



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Victor Eduardo Cury Silva

**ANÁLISE HIDRODINÂMICA E BIOGEOQUÍMICA DE UMA LAGUNA COSTEIRA  
SUBTROPICAL EM BACIA HIDROGRÁFICA URBANIZADA: LAGOA DA  
CONCEIÇÃO, FLORIANÓPOLIS, SANTA CATARINA**

Florianópolis SC  
2021

Victor Eduardo Cury Silva

**ANÁLISE HIDRODINÂMICA E BIOGEOQUÍMICA DE UMA LAGUNA COSTEIRA  
SUBTROPICAL EM BACIA HIDROGRÁFICA URBANIZADA: LAGOA DA  
CONCEIÇÃO, FLORIANÓPOLIS, SANTA CATARINA**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Ambiental.

Orientador: Professor Davide Franco, Dr.

Coorientadora: Professora Alessandra Larissa D'Oliveira Fonseca, Dra.

Florianópolis  
2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Silva, Victor Eduardo Cury  
ANÁLISE HIDRODINÂMICA E BIOGEOQUÍMICA DE UMA LAGUNA  
COSTEIRA SUBTROPICAL EM BACIA HIDROGRÁFICA URBANIZADA:  
LAGOA DA CONCEIÇÃO, FLORIANÓPOLIS, SANTA CATARINA / Victor  
Eduardo Cury Silva ; orientador, Davide Franco,  
coorientador, Alessandra Larissa D'Oliveira Fonseca,  
coorientador, Rodrigo Barletta, 2021.  
159 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Ambiental. 2. Hidrodinâmica estuarina. 3.  
Biogeoquímica. 4. Modelagem numérica de qualidade da água.  
5. Saneamento. I. Franco, Davide . II. Fonseca, Alessandra  
Larissa D'Oliveira . III. Barletta, Rodrigo IV.  
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós  
Graduação em Engenharia Ambiental. V. Título.

Victor Eduardo Cury Silva

**ANÁLISE HIDRODINÂMICA E BIOGEOQUÍMICA DE UMA LAGUNA COSTEIRA  
SUBTROPICAL EM BACIA HIDROGRÁFICA URBANIZADA: LAGOA DA  
CONCEIÇÃO, FLORIANÓPOLIS, SANTA CATARINA**

O presente trabalho em nível de doutorado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta dos seguintes membros:

---

Professora Alexandra Rodrigues Finotti, Dra.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Professor Leonardo Hoinaski, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Professora Elisa Helena Fernandes, Dra.  
Universidade Federal do Rio Grande

---

Professor Leonardo Hoinaski, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Coordenadora do PPGEA

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de doutor em Engenharia Ambiental.

---

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

---

Professor Dr. Davide Franco, Dr.  
Orientador

Florianópolis, 12 de novembro de 2021.

Este trabalho é dedicado a todos aqueles que se esforçam todos os dias para construir um mundo melhor para todos.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus pela vida, pelo tempo e pela saúde que sempre me foi dado durante essa pesquisa. Gostaria de agradecer à minha família, ao meu pai Wagner, à minha mãe Deise e aos meus irmãos Wagner e Vinicius por todo apoio incondicional. Também ao meu avô Salim que da sua varanda em Piraju nos passava o seu sentimento pela natureza e pela vida. Ao meu avô Omar (*in memoriam*), e às minhas avós, Rute (*in memoriam*) e Palmira (*in memoriam*), que puderam acompanhar em partes e me apoiaram na realização deste trabalho, além de me ensinarem muito sobre a vida. A vocês, eu dedico este trabalho. Também quero agradecer minha companheira Laura e ao meu filho Miguel que me motivaram muito a superar todas as dificuldades que apareceram. Às minhas sobrinhas Flora e Alice e à minha cunhada Carol. Ao meu sogro Hermes e minha sogra Meire e meu cunhado Tulio e sobrinho Davi. Vocês que me acompanharam nos bastidores, nesta desafiante jornada de doutorado e que compartilharam de momentos difíceis de escolhas difíceis que um trabalho exigente como este impôs e pela alegria das conquistas deste processo. A vocês, eu dedico este trabalho. Muito obrigado!

Agradeço também a todos os meus professores e professoras, que são muitos e muitas, mas, em especial, ao meu orientador Davide Franco que me deu a oportunidade de me iniciar na pesquisa e de participar do grupo do LaHiMar, local onde as perguntas de pesquisa movem as pessoas a buscarem sempre um aprimoramento. Agradeço por todos os problemas que me deram para resolver, desde os técnicos aos pessoais, todos me ajudaram a desenvolver o conhecimento e a experiência que buscava na pesquisa científica. Davide, a você também dedico este trabalho, pois sua exigência e o rigor com que encara a pesquisa foram fundamentais para que eu chegasse até aqui!

Registro, ainda, gratidão à minha coorientadora, professora Alessandra Fonseca, que me deu suporte e me instruiu em muitos aspectos da biogeoquímica experimental e conceitual para que eu chegasse a uma compreensão dos processos biogeoquímicos da relevância social desta pesquisa. Muito obrigado. Gostaria de agradecer ainda ao meu coorientador Rodrigo Barletta pelo exemplo de profissionalismo e pelo apoio de quem já fez um doutorado e sabe como é desafiador.

Agradeço ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, ao Departamento de Ecologia e ao Departamento de Oceanografia da Universidade Federal de Santa Catarina, estruturas e laboratórios sem a qual não seria possível realizar esta pesquisa. Ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) pela bolsa

que a mim foi confiada por quatro anos deste trabalho dedicado à minha formação profissional e à geração de novos dados e resultados de interesse científico e social de nosso momento histórico.

Agradeço aos colegas de estudo, pesquisa e trabalho do LaHiMar que fizeram e fazem parte da minha trajetória na pós-graduação e na vida profissional, por todas as coletas, trabalhos noturnos, dúvidas, inquietações e discussões que me fizeram crescer nesse período. Agradeço também aos muitos pesquisadores, cientistas, que preocupados com os desastres ambientais de nosso tempo, estudaram a Lagoa da Conceição e muitas outras lagunas pelo mundo e registraram diversos resultados em seus artigos sobre esses belos e complexos ecossistemas que estão sofrendo com a urbanização desordenada das cidades.

Agradeço às instituições parceiras ao projeto, EPAGRI-CIRAM, IBGE, SMDU e a Universidade de Delft-Holanda que disponibilizou o modelo numérico que é utilizado de forma gratuita por cientistas e engenheiros para aprimorar pesquisa e gestão em todo mundo.

Muito obrigado!

“Uma mente que se abre a uma nova ideia jamais volta ao seu tamanho original.”  
A. Einsten

## RESUMO

O modelo numérico Delft-3D foi utilizado nos estudos da distribuição e variabilidade de propriedades de qualidade da água e da circulação tridimensional do sistema estuarino da Lagoa da Conceição – SC. Os resultados do modelo foram validados quantitativamente, usando dados experimentais de nível e corrente da laguna amostrados por um marégrafo e um perfilador de corrente (ADCP) e dados de qualidade da água levantados em campo e extraídos da literatura para os anos de 2001 e 2015. Foi construído um modelo de regionalização de vazões e descargas de nutrientes de fonte natural e antrópica para todas as sub-bacias que drenam para a LdC. Foram identificadas quatro unidades de resposta hidrológicas distintas na bacia da LdC, com características distintas de produção de vazão e em sua dinâmica de resposta a eventos de chuva. O modelo de regionalização de vazões foi validado com dados experimentais em três bacias de controle com valores do índice de Nashutcliffe médio de 0,80. A contribuição fluvial total que drena para a LdC foi estimada em 1,63 m<sup>3</sup>/s. Destas, 63% é produzida pelas bacias rochosas (UrH Maciços), 22% da vazão entra pelas bacias do Norte (UrH Norte) e 15% entra pelas bacias da vertente oceânica (UrH Dunas e Planície Costeira). O modelo hidrodinâmico foi calibrado e validado e obteve RMSE de 0,0085, R<sup>2</sup> de 0,81 para os níveis. As correntes também apresentaram boa aproximação em amplitude de intensidades, direção e sentido das correntes. O campo de velocidades mostrou que a LdC é um corpo de água heterogêneo, com campo rotacional e divergente que variam de acordo com a região do fluxo de escoamento. As características morfológicas e as entradas fluviais criam regiões de fluxo preferencial, vórtices e recirculações. O índice de Richardson mostrou resultados que validam a região de estratificação no setor Central juntamente com uma célula de recirculação de alta pressão na mesma região. Esse mesmo conjunto de condições acontece em uma área do setor Centro-Norte. O fluxo residual na laguna é sentido laguna-oceano, assim sendo, a maior contribuição para energia das oscilações de nível e corrente é oceânico – 92,4% da variância do sinal do nível, sendo que todas os outros estressores juntos (vento, precipitação e entradas fluviais) correspondem a menor parte, 7,6% da variância. As velocidades médias no corpo lagunar são da ordem de 1,4 a 4,2 cm/s, chegando a máximas de 43 cm/s na região Central. No canal, a velocidade média foi de 21cm/s com máxima de 191cm/s. Os tempos de residência foram estimados pelo método do traçador lagrangiano, sendo que para o setor Norte foi de 210 dias, Centro-Norte foi de 180 dias, Central foi de 150 e Sul foi de 270 dias. Contudo, o tempo total de renovação de 95% de toda LdC chegou a 360 dias. Os setores de maior conectividade hidrodinâmica com os demais foram o Central e Centro-Norte. O modelo LOICZ apresentou valores de tempo de residência inferiores aos do modelo proposto (160 dias), indicando, assim, uma possível estimativa maior do fluxo difusivo na formulação do modelo LOICZ. Foi identificado que o crescimento populacional na BH é heterogêneo e segue a dinâmica de curva logística que foi melhor calibrada para cada distrito separadamente. Por meio dos índices construtivos do Plano Diretor Municipal, foi estimada uma população máxima de 71.792 habitantes, sendo que os distritos Lagoa da Conceição e Barra da Lagoa tiveram o pico de crescimento em 2005 e 1986, respectivamente, e já estão próximos do estado de ocupação máxima. Entretanto, o Distrito do Rio Vermelho ainda tende a mais do que duplicar a população até 2040, concentrando 39 dos 69 mil habitantes estimados para essa data. Os dados experimentais de nutrientes na nascente e foz dos quatro rios monitorados mostraram que de 69 a 96% da descarga de NID das bacias urbanizadas são de fonte antrópica, sendo que, para o PID, esse número é de 87 a 97%. Através da análise de componentes principais, as variáveis mais importantes para descrever as variações espaciais e temporais para os dados de qualidade da água da laguna de 2001 a 2017 foram Oxigênio Dissolvido, nitrogênio e clorofila. Os efeitos de alta concentração de nutrientes nas proximidades dos rios e nas extremidades Norte e Sul da laguna se intensificam de 2001 a 2017, como observado nos dados experimentais. O modelo de qualidade de água se ajustou bem aos dados experimentais de 2001 e 2015, estima-se que para 2040 ocorrerá um crescimento muito acentuado nas concentrações de amônio, nitrato e fosfato em toda laguna, mas com maior impacto nos setores Sul e Norte. Em suma, a LdC se apresentou

como um ambiente aquático muito sensível às mudanças de uso e de ocupação da BH e se mostra em processo de eutrofização acelerada, sobretudo nas regiões de maior influência antrópica e de menor influência da diluição oceânica (extremo Norte e Sul da laguna). É importante frisar que, caso sejam feitas mudanças no plano diretor para aumento da população-limite, os efeitos deletérios da eutrofização podem se agravar ainda mais. Entretanto, o contrário também é válido, caso as condições de saneamento da BH sejam melhoradas, as descargas antrópicas de nutrientes podem reduzir, melhorando, assim, a qualidade de água da laguna. Portanto, se faz necessário estabelecer estratégias de saneamento mais eficazes que podem ser orientadas por uma legislação local mais restritiva para o lançamento de efluentes tratados na LdC, em especial para os parâmetros de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo.

**Palavras-chave:** Modelagem numérica. Modelagem de qualidade da água. Urbanização. Lagunas costeiras. Descargas de nutrientes. Dispersão de poluentes. Laguna Costeira.

## ABSTRACT

The Delft-3D numerical model was used to study the distribution and variability of water quality properties, and the three-dimensional circulation of the Lagoa da Conceição – SC estuarine system. The model results were validated quantitatively using experimental data of level and current of the lagoon sampled by a tide gauge and a current profiler (ADCP) and water quality data collected in the field and extracted from the literature for the years 2001 and 2015. A regionalization flows model was built and the nutrients inputs from natural and anthropic sources was estimated for all sub-basins that drain into the LdC. Four distinct hydrological response units were identified in the LdC basin, with distinct characteristics of flow production and in their dynamic response to rainfall events. The flow regionalization model was validated with experimental data in three control basins with mean Nashutcliffe index values of 0.80. The total fluvial contribution that drains to the LdC was estimated at 1.63 m<sup>3</sup>/s. Of these, 63% is produced by the rocky basins (UrH Massifs), 22% of the flow enters the northern basins (UrH Norte) and 15% enters the basins of the oceanic slope (UrH Dunas and Coastal Plain). The hydrodynamic model was calibrated and validated and obtained RMSE of 0.0085, R<sup>2</sup> of 0.81 for the levels. The currents also presented good approximation in amplitude of intensities, direction and direction of the currents. The velocity field showed that the LdC is a heterogeneous body of water, with a rotational and divergent field that varies according to the region of the flow. The morphological features and river entrances create regions of preferential flow, vortices and recirculations. The Richardson index showed results that validate the stratification region in the Central sector together with a high pressure recirculation cell in the table region. This same set of conditions occurs in an area of the center north sector. The residual flow in the lagoon is in the lagoon-ocean direction, so the largest contribution to the energy of the level and current oscillations is oceanic - 92.4% of the level signal variance, with all the other stressors together (wind, precipitation and inflows). rivers) correspond to the smallest part, 7.6% of the variance. The average velocities in the lagoon body are of the order of 1.4 to 4.2 cm/s, reaching maximums of 43 cm/s in the Central region. In the channel, the average speed was 21cm/s with a maximum of 191cm/s. The residence times were estimated using the Lagrangian tracer method, with 210 days for the North sector, 180 days for the North Center, 150 for the Central and 270 days for the South. However, the total renewal time of 95% of the entire LdC reached 360 days. The sectors with greater hydrodynamic connectivity with the others were the Central and Central North. The LOICZ model presented lower residence time values than the proposed model (160 days), thus indicating a possible higher estimate of the diffusive flow in the formulation of the LOICZ model. It was identified that the population growth in BH is heterogeneous and follows the dynamics of the logistic curve that was better calibrated for each district separately. Through the constructive indexes of the Municipal Master Plan, a maximum population of 71,792 inhabitants was estimated, and the districts Lagoa da Conceição, Barra da Lagoa had the peak of growth in 2005 and 1986 respectively and are already close to the state of maximum occupation, however the District of Rio Vermelho still tends to more than double its population by 2040, concentrating 39 of the 69 thousand inhabitants estimated for that date. Experimental data on nutrients at the source and mouth of the four monitored rivers showed that 69 to 96% of NID discharge from urbanized basins is from anthropic sources, and for the PID this number is from 87 to 97%. Through principal component analysis, the most important variables to describe the spatial and temporal variations for the lagoon water quality data from 2001 to 2017 were Dissolved Oxygen, Nitrogen and Chlorophyll. The effects of high concentration of nutrients in the vicinity of the rivers and in the north and south ends of the lagoon intensified from 2001 to 2017 as observed in the experimental data. The water quality model fitted well to the experimental data from 2001 and 2015 and estimated that by 2040 there will be a very sharp increase in ammonium, nitrate and phosphate concentrations throughout the lagoon, but with greater impact in the South and North sectors. In short, the LdC presented itself as an aquatic environment that is very sensitive to changes in use and occupation of the BH and shows itself in a process of accelerated eutrophication, especially in regions

of greater anthropic influence and less influence of oceanic dilution (north and south end of the lagoon) . It is important to emphasize that if changes are made to the master plan to increase the limit population, the deleterious effects of eutrophication may worsen even more. However, the opposite is also valid, if the sanitation conditions of the BH are improved, the anthropic discharges of nutrients can reduce, thus improving the water quality of the lagoon. Therefore, more effective sanitation strategies are needed that can be guided by more restrictive local legislation for the release of treated effluents into the LdC, especially for the parameters of organic matter, nitrogen and phosphorus.

**Keywords:** Numerical modelling. Water quality modeling. Urbanization. Coastal lagoons. Nutrient discharges. Dispersion of pollutants. Coastal Lagoon.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Área de estudo: a) Topobatimetria da Lagoa da Conceição com destaque para as entradas fluviais e os setores; b) Topobatimetria do Canal da Barra da Lagoa.....	31
Figura 2 – Precipitação normal climatológica do INMET para reigião de Florianópolis .....	32
Figura 3 – Uso e ocupação da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição em 2010 a partir de uma imagem IKONOS com 1 m de resolução .....	33
Figura 4 – Fluxograma metodológico do Capítulo 1.....	34
Figura 5 – Fluxograma de cálculo da vazão diária específica para cada SBH.....	39
Figura 6 – Fluxograma metodológico da análise hidrodinâmica .....	40
Figura 7 – Grade numérica utilizada para modelagem da Lagoa da Conceição .....	42
Figura 8 – Definição das 60 entradas fluviais e da fronteira aberta com o Oceano .....	43
Figura 9 – Disponibilidade temporal de dados medidos para calibração e validação do modelo hidrodinâmico.....	44
Figura 10 – Batimetria e pontos de fundeio do ADCP – Lagoa da Conceição.....	46
Figura 11 – Fluxograma de análise do modelo de partículas conservativas para encontrar o tempo de residência de cada setor da laguna.....	49
Figura 12 – Fluxograma metodológico da estimativa de aporte de nutrientes.....	50
Figura 13 – Oito setores hidrodinâmicos da laguna .....	55
Figura 14 – Mapa da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição com os pontos de amostragem nos rios monitorados.....	57
Figura 15 – Modelo conceitual de balanço de massa LOICZ-2D para a Lagoa da Conceição	59
Figura 16 – Fluxograma metodológico da avaliação da qualidade da água.....	60
Figura 17 – a) Topo Batimetria da Bacia hidrográfica da LdC com as linhas drenagem obtidas por geoprocessamento; b) Mapa da matriz geológica da bacia hidrográfica da LdC.....	63
Figura 18 – a) Mapa de tipo de solo da Bacia hidrográfica da LdC; b) Mapa de uso e ocupação do solo da Bacia Hidrográfica da LdC de 2010.....	64
Figura 19 – Diagrama biplot da primeira e segunda componente da PCA para os descritores de terreno da Bacia Hidrográfica da LdC.....	65
Figura 20 – Dendograma do agrupamento das Sub-Bacias Hidrográficas da Lagoa da Conceição pelos parâmetros geomorfológicos .....	67
Figura 21 – Vazão dos rios nas SBH de controle da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição de março de 2015 a novembro de 2018 e no eixo secundário a precipitação acumulada diária em Florianópolis (INMET).....	69
Figura 22 – Vazões de referência regionalizadas para as Sub-Bacias Hidrográficas que drenam para a Lagoa da Conceição .....	71
Figura 23 – Comparação dos dados medidos e estimados para as bacias hidrográficas de controle .....	74
Figura 24 – Vazão fluvial total modelada para laguna.....	75

Figura 25 – Correlação cruzada entre a série de nível do mar de Imbituba e da Baía Sul em escala diária .....	77
Figura 26 – Série de nível do mar observado e suas componentes de maré astronômica, meteorológica e residual; a) Praia da Armação; b) Baía Sul.....	78
Figura 27 – Séries meteorológicas observadas na Baía e na Armação e correlação cruzada entre elas.....	79
Figura 28 – Dados de nível do mar obtidos em Imbituba e estimados para a Armação .....	79
Figura 29 – Rosa dos Ventos dos dados obtidos pela Estação INMET 1501 e do modelo de reanálise de vento Copernicus My Ocean para o período .....	80
Figura 30 – Precipitação diária e acumulada em cinco dias para estação INMET – Florianópolis .....	81
Figura 31 – BoxPlot mensal da precipitação observada na estação INMET 1501 pelo período de 01/2001 a 12/2020 .....	82
Figura 32 – Histograma de frequência bivariado para os cenários meteo-oceanograficos de 2001 a 2020 – precipitação e níveis médios.....	82
Figura 33 – Cenário meteo-oceanográfico da Lagoa da Conceição para o período de calibração .....	83
Figura 34 – Resultado das simulações para análise dos parâmetros de calibração e os erros associados.....	84
Figura 35 – <i>Scatter plot</i> dos níveis modelados e observados no período de calibração (set/2013 a mar/2014.....	85
Figura 36 – Níveis modelados e observados para o período de validação do modelo.....	86
Figura 37 – <i>Scatter plot</i> do nível médio diário observado e modelado para o período de validação.....	86
Figura 38 – Componentes U e V do modelo na célula de cálculo em que foi fundeado o ADCP .....	87
Figura 39 – Componentes U e V da corrente registrada pelo ADCP no período de fundeio... 87	87
Figura 40 – Dados de nível, precipitação e vazão impostos ao modelo para cenário de análise dos padrões hidrodinâmicos – ano de 2015.....	88
Figura 41 – a) Intensidade média do campo vetorial de correntes (m/s); b) Desvio-padrão médio do campo vetorial de correntes (m/s) .....	90
Figura 42 – Fluxo de Quantidade de movimento (os valores estão em escala Log10).....	92
Figura 43 – Campo vetorial médio no interior da laguna – as regiões marcadas em vermelho indicam giros anticiclones de alta pressão, e as regiões marcadas em laranja indicam giros ciclônicos de baixa pressão.....	93
Figura 44 – Divergente do campo vetorial de correntes na Lagoa da Conceição (365 dias de simulação).....	95
Figura 45 – Rotacional do campo vetorial de correntes na Lagoa da Conceição (365 dias de simulação).....	96
Figura 46 – Salinidade média na superfície e no fundo simulada para LdC.....	96

Figura 47 – Índice de Richardson do campo vetorial de correntes na Lagoa da Conceição (365 dias de simulação) .....	97
Figura 48 – Simulação do tempo de residência do setor Norte da LdC: a) Mapa em t=0 e t=90d; b) Somatório de partículas acumuladas ao longo do tempo .....	98
Figura 49 – Simulação do tempo de residência do setor Centro-Norte da LdC: a) Mapa em t=0 e t=90d; b) Somatório de partículas acumuladas ao longo do tempo.....	99
Figura 50 – Concentração de partículas ao longo da simulação de tempo de residência do setor Central da laguna .....	100
Figura 51 – Concentração de partículas ao longo da simulação de tempo de residência do setor Sul da laguna .....	101
Figura 52 – Mapa dos Distritos Administrativos e da mancha urbana da bacia hidrográfica da LdC em: a) 2001; b) 2010; c) 2018 e entornos.....	105
Figura 53 – a) Macroáreas definidas pelo planejamento urbano do Plano Diretor de Florianópolis: Lei Municipal 482, de 2014; b) Macroáreas com as áreas já ocupadas por mancha urbana de 2018 .....	106
Figura 54 – Projeção populacional logística ajustada aos dados populacionais do: a) Distrito de São João do Rio Vermelho; b) Projeção populacional logística ajustada aos dados populacionais do Distrito da Lagoa da Conceição.....	107
Figura 55 – Projeção populacional logística ajustada aos dados populacionais do: a) Distrito da Barra da Lagoa; b) Distritos e da soma dos distritos da BH da LdC.....	108
Figura 56 – a) Erro associado à estimativa dos parâmetros de r e $t_m$ para os modelos ajustados aos dados censitários do IBGE (para erro < 5%); b) Curva da evolução do aumento populacional e erros estimados através do algoritmo de Monte Carlo para o desvio-padrão dos dados censitários do IBGE.....	109
Figura 57 – Concentração de N-NH <sub>4</sub> em mg/l encontrado na foz dos rios .....	111
Figura 58 – Concentrações de N-NO na foz dos rios .....	112
Figura 59 – Concentração de Nitrogênio Inorgânico Dissolvido (NID) na foz dos rios.....	112
Figura 60 – Concentração de Nitrogênio Inorgânico Dissolvido (NID) na nascente dos rios	113
Figura 61 – Concentração de PID na foz dos rios .....	113
Figura 62 – Concentração de Fósforo Inorgânico Dissolvido (PID) na nascente dos rios.....	114
Figura 63 – Descargas de N-NH nos rios .....	114
Figura 64 – Descarga de N-NO dos rios na laguna .....	115
Figura 65 – Descargas fluviais de Fósforo Inorgânico Dissolvido .....	115
Figura 66 – <i>Scatter plot</i> da clorofila pelo NID .....	117
Figura 67 – <i>Scatter plot</i> do PID pelo SiOH.....	117
Figura 68 – <i>Scatter plot</i> da relação entre PID e clorofila .....	118
Figura 69 – a) Estimativa das descargas de NID na linha de costa da LdC; b) Estimativa das descargas de PID na linha de costa da LdC.....	121

Figura 70 – a) Evolução da importância das descargas fluviais de NID para os quatro setores da laguna; b) Evolução da importância das descargas fluviais de PID para os quatro setores da laguna .....	122
Figura 71 – Agrupamento pelo índice de estratificação para os setores hidrodinâmicos da Lagoa da Conceição utilizando o método de ligação completa e distância euclidiana .....	122
Figura 72 – Evolução da estratificação da coluna d'água no setor C2 da laguna ao longo do período avaliado .....	123
Figura 73 – Evolução temporal dos valores do TRIX para a Lagoa da Conceição para o período monitorado.....	124
Figura 74 – Diagrama de Biplot tridimensional para PCA dos parâmetros físico-químicos de qualidade da água da Lagoa da Conceição de 2001 a 2017 .....	125
Figura 75 – Cargas específicas de NID por m <sup>2</sup> da laguna ao longo do tempo pelos setores da laguna utilizados na modelagem LOICZ.....	128
Figura 76 – Cargas específicas de PID por m <sup>2</sup> da laguna ao longo do tempo pelos setores da laguna utilizados na modelagem LOICZ.....	128
Figura 77 – Concentração média de nutrientes em cada setor da laguna ao longo do tempo em 2015 .....	136
Figura 78 – Concentrações médias de Amônio e Nitrato encontradas pelo modelo em 2015.....	138
Figura 79 – Concentrações do íon fosfato encontrados pelo modelo em 2015.....	139
Figura 80 – a) Concentração média de NID modelada em cada setor da laguna ao longo do tempo em 2001; b) Concentração de NID e PID encontrada experimentalmente em cada setor em 2001 .....	140
Figura 81 – Concentrações médias de Amônio e Nitrato encontradas pelo modelo em 2001.....	141
Figura 82 – Concentrações médias de Íons Fosfato encontradas pelo modelo em 2001 .....	142
Figura 83 – Concentração média de nutrientes em cada setor da laguna ao longo do tempo em 2040 .....	143
Figura 84 – Concentrações médias de Amônio e Nitrato encontradas pelo modelo em 2040.....	143
Figura 85 – Concentrações médias de Íons Fosfato encontradas pelo modelo em 2040 .....	144

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados da Bacia Hidrográfica em Sistemas de Informação Geográfica.....	35
Tabela 2 – Descritores de terreno observados em dados SIG .....	36
Tabela 3 – Resumo da base de dados utilizados para modelagem das fronteiras para entrada no modelo Delft-3D.....	44
Tabela 4 – Localização e período de operação do ADCP na Lagoa da Conceição.....	45
Tabela 5 – Erros utilizados para o cálculo da acurácia do modelo.....	46
Tabela 6 – Cenários de simulação hidrodinâmica da lagoa para calibração, validação e para caracterização hidrodinâmica .....	47
Tabela 7 – Referência dos dados secundários utilizados para a análise histórica de qualidade da água da Lagoa da Conceição .....	53
Tabela 8 – Distribuição dos números de amostras utilizados para análise de tendência espacial e temporal da Lagoa da Conceição para cada região: Norte, Centro-Norte, Central e Sul .....	54
Tabela 9 – Condições de contorno de qualidade da água na fronteira oceânica do modelo ....	62
Tabela 10 – Variância explicada para os fatores da PCA para os descritores de terreno – componentes até autovalor de 1,0 .....	65
Tabela 11 – Importância das variáveis nos fatores da PCA .....	66
Tabela 12 – Características fisiográficas e morfológicas das Bacias Hidrográficas agrupadas por UrHs .....	68
Tabela 13 – Descrição hidrológica das sub-bacias monitoradas .....	69
Tabela 14 – Vazões estimadas e descritores explicativos para as Unidades de Resposta Hidrológica da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição .....	72
Tabela 15 – Erros associado à estimativa da vazão para as bacias hidrográficas de controle..	74
Tabela 16 – Erros associados aos níveis modelados e o nível observado no período de calibração – escolha do valor de Manning no Canal da Barra.....	84
Tabela 17 – A matriz de variância obtida para as componentes de nível astronômica e meteorológica – para laguna e mar adjacente.....	89
Tabela 18 – Velocidades média, máxima e desvio-padrão médio dos setores da laguna .....	91
Tabela 19 – Tempo de Residência (TR) dos setores, da laguna e conectividade entre os setores .....	102
Tabela 20 – Enquadramento da Lagoa da Conceição em comparação com outras lagunas costeiras do Sul do Brasil .....	103
Tabela 21 – Dados populacionais para os distritos que compõem a bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição.....	105
Tabela 22 – Parâmetros de ajuste da projeção logística para os distritos da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição.....	107
Tabela 23 – Síntese dos resultados obtidos pela projeção logística para os três distritos que compõem a Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição.....	110
Tabela 24 – Características populacionais das sub-bacias monitoradas.....	110

Tabela 25 – Matriz de correlação não paramétrica de Spearman.....	116
Tabela 26 – Descargas naturais e antrópicas específicas de Nitrogênio Inorgânico Dissolvido para os rios monitorados.....	119
Tabela 27 – Descargas naturais e antrópicas específicas de Fósforo Inorgânico Dissolvido para os rios monitorados.....	120
Tabela 28 – Descargas de NID e PID da Bacia Hidrográfica e trocas entre os setores da laguna para os dois períodos identificados pela ANOVA.....	127
Tabela 29 – Eficiência na remoção/ciclagem de nutrientes por compartimento.....	129
Tabela 30 – Produção primária da Lagoa da Conceição .....	131
Tabela 31 – Metabolismo líquido e características geográficas de outras lagunas na costa brasileira em comparação com a Lagoa da Conceição.....	133
Tabela 32 – Parâmetros de calibração para os processos utilizados no Delft Waq.....	136

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ADCP – Perfilador Acústico de efeito Doppler
- BH – Bacia Hidrográfica
- CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
- CH<sub>4</sub> – Metano
- Chl-a – Clorofila-a
- CO – Monóxido de carbono
- CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono
- CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
- DELFT-3D – Modelo numérico que acopla processos hidrodinâmicos com qualidade da água
- ENS – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental
- et al.* – *Et alii* (e outros, e colaboradores)
- etc.* – *Et cetera* (e outras coisas, e assim por diante)
- ETE – Estação de Tratamento de Esgoto
- FPGA – Arranjo de Portas Reprogramáveis (*Field Programmable Gate Array*)
- H<sub>2</sub>S – Sulfeto de Hidrogênio
- Hz – Hertz
- In situ* – No lugar, no local
- LAHIMAR – Laboratório de Hidráulica Marítima e Ecossistemas Marinhos Costeiros
- LOICZ – Land-Ocean Interaction in the Coastal Zone
- MSE – Erro Quadrático Médio
- NH<sub>3</sub> – Amônia
- NID – Nitrogênio Inorgânico Dissolvido
- PCA – Análises de Componentes Principais (*Principal Component Analyses*)
- PDF – Função densidade de probabilidade
- PID – Fósforo Inorgânico Dissolvido
- ppp – partes por bilhão
- PPGEA – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental
- ppm – partes por milhão
- R – Coeficiente de determinação ajustado
- RMSE – Raiz Quadrada dos Erros Quadráticos Médios (*Root Mean Square Error*)
- SBH – Sub-Bacia Hidrográfica
- UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina
- UrH – Unidade de Resposta Hidrológica

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>23</b>
1.1 HIPÓTESES.....	25
1.2 OBJETIVOS.....	25
1.2.1 Objetivo Geral .....	25
1.2.2 Objetivos Específicos .....	25
1.3 ESTADO DA ARTE.....	26
1.4 ESTRUTURA DA TESE.....	28
<b>2 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>30</b>
2.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	30
2.1.1 A Lagoa da Conceição.....	30
2.1.2 Canal da Barra da Lagoa da Conceição.....	31
2.1.3 Padrão Climático Local .....	32
2.1.4 Ocupação Urbana na Lagoa da Conceição .....	33
2.2 REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES .....	34
2.2.1 Geoprocessamento.....	35
2.2.2 Agrupamento das SBHs em Unidades de Resposta Hidrológica .....	36
2.2.3 Monitoramento dos Aportes Fluviais e da Precipitação.....	37
2.2.4 Estimativa das Vazões Específicas e Regionalização .....	37
2.2.5 Modelo de Regionalização de Vazão em Escala Diária.....	38
2.3 CONSTRUÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO E ANÁLISE DOS PADRÕES HIDRODINÂMICOS DA LAGOA DA CONCEIÇÃO.....	39
2.3.1 Modelo Numérico Delft-3D Flow .....	40
2.3.2 Modelo de Transporte Delft-3D Part.....	41
2.3.3 Domínio do Modelo e Grade Numérica .....	41
2.3.4 Condições de Contorno .....	42
2.3.5 Disponibilidade de Dados para Construção do Modelo.....	43
2.3.6 Dados de Corrente .....	45
2.3.7 Calibração, Validação e Cálculo de Erros do Modelo Hidrodinâmico .....	46
2.3.8 Obtenção do Tempo de Residência e da Conectividade Hidrodinâmica dos Setores da laguna.....	47
2.3.9 Análise das Regiões com Tendência à Dispersão e à Acumulação de Materiais no Corpo de Água Lagunar e Índice de Richardson.....	49
2.4 ESTIMATIVA DOS APORTES DE NUTRIENTES DE FONTE NATURAL E ANTRÓPICA PARA A LAGOA DA CONCEIÇÃO.....	50
2.4.1 Aumento Populacional na Bacia Hidrográfica – Modelo Logístico (Verhulst).....	51

2.4.2	Definição da Capacidade-Suporte .....	52
2.4.3	Distribuição da População dos Distritos nas Sub-Bacias Hidrográficas .....	53
2.4.4	Monitoramento da Qualidade da Água da Laguna.....	53
2.4.5	Índice de Estratificação e Índice de Estado Trófico (TRIX).....	55
2.4.6	Monitoramento dos Aportes Fluviais .....	56
2.4.7	Regionalização das Cargas de Nutrientes (N e P) .....	57
2.4.8	Balço de Fósforo e Nitrogênio no Sistema em Estado Estacionário – Aplicação do Modelo LOICZ.....	58
2.5	CONSTRUÇÃO DO MODELO NUMÉRICO ACOPLADO À QUALIDADE DA ÁGUA DA LAGUNA – DELFT-3D WAQ .....	60
2.5.1	Modelo de Qualidade da Água Delft-3D Waq .....	60
2.5.2	Construção do Modelo de Qualidade da Água.....	61
2.5.3	Estimativa de Aumento das Cargas de Nutrientes de Fonte Antrópica.....	62
<b>3</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>63</b>
3.1	ESTIMATIVA DOS APORTES POR DESCARGA SUPERFICIAL PARA O CORPO DE ÁGUA.....	63
3.1.1	Determinação das Vazões nas SBHs de Controle .....	68
3.1.2	Regionalização de Vazões de Referência.....	71
3.1.3	Importância Hidrológica para os Setores da Laguna.....	72
3.1.4	Regionalização de Vazão em Escala Diária .....	73
3.1.5	Conclusão.....	75
3.2	CARACTERIZAÇÃO E CONECTIVIDADE HIDRODINÂMICA DA LAGOA DA CONCEIÇÃO ATRAVÉS DE MODELAGEM NUMÉRICA COM DELFT-FLOW E DELFT-PART.....	76
3.2.1	Dados de nível do mar .....	76
3.2.2	Análise dos Padrões dos Dados de Ventos Disponíveis.....	80
3.2.3	Clima de Precipitação nas Proximidades da Lagoa da Conceição .....	81
3.2.4	Cenários Meteo-Oceanográficos da Bacia da Lagoa da Conceição .....	82
3.2.5	Cenário de Calibração do Modelo Hidrodinâmico.....	82
3.2.6	Validação dos Valores de Alfa e Coeficiente de Rugosidade de Manning – Cenário com Dados de ADCP de junho e julho de 2017 .....	85
3.2.7	Análise do Padrões Hidrodinâmicos Estacionários da Lagoa da Conceição – Intervalo de 1º/01/2015 a 31/12/2015.....	88
3.2.8	Padrão Hidrodinâmico da Lagoa da Conceição – Atenuação do Sinal de Maré no Canal da Barra da Lagoa.....	89
3.2.9	Intensidade Média do Campo Vetorial da Laguna .....	89
3.2.10	Salinidade e Índice de Richardson.....	96
3.2.11	Tempo de Residência dos Compartimentos e Conectividade .....	98

3.2.12 Conclusão.....	103
3.3 ESTIMATIVA DAS DESCARGAS DE NUTRIENTES NATURAL E ANTRÓPICA NA LAGUNA ATRAVÉS DOS ESCOAMENTOS SUPERFICIAIS E DAS PROJEÇÕES FUTURAS.....	105
3.3.1 Expansão da Mancha Urbana da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição .....	105
3.3.2 Definição da População Máxima da Bacia Hidrográfica ou Capacidade Suporte – A Partir do Plano Diretor da Cidade de Florianópolis .....	106
3.3.3 Monitoramento das Descargas Superficiais de Nutrientes .....	110
3.3.4 Relação entre as Concentrações de Nutrientes nas Demais Variáveis Físico-Químicas na Qualidade da Água.....	116
3.3.5 Estimativas das Descargas de Nitrogênio e Fósforo ao Longo da Linha da Costa da Lagoa da Conceição.....	119
3.3.6 Análise da Qualidade da Água da Lagoa da Conceição e seus Compartimentos de 2001 a 2017.....	122
3.3.7 Efeitos da Eutrofização nos Ciclos Biogeoquímicos.....	124
3.3.8 Ciclagem de Nutrientes e Produção Primária Líquida .....	126
3.3.9 Conclusão	134
3.4 AVALIAÇÃO DO EFEITO DAS DESCARGAS SUPERFICIAIS DE NUTRIENTES E DO AUMENTO POPULACIONAL NA QUALIDADE DA ÁGUA.....	135
3.4.1 Calibração dos Processos de Qualidade da Água.....	135
3.4.2 Resultado das Simulações de Qualidade da Água.....	136
3.4.3 Avaliação da Importância das Descargas de Nutrientes Inorgânicos Dissolvidos em 2001.....	139
3.4.4 Mudanças nas Concentrações de Nutrientes Estimada pela Previsão de Aumento Populacional para 2040 .....	142
3.4.5 Conclusão.....	145
<b>4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>147</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>150</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento contínuo da população mundial e das produções industriais a níveis globais e regionais vem se manifestando nitidamente há alguns anos e, conseqüentemente, acarretando desafios sociais, econômicos e ambientais em escala global (HALPERN *et al.*, 2008; 2015; LOTZE *et al.*, 2006). Segundo Rockström (2009), a crença em um desenvolvimento econômico e industrial ilimitado fez com que as alterações nos ciclos naturais ultrapassassem a capacidade do planeta Terra em se regenerar em termos de alterações no uso do solo, alterações no ciclo da água, alterações no ciclo de nutrientes (nitrogênio e fósforo) e perda da biodiversidade.

Esse processo global tem seu efeito acumulado pelos efeitos de escala regionais e locais (GESAMP, 2001; BIANCHI, 2006). Nos países em desenvolvimento, elevadas taxas de ocupação urbana, associadas às deficiências tecnológicas e à má gestão pública, tornam o lançamento de descargas sanitárias uma das mais preocupantes fontes de poluição em corpos hídricos costeiros (DSIKOWITZKY *et al.*, 2016; MIRANDA; DE CASTRO; KJERFVE, 2002; ROVERSI *et al.*, 2016; WETZ *et al.*, 2016).

Lagunas costeiras constituem ambientes aquáticos semifechados de transição com elevado valor socioeconômico, o que os torna ambientes muito suscetíveis à ação do ser humano. Em particular, as lagunas estranguladas são caracterizadas por apresentarem elevado tempo de residência associado a pequenas taxas de renovação de água, o que resulta em acúmulo de nutrientes, sedimentos e matéria orgânica (BIANCHI, 2006; EKAU; KNOPPERS, 2003; KJERFVE, 1994; KNOPPERS; KJERFVE, 1999; MIRANDA; DE CASTRO; KJERFVE, 2002). Nesses ambientes, a excessiva descarga de nutrientes provoca alterações que conduzem a diferentes níveis de eutrofização, resultando no declínio da biodiversidade, na alteração de cadeias alimentares, em danos à saúde do ser humano e em prejuízos econômicos e sociais dificilmente mensuráveis (GASALLA; ROSSI-WONGTSCHOWSKI, 2004; NIXON, 1995; RABