	<i>CF</i>	Calibration			Validation		
					<i>RSR</i>	<i>NSE</i>	<i>PBIAS</i>	<i>RSR</i>	<i>NSE</i>	<i>PBIAS</i>
Guaíba - All Data										
<b>Curve 1</b>	<b>7.085</b>	<b>0.335</b>			<b>0.599</b>	<b>0.641</b>	<b>-1.485</b>	<b>0.597</b>	<b>0.644</b>	<b>-2.563</b>
Curve 2	81.95	0.131	-125		0.629	0.607	-6.918	0.619	0.616	-8.284
Curve 3	0.835	0.341			0.602	0.637	-2.196	0.595	0.646	-3.278
Curve 4	0.835	0.341		1.032	0.773	0.402	-17.493	-	-	-
Guaíba - Monthly Avg.										
Curve 1	6.479	0.339			0.310	0.904	2.394	0.449	0.798	0.333
Curve 2	0.360	0.663	30.17		0.289	0.916	1.716	0.409	0.832	-0.497
Curve 3	0.812	0.339			0.310	0.904	2.396	0.449	0.798	0.335
Curve 4	0.812	0.339		1.004	0.295	0.913	0.689	0.442	0.804	-1.402
Camaquã - All Data										
Curve 1	7.001	0.403			0.852	0.273	25.138	-	-	-
Curve 2	16.54	0.308	-21.51		0.838	0.298	25.025	-	-	-
Curve 3	0.676	0.496			0.830	0.311	19.242	-	-	-
Curve 4	0.676	0.496		1.383	4.833	-22.359	-299.754	-	-	-
Camaquã - Monthly Avg.										
<b>Curve 1</b>	<b>3.675</b>	<b>0.575</b>			<b>0.541</b>	<b>0.707</b>	<b>-4.080</b>	<b>0.677</b>	<b>0.542</b>	<b>16.087</b>
Curve 2	8,3E-06	2.550	33.28		0.497	0.753	10.599	1.063	-0.129	41.384
Curve 3	0.863	0.388			0.696	0.516	18.730	0.892	0.204	32.897
Curve 4	0.863	0.388		1.073	0.570	0.675	-8.085	0.700	0.510	10.995
SGC - All Data										
<b>Curve 1</b>	<b>7.877</b>	<b>0.454</b>			<b>0.584</b>	<b>0.659</b>	<b>0.867</b>	<b>0.596</b>	<b>0.645</b>	<b>4.379</b>
Curve 2	8.115	0.450	-1.035		0.584	0.659	0.979	0.596	0.645	4.494
Curve 3	0.878	0.459			0.584	0.659	1.281	0.597	0.644	4.810
Curve 4	0.878	0.459		1.091	1.178	-0.388	-54.829	-	-	-

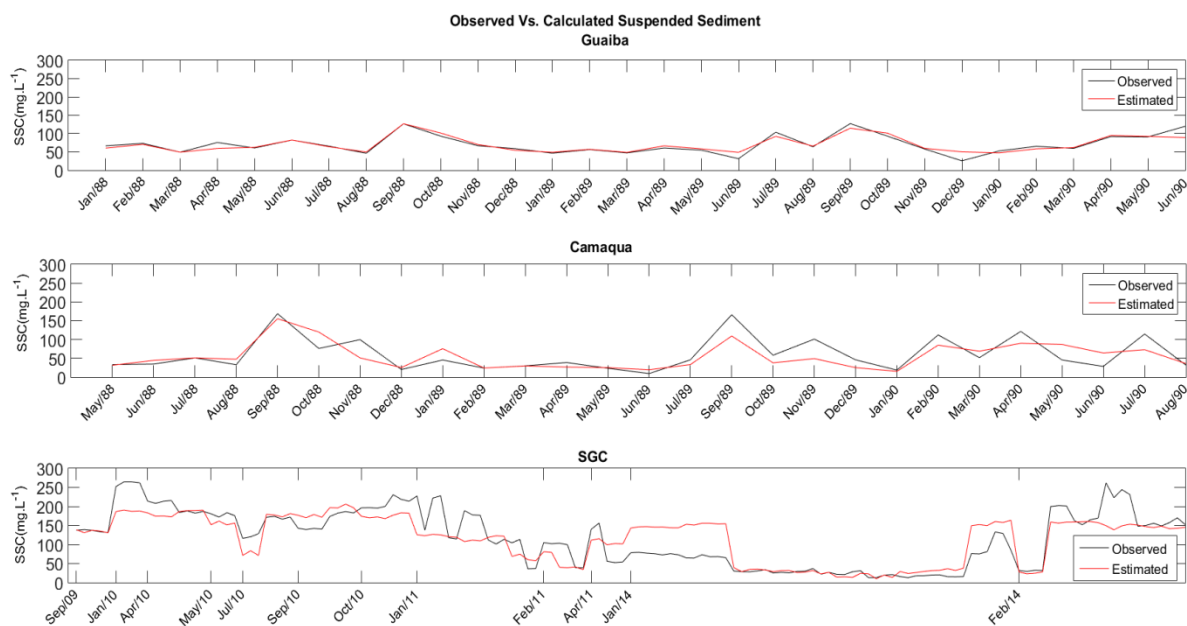
It is evident from the results (Table 3) that these three parameters behaved differently for each data set, and the best fit of one parameter did not imply in the best fit for the other two. Horowitz (2003) observed that high and low  $r^2$  parameters (similar to NSE parameter), used to determine the rating-curve goodness of fit, could present similar errors when used to predict suspended sediment concentrations. According to the author, both rating-curves with high or low correlation can be used, but their range of applicability is different. The difference is in the time frame range; low  $r^2$  has a more restricted applicability. Therefore, the ideal suspended sediment rating-curve must present the higher efficiency values compared to the other curves. For the Guaíba River, the measured data presents a SSC average of  $72.94 \text{ mg.L}^{-1}$ , with average discharge of  $1488.8 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , and the statistical parameters varied from Very Good for monthly averages to Unsatisfactory for All Data using Curve 4. For the All Data set, Curve 1 presented the best fit, and Curve 4 presented an Unsatisfactory performance. For monthly averaged data, all curves present a Very Good performance, with Curve 2 presenting the higher accuracy. Thus, for the Guaíba River data, both power function and log transformed curves presented high efficiency and low bias. Asselman (2000) and Demissie et al. (2003) comment that the power function use to present a higher efficiency than other regression curves, being the most usual regression curve.

The Camaquã River showed a different behavior for each of the rating-curves. The calibration of All Data curves fail to reproduce accurately suspended sediment data, resulting in an overall "Unsatisfactory" behavior of the rating-curves, where the higher error was for Curve 4, presenting a *PBIAS* over 299%. According to EPA (2002), the "Unsatisfactory" calibration can be the result of 5 factors: a) different data sets for curves calibration and validation; b) the model was inadequately calibrated; c) the observed data had limitations on quantity and; d) quality; e) the model could be unable to reproduce the environmental behavior. Monthly data, on the other hand, presented a "Very Good" to "Satisfactory" classification during calibration. The validation, however, presented values out of that range. With an observed SSC average of  $62.27 \text{ mg.L}^{-1}$  and a mean discharge of  $152.54 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , the power functions with the additional constant and the log transformed curve (Curves 2 and 3, respectively) presented higher errors when validating simulated against observed data, leaving the power function as the more accurate suspended sediment rating-curve.

Monthly averaged curves were not applied for the SGC due to the lack of data. The behaviors of the rating-curves were similar to the Guaíba River All Data set, where Curve

4 was also discarded due to its high *PBIAS* and poor calibration. Among the other curves, the most accurate rating-curve was the power function regression (Curve 1). With a measured SSC average of 117.75 mg.L<sup>-1</sup> and water discharge of 495.95m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, the SGC presented "Very Good" *PBIAS*, which indicates low differences between simulated suspended sediment discharge values and measurements.

Results indicated that the power function curve was the most appropriate rating-curve for all rivers. Despite that each river rating-curve behaves differently, they all presented high accuracy and low errors. The Guaíba river curve overestimates the sediment load in 0.49% to 2.5%, the Camaquã river curve underestimates in approximately 16% and the SGC in 4.37%, which are all considered a high performance rating. The observed and calculated SSC behavior can be observed in Figure 3. The calculated SSC are based on the best rating curve of each environment. The Guaíba and Camaquã Rivers SSC estimative are based on the monthly approach, while the SGC SSC estimative is compared to all SSC data available. This performance improves when decreasing the temporal resolution. Monthly data presented smaller errors and a calibration with higher correlation between results. Similar results were also found by Horowitz (2003) when testing different time resolution for suspended sediment rating-curves, as the suspended sediment curve errors can be higher for short time-frames such as daily and weekly data due to the high frequency variability of the events, which are filtered when longer periods (monthly or annually) are used. Colby (1956) also reported that the difference between the accuracy of daily and lower temporal scales samples for a monthly/annual sediment rating-curve do not justify the cost of maintaining a daily record gaging station.



**Figure 3: Observed vs. Calculated SSC for (a) Guaíba (b) Camaquã and (c) SGC using the best rating curve approach.**

Changes in suspended sediment rating-curves and the measured riverine SSC are not only caused by the river discharge, but also by the changes in river sediment supply and the characteristics of its watershed, such as the increase in suspended sediment input due to the increase of land used for plantation, rainfall intensity, seasonality, among other factors (Rovira & Batalla, 2006; Warrick, 2015). Sediment rating-curves, however, allow us to have a clear idea of the sediment supply that is carried out with the river discharge, helping the researches and environmental managers to better understand the environment, facilitating its maintenance and/or its rehabilitation. One of the hardest obstacles of estimating SSC is to find the appropriate curve that better represents the river. Crowder et al. (2007) comments that the non-linear rating-curve is the ideal regression for most of rivers, whereas most logarithmic curves result in data that do not fall primarily along a line, but more as a concave or convex curve. In addition, each river has its own variability and its behavior is not always as expected.

Even though each sediment rating-curve approach has its own characteristic and different behavior, the statistical parameters analyzed (the *RSR*, the *NSE* and the percentage of bias between simulated and observed data), enabled us to evaluate the best approach for each of the PL main rivers. Several authors have also used at least one of these parameters to evaluate regression curves (Asselman, 2000; Horowitz, 2003; Moriasi et al., 2007; Crowder et al., 2007; Jha & Jha, 2013).



For all sets of data, the power function (curves 1 and 2) presented the best results, with low *PBIAS* error and a high curve calibration. The monthly data set rating -curve presented the smaller error, when available. For the Guaíba River, the annual suspended sediment discharge, calculated from the SSC best rating-curve and its respective mean river discharge, was approximately of  $2.99 \times 10^6 \text{ ton.y}^{-1}$ , with a 0.5 to 2.5% overestimation bias. For the Camaquã River, the suspended sediment discharge was about  $0.24 \times 10^6 \text{ ton.y}^{-1}$ , with an underestimation of 16%. For the SGC, the discharge was around  $1.88 \times 10^6 \text{ ton.y}^{-1}$  and presented an underestimation of 4.4%. As the Camaquã river presented the highest *PBIAS* among the others (16%), its bias is considered small in comparison with the 55% bias for a Satisfactory classification of suspended sediment (Moriasi et al., 2007).

Once the best suspended sediment rating-curve is established for each of the main PL tributaries, it is possible to reconstruct longer time series of suspended sediment concentrations, filling in the gaps where only water discharge data are available. This type of approach is used around the world due to the high cost of maintaining gaging stations and the handwork of recording SSC. Thus, the suspended sediment rating-curve became a useful tool when working with time series of suspended sediment concentrations. The time step and number of samples needed to calculate an efficient rating-curve depend on the temporal demanded resolution. According to Horowitz (2003), the lower the temporal resolution for total suspended sediment concentration, the fewer the samples are required. In this case, for an efficient annual estimation, not more than 12 samples per year are necessary, or for a 5-year estimative, six samples per year are acceptable for an accurate rating-curve. For the PL, only the Guaíba data enable the comparison between different time interval curves. The Camaquã river and the SGC presented not acceptable results for comparison, because for the Camaquã river the All Data curve was "Unsatisfactory", and for the SGC the monthly curve did not present enough data to perform an accurate curve. The Guaíba river calibration and validation curves made it possible to conclude that for annual loads the monthly curve presented the smaller errors and the higher correlation between simulated and observed data. This result is consistent with other authors that found that daily records are not necessary to perform monthly to annual rating-curve estimatives (Colby, 1956; Horowitz, 2003).

#### **4. Conclusions**

The PL main tributaries contribute with approximately  $5.1 \times 10^6$  ton of suspended sediments into the main lagoon per year. The fractions that do not deposit within the lagoon or in the estuarine region are flushed out to the coast. Once the sediment reaches the coastal region, there are many consequences related to its availability and variability. Therefore, the classification of the best approach to build sediment rating-curves for each affluent is essential to analyze SSC long time series.

The non-linear approach presented the higher efficiency, and can be used to calculate monthly or annual suspended sediment concentrations. For higher temporal resolution, more data is necessary. One can suggest that for further work more SSC data is necessary to continue recalibrating the suspended sediment rating-curve, for more temporal detail and higher temporal resolution. For hindcasting calculations, this approach may not change the accuracy of the suspended sediment rating-curve, but for years to come it is important to look for changes in the curve efficiency, once the development and growth of population can alter the environment by land use and soil loss due to paddy fields in the region.

Although a long river flow record is available to reconstruct long period suspended sediment concentrations variability, it is advisable to continue recording suspended sediment data at least on a monthly time scale to monitor the curve calibration behavior. Once curves do not change considerably in a long term, they could be used to investigate longer periods of variability such as the climate variations that intensify the rainfall and streamflow along the seasons, and the influence of El Niño and La Niña cycles. A continuous calibration throughout the years is necessary for suspended sediment rating-curves, but its periodicity will depend on the question that needs to be answered.

## 5. References

- Andrade Neto, J. S. d., Rigon, L. T., Toldo Jr., E.E., Schttini, C. A. F. (2012). Descarga sólida em suspensão do sistema fluvial do Guaíba, RS, e sua variabilidade temporal. *Pesquisas em Geociências*, v. 39(2), p.161-171, may/aug. 2012.
- Asselman, N. (2000). Fitting and interpretation of sediment rating curves. *Journal of Hydrology*, v. 234, p.228-248.
- Baisch, P. *Les oligo-éléments métalliques du système fluvio-lagunaire dos Patos (Brésil)- Flux et devenir*. 1994. 345f. Ph.D thesis in Marine Geology. University of Bordeaux I, France, 1994.
- Barnes, B. S. (1939). The structure of discharge-recession curves. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, v. 20(4), 721-725.
- Calliari, L. J., Winterwerp, J. C., Fernandes, E., Cuchiara, D., Vinzon, S. B., Sperle, M., Holland, K. T. (2009). Fine grain sediment transport and deposition in the Patos Lagoon-Cassino beach sedimentary system. *Continental Shelf Research*, v.29(3), p. 515-529.
- Campbell, F. B., Bauder, H. A. (1940). A rating-curve method for determining silt-discharge of streams. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, v.21(2), p. 603-607. 1940.
- Carvalho, N.O. *Hidrosedimentologia prática: Interciência*. 2ª Ed. rev. Atual e ampliada. - Rio de Janeiro, 2008.
- Chen, Z., Li, J., Shen, H., & Zhanghua, W. (2001). Yangtze river of china: historical analysis of discharge variability and sediment flux. *Geomorphology*, v.41, 77-91.
- Cohn, T. (1995). Recent advances in statistical methods for the estimation of sediment and nutrient transport in rivers. *Reviews of Geophysics*, v.33, 1117-1123.
- Colby, B. (1956). Relationship of sediment discharge to stream ow. Technical Report US Dept. of the Interior, Geological Survey, Water Resources Division.
- Crawford, C. G. (1991). Estimation of suspended-sediment rating curves and mean suspended-sediment loads. *Journal of Hydrology*, v.129, 331-348.
- Crowder, D., Demissie, M., Markus, M. (2007). The accuracy of sediment loads when log-transformation produces nonlinear sediment load-discharge relationships. *Journal of Hydrology*, v.336, 250-268.
- Demissie, M., Xia, R., Keefer, L., Bhowmik, N. G. (2003). Sediment budget of the Illinois river. *International Journal of Sediment Research*, v.18, 305-313.

- Dyer, K.R. *Estuaries*. 2nd Edition. Wiley, New York. 1997.
- EPA, U. S. (2002). Guidance for Quality Assurance Project Plans. Technical Report QA/G-5, EPA/240/R-02/009.
- Ferguson, R. I. River loads underestimated by rating curves. (1986). *Water Resources Research*, v. 22, n.1, p. 74-76.
- Fernandes, E.H.L., Dyer, K.R., Möller Jr., O.O., Niencheski, L.F.H. 2002. The Patos Lagoon Hydrodynamics during an El Niño event (1998). *Continental Shelf Research*, v.22, p. 1699-1713.
- Geyer, W. R. (1993). The importance of suppression of turbulence by stratification on the estuarine turbidity maximum. *Estuaries*, v.16 , 113-125.
- Glysson, G. D. (1987). Sediment-transport curves. Technical Report US Geo-logical Survey.
- Guo, Y., Markus, M., Demissie, M. (2002). Uncertainty of nitrate-n load computations for agricultural watersheds. *Water Resources Research*, v.38.
- Gupta, H. V., Sorooshian, S., Yapo, P. O. (1999). Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, v.4, 135-143.
- Herz, R. *Circulação das águas de superfície da Lagoa dos Patos*. 1977. 455f. Ph.D thesis. Universidade de São Paulo, Brazil, 1977.
- Higgins, A., Restrepo, J.C., Ortiz, J.C., Pierini, J. Otero, L. (2016). Suspended sediment transport in the Magdalena River (Colombia, South America): Hydrologic regime, rating parameters and effective discharge variability. *International Journal of Sediment Research*, 31(1), p.25-35.
- Hirata, F.E., Möller Jr.,O.O., Mata, M.M. (2010). Regime shifts, trends and interannual variations of water level in Mirim Lagoon,southern Brazil. *Pan-American Journal of Aquatics Sciences*. 5, 254-266.
- Horowitz, A. J. (2003) An evaluation of sediment rating curves for estimating suspended sediment concentrations for subsequent flux calculations. *Hydrological Processes*, v.17(17), p. 3387-3409.
- Horowitz, A. J. (2010). A quarter century of declining suspended sediment fluxes in the Mississippi river and the e effect of the 1993 flood. *Hydrological Processes*, 24, 13-34.

- Jha, B., Jha, M. K. (2013). Rating Curve Estimation of Surface Water Quality Data Using LOADEST. *Journal of Environmental Protection*, 4, 849-856.
- Kjerfve, B. (1986). Comparative oceanography of coastal lagoons.
- Miller, Carl R. (1951). Analysis of flow-duration: sediment-rating curve method of computing sediment yield. Denver, Colo.: United States, Dept. of Interior, Bureau of Reclamation.
- Möller Jr., O. O. *Hydrodynamique de la Lagune dos Patos (30 RS, Brésil). Mesures et modélisation*. 1996. 204f. Ph.D thesis in Oceanography. University of Bordeaux I, France, 1996.
- Möller Jr., O. O.; Castaing, P.; Salomom, J.-C.; Lazure, P. (2001). The influence of local and non-local forcing effects on the subtidal circulation of patos lagoon. *Estuaries*, v. 24, n.2, p.297-311.
- Möller Jr., O. O., Collares, G. L., Tavares, V. E., Milani, I., Costa, R. L., Abe, M. P., Cavalcanti, A. M., Oliveira, H. A. (2010). Estudo do comportamento hidrodinâmico do vale do Canal de São Gonçalo na área do pro-mar de dentro. Technical Report FAURG-FURG-UFPEL N° 016/2006.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* , 50 , 885-900.
- Nash, J. E., Sutcliffe e, J. V. (1970). River ow forecasting through conceptual models part i|a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290.
- Oliveira, H. A. d., Fernandes, E. H. L., Möller Jr., O. O., Collares, G. L. (2015) Processos hidrológicos da Lagoa Mirim. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.20(1), p.34-45.
- Rovira, A., Batalla, R. J. (2006). Temporal distribution of suspended sediment transport in a mediterranean basin: The lower tordera (ne spain). *Geomorphology*, v.79, 58-71.
- Syvitski, J. P., Morehead, M. D., Bahr, D. B., Mulder, T. (2000). Estimating uvia| sediment transport: the rating parameters. *Water Resources Research*, v.36, 2747-2760.
- Toldo Jr., E.E. Sedimentação, Predição do Padrão de Ondas, e Dinâmica Sedimentar da Antepraia e Zona de Surfe do Sistema Lagunar. 1994. 183f. Ph.D. thesis in Geosciences) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

- Toldo Jr., E.E., Dillenburg, S., Correa, I., Almeida, L.(2000). Holocene sedimentation in Lagoa dos Patos lagoon, Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of Coastal Research*, v.16, n.3, p. 816–822.
- Vaz, A. C., Möller Jr., O. O., Almeida, T. L. d.(2006) Análise quantitativa da descarga dos rios afluentes da Lagoa dos Patos. *Atlântida*, v.28, n.1, p. 13-23.
- Walling, D.E. (1974). Suspended sediment production and building activity in a small British Basin. Effects of Man on the Interface of the Hydrological Cycle with the Physical Environment. *IAHS Publication*, v.113, p.137-144.
- Walling, D. E. (1977a). Assessing the accuracy of suspended sediment rating curves for a small basin. *Water Resources Research*, v.13, n.3, p. 531-538.
- Walling, D.E. (1977b). Limitations of the rating curve technique for estimating suspended sediment loads, with particular reference to British rivers. Erosion and solid matter transport in inland waters, (pp. 34-48).
- Warrick, J. A., Rubin, D. M. (2007), Suspended-sediment rating curve response to urbanization and wildfire, Santa Ana River, California, *Journal of Geophysics. Res.*, 112, F02018, doi:10.1029/2006JF000662.
- Warrick, J. A. (2015). Trend analyses with river sediment rating curves. *Hydrological Processes*, v.29 , n.6, p.936-949.
- Yang, G., Chen, Z., Yu, F., Wang, Z., Zhao, Y., Wang, Z. (2007).Sediment rating parameters and their implications: Yangtze river, China. *Geomorphology*, v.85, n.3-4, p.166-175.

---

# Variabilidade do Balanço de Sedimento em Suspensão da Lagoa dos Patos: Principais Afluentes e Trocas com o Oceano Adjacente

Bárbara Michelly Jung<sup>a1</sup>, Osmar Olinto Möller Jr. <sup>a</sup>, Elisa Helena L. Fernandes<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Laboratório de Oceanografia Costeira e Estuarina, Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Brasil.

<sup>1</sup> [ibarbarajung@gmail.com](mailto:ibarbarajung@gmail.com)

## ABSTRACT

The main purpose of this research is to evaluate the variability of suspended sediment contributions of Patos Lagoon main tributaries (Guaíba River, Camaquã River, and São Gonçalo Channel), which transport large suspended sediment loads towards the ocean. The fundamental data were the Jacuí and Taquari rivers discharge for the Guaíba Complex, the Camaquã River discharge and the São Gonçalo Channel (SGC) discharge, and suspended sediment and discharge for the estuarine region. These time series were transformed into suspended sediment using concentrations sediment rating-curves. Wavelet analyzes were performed to verify the time series spatial and temporal variability. Results indicated that the Guaíba River is not the main suspended sediments contributor for the coastal region, since part of its contribution is retained throughout the LP. The SGC, which is responsible for 42% of the suspended sediment concentration that reaches the system with an average of 137 mg.L<sup>-1</sup>, becomes the main contributor since its proximity to the LP estuary is essential for exchanges with the ocean. The suspended sediment that reaches the LP estuary is exported to the ocean mainly by the estuarine bottom layer, which presented concentrations 10 times higher than the surface layer, reaching over 600 mg.L<sup>-1</sup>. These environments present well defined annual and seasonal variability, presenting energy peaks in the order of 32 to 64 months. This lower frequency variability may be related to ENSO events. The suspended sediment flux balance resulting from this work is a first unprecedented approximation, with input fluxes of 19.500 m<sup>3</sup>.day<sup>-1</sup> and output fluxes over 27.600 m<sup>3</sup>.day<sup>-1</sup> in a 2 year time series, filling an important research gap in the region. Its complexity, however, goes beyond the analysis of the LP suspended sediment inflows and outflows. This system, however, encompass a more complex dynamic, such as erosion of LP banks, soil leaching, the formation of fluid mud, turbidity maximum zone, resuspension of the channel sediment, among other factors which still needs to be analyzed.

**Keywords: Sediment Balance, Patos Lagoon, Temporal Variability, Spatial Variability, Suspended Sediment**

## Concentration.

## RESUMO

O objetivo principal desse trabalho é avaliar a variabilidade das contribuições de sedimento em suspensão dos principais afluentes da Lagoa dos Patos (LP) (rio Guaíba, rio Camaquã, e Canal São Gonçalo), que apresentam descarga fluvial variável e podem transportar grande fluxo de sedimento em suspensão através do estuário em direção ao oceano adjacente. Os dados utilizados foram séries temporais de descarga fluvial para os rios Jacuí e Taquari, que representam a contribuição do rio Guaíba, para o rio Camaquã e para o Canal do São Gonçalo (CSG), juntamente com dados de vazão e sedimento em suspensão para a região do estuário. Essas séries temporais foram transformadas em séries temporais de fluxos e de concentração de sedimento em suspensão com a utilização de curvas-chave. Análises de Ondas foram realizadas a fim de verificar a variabilidade espacial e temporal dos dados. Os resultados indicam que, apesar do rio Guaíba apresentar o maior fluxo de exportação, ele não é o principal exportador de sedimentos em suspensão para a região costeira, pois parte do seu aporte fica retido ao longo da LP. Já o CSG, que é responsável por 42% do sedimento em suspensão que entra no sistema, com concentrações médias de 137 mg.L<sup>-1</sup>, se torna o principal contribuinte, uma vez que sua proximidade com a desembocadura do estuário da LP é vital para as trocas com o oceano. O estuário da LP, com carga média de 171 mg.L<sup>-1</sup>, exporta esse sedimento em suspensão para o oceano adjacente principalmente pela camada de fundo, que apresentou concentrações 10 vezes maiores que a camada superficial, na ordem de 600 mg.L<sup>-1</sup>. Esses ambientes apresentam variabilidade anual e sazonal bem definida, apresentando também significativos picos com períodos entre 32 e 64 meses, quando a exportação de sedimentos em suspensão para o oceano adjacente chega a duplicar. Essa variabilidade em escala interanual pode estar relacionada ao ciclo ENSO. O balanço de sedimento em suspensão resultante desse trabalho é uma primeira aproximação inédita, com estimativas de fluxos de entrada para um período de 2 anos na ordem de aproximadamente 19.500 m<sup>3</sup>.dia<sup>-1</sup>, e saída na ordem 27.600 m<sup>3</sup>.dia<sup>-1</sup>, preenchendo uma importante lacuna de informações na região. Sua complexidade, porém, vai além da análise dos fluxos de entrada e saída de sedimento em suspensão da LP, abrangendo processos mais complexos como erosão das margens da LP, lixiviação das lavouras, a formação de lama fluida na região do estuário, zona de máxima turbidez, ressuspensão de sedimento do canal, entre outros fatores a serem analisados em estudos futuros.

**Palavras-Chave: Balanço Sedimentar, Lagoa dos Patos, Variabilidade Temporal, Variabilidade Espacial, Fluxos de Sedimento em Suspensão.**

## INTRODUÇÃO

O transporte de sedimentos fluviais em suspensão e as trocas com o oceano é um tema amplamente estudado nos últimos 50 anos (WALLING, 2006). Além da variabilidade intrínseca dos fluxos naturais nos rios, há também a parte antropogênica, como a construção de barragens, o uso da terra pela agricultura, o uso da água dos rios para a irrigação, dentre outros fatores. As consequências dessas alterações afetam diretamente a concentração de sedimento em suspensão (CSS) dos rios, que consequentemente alteram as taxas de exportação de sedimentos em suspensão para o oceano adjacente. Esta variabilidade implica diretamente na manutenção da estabilidade da zona costeira causando impactos tanto ambientais como econômicos para as comunidades costeiras (SYVITSKI, 2003). Porém, o maior obstáculo em se analisar a variabilidade de CSS nos aportes fluviais é a disponibilidade dos dados pretéritos e a dificuldade e custo de se manter estações de coleta e medição de CSS constantes nos afluentes. Para contrapor esta dificuldade para cada rio, é possível estipular uma curva chave de sedimento em suspensão utilizando regressões com dados de vazão, onde cada rio pode apresentar comportamento diferente condizente com suas características (ASSELMAN, 2000; HOROWITZ, 2003). Estas regressões, porém, são limitadas a cada afluente, uma vez que cada ambiente se comporta de maneira independente.

De acordo com Chen et al. (2001), o comportamento dos rios em relação à exportação de sedimento em suspensão é susceptível também à mudanças ao longo do percurso. Essas mudanças se devem à característica específica da bacia de drenagem de cada região por onde o rio meandra juntamente com a origem de seus tributários secundários, que controlam a entrada de sedimentos nos rios, e a intensidade da vazão que vai determinar a capacidade em suspender esse sedimento e transporta-lo à jusante. Chen et al. (2001) encontraram para diferentes regiões do rio Yangtze, na China, diferenças de até 80 milhões de ton.ano<sup>-1</sup>, sendo variável de acordo com as estações de alta pluviosidade. Essas variações não somente ocorrem para diferentes regiões, com mudanças de longo período nas bacias de drenagem, mas também influenciam diretamente no comportamento da CSS dos afluentes. Warrick et al. (2013), avaliaram o comportamento de diferentes rios na região da Carolina do Norte (EUA). Os autores analisaram dados de sedimento em suspensão para os anos de 1955 a 2010, e encontraram tendências multianuais causadas principalmente pelo uso intensivo das terras e a variação climática, sendo variável o comportamento de cada rio. Assim é necessário fazer considerações não somente em relação às mudanças das características intrínsecas de cada rio, mas também é necessário observar mudanças ao longo dos anos principalmente no uso das terras e construção de represas (WARRICK et al., 2010).

No Brasil, Medeiros et al. (2011) analisaram a influência do conjunto destes fatores para o rio São Francisco. Os autores avaliaram a CSS para três diferentes situações, uma situação de baixa vazão devido à estação de seca, e outras duas já com a influência da precipitação, porém com taxas diferenciadas. Apesar do contraste entre alta e baixa CSS entre períodos de alta e baixa precipitação, respectivamente, Medeiros et al. (2011) verificaram que existe também um fator determinante que é a localização das regiões de precipitação que podem ou não favorecer o transporte pelos rios, fazendo com que o sedimento em suspensão apesar de abundante fique retido ao longo do percurso, como por exemplo, nas represas.

Dessa maneira, é necessário que ao avaliar a CSS que é exportada para o oceano se tenha conhecimento do aporte e comportamento individual dos principais tributários que compõem o sistema.

O principal mecanismo de entrada de sedimento em suspensão para a LP é o aporte fluvial dos principais rios e canais que nela deságuam, onde a lixiviação do solo e das margens dos rios representa um importante papel. A área de drenagem que contribui para esse input é de aproximadamente 200.000 km<sup>2</sup>, tendo como seu principal contribuinte o rio Guaíba, com 62% da descarga líquida média anual, seguido do CSG com aporte de 27% e 11% do rio Camaquã (VAZ; MÖLLER Jr.; ALMEIDA, 2006). Somado a este fator, diversos tipos de cultivos agrícolas, principalmente de arroz e soja, existem nessas bacias, e sua irrigação é feita através da captação de água dos afluentes e da própria LP. De acordo com o IBGE (2010), 52% das fontes de irrigação da Planície Costeira e Zona Sul do Estado do Rio Grande do Sul são utilizadas para as plantações. Consequentemente, a LP acaba recebendo uma quantidade de sedimento em suspensão lixiviado dessas lavouras, que não é contabilizado pelo método das curvas-chave. Este sedimento em suspensão ao chegar na LP contribui para as altas taxas de sedimentação observadas por Toldo et al. (2000; 2006), que destacam taxas de sedimentação de 0.52 e 0.75 mm/ano, sendo que essas taxas vêm aumentando nos últimos 150 anos, atingindo valores de 3.5 à 8.3 mm/ano. Este aumento na sedimentação ao longo da LP pode ser correlacionado ao desmatamento das bacias hidrográficas associadas e à falta de manejo adequado dessas áreas (TOLDO et al., 2000; 2006). Para que se tenha uma ideia dos efeitos desses processos, para as regiões do RS situadas nas bacias hidrográficas do rio Uruguai e Alto Jacuí estima-se uma perda de solos de mais de 40 t/ha/ano em 6 milhões de hectares (VERDUN et al., 2014).

São poucos os trabalhos, entretanto, que abordam o comportamento das concentrações de sedimento em suspensão (CSS) na LP e no seu estuário, e quando existem, geralmente são estudos de aportes isolados (HARTMANN; HARROT, 1990; BAISCH, 1994; CALLIARI et al., 2009; ANDRADE NETO et al., 2012; ÁVILA; MOLLER; ANDRADE, 2014; KIRCHHOF, 2015; ANDRADE, 2016). A principal contribuição desse trabalho é integrar informações a respeito dos aportes de sedimento em suspensão dos principais afluentes da LP, com o objetivo de estimar e avaliar a variabilidade temporal do balanço de sedimento em suspensão entre os rios afluentes da LP e as trocas com o oceano adjacente.

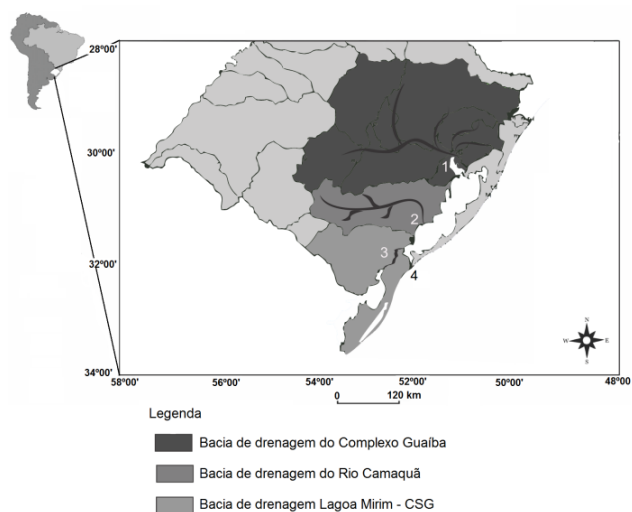
## MATERIAL E MÉTODOS

### Área de Estudo

A Lagoa dos Patos (LP), uma das maiores lagunas costeiras do mundo, tem mais de 10.000km<sup>2</sup> de extensão, apresentando apenas um canal de acesso com extensão de aproximadamente 20km, que a conecta com o Oceano Atlântico. Sua região estuarina representa 10% da área total da LP (MÖLLER Jr.; FERNANDES, 2010). A LP é alimentada por três principais bacias hidrográficas (Figura 1), que representam uma área de drenagem de 200.000 km<sup>2</sup>. A bacia hidrográfica do rio Guaíba, composta principalmente pelos rios Jacuí e Taquari; a bacia hidrográfica do rio Camaquã e a da Lagoa Mirim que está conectada à LP pelo Canal do São Gonçalo (CSG), que acabam apresentando vazões dominadas pela variabilidade sazonal da região em que se encontram



(MÖLLER et al., 1996). O principal contribuinte da LP é o rio Guaíba, localizado na região norte da LP, correspondendo a 62% da descarga líquida média anual variando entre 1300 a 2000  $m^3 \cdot s^{-1}$ , podendo atingir picos de até 15.000  $m^3 \cdot s^{-1}$  (MARQUES, 2005; VAZ; MÖLLER Jr.; ALMEIDA, 2006; KIRCHHOF, 2015). Sendo ele um importante contribuinte de sedimentos lamosos que atingem e contribuem com as taxas de sedimentação da LP (TOLDO Jr., 1994). O rio Camaquã, localizado na região central da LP, apresenta uma vazão média de 400  $m^3 \cdot s^{-1}$ , variando sazonalmente (VAZ, 2003; VAZ; MOLLER Jr., ALMEIDA, 2006), exportando principalmente sedimentos arenosos oriundos de erosão e intemperismo químico do Escudo Sul Riograndense (SILVA, 2009). O CSG que liga a LM à LP transporta principalmente sedimentos finos em uma vazão média estimada de 590  $m^3 \cdot s^{-1}$ , com alta variabilidade sazonal contribuindo com processos de erosão de margens (OLIVEIRA, 2012; OLIVEIRA et al., 2015).



**Figura 1.** Distribuição das bacias hidrográficas que alimentam a LP. (1) Guaíba; (2) Camaquã; (3) CSG; (4) Canal de Acesso. Adaptada de Jung et al. (2017, no prelo).

De acordo com Toldo (1991), a morfologia da LP apresenta duas regiões distintas. A região mais rasa, que é dominada por sedimentos arenosos, e a região mais profunda, que apresenta sedimentos de granulometria mais fina, os sedimentos lamosos. Antikeira e Calliari (2005) encontraram diferentes granulometrias de acordo com a hidrodinâmica do local na região estuarina, destacando os sedimentos argilo-silticos nos canais mais profundos até sedimentos arenosos nas regiões mais rasas. O sedimento em suspensão que não é depositado ao longo da LP é então transportado em direção ao Oceano Atlântico através do Estuário Lagoa dos Patos (ELP). O transporte ao longo da LP é dominado principalmente pelo regime de ventos da região e pela variabilidade da descarga fluvial (MÖLLER Jr. et al., 1996; 2001).

## Dados de Vazão e CSS

A avaliação do balanço de sedimento em suspensão da LP será feita através da análise de séries temporais históricas de CSS dos principais afluentes do sistema e da boca do ELP. As séries temporais de CSS dos afluentes foram reconstruídas através da aplicação do método de curvas-chave aos dados de vazão dos rios (Jung et al. (no prelo)). A aplicação de curvas-chave de sedimento em suspensão para a estimativa de séries temporais de CSS através da vazão vem sendo amplamente utilizada por diversos autores desde os anos 40 (CAMPBELL;

BAUDER, 1940; COLBY, 1956; WALLING, 1974, 1977; FERGUSON, 1986; HOROWITZ, 2003; YANG et al., 2007; WARRICK, 2015). Apesar do CSG não ser caracterizado como um canal hidráulico, sua vazão é determinada principalmente pela diferença de nível entre a Lagoa Mirim e a LP e ação do vento. Desta maneira as aproximações para vazão feitas para este sistema foram obtidas por Oliveira et al. (2015) utilizando um modelo analítico de nível para estimar a vazão desde sistema. Convém ressaltar que, conforme observado por Hirata, Möller Jr. e Mata et al. (2010) nos últimos 100 anos vem ocorrendo uma elevação considerável entre esses dois ambientes o que pode contribuir com o aumento de vazão da Lagoa Mirim em direção à LP.

Dados diários de vazão utilizados foram disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA) e pela Agência da Lagoa Mirim (ALM). Dados para os rios Guaíba e Camaquã abrangem 50 anos de dados (1964 a 2015). Lacunas ao longo das séries temporais foram preenchidas de acordo com Vaz, Möller Jr. e Almeida (2006). Para o CSG foram disponibilizados 20 anos de dados de nível pela Agência da Lagoa Mirim (ALM) (1992 a 2013), que foram convertidos para vazão diária de acordo com Oliveira et al. (2015). Para estimar a CSS na desembocadura do ELP, foram utilizados dados horários de um perfilador acústico de correntes fundeado no Canal de Acesso (CA) a 16 metros de profundidade, entre Abril de 2010 à Janeiro de 2012. O método proposto por Ávila et al. (2014) foi utilizado para a estimativa do sedimento em suspensão em 10 níveis de profundidade. Em relação aos fluxos de sedimento em suspensão foi considerado a densidade de 1.100  $kg \cdot m^{-3}$  utilizada por Winterwerp & Van Kesteren (2004) apud Andrade et al. (2012).

## Variabilidade

A análise da variabilidade do balanço de sedimento em suspensão da LP permitirá determinar como esse responde às principais forçantes do sistema e aos ciclos ENSO. Dentre as diferentes metodologias disponíveis na literatura, uma amplamente utilizada principalmente na área da oceanografia para tratamento de dados não-estacionários é a análise de Ondaletas. Em contraste com a análise espectral de Fourier, que decompõe as séries em senos e cossenos de forma contínua e uniforme, a análise das Ondaletas permite analisar o sinal de maneira não estacionária, em diferentes escalas, tanto no domínio do tempo quanto no da frequência, permitindo assim identificar os espectros que dominam sobre o sinal (TORRANCE; COMPO, 1998; SANTOS; FREIRE; TORRANCE, 2013).

A aplicação das ondaletas é um método matemático que permite a separação da variação do sinal em diferentes domínios de frequência e localização no tempo, através da translação de uma ondaleta original (DANTAS, 2009). As ondaletas são funções matemáticas conhecidas com duração ou comprimento finito que percorre o sinal que está sendo analisado identificando comportamentos similares a ondaleta-mãe pré-estabelecida.

As funções da ondaleta-mãe mais amplamente utilizadas em estudos hidrológicos são a de Morlet e a Chapéu-Mexicano. A Chapéu-Mexicano é baseada em uma função gaussiana com valores reais, apresentando uma função estreita no domínio espaço-tempo. Já a Morlet é uma função complexa, e apresenta maior complexidade na ondaleta original permitindo a análise em séries com maiores variabilidades, abrangendo maiores variações do sinal gerando

maior precisão no domínio da frequência (TORRANCE; COMPO, 1998; SANTOS; FREIRE; TORRANCE, 2013).

De acordo com Compagnucci et al. (2014), a ondaleta-mãe de Morlet é a mais indicada para trabalhar com sinais não estacionários e é a que apresenta melhor resultado quando aplicada em estudos hidrológicos devido a sua maior capacidade de capturar as variações do sinal apresentando um detalhamento melhor das oscilações. O espaçamento entre as escalas discretas da ondaleta Morlet que foi utilizada no trabalho foi de 0.25, o que permite um balanço computacional entre a escala de resolução das oscilações e a velocidade de processamento.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

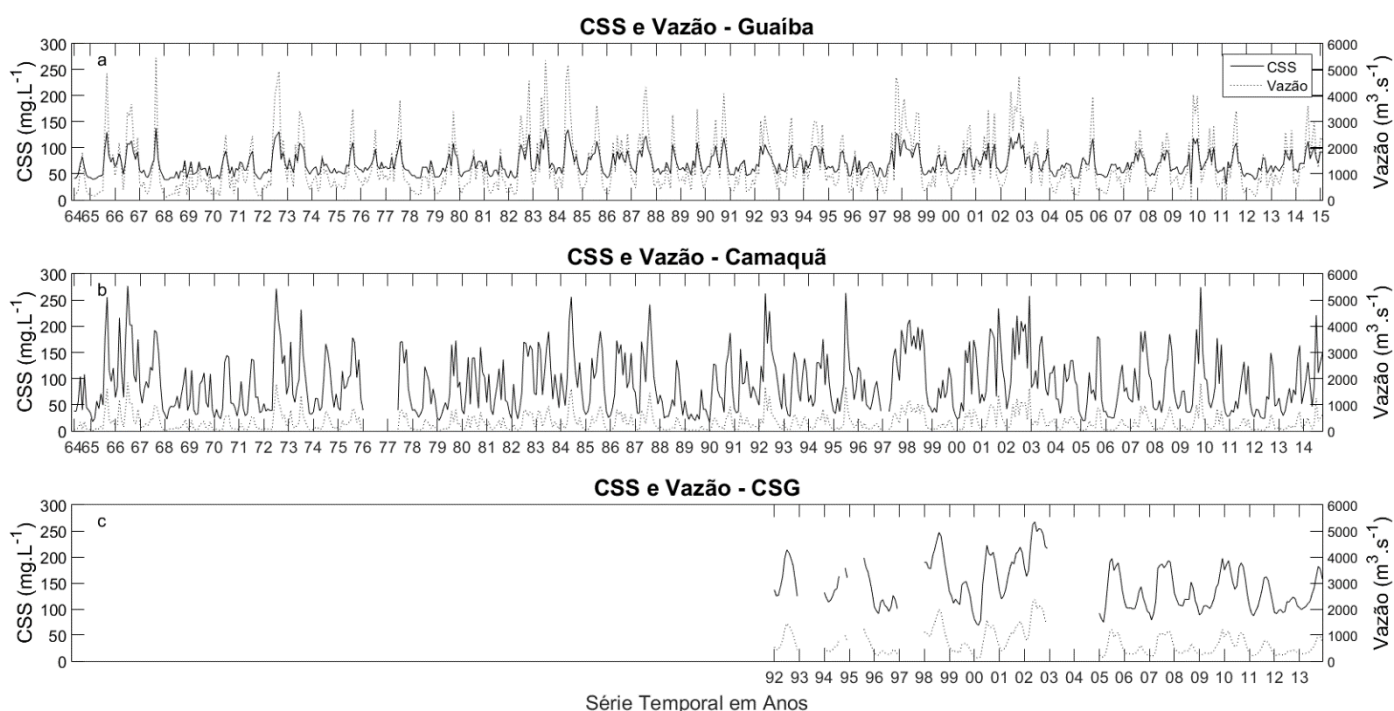
### Fluxo de Entrada de Sedimento para a Lagoa dos Patos

Através das curvas-chave de sedimento em suspensão propostas por Jung et al. (2017, no prelo) foram construídas as séries de CSS para a base de dados históricos de vazão. Os dados estimados pelas curvas-chave apresentaram, para as estimativas diárias, correlação entre dados observados e estimados de 80%, 64% e 83%, respectivamente para os rios Guaíba, Camaquã e CSG. Para estimativas mensais apresentaram porcentagem de bias de 0,5%, 16% e 4,3% respectivamente. Séries temporais de médias mensais de CSS obtidas pelas curvas-chave para cada afluente da LP são apresentadas na Figura 2. É possível observar correlação entre aumento da vazão com o aumento da CSS. Isso ocorre basicamente pelo transporte de sedimento estar principalmente ligado à capacidade de transporte do rio.

O Guaíba (Figura 2a) apresentou a menor média histórica de CSS entre os afluentes, com valor médio de 69.33 mg.L<sup>-1</sup>, porém, ao calcular o fluxo de CSS, devido a sua alta descarga fluvial (média histórica de 1305 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>), o rio Guaíba se torna um dos principais contribuintes de sedimentos em

suspensão para a LP (Figura 3a). Esses valores são consistentes com os valores medidos *in situ* por Kirchof (2015), que mediu CSS de 50 a 54 mg.L<sup>-1</sup> no rio Guaíba, com vazão média de 1314 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. Para o rio Camaquã, é possível observar que há um aumento nos valores pontuais de CSS ao longo da série (Figura 2b). A média de CSS, porém não difere significativamente do rio Guaíba, apresentando valores de 91.67 mg.L<sup>-1</sup>. O rio Camaquã, porém, apresenta para a série de 50 anos de dados, a média de vazão bem abaixo do rio Guaíba, em média 330 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, o que para fluxos de sedimento é expressivo. Para o CSG (Figura 2c), apesar da série temporal ser menor, sua CSS é significativa com 145.74 mg.L<sup>-1</sup> e 698.43 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> de vazão. Esses valores estão de acordo com a literatura (HARTMANN; HARKOT, 1990; OLIVEIRA et al., 2015). Hartmann e Karkot (1990) verificaram que o CSG responde às variações meteorológicas, onde a passagem de uma tempestade pode ressuspender o sedimento fazendo com que as CSS variem de 75 a 320 mg.L<sup>-1</sup> em 15 horas. Apesar das diferenças entre valores, o comportamento dos três rios é similar, havendo uma simultaneidade nos aumentos e diminuições de CSS e vazão, variando apenas sua intensidade devido às peculiaridades de cada bacia de drenagem que abastece os rios.

Para o rio Guaíba, Risso et al. (2005), através de uma modelagem empírica aplicando a Equação Universal de Perda de Solos, identificaram e analisaram 37 das suas sub-bacias, que estão interconectadas e que contribuem com material sedimentar em suspensão para LP. Os autores identificaram as sub-bacias que têm a maior contribuição para a produção e perda de sedimentos, e quantificaram valores de exportação para o rio Guaíba de cerca de 435.000 ton.ano<sup>-1</sup> de sedimentos em suspensão. Esses sedimentos que chegam ao rio Guaíba podem ser parcialmente exportados para a LP. Este tipo de estudo quantitativo ainda não foi desenvolvido para os outros afluentes, porém há um levantamento realizado por Lima e Silva (2012) que apontam como principais problemas da bacia de drenagem do Camaquã o desmatamento da vegetação nativa devido às áreas de cultivo agrícola, o assoreamento e a



**Figura 2.** Séries temporais de vazão e CSS dos principais afluentes da LP. (a) Série temporal histórica do Complexo rio Guaíba. (b) Série temporal histórica do rio Camaquã. (c) Série temporal histórica para o CSG.

diminuição no volume de descarga devido à utilização das águas para irrigação das lavouras. Para o CSG também não há quantificação destes efeitos antrópicos, porém, Simon e Silva (2015), através de comparações entre mapas geomorfológicos de 1953 e 2010, observaram a evolução e impactos do efeito antropogênico na morfohidrodinâmica da Planície Lagunar sob a influência do Canal do São Gonçalo. De acordo com os autores, o uso da terra ao redor de algumas áreas deste sistema hidrográfico tem contribuído para o aumento do fluxo de sedimento em suspensão que chega até a LP pelo CSG, efeito que pode ser observado pelo acúmulo de sedimento também nas linhas de costa adjacente à desembocadura do canal. Outras regiões do canal, porém, onde já foram realizados planos de manejo e enquadrados em áreas de proteção ambiental, já apresentam indícios de recuperação, mostrando a capacidade do ambiente em ser resiliente.

O fluxo de sedimento em suspensão (Figura 3) apresenta significativa variabilidade ao longo da série histórica. Os fluxos médios da série histórica, do rio Guaíba e do CSG são similares, exportando quase  $10.000 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$ , levando-se em conta a diferença temporal dos dados. O rio Guaíba por sua vez apresentou valores extremos de até  $260.000 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$ , valores esses até 27 vezes maiores que a média (Figura 3a). Os maiores valores de fluxos são encontrados durante o período de inverno e valores extremos em períodos de El Niño. O rio Camaquã também apresentou fluxos intensos, com máximos próximos de  $200.000 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$  (Figura 3b), porém sua média histórica está bem abaixo do encontrado para os outros afluentes, mantendo sua média de fluxo em  $4914 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$ . Em contrapartida, o CSG não apresentou valores desta magnitude, apresentando picos máximos de fluxo de  $59.121 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$  (Figura 3c). O CSG, porém, ao longo da série histórica, apresenta menor variabilidade, mantendo uma constância maior de aporte de sedimento em suspensão, elevando sua média histórica para  $9781 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$ .

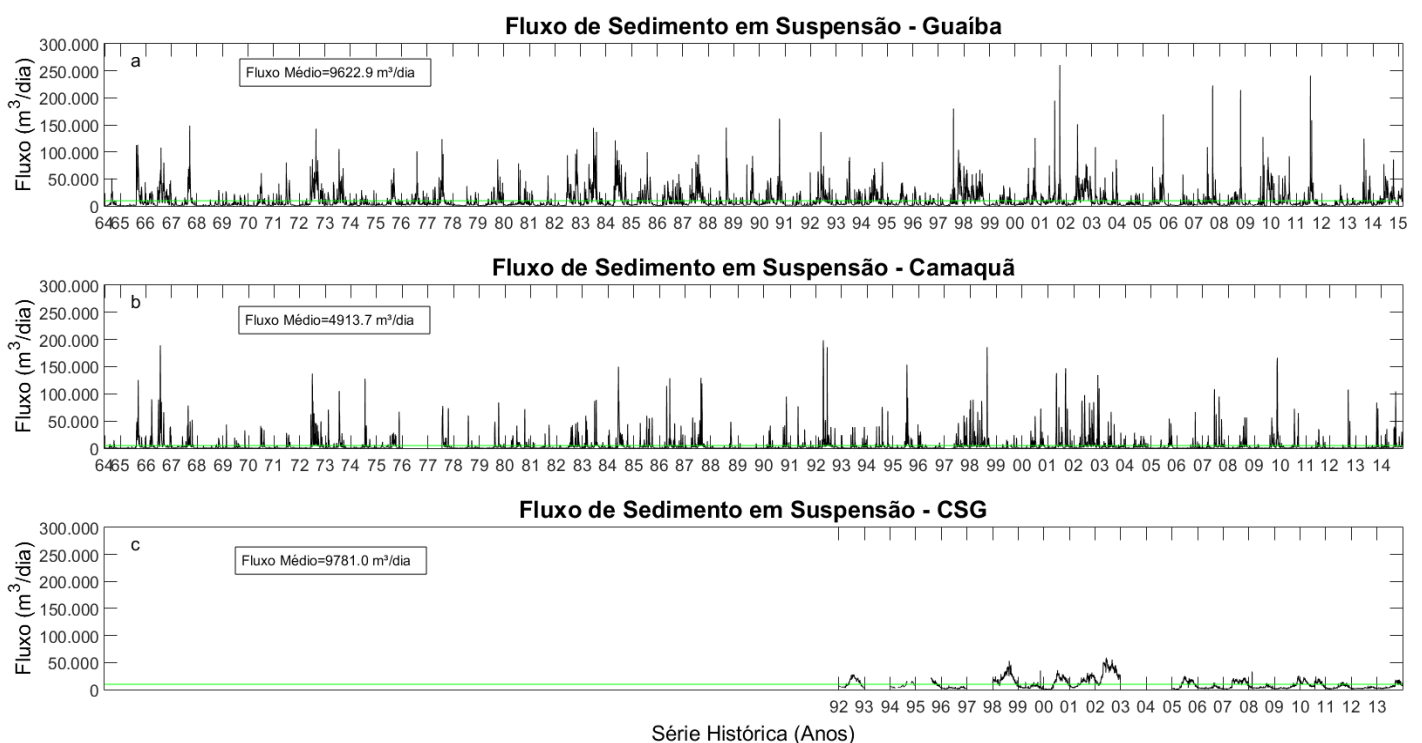
Para fazermos o balanço entre a entrada e saída de sedimentos em suspensão da LP, as médias de CSS e vazão para cada afluente foram obtidas entre o mesmo período dos

dados do Canal de Acesso, entre os anos de 2010-2012. Na Tabela 1 estão representados os valores médios encontrados para a CSS, vazão e a taxa em toneladas de sedimento em suspensão exportado por ano pelos principais afluentes da LP em balanço com os valores exportados pelo estuário da LP. O somatório da contribuição média anual dos afluentes da LP encontrado para esse período foi de  $5.94 \times 10^6$  toneladas por ano (Tabela 1).

**Tabela 1.** Balanço sedimentar da Lagoa dos Patos. Entradas e saída de CSS pelos principais afluentes e pela desembocadura do ELP.

		Vazão $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	CSS $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	Taxa de Exportação $10^6 \text{ton} \cdot \text{ano}^{-1}$
Entrada	Guaíba	1336,10	69,04	2,91
	Camaquã	234,07	71,86	0,53
	CSG	578,61	136,89	2,50
	<b>Total</b>	<b>2147,78</b>	<b>277,79</b>	<b>5,94</b>
Saída	ELP	2116,00	171,42	11,44

Apesar da vazão não ser a maior entre os afluentes, o CSG contribui com 42.1% do total de CSS que entra na LP, seguido pelo rio Guaíba com 48.9% e o rio Camaquã com 8.9% nesse período. A maior CSS exportada para a LP é proveniente então do rio Guaíba, a uma taxa de  $2.91 \times 10^6 \text{ ton} \cdot \text{ano}^{-1}$ , seguido do CSG com  $2.5 \times 10^6 \text{ ton} \cdot \text{ano}^{-1}$ . Para o CSG apesar da sua vazão ser menos da metade do valor encontrado para o rio Guaíba, a alta CSS faz com que sua taxa



**Figura 3.** Séries temporais do fluxo de sedimento em suspensão dos principais afluentes da LP. (a) Complexo rio Guaíba. (b) rio Camaquã. (c) CSG. Linhas em verde representam o valor médio do fluxo.

de exportação seja equiparável. O rio Camaquã apesar de apresentar uma CSS superior ao rio Guaíba,  $71.86 \text{ mg.L}^{-1}$  (comparado com os  $69 \text{ mg.L}^{-1}$ ), apresentou contribuição de CSS pouco expressiva com valores de  $0.5 \times 10^6 \text{ ton.ano}^{-1}$ . Isto se deve ao fato de que o fluxo de exportação de sedimento em suspensão está diretamente ligado à capacidade do rio em suspender e transportar o sedimento e da disponibilidade de sedimentos pela sua bacia de drenagem. Desta forma, uma vez que neste período a vazão do rio Guaíba é quase 6 vezes maior que a vazão do rio Camaquã justifica a diferença de exportação anual de sedimento em suspensão entre eles.

Outro fator determinante em relação às trocas de sedimento em suspensão com a região costeira é a distância do afluente até a desembocadura do ELP, que conecta o sistema Lagunar-Estuarino. A proximidade do CSG e a desembocadura do ELP faz com que ele seja de extrema importância em relação à contribuição de sedimento em suspensão que é exportada para o oceano adjacente. O sedimento em suspensão dos rios Guaíba e Camaquã acabam tendo parte depositada ao longo do caminho até o ELP. De acordo com Baisch (1994), apenas 25% da CSS que entra na LP atinge o ELP. Neste caso chegaria ao ELP, proveniente dos rios Guaíba e Camaquã, cerca de  $8.6 \times 10^5 \text{ ton.ano}^{-1}$ , correspondente à 25% do aporte, que somados ao do CSG totalizariam  $3.36 \times 10^6 \text{ ton.ano}^{-1}$  que chegariam então ao ELP sendo exportados para o oceano, correspondendo à aproximadamente 57% do valor total da entrada de sedimentos via fluvial.

**Tabela 2.** Valores de Exportação de sedimento em suspensão encontrados na literatura para os afluentes da LP.

Literatura	Local	Taxa de Exportação ( $\times 10^6 \text{ ton.ano}^{-1}$ )
Baisch (1994)	Guaíba e Camaquã	5,3
Andrade Neto (2012)	Guaíba	1,1
Kirchhof (2015)	Guaíba	1,7
Hartmann e Harkot (1990)	CSG	15,768 a 6,6

Valores de referência podem ser encontrados na Tabela 2, cujos trabalhos publicados não representam o comportamento da CSS na LP como um todo, mas somente valores dos afluentes individualmente. Baisch (1994) estimou para os rios Guaíba e Camaquã uma contribuição de CSS de  $5.3 \times 10^6 \text{ ton.ano}^{-1}$ . Mais recentemente, Andrade Neto et al. (2012) estimaram para o rio Guaíba uma exportação de  $1.1 \times 10^6 \text{ ton.ano}^{-1}$ , enquanto Kirchhof (2015) encontrou  $1.7 \times 10^6 \text{ ton.ano}^{-1}$ . Apesar dos valores encontrados por esses autores serem semelhantes, eles devem ser considerados com cautela, uma vez que as CSS foram estimadas com base numa amostragem pontual de 15 h realizada pelo DMAE (Departamento Municipal de Água e Esgoto de Porto Alegre). Esses dados são reconhecidamente subestimados (KIRCHHOF, 2015). Para o CSG, Hartmann e Harkot (1990) encontraram valores de CSS variando de  $1.8 \text{ ton.h}^{-1}$  a  $756 \text{ ton.h}^{-1}$ .

Para os fluxos, os 2 anos de dados não apresentaram valores muito diferentes das séries históricas para cada afluente. O rio Guaíba apresentou um fluxo médio para o período de  $9.746 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$ , o rio Camaquã apresentou  $2.811 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$ , e o CSG fluxos na ordem de  $6.934 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$ . A soma dos fluxos de entrada para este período atingem então valores de  $19.491 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$ .

### Fluxo de Saída de Sedimento para o Oceano

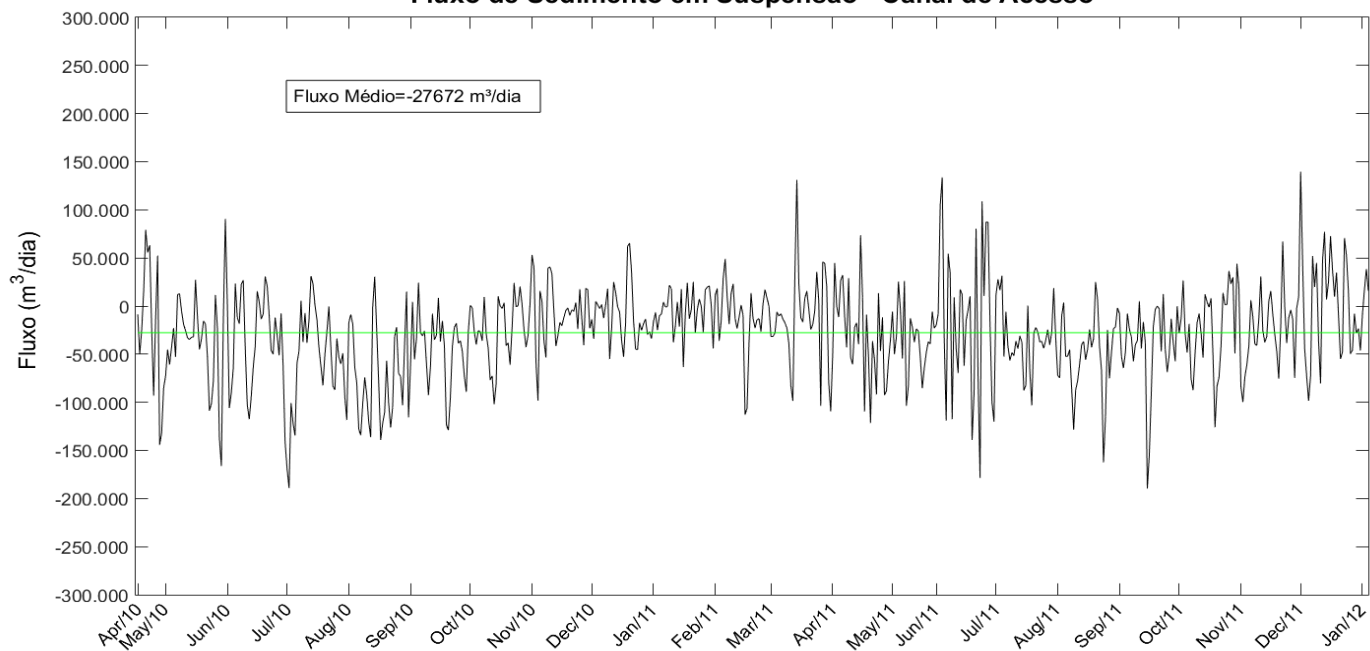
Para o balanço sedimentar da LP é então necessário analisar a exportação de sedimento em suspensão do ELP para o oceano adjacente através do canal de acesso. Esta análise se deu no mesmo período dos dados apresentados na Tabela 1 para os afluentes. O comportamento do fluxo de sedimento em suspensão que é exportado via ELP é apresentado na Figura 4. Valores positivos são relativos aos fluxos de entrada de sedimento em suspensão pelo fluxo de enchente, e valores negativos relativos ao regime de vazante e exportação de sedimento em suspensão. Os dados observados para a desembocadura do ELP apresentaram valores médios integrados na coluna de água de  $171.42 \text{ mg.L}^{-1}$  e  $2116 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , de CSS e vazão respectivamente (Tabela 1). Essas médias convertidas para concentrações anuais de exportação chegam a valores como  $11.44 \times 10^6 \text{ ton.ano}^{-1}$  de sedimento que saem do ELP, em um fluxo médio de  $-27.672 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$  (Figura 4).

Os valores de CSS encontradas no ELP são similares aos encontrados por Marques et al. (2010), Calliari et al. (2009), com concentrações superiores à  $100 \text{ mg.L}^{-1}$  e Paim e Möller (1986), que encontraram valores de 31 à  $135 \text{ mg.L}^{-1}$ . Já Ávila (2013) encontrou valores variando de 50 à  $300 \text{ mg.L}^{-1}$  em diferentes cruzeiros realizados no ELP em diferentes estações do ano, tendo suas maiores concentrações junto ao fundo. Existe então uma diferença de  $5.5 \times 10^6 \text{ ton.ano}^{-1}$  entre a entrada e saída de sedimentos em suspensão pelos principais afluentes pela desembocadura do ELP e uma diferença de fluxo de  $8,18 \times 10^3 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$  para esse período. Essa diferença não necessariamente representa um desbalanço do sistema. A diferença entre a entrada de sedimento em suspensão através dos rios e a CSS observada no ELP pode ser relacionada a diversos fatores como, a formação de Zonas de Máxima Turbidez (ZMT), floculação ao encontro de águas salinas com a água doce, ressuspensão de sedimento de fundo, acumulação temporal de sedimento em partes rasas, formação de lama fluída, entre outros fatores.

Estuários são zonas altamente complexas e energéticas de transição entre águas fluviais e oceânicas, onde podemos encontrar essas ZMT. Estas zonas são caracterizadas pela alta concentração de sedimento em suspensão (DYER, 1986). Geralmente, elas são formadas pelo encontro de água doce e águas salinas formando uma circulação residual dominada pela densidade, com águas fluviais menos densas na região superficial e água oceânica mais densa junto ao fundo. Essa camada densa junto ao fundo acaba transportando, ressuspensando, ou armazenando material em suspensão na região do limite desta intrusão salina (POSTMA, 1967).

Desta forma contribuem com altas concentrações de sedimento para a região oceânica adjacente uma vez que, quando a vazão do estuário se torna dominante em toda a coluna de água, essas altas concentrações de CSS acumuladas periodicamente na camada de fundo é exportada de uma só vez para a região costeira. Para a região do estuário, Calliari et al. (2009) observaram esse aumento da concentração de sedimentos em suspensão correlacionada à presença da cunha

### Fluxo de Sedimento em Suspensão - Canal de Acesso



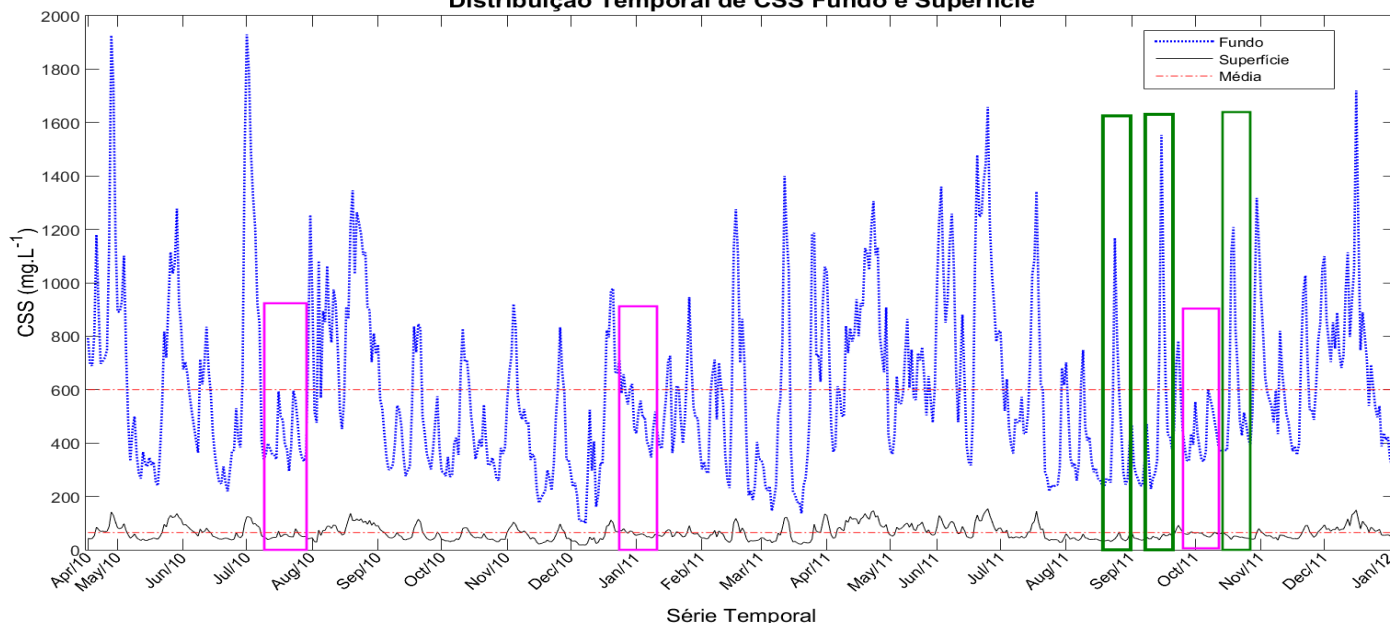
**Figura 4.** Séries temporais do fluxo de sedimento em suspensão para a região do Canal de Acesso. Linha em verde representa o valor médio do fluxo.

salina e seu limite de intrusão, onde o sedimento possivelmente acaba ficando trapeado durante os períodos de baixa descarga fluvial. Ávila (2013) observou as maiores concentrações média de sedimento na região do canal e desembocadura do ELP; o autor atribuiu este fato à ressuspensão de sedimentos por ondas, por ser um estuário de baixa amplitude de maré, à entrada de água salgada carregando sedimento da zona costeira e a baixa descarga que impede a saída de sedimento do ELP, acumulando sedimento na região mais externa do estuário.

Para testarmos esta teoria foram analisados separadamente os valores de CSS das camadas junto ao fundo (com profundidades maiores que 13 metros) e as mais superficiais (menores que 13 metros). Na Figura 5 é possível então observar que a maior exportação de CSS ocorre junto

ao fundo. Valores médios de CSS para o fundo foram de 600  $\text{mg.L}^{-1}$ , em contrapartida, para a camada superficial foi encontrado valores de 64,2  $\text{mg.L}^{-1}$ . Desta maneira, a quantidade de sedimento que está sendo exportado constantemente com a vazão para o oceano pela coluna de água pode ser considerada de  $4,28 \times 10^6 \text{ ton.ano}^{-1}$ , uma vez que a camada do fundo pode apresentar comportamento diferenciado da direção da vazão, se comportando como uma camada maleável e inconstante. A presença desta alta concentração de CSS na região do fundo do Canal de Acesso explicaria então a diferença de  $8,18 \times 10^3 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$  entre o fluxo de entrada e de saída de sedimento em suspensão do sistema LP-ELP-Oceano. É possível observar que o comportamento ao longo da série temporal (Figura 5) é similar nas duas camadas, porém com magnitudes diferentes. Apesar desta similaridade, encontram-se diferenças pontuais em CSS

### Distribuição Temporal de CSS Fundo e Superfície



**Figura 5.** Série Temporal de CSS para o canal de acesso, representando a distribuição temporal de CSS para as camadas de fundo e superfície. Linhas tracejadas em vermelho representam a média de CSS de fundo e superfície.

em alguns períodos, destacado em magenta e verde na Figura 5. Na região em magenta encontramos uma diminuição da CSS no fundo enquanto que na camada mais superficial a CSS se mantém próximo da média. Em verde observamos eventos onde há um aumento significativo da CSS na região mais profunda do Canal de Acesso enquanto que na região mais superficial as concentrações ficaram abaixo da média. Como a variabilidade da camada do fundo é dependente principalmente da interação entre as águas salinas com a água doce proveniente das descargas dos afluentes, sua complexidade e variabilidade depende também de variáveis não abordadas nesse trabalho. Essa parte de CSS concentrada no fundo pode ser considerada como o início à formação de uma camada de lama fluida no canal de acesso do ELP ou a formação da ZMT. Paim e Möller (1986) encontraram valores semelhantes de exportação de  $3,8 \times 10^6 \text{ ton.ano}^{-1}$ , cujas taxas podem variar de acordo com a relação entre variabilidade de descarga fluvial, eventos meteorológicos (associados à passagem de frentes), taxas de precipitação, presença de cunha salina, vento, dentre outros fatores que podem interferir nessa dinâmica do ELP (PAIM; MÖLLER, 1986; HARTMANN, 1996; ÁVILA, 2013).

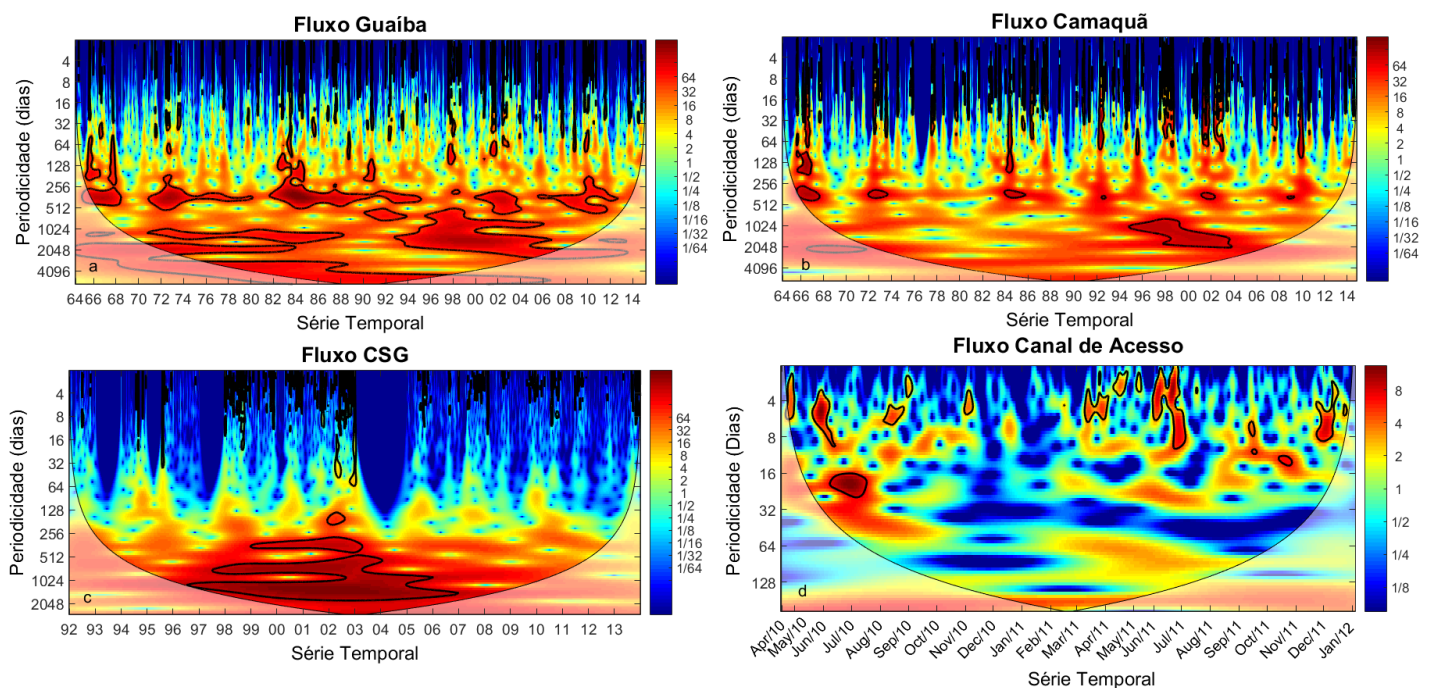
### Variabilidade do Balanço Sedimentar

A Figura 6 representa a variabilidade do sinal da série histórica de fluxo de sedimento em suspensão para os quatro ambientes estudados. A intensidade da variabilidade do sinal é demarcada pela intensidade de cores quentes, que representa então os períodos onde existe maior energia do sinal. Assim, é possível observar pela Figura 6 que existe uma similaridade entre a variabilidade dos quatro ambientes estudados. Para todos os afluentes existe uma concentração da energia do espectro de frequência entre 256 e 512 dias, (entre 8,5 e 17 meses) representando a variabilidade anual do aporte de sedimentos em suspensão.

Para os rios Guaíba e o Camaquã, a variabilidade anual está mais demarcada devido a maior cobertura temporal dos dados, apresentando 50 anos de dados (Figuras 6a e 6b). A

variabilidade sazonal pode ser também visualizada pelos pequenos picos em torno da periodicidade de 120 dias. Para o CSG podemos observar também a predominância da variabilidade anual e interanual, que apresentam picos com maiores intensidades, e a sazonal menos delimitada (Figura 6c). Desta forma, os três principais afluentes da LP apresentam sinais predominantes de variabilidade distintos, variando da entre dominância do período anual para os rios Guaíba e Camaquã, apresentando também um importante sinal sazonal, e interanual para o CSG. A descarga fluvial destes tributários apresenta ciclos anuais bem definidos, e variações sazonais bem delimitadas que, de acordo com Möller (1996), é regido por períodos de intensa precipitação nas estações de inverno, e baixa precipitação no verão. É importante salientar que a vazão destes tributários explica entre 80 e 96% da CSS observada (JUNG et al, 2017, no prelo)

A dispersão do sedimento em suspensão não é só função da vazão, podendo ser influenciada por outros fatores. Dentre eles podemos citar a composição do leito, as características hidromorfológicas do canal e a intensidade de precipitações que degradam o solo e lixiviam para o interior dos corpos hídricos alterando o equilíbrio hidrossedimentológico transportado (CARVALHO, 2008; SCAPIN, 2005). Para o sistema Guaíba, Andrade Neto (2012), observou variabilidade ao longo do tempo do transporte de sedimentos em suspensão, onde foram analisados dados dos anos de 2003 a 2006, e atribuiu as variações encontradas aos fenômenos climáticos e a ação antrópica. Períodos de grandes variações foram, porém, associadas ao fenômeno El Niño. Eventos de El Niño contribuem principalmente para a intensificação da precipitação na região, que indiretamente está associado com maior transporte de sedimentos pelos e para os rios. Na análise de variabilidade dos tributários da LP (Figuras 6a, 6b e 6c) foi possível identificar uma intensificação do sinal em torno dos 32 à 64 meses (2.6 à 5.3 anos, que pode ser associada aos eventos de El Niños, principalmente os intensos e moderado de 1998 e 2003, respectivamente.



**Figura 6.** Análise da variabilidade do fluxo de sedimento em suspensão através das Ondaletas para os diferentes tributários da LP e para a região do Canal de Acesso. (a) Variabilidade do fluxo para o rio Guaíba; (b) variabilidade do fluxo para o rio Camaquã; (c) variabilidade do fluxo para o CSG; (d) variabilidade do fluxo para o Canal de Acesso do Porto de Rio Grande.

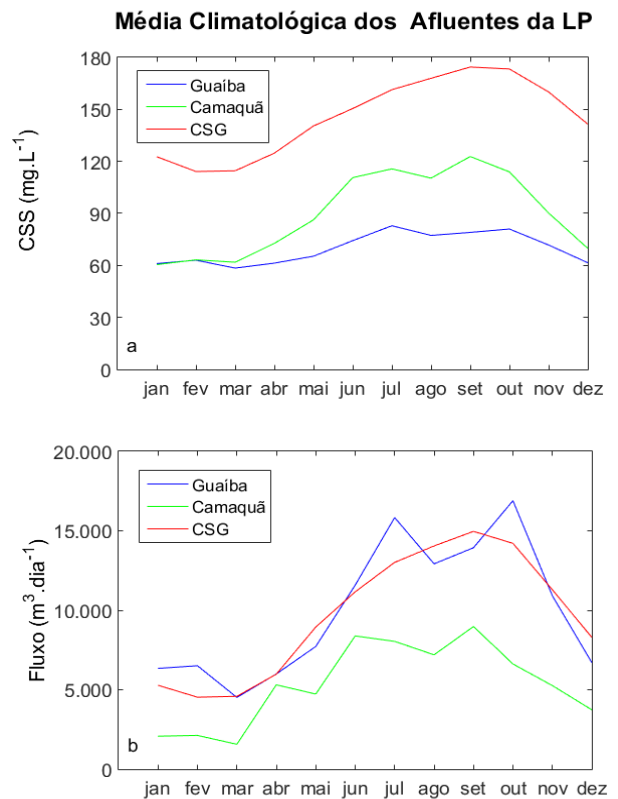
A região do Canal de Acesso é uma área mais susceptível a mudanças de fluxo em escalas de tempo sinóticas menores que as outras regiões devido a sua interação com a região costeira. Desta forma é possível observar que a escala de tempo da variabilidade encontrada para o Canal de Acesso é menor que os outros ambientes, apresentando variação em escalas de dias e semanas. Isso ocorre principalmente pela intensa passagem de frentes frias na região. A mudança da direção de ventos na região, ventos de NE e SO, causam desníveis na costa ou no interior do estuário, promovendo fluxos de vazante/enchente, respectivamente (MÖLLER et al., 2001; FERNANDES; DYER; MÖLLER Jr., 2005) e consequentemente o transporte de sedimentos para fora/dentro respectivamente. Pode-se inferir deste efeito que, a intensificação ou não da vazão na região do estuário tem consequência mais instantânea que a precipitação nos tributários. Isso ocorre devido ao efeito que o encontro das águas salinas e doce tem para a CSS, uma vez que sua interação é determinante para efeitos de intensificação de CSS como a formação de ZMT, floculação, entre outros efeitos.

Apesar dos dados apresentados serem insuficientes para demonstrar escalas de variabilidade maiores, de acordo com Marques (2005), a vazão do estuário apresenta uma variabilidade anual bem definida, pelo menos para a descarga de água doce. De acordo com o autor, a descarga fluvial, o nível e a salinidade apresentam ciclos interanuais, que podem ser correlacionados com a ocorrência dos fenômenos ENSO com importantes consequências para a área estuarina (Fernandes et al. 2002; Odebrecht et al., 2005).

O padrão sazonal para os principais afluentes foi analisado através das climatologias. Visando à comparação entre os ambientes, foi utilizado o período temporal do CSG, que possui a menor série temporal de dados entre eles (20 anos). Observa-se tanto na distribuição de CSS quanto do fluxo (Figuras 7a e 7b) e está em concordância com o descrito por Möller (1996) e Vaz et al (2006) para vazão. Para os meses de inverno e início de primavera encontramos valores altos de CSS intensificando consequentemente os fluxos durante esse período. Isso ocorre devido, principalmente, à alta capacidade de transporte dos rios uma vez que suas vazões também são intensificadas. Já nos meses onde a vazão diminui a CSS também pode diminuir. Esta correlação também já foi observada por Rodriguez-Blanco; Tobaada-Castro e Tobaada-Castro (2010), onde pela análise de padrões de vazão e sedimento em suspensão observaram que existe um comportamento positivo entre os dois fatores. A alta descarga dos rios é proveniente das intensas chuvas que acabam lixiviando sedimento para dentro do rio, através de voçorocas, sulcos ou ravinas derivadas da agricultura que deixa o solo expostos sem vegetação.

É possível identificar nas Figuras 7a e 7b que existe uma linearidade entre o aumento da concentração de sedimento em suspensão e o aumento do fluxo. Esse comportamento sazonal é derivado da relação entre a intensidade de vazão e a capacidade do rio em transportar altas CSS. A vazão é um fator determinante para o aumento do fluxo, sendo possível observar entre os períodos de Janeiro à Maio para o CSG, que apesar da alta CSS o fluxo se mantém baixo, devido ao período sazonal de baixa precipitação. O rio Camaquã por sua vez, mesmo em estações de alta descarga fluvial apresenta um fluxo e CSS relativamente menores do que os outros tributários devido principalmente a sua característica sedimentológica. Esse padrão de sazonalidade também foi encontrado por Pasquini, Niencheski e Depetris (2012) para precipitação na

região de Porto Alegre, e vazão do rio Jacuí, ocorrendo os maiores valores ao longo do Inverno Austral e início da Primavera.



**Figura 7.** Média climatológica para (a) CSS e (b) fluxo dos afluentes da LP. Variabilidade sazonal dos rios Guaíba, Camaquã e o CSG.

Pode-se comparar o comportamento destes tributários com os apresentados por Chen et al. (2001). Os autores descrevem as diferenças de fluxo de sedimento entre diferentes regiões do rio Yangtze, na China. Eles justificam as diferenças de fluxos encontrados com a diferença entre a capacidade da vazão em transportar sedimentos finos e arenosos. Para uma região predominantemente composta por sedimentos arenosos, a capacidade de transportar sedimento se torna menor, e é necessária uma vazão maior para transportar a mesma CSS do que um ambiente dominado por sedimentos finos. Já o fluxo de sedimentos para ambientes com sedimentos finos se correlaciona mais ao abastecimento destes no ambiente do que a capacidade de transporte pelo rio. Para o rio Guaíba e o CSG que apresentam em sua maioria sedimentos finos, é observado que, apesar de o CSG apresentar CSS consideravelmente superior, seus fluxos são comparáveis uma vez que a vazão do Guaíba é praticamente o dobro e compensaria essa diferença de exportação por longo período de tempo.

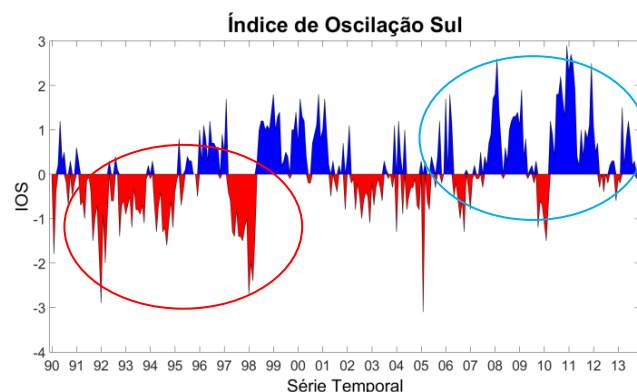
### Tendência Temporal e Eventos Extremos

Um dos principais fatores que determinam mudanças em padrões de longo período são os efeitos do ENSO (El Niño-Southern Oscillation) (HIRATA; MÖLLER Jr.; MATA, 2010). Esses eventos extremos são de suma importância para a exportação de material em suspensão para o oceano adjacente, pelos efeitos erosivos na bacia hidrográfica, pela remobilização de sedimento de fundo pela alta taxa de vazão quanto pela distribuição da alta concentração de sedimento oriunda dos afluentes que é exportado para fora do estuário. De acordo com Pasquini, Niencheski e Depetris (2012), a LP

está sujeita a variabilidade do fenômeno ENSO. Essas variações ocorrem principalmente pela influência direta da pluviosidade com a descarga de água doce proveniente dos rios pelas bacias de drenagem. Tendências dos últimos 50 anos mostram um aumento de precipitação na região de Porto Alegre, porém análises em escalas menores mostram tendências negativas, para o período de 2000-2011 (PASQUINI; NIENCHESKI; DEPETRIS, 2012). Desta maneira, se fez análise para a CSS em períodos decadais (Figura 8), uma vez que é especulado por Pasquini, Niencheski e Depetris (2012) que um único evento forte de El Niño pode influenciar essa mudança de padrões. As tendências encontradas pelos autores para o período de 2000-2010 também foram encontradas para CSS no presente trabalho (Figuras 8a e 8b). Porém para 2005-2015 essa tendência se inverte, tanto para o rio Guaíba quanto para o Rio Camaquã. Existe então uma tendência positiva de aumento de sedimento em suspensão do início deste século aos dias atuais, comparado também com o século passado para os rios Guaíba e Camaquã. Para o CSG em contrapartida há uma tendência de diminuição do aporte de sedimentos a partir do ano 2000 (Figura 8c).

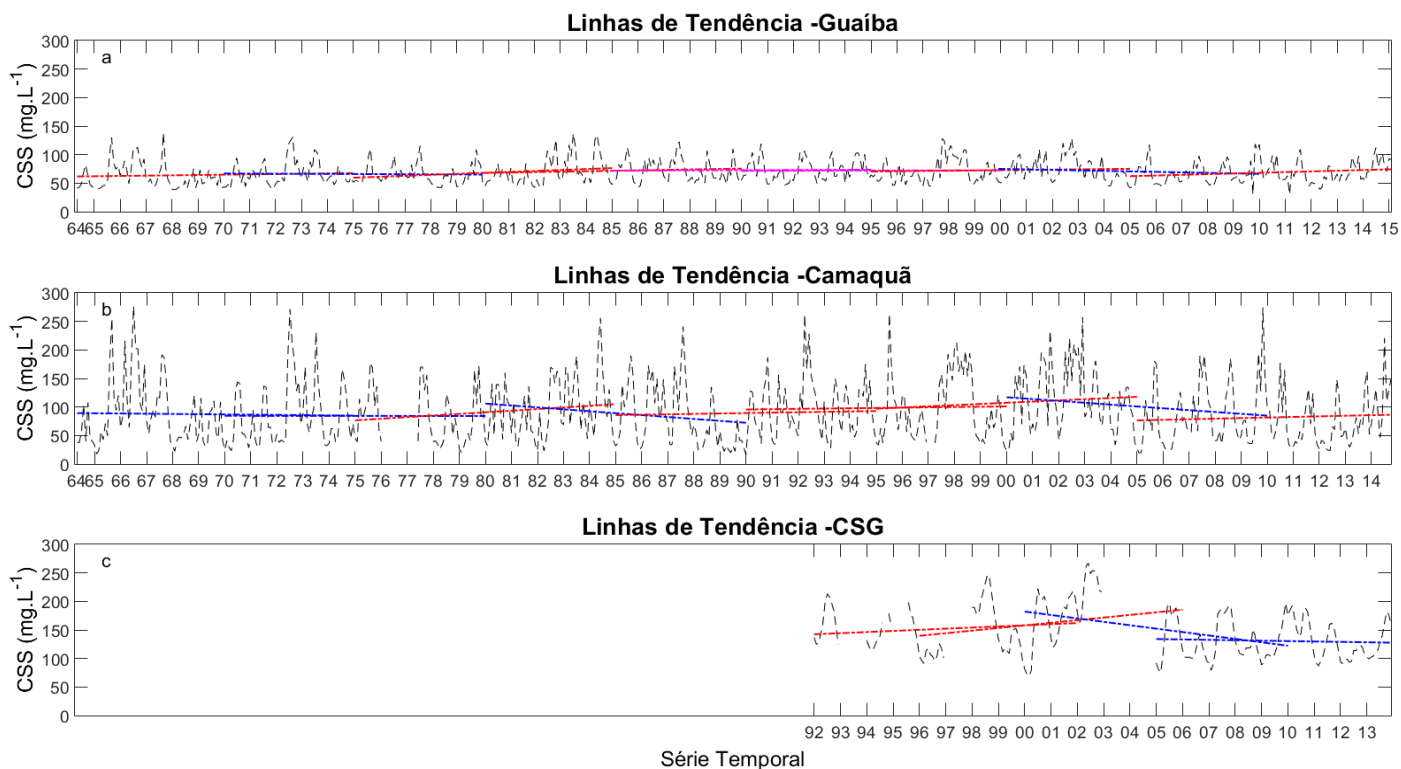
Valores de IOS (Índice de Oscilação Sul) apresentaram para os anos de 2005 a 2013 a predominância de períodos de La Niña (Figura 9), cuja diminuição da precipitação pode acarretar menores valores de exportação de sedimentos, apresentando como consequência a tendência negativa encontrada no CSG (Figura 8c). Já para os anos 90 encontramos valores médios de IOS negativos (Figura 9). O intenso El Niño de 1998, por exemplo, acabou intensificando os períodos chuvosos na região e consequentemente aumentando a CSS exportado para a LP (Figura 8a,8b). Estudos feitos para os níveis da LM por Hirata, Möller Jr. e Mata et al. (2010) mostraram que nos últimos 100 anos há um aumento do nível da LM, o que consequentemente pode

resultar em um aumento de fluxo em direção à LP (Oliveira et al. 2015).



**Figura 9.** Índice de Oscilação Sul para o período de 1990 até 2013. Região circulada em vermelho corresponde à década de 90, apresentando predominância de eventos negativos (El Niño). Região circulada em azul representa período atual com predominância de índices positivos (La Niña).

A fim de avaliar a influência de eventos extremos nessas taxas de exportação, foi analisada a exportação média para dois eventos significativos de El Niño, nos anos de 1998 e 2002. Ao longo do evento de 1997-98 foi verificado uma média de vazão pelos principais afluentes de aproximadamente 3900 m<sup>3</sup>.ano<sup>-1</sup>, que corresponde à 167% da média histórica. O rio Guaíba apresentou picos de fluxos de sedimento em suspensão de 180.000 m<sup>3</sup>.dia<sup>-1</sup>, exportando valores 19 vezes maiores que a exportação média. Para o rio Camaquã, os fluxos máximos foram da ordem de 186.000 m<sup>3</sup>.dia<sup>-1</sup>, exportando cerca de 38 vezes mais que a média em um único período. Já para o CSG, foram observados máximos de exportação na ordem de 53.000 m<sup>3</sup>.dia<sup>-1</sup>, sendo 5,4 vezes a média. Para o evento de El Niño de 2001-2002, cujos valores



**Figura 8.** Linhas de tendências para os principais tributários da LP. (a) Rio Guaíba; (b) Rio Camaquã e (c) CSG. As linhas pontilhadas em preto representam a série temporal histórica de CSS. As cores das linhas de tendência em vermelho, azul e magenta estão representando as linhas de tendências positivas, negativas e estáticas, respectivamente.



médios de vazão atingem  $4900 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ , os valores são ainda mais relevantes. O rio Guaíba exportou em seus picos máximos de vazão cerca de  $260.000 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$ , sendo 27 vezes mais sedimento em suspensão que a taxa média. O Camaquã aumentou sua taxa de exportação em até 30 vezes com um fluxo máximo de aproximadamente  $150.000 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$ , e o CSG até 6 vezes com valores de  $60.000 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$ . Logo, estes eventos extremos são de extrema importância para exportação de sedimentos em suspensão para a LP e consequentemente para o oceano, onde em um único evento a exportação aumenta consideravelmente devido ao aumento da vazão e consequentemente da capacidade de transporte do rio.

Marques et al. (2010) através de uma simulação numérica, para os anos de 1998 e 1999, observaram no primeiro ano da simulação picos extremos de exportação de sedimento em suspensão. O ano seguinte apresentou valores menores, considerando que passado o evento El Niño, valores de descarga fluvial diminuem consideravelmente e por sua vez o transporte de sedimento em suspensão na região. Os autores calcularam valores integrados do transporte de massa para o oceano, que para a simulação foi de  $13.7 \times 10^6 \text{ ton} \cdot \text{ano}^{-1}$ , com CSS de  $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . Pode-se dizer então que existe uma subestimação por conta do modelo numérico utilizado por Marques et al. (2010). Essas limitações podem estar relacionadas, principalmente, com: o fato do modelo não conseguir representar peculiaridades do fundo como a formação de lama fluida que pode ou não residir periodicamente no fundo do canal de acesso; formação e deslocamento da ZMT; ressuspensão de material depositado ao fundo do canal, entre outros fatores.

Para analisarmos essas tendências devemos analisar também o uso do solo dessas regiões, e como ele variou nos últimos 50 anos. Como característica do estado, o Rio Grande do Sul é o maior produtor de arroz do Brasil, sendo responsável por mais de 40% da produção brasileira (TERRES et al. 1999). Essa região no último século aumentou em 1589% sua área de cultivo de arroz, sendo que a produtividade aumentou nos últimos 50 anos em 63%. (IRGA.DCI). Para aumentar a produtividade, principalmente em regiões de várzeas e de solos pobres, foi desenvolvido a cultura de arroz irrigado que utiliza a captação de água para o cultivo, juntamente com a pecuária (Pinto et al. 1999). De acordo com o IBGE (2010) esse tipo de plantação é responsável por aproximadamente 52% da captação de água dos recursos hídricos da região. Essa região compreende os rios Guaíba e o Camaquã, passando pela região da planície costeira até a Zona Sul do estado. Além disso, nos últimos anos foi observado um avanço do plantio da soja sobre áreas de pastagens. Estima-se que entre 2012 e 2013 a área plantada de soja avançou sobre 470.241 ha que antes eram utilizados para pastagem de gado bovino (FARSUL, 2013). Somente nos municípios da Região Sul do Estado, o aumento na área plantada de soja entre 2010 e 2013 foi de 48% (EMATER-RS/ASCAR, 2014). Em relação à bacia da Lagoa Mirim, só do lado uruguaio a produção de arroz irrigado praticamente dobrou de 1990 a 2003, passando de 82.000 ha para 153.000 ha (MGAP-DIEA, 2003).

Ao compararmos as médias de CSS do século passado para o presente, a concentração de sedimentos em suspensão aumentou tanto para o rio Guaíba quanto para o rio Camaquã, de 68.9 para  $70.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  e de 91 para  $93.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , respectivamente. O rio Guaíba apresentou maior parte das suas tendências positivas, já o rio Camaquã apresentou variações bem distribuídas ao longo da série.

Para o CSG, porém, esse comportamento se inverte. O período de 1992 a 2000, encontramos médias de CSS de  $153.44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , já para o período atual esse valor cai para  $130.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . São vários os fatores que podem ser atribuídos a este comportamento. Este canal não depende tanto da lixiviação das encostas como os outros afluentes, uma vez que sua função é conectar a LM à LP. Desta forma, parte do sedimento lixiviado pela rizicultura da região acaba sendo depositado no interior da LM. Porém, por ser um corpo de água raso a LM está sujeita a processos de ressuspensão pelo vento que consequentemente são exportados para a LP (OLIVEIRA, 2012) e o que determina a exportação de sedimento ressuspensão para a LP é a diferença de nível entre a LM e a LP (OLIVEIRA et al. 2015). Desta forma, a construção de séries de CSS mais longas que 20 anos, bem como a análise mais detalhada dos processos secundários que ocorrem no canal podem mostrar que a tendência para maiores períodos pode se inverter, uma vez que a exportação predominante é da LM para a LP.

## CONCLUSÕES

O rio Guaíba é um dos principais contribuintes de sedimento em suspensão para a LP, apresentando o maior fluxo de sedimento em suspensão, oriundos da sua bacia de drenagem que tem alta disponibilidade de formação de sedimentos finos e apresenta relevo propício para o transporte dessas concentrações. Porém, ele não é o principal exportador para de sedimentos em suspensão para a região costeira. Parte desse sedimento em suspensão exportado pelo rio Guaíba acaba retido no interior da LP, ou pode ser transportado lentamente para o ELP. O rio Camaquã por sua vez, apresentou o menor fluxo de sedimento em suspensão, derivado principalmente do fato da vazão ser muito baixa em relação aos outros, e a composição de sua bacia de drenagem favorecer a exportação de sedimentos de granulometria maior que silte e argila, o que com baixas vazões diminui o poder de transporte de sedimento em suspensão.

O CSG, apesar de teoricamente não se comportar como um canal hidráulico padrão devido ao seu relevo, sua vazão proposta por Oliveira et al. (2015) permitiu que fosse calculado seu fluxo de sedimento em suspensão verificando sua importante contribuição para o sistema da LP e principalmente para a região costeira. Devido a sua alta CSS, oriunda principalmente pela contribuição da sua bacia de drenagem, lixiviação das lavouras e possivelmente ressuspensão de sedimentos do fundo da LM, juntamente com a sua proximidade do ELP e do Oceano adjacente, faz com que o CSG seja o afluente mais importante em relação à exportação de sedimentos em suspensão para a região costeira. Sua importância e contribuição são facilmente visíveis por imagens de satélite, apresentando águas mais turvas escoando em direção à desembocadura do ELP sendo exportada para a região costeira, ficando sujeita à hidrodinâmica local. Apesar das linhas de tendências dos últimos 10 anos apontarem para uma diminuição de aporte sedimentar do CSG, essa diminuição pode estar associada a eventos ENSO. Com a variabilidade das mudanças climáticas, que para a região tem como consequência o aumento da precipitação, é necessário que o monitoramento da exportação de CSS seja continuamente realizado, uma vez que o CSG é o exportador principal de sedimentos da região e está diretamente ligado à capacidade de vazão do afluente. O evento de El Niño analisado no estudo mostrou que durante esses eventos a capacidade de transporte de sedimentos, e a sua exportação para o oceano aumentam significativamente.

Todos os afluentes analisados apresentaram variabilidade anual e sazonal bem delimitada, o que era esperado pela correlação com o comportamento da vazão. Para o canal de acesso, essa variabilidade se concentra na escala sinótica em função da passagem de frentes. Esse controle afeta diretamente os fluxos de sedimento em suspensão pela interação da água salgada e a água doce, e pelo aprisionamento de sedimentos dentro do estuário, acumulados em período de ventos do quadrante sul que impedem/dificultam a vazão do estuário. A exportação de sedimentos pelo estuário se dá principalmente pela camada de fundo. Consequentemente, a entrada de uma cunha salina liderada pela passagem de frentes frias bloqueará primeiramente a exportação pelo fundo, por este ser mais denso e encontrar água salina que também é mais densa do que a água doce com uma menor CSS na superfície. O fundo do canal de Acesso exporta cerca de 10 vezes mais sedimento do que a camada mais superficial, o que afeta diretamente as taxas de exportação do ELP. Desta forma, se existir um período de predominância de uma cunha salina, que causa um acúmulo dessa alta concentração de sedimento de fundo na frente da cunha, podemos ter alta taxas de sedimento sendo exportados no período onde a penetração de águas do mar perde intensidade, sendo então redistribuído na zona costeira. Este tipo de comportamento pode ser a explicação para os eventos irregulares de alta concentração de sedimentos finos na região costeira. Os estudos já feitos para essa região falham principalmente em representar essa camada de fundo, fazendo com que os valores de exportação sejam menores que os encontrados neste trabalho.

Apesar dos valores encontrados de CSS falharem em representar um balanço sedimentar efetivo, seus fluxos são equiparáveis e podemos concluir que o balanço existe, sendo ele, porém, mais complexo do que simplesmente a soma dos fluxos de sedimento em suspensão. Para trabalhos futuros é necessário levar-se em consideração a contribuição de sedimentos em suspensão lixiviados pelas lavouras na encosta da LP, e as taxas de erosão na margem da LP, que contribuem para o aumento das taxas de sedimento em suspensão que chegam ao ELP e que não foram levadas em consideração para o balanço sedimentar deste estudo. A complexidade desse balanço está relacionada também à presença de uma camada de fundo no ELP com concentrações elevadas de sedimento em suspensão que podem estar relacionadas a fatores mais complexos como a presença de lama fluída, ressuspensão de sedimento do fundo, floculação pela interação da água salina, dentre outros fatores que devem ser analisados com mais detalhamento em trabalhos futuros.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE NETO, J. S. d.; RIGON, L. T.; TOLDO Jr., E.E.; SCHITTINI, C. A. F. (2012). Descarga sólida em suspensão do sistema fluvial do Guaíba, rs, e sua variabilidade temporal. *Pesquisas em Geociências*, v. 39, n.2, p.161-171, maio/ago. 2012.
- ANDRADE, A. C. F. d. *Dados MODIS e Landsat-8 para análise da água da Lagoa dos Patos, RS*. 2016. 65f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- ANTIQUEIRA, J.A.F.; CALLIARI, L.J.; 2005. Características sedimentares da desembocadura da Lagoa dos Patos. *Gravel*, n.3, p. 39-46, nov.2005.
- ASSELMAN, N. Fitting and interpretation of sediment rating curves. *Journal of Hydrology*, v. 234, p.228-248, mai. 2000.
- ÁVILA, R. A. *Distribuição do material particulado em suspensão e suas inter-relações com diferentes propriedades no estuário da Lagoa dos Patos*. 2013. 91f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física, Química e Geológica) - Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2013.
- ÁVILA, R.A.; MÖLLER Jr., O.O.; ANDRADE, M.M. Uso de um ADCP para Estimar Concentrações de Material Particulado em Suspensão para o Estuário da Lagoa dos Patos, Brasil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. v.19, n.2, p. 299-309, abr./jun. 2014.
- BAISCH, P. *Les oligo-éléments métalliques du système fluvio-lagunaire dos Patos (Brésil)- Flux et devenir*. 1994. 345f. Tese (Doutorado em Geologia Marinha). Universidade de Bordeaux I, França, 1994.
- CALLIARI, L. J.; WINTERWERP, J. C.; FERNANDES, E.; CUCHIARA, D.; VINZON, S. B.; SPERLE, M.; HOLLAND, K. T. Fine grain sediment transport and deposition in the Patos Lagoon-Cassino beach sedimentary system. *Continental Shelf Research*, v.29, n.3, p. 515-529, mar. 2009.
- CAMPBELL, F. B.; BAUDER, H. A. A rating-curve method for determining silt-discharge of streams. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, v.21, n.2, p. 603-607. 1940.
- CARVALHO, N.O. *Hidro sedimentologia prática: Interviência*. 2ª Ed. rev. Atual e ampliada. - Rio de Janeiro, 2008.
- CHEN, Z.; LI, J.; SHEN, H.; ZHANGHUA, W. Yangtze River of China: historical analysis of discharge variability and sediment flux. *Geomorphology*, v.41, n.2, p.77-91, may. 2001.
- COLBY, B. (1956). Relationship of sediment discharge to streamflow. Relatório técnico do departamento Americano de pesquisas geológicas: Water Resources Division: 1956. Washington, D.C., 1956. 170p.
- COMPAGNUCCI, R. H.; BERMAN, A. L.; HERRERA, V.V.; SILVESTRI, G. Are southern South American Rivers linked to the solar variability? *International Journal of Climatology*, v.34, p.1706-1714, ago. 2014.
- DANTAS, M. d. S. *Análise espectral de padrões gradientes de séries temporais curtas*. 2009. 158f. Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São José dos Campos, 2009.
- DYER, K. R. *Coastal and estuarine sediment dynamics*. John Wiley & Sons, Inc. Chichester, 1986.

- EMATER-RS/ASCAR (2014). Valores da Produção Agrícola Principais Grãos, Arroz Irrigado, Soja e Milho na Região Sul. Relatório Técnico da Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado do Rio Grande do Sul e Associação Sulina de Crédito e Assistência Rural, 2014. Pelotas, 2014. 9p.
- FARSUL (2013). Balanço da Agropecuária em 2013 e Perspectivas para 2014. Relatório Econômico da Federação da Agricultura do Estado do Rio Grande do Sul: 2013. Porto Alegre, 2013. 89p.
- FERGUSON, R. I. River loads underestimated by rating curves. *Water Resources Research*, v. 22, n.1, p. 74-76, jan. 1986.
- FERNANDES, E. H. L.; DYER, K. R; MÖLLER, O. O. Spatial gradients in the flow of southern Patos Lagoon. *Journal of Coastal Research*, v.21, n.4, p. 759-769, jul. 2005.
- HARTMANN, C. *Dinâmica, distribuição e composição do material em suspensão na região sul da Lagoa dos Patos, RS*. 1996. 363f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.
- HARTMANN, C.; HARKOT, P. F. C. Influência do canal São Gonçalo ao aporte de sedimentos para o estuário da laguna dos patos-RS. *Brazilian Journal of Geology*, v.20, n.1, p. 329-332, jan. 1990.
- 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 Aquatic Sciences*, v.5, n.2, p. 254-266, 2010.
- HOROWITZ, A. J. An evaluation of sediment rating curves for estimating suspended sediment concentrations for subsequent flux calculations. *Hydrological Processes*, v.17, n. 17, p. 3387-3409, dez. 2003.
- IBGE (2010). Levantamento e classificação do uso da terra uso da terra no estado do Rio Grande do Sul. Relatório Técnico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística: 2010. Rio de Janeiro, 2010. 151p.
- IRGA.DCI. Equipe de Política Setorial. Arroz irrigado no RS: área, produção e rendimento. Porto Alegre (Série histórica - 1920 a 2000).
- KIRCHHOF, P. A. *A contribuição de sedimentos terrígenos dos rios Jacuí e Guaíba para o Sistema Lagunar (Lagoa Dos Patos) do RS*. 2015. 50f. Monografia (Trabalho de conclusão do curso de Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- LIMA, L.B; SILVA, L.F.M. Os principais problemas ambientais da Bacia hidrográfica do Rio Camaquã. In: SALÃO INTERNACIONAL DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO (SIEPE), 4(2), 2012, Universidade Federal dos Pampas. *Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão*.
- 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. 87f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física, Química e Geológica) - Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2005.
- MARQUES, W. C.; FERNANDES, E. H.; MORAES, B. C.; MÖLLER Jr., O. O.; MALCHEREK, A. Dynamics of the patos lagoon coastal plume and its contribution to the deposition pattern of the southern brazilian inner shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v.115, n.C10045, 2010.
- MEDEIROS, P.R.P.; KNOPPERS, B.; SOUZA, W.F.L.; OLIVEIRA, E.N. Aporte de sedimentos em suspensão no baixo rio São Francisco (SE/AL), em diferentes condições hidrológicas. *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, v.15, n.1, p.42-53, 2011.
- MGAP-DIEA (2003). El Cultivo de Arroz en Uruguay Contribución a su Conocimiento. Relatório Técnico do Ministério de Ganadería, Agricultura e Pesca e Estadísticas Agropecuária: 2003. Uruguai, 2003. 34p.
- MÖLLER Jr., O. O. *Hydrodynamique de la Lagune dos Patos (30 RS, Brésil). Mesures et modélisation*. 1996. 204f. Tese (Doutorado em Oceanografia). Universidade de Bordeaux I, França, 1996.
- MÖLLER Jr. O.O.; LORENZZETTI, J.A., STECH, J., MATA, M.M., The Patos Lagoon Summertime Circulation and Dynamics. *Continental Shelf Research*, v.16, n.3, p. 335-351. 1996.
- MÖLLER Jr., O. O.; CASTAING, P.; SALOMOM, J.-C.; LAZURE, P. (2001). The influence of local and non-local forcing effects on the subtidal circulation of patos lagoon. *Estuaries*, v. 24, n.2, p.297-311. abr.2001.
- MÖLLER Jr., O. O.; FERNANDES, E.H.L. Hidrologia e hidrodinâmica. In: SEELIGER, U. & ODEBRECHT, C., Ed(s). *O estuário da Lagoa dos Patos: um século de transformações*. Rio Grande: FURG, 2010. p. 17-30.
- MÖLLER Jr., O. O.; LORENZZETTI, J. A.; STECH, J. L.; MATA, M. M. The Patos Lagoon summertime circulation and dynamics. *Continental Shelf Research*, v. 3, n. 16, p. 335-351, mar. 1996.
- ODEBRECHT, C.; ABREU, P.C.; MÖLLER Jr., O.O.; NIENCHESKI, L.F.; PROENÇA, L.A.; TORGAN, J.C. Drought effects on pelagic properties in the shallow and turbid Patos Lagoon, Brazil. *Estuaries and Coast*, v.28, n.5, p.675-685, oct. 2005
- OLIVEIRA, H.A. Estudo do comportamento hidrodinâmico da Lagoa Mirim e dos processos de troca com a Lagoa dos Patos via Canal de São Gonçalo. 2012. 98p. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física, Química e Geológica) -

- Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2012.
- OLIVEIRA, H. A. d.; FERNANDES, E. H. L., MÖLLER Jr., O. O.; COLLARES, G. L. Processos hidrológicos da Lagoa Mirim. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.20, n.1, p.34-45, jan./mar.2015.
- PAIM, P.S.G.; MÖLLER Jr., O.O. Material em suspensão e dissolvido no estuário da Lagoa dos Patos – FASE III. Relatório técnico do Contrato FURG/CIRM: 1986. Rio Grande do Sul, 1986. 133p.
- PASQUINI, A.I; NIENCHESKI, L.F.H.; DEPETRIS, P.J. The ENSO signature and other hydrological characteristics in Patos and adjacent coastal lagoons, south-eastern Brazil. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v.111, jul.2012.
- PINTO, L. F. S.; PAULETTO, E. A.; GOMES, A. da S.; SOUSA, R. O. Caracterização de solos de várzea. In: GOMES, A. da S. & PAULETTO, E.A., (Eds.). *Manejo de solo e da água em áreas de várzeas*. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 1999. p.11-36.
- POSTMA, H. (1967). Sediment transport and sedimentation in the estuarine environment. In: LAUFF, G. H. (Ed.). *Estuaries*. Washington, D.C: American Assoc. for the Advancement of Science, 1967. p. 158-179.
- RISSO, A.; REIS, L. G. d. M.; PAZ, A. R. d.; LIMA, H. V. C. Estimativa da produção de sedimentos de forma distribuída usando a equação universal de perdas de solo (EUPS) e geoprocessamento: aplicação na bacia do Lago Guaíba (RS). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 16, 2005, João Pessoa, PB, p.21-29. 2005.
- RODRÍGUEZ-BLANCO, M. L.; TOBOADA-CASTRO, M. M.; TOBOADA-CASTRO, M. T. Sources and sediment yield from a rural catchment in humid temperate environment, northwest Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 35, n.3, p.272-277, mar.2010.
- SANTOS, C. A. G.; FREIRE, P. K. M. M.; TORRENCE, C. A transformada wavelet e sua aplicação na análise de séries hidrológicas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, n. 3, p. 271-280, jul./set. 2013.
- SCAPIN, J. Caracterização do transporte de sedimentos em um pequeno rio urbano na cidade de Santa Maria–RS. 2005. 116f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.
- SILVA, J. L. B. d. Identificação do sistema de paleodrenagem na margem continental sul brasileira adjacente à Lagoa Mirim no terciário superior por sismicidade de reflexão. 2009. 239f. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- SIMON, A.L.H.; SILVA, P.F. Análise Geomorfológica da Planície Lagunar Sob Influência do Canal São Gonçalo – Rio Grande do Sul – Brasil. *Geociências (São Paulo)*, v. 34, n.4, p.749-767, 2015.
- SYVITSKI, J.P. Supply and flux of sediment along hydrological pathways: research for the 21st century. *Global and Planetary Change*, v.39, n.1-2, p.1-11, out.2003.
- TERRES, A. L.; GALLI, J.; FAGUNDES, P. R. R.; MACHADO, M. O.; M. JÚNIOR. A.M. de; MARTINS, J. F.; NUNES, C. D. M.; FRANCO, D. F.; AZAMBUJA, I. H. V.; Arroz irrigado no Rio Grande do Sul: generalidades e cultivares. Relatório técnico Embrapa Clima Temperado: 1999. Pelotas, 1999. 58p.
- TOLDO Jr., E.E. Morfodinâmica da laguna dos patos, rio grande do sul. *Pesquisas*, v. 18, n.1, p. 58-63. 1991.
- TOLDO Jr., E.E. Sedimentação, Predição do Padrão de Ondas, e Dinâmica Sedimentar da Antepraia e Zona de Surfe do Sistema Lagunar. 1994. 183f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.
- TOLDO Jr., E.E.; DILLENBURG, S.; CORREA, I.; & ALMEIDA, L. Holocene sedimentation in Lagoa dos Patos lagoon, Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of Coastal Research*, v.16, n.3, p. 816–822, 2000.
- TOLDO Jr., E.E.; DILLENBURG, S.; CORREA, I.; ALMEIDA, L.; WESCHENFELDER, J.; GRUBER, N. Sedimentação de longo e curto período na Lagoa dos Patos, Sul do Brasil. *Pesquisas em Geociências*, v.33, n.2, p. 79-86, 2006.
- TORRENCE, C.; COMPO, G. P. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 79, n.1, p.61-78, 1998.
- VAZ, A. *Efeito da descarga de água doce em processos ocorrentes no estuário da Lagoa dos Patos*. 2003. 68f. Monografia (Trabalho de conclusão do curso de Oceanologia) – Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2003.
- VAZ, A. C.; MÖLLER Jr., O. O.; ALMEIDA, T. L. d. Análise quantitativa da descarga dos rios afluentes da Lagoa dos Patos. *Atlântida*, v.28, n.1, p. 13-23. 2006.
- VERDUM, R.; STRECK, E.V.; VIEIRA, L.F.S. Degradação dos Solos no Rio Grande do Sul. In: GUERRA, A.J.T. & JORGE, M.C.O. Ed(s). *Degradação dos Solos no Brasil*. Rio de Janeiro: Vertrand Brasil, 2014. p. 86-125.
- VIEIRA, H. Aspectos sedimentológico do Canal de São Gonçalo. 1982. 132f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1982.
- WALLING, D.E. Suspended sediment production and building activity in a small British Basin. Effects of Man on the

Interface of the Hydrological Cycle with the Physical Environment. *LAHS Publication*, v.113, p.137-144, 1974.

WALLING, D. E. Assessing the accuracy of suspended sediment rating curves for a small basin. *Water Resources Research*, v.13, n.3, p. 531-538, jun. 1977.

WALLING D.E. Human impact on land–ocean sediment transfer by the world's rivers. *Geomorphology*, v.79, n.3-4, p.192-216, set. 2006.

WARRICK, J. A. Trend analyses with river sediment rating curves. *Hydrological Processes*, v.29 , n.6, p.936-949, mar. 2015.

WARRICK, J.A.; MADEJ, M.A; GOÑI, M.A.; WHEATCROFT, R.A. Trends in the suspended-sediment yields of coastal rivers of northern California, 1955–2010. *Journal of Hydrology*, v.489, p.108-123, mai.2013.

WINTERWERP, J.C.; VAN KESTEREN, W.G.M. Introduction to the physics of cohesive sediment in the marine environment. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands. 466p. 2004.

YANG, G.; CHEN, Z.; YU, F.; WANG, Z.; ZHAO, Y.; WANG, Z. Sediment rating parameters and their implications: Yangtze river, China. *Geomorphology*, v.85, n.3-4, p.166-175, mar.2007.

# Capítulo 5

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

**E**ste trabalho possibilitou a elaboração e avaliação da melhor metodologia para estimar as concentrações de sedimento em suspensão para os diferentes afluentes da Lagoa dos Patos. Visto a dificuldade em se manter estações de coletas de amostras de sedimento em suspensão para afluentes em escalas temporais altas, a aplicação de curvas-chave vem sendo uma das ferramentas mais utilizadas para entender a dinâmica e variabilidade desses fluxos de sedimento. Através deste trabalho foi possível então concluir que a abordagem de uma regressão não linear para a elaboração dessas aproximações apresentou os menores erros e melhor coerência nos resultados. Porém, pode-se concluir também que é necessário obter contínuas amostragens para novas calibrações das curvas-chave já determinada, isso para que as calibrações e validações estejam sempre de acordo e apresentem melhores estimativas.

Através da reconstrução da série histórica de CSS e de descarga fluvial foram obtidos os fluxos de sedimento em suspensão dos diversos afluentes e as trocas com o oceano. Apesar das diferenças encontradas entre os fluxos de exportação, foi possível observar que existe um balanço considerável entre a entrada de sedimentos em suspensão pelos principais tributários da LP e as trocas com o oceano através da região estuarina. As diferenças encontradas podem ser atribuídas a fatores secundários que não foram contabilizados neste trabalho e que tem forte influência na concentração de sedimentos em suspensão como a lixiviação das áreas plantas nas margens da LP, aporte de CSS pela erosão de margens, a presença de uma camada de fundo no estuário

com altas CSS, ressuspensão de sedimento e até mesmo efeitos da floculação no encontro da água do mar com a água doce.

Os diferentes afluentes analisados apresentaram variabilidade semelhante, apesar de serem ambientes distintos e apresentarem taxas de exportação diferentes. Esta semelhança possivelmente está ligada à própria variabilidade climática da região, que influencia diretamente as regiões das bacias de drenagem dos rios em questão alterando as taxas de pluviosidade alterando a quantidade de água drenada para os rios. Um dos principais fatores climáticos que influenciam diretamente nessas taxas de exportação é o ENSO, que pode acabar alterando até mesmo linhas de tendências com períodos mais longos. Este fenômeno climático é responsável por aumentar as taxas de exportação de sedimento em concentrações expressivas, sendo responsável então por uma contribuição para a LP muito além da média. Conseqüentemente, a quantidade de sedimento em suspensão que é exportado para o oceano podem atingir valores significantes, podendo levar a conseqüências ambientais para a região costeira adjacente. Outros fatores secundários também podem alterar o volume de sedimento que é exportado, como exemplo o mau uso do solo, desmatamentos, aumentos de áreas plantadas e urbanas e que podem também acabar influenciando a longo prazo esses fluxos.

O CSG se mostrou o tributário mais importante em relação à contribuição de sedimento em suspensão para o ELP. Além de exportar altas taxas, semelhantes ao rio Guaíba, seu sedimento em suspensão é introduzido diretamente no ELP, não sedimentando no interior da LP como os outros tributários. Parte desse material pode ficar retido em baías ou sacos existentes nas margens do estuário da Lagoa dos Patos, como apontado por Costa (2016) que tem uma de suas figuras reproduzida abaixo.

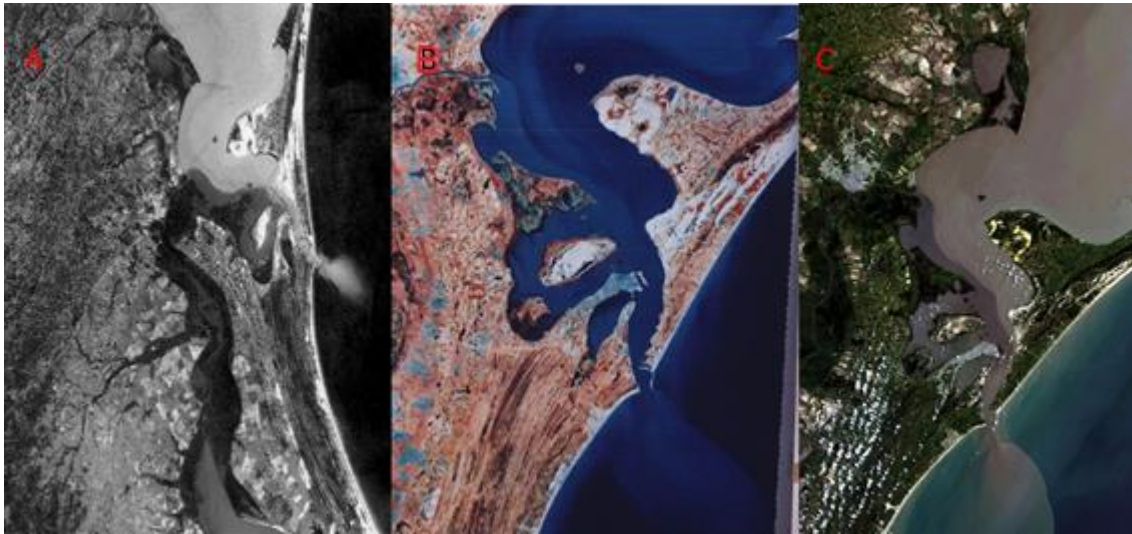


Figura 5. Pluma do CSG no interior do ELP a partir de imagens ou fotos. A): Foto em missão Skylab tirada da região estuarina da Lagoa dos Patos em 1973 onde a pluma do CSG aparece de forma distinta em função da coloração mais escura dos sedimentos que carrega em suspensão. Fonte: Herz, 1977. B: Imagem Landsat de 6 de Julho de 1987 onde a pluma do CSG apresenta o mesmo comportamento, mas agora toma todo o Canal de Acesso à Lagoa dos Patos; C: Imagem Landsat de 18 de Novembro de 2013 onde a pluma apresenta a mesma dinâmica que os casos A e B contribuindo para a formação da pluma da Lagoa dos Patos (obtida de Costa, 2016).

O rio Guaíba, apesar de ter valores de fluxo superior aos outros tributários, parte do seu sedimento é depositado dentro da LP, chegando taxas menores ao ELP. O rio Camaquã, apesar de sua localização ser mais favorável que o rio Guaíba, seus fluxos são pouco significativos em relação aos outros dois. Desta forma é necessário aprofundar principalmente os estudos nas trocas de fluxos de sedimento entre a Lagoa Mirim e o ELP, através do CSG, visto que este é fundamental para a exportação de sedimento em suspensão diretamente o oceano ou significativamente retido nos embaiamentos. Como objetivo final deste trabalho é de extrema importância que disponibilizemos esses dados estimados principalmente para a aplicação em modelos numéricos hidrodinâmicos da LP como um todo, ou até mesmo da região costeira, uma vez que os fluxos de sedimento para o oceano são responsáveis por diversos fenômenos encontrados na região costeira.



# Capítulo 6

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE NETO, J. S. d.; RIGON, L. T.; TOLDO Jr., E. E.; SCHTTINI, C. A. F. (2012). Descarga sólida em suspensão do sistema fluvial do Guaíba, RS, e sua variabilidade temporal. *Pesquisas em Geociências*, v. 39, n.2, p.161-171, maio/ago. 2012.
- ÁVILA, R. A. *Distribuição do material particulado em suspensão e suas inter-relações com diferentes propriedades no estuário da Lagoa dos Patos*. 2013. 91f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física, Química e Geológica) - Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2013.
- BAISCH, P. *Les oligo-éléments métalliques du système fluvio-lagunaire dos Patos (Brésil)- Flux et devenir*. 1994. 345f. Tese (Doutorado em Geologia Marinha) - University of Bordeaux I, France, 1994.
- BOLZAN, M. J. A. Análise da transformada em ondaletas aplicada em sinal geofísico. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v.26, n.1, p. 37-41, 2004.
- CALLIARI, L. J.; WINTERWERP, J. C.; FERNANDES, E.; CUCHIARA, D.; VINZON, S. B.; SPERLE, M.; HOLLAND, K. T. Fine grain sediment transport and deposition in the Patos Lagoon - Cassino beach sedimentary system. *Continental Shelf Research*, v.29, n.3, p. 515-529, mar. 2009.
- CASTELÃO, R. M.; MÖLLER Jr., O. O. Sobre a circulação tridimensional forçada por ventos na lagoa dos patos. *Atlântica*, v. 25, n.2, p. 91-106, 2003.
- COSTA, M. S. *Variabilidade dos fluxos de sedimentos em suspensão do canal de São Gonçalo para a Lagoa dos Patos*. 2016. 31f. (Monografia para

obtenção do título de Oceanóloga) - Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2016.

DANTAS, M. d. S. *Análise espectral de padrões gradientes de séries temporais curtas*. 2009. 158f. Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São José dos Campos, 2009.

DAUBECHIES, I. The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis. *IEEE Transactions on Information Theory*, v.36, n.5, p. 961-1005, sep.1990.

DYER, K. R. "Fine Sediment Particle Transport in Estuaries". *Physical Processes in Estuaries*. Ed. Job Dronkers, Ed. Wim Van Leussen. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1988. 295-310.

DYER, K. R. "Sediment Transport Processes in Estuaries". *Developments in Sedimentology: Geomorphology and Sedimentology of Estuaries*. Ed. G.M.E.Perillo. Elsevier Science B.V, 1995. Vol.53, 423-449.

FARGE, M. Wavelet transforms and their applications to turbulence. *Annual Review of Fluid Mechanics*, v.24, 395-458.

FERNANDES, L. D. F. Transporte de poluentes em estuários. 2001. 54f. (Monografia para obtenção do título de Engenharia do Ambiente) - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2001.

FIA R.; MATOS, A.; CORADI, P. C.; PEREIRA-RAMIREZ, O. (2009). Estado trófico da água na bacia hidrográfica da Lagoa Mirim, RS, Brasil. *Revista Ambiente e Água*, v.4, n.1, mar. 132-141.

GARCIA, C. A. E. "Características hidrográficas". *Os ecossistemas costeiro e marinho do extremo Sul do Brasil*. Ed. Ulrich Seeliger, Ed.Clarrise Odebrecht, Ed. Jorge P. Castelo. Rio Grande: Ecoscientia ,1998. 18-21.

GEYER, W. R. The importance of suppression of turbulence by stratification on the estuarine turbidity maximum. *Estuaries*, v.16, n.1, p. 113-125. mar.1993.

- GUPTA, H.; CHAKRAPANI, G. Temporal and spatial variations in water flow and sediment load in Narmada river basin, India: natural and man-made factors. *Environmental Geology*. v. 48, n.4, p. 579-589, aug. 2005.
- HAAR, A. Zur Theorie der orthogonalen Funktionensysteme. *Mathematical Annals*, v.69, n.3, p.331-371. 1910.
- HARTMANN, C. *Dinâmica, distribuição e composição do material em suspensão na região sul da Lagoa dos Patos, RS*. 1996. 363f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.
- HERZ, R. *Circulação das águas de superfície da Lagoa dos Patos*. 1977. 455f. Tese (Doutorado em Oceanografia) - Universidade de São Paulo, Brasil, 1977.
- HOROWITZ, A. J. An evaluation of sediment rating curves for estimating suspended sediment concentrations for subsequent flux calculations. *Hydrological Processes*, v.17, n.17, p. 3387-3409, dez. 2003.
- HOWARTH, R. W.; FRUCI, J. R.; SHERMAN, D. Inputs of sediment and carbon to an estuarine ecosystem: Influence of land use. *Ecological applications*, v.1 , n.1, p. 27-39, feb. 1991.
- KIRCHHOF, P. A. *A contribuição de sedimentos terrígenos dos rios Jacuí e Guaíba para o Sistema Lagunar (Lagoa Dos Patos) do RS*. 2015. 50f. Monografia (Trabalho de conclusão do curso de Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- MARQUES, W.C. *Padrões de variabilidade temporal nas forçantes da circulação e seus feitos na dinâmica da Lagoa dos Patos, Rio Grande do Sul, Brasil*. 2005. 87f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física, Química e Geológica) - Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2005.

- MARQUES, W. C.; MÖLLER Jr. O. O. Variabilidade temporal em longo período da descarga fluvial e níveis de água da Lagoa dos Patos, Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 13, 155 -163, 2009.
- MÖLLER Jr., O. O.; CASTAING, P.; SALOMOM JC.; 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. abr. 2001.
- MÖLLER Jr., O. O.; LORENZZETTI, J. A.; STECH, J. L.; MATA, M. M. The Patos Lagoon summertime circulation and dynamics. *Continental Shelf Research*, v. 3, n. 16, p. 335-351, mar. 1996.
- MÖLLER Jr., O. O. *Hydrodynamique de la Lagune dos Patos (30 RS, Brésil). Mesures et modélisation*. 1996. 204f. Tese (Doutorado em Oceanografia). University of Bordeaux I, France, 1996.
- MUDELSEE, M. Estimating Pearson's correlation coefficient with bootstrap confidence interval from serially dependent time series. *Mathematical Geology*, v.35, n.6, p.651-665, aug. 2003.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. d. A. Hidrologia Estatística. Serviço Geológico do Brasil - CPRM. Belo Horizonte. 2007.
- OLIVEIRA, H. A. Estudo do comportamento hidrodinâmico da Lagoa Mirim e dos processos de troca com a Lagoa dos Patos via Canal de São Gonçalo. 2012. 98p. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física, Química e Geológica) - Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2012.
- OLIVEIRA, H. A.; FERNANDES, E. H. L., MÖLLER Jr., O. O.; COLLARES, G. L. Processos hidrológicos da Lagoa Mirim. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.20, n.1, p.34-45, jan./mar. 2015.
- PMSB - Plano Municipal de Saneamento Básico do Município de Morro Redondo - RS. Prefeitura Municipal de Morro Redondo – Núcleo de Ensino Pesquisa

e Extensão em Saneamento Ambiental da Universidade Federal de Pelotas, 2016.

POSTMA, H. Sediment transport and sedimentation in the estuarine environment. In: LAUFF, G. H. (Ed.). *Estuaries*. Washington, D.C: American Assoc. for the Advancement of Science, 1967. p. 158-179.

RODGERS, J. L.; NICEWANDER, W. A. Thirteen ways to look at the correlation coefficient. *The American Statistician*, v. 42, n.1, p. 59-66. 1988.

SANTOS, C. A. G.; FREIRE, P. K. M. M.; TORRENCE, C. A transformada wavelet e sua aplicação na análise de séries hidrológicas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, n. 3, p. 271-280, jul./set. 2013.

SILVA, J. L. B. d. *Identificação do sistema de paleodrenagem na margem continental sul brasileira adjacente à Lagoa Mirim no terciário superior por sísmica de reflexão*. 2009. 239f. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

STECH, J. L.; LORENZZETTI, J. A. The response of the south Brazil bight to the passage of wintertime cold fronts. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v.97, n.C6, p.9507-9520, jun. 1992.

TOLDO Jr., E. E. Morfodinâmica da Laguna dos Patos, Rio Grande do Sul. *Pesquisas*, v. 18, n.1, p. 58-63. 1991.

TOLDO Jr., E. E. *Sedimentação, Predição do Padrão de Ondas, e Dinâmica Sedimentar da Antepraia e Zona de Surfe do Sistema Lagunar*. 1994. 183f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

TOLDO Jr., E. E.; DILLENBURG, S.; CORREA, I.; ALMEIDA, L. Holocene sedimentation in Lagoa dos Patos Lagoon, Rio Grande do Sul, *Brazil*. *Journal of Coastal Research*, v.16, n.3, p. 816–822, 2000.

- TOLDO Jr., E. E.; DILLENBURG, S.; CORREA, I.; ALMEIDA, L.; WESCHENFELDER, J.; GRUBER, N. Sedimentação de longo e curto período na Lagoa dos Patos, Sul do Brasil. *Pesquisas em Geociências*, v.33, n.2, p. 79-86, 2006.
- TORRENCE, C.; COMPO, G. P. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 79, n.1, p.61-78, 1998.
- VAZ, A. *Efeito da descarga de água doce em processos ocorrentes no estuário da Lagoa dos Patos*. 2003. 68f. Monografia (Trabalho de conclusão do curso de Oceanologia) – Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2003.
- VAZ, A. C.; MÖLLER Jr., O. O.; ALMEIDA, T. L. d. Análise quantitativa da descarga dos rios afluentes da Lagoa dos Patos. *Atlântida*, v.28, n.1, p. 13-23. 2006
- VIEIRA, E. F.; RANGEL, S. R. S. Rio Grande do Sul: geográfica física e vegetação. Sagra Publicações, Porto Alegre. 1984.
- VIEIRA, E. F.; RANGEL, S. R. S. Planície costeira do Rio Grande do Sul: geográfica física, vegetação e dinâmica sócio- demográfica. Sagra publicações, Porto Alegre.1988.
- VIEIRA, H. *Aspectos sedimentológico do Canal de São Gonçalo*. 1982. 132f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1982.
- VILLWOCK, J.; MARTINS, L. Depósitos lamíticos de pós-praia, Cassino, RS. *Pesquisas*, v.1, p.69-85. 1972.
- ZHANG, J.; HUANG, W. W.; SHI, M. C. Huanghe (yellow river) and its estuary: sediment origin, transport and deposition. *Journal of Hydrology*, v.120, n.1-4, 203-223, dec. 1990.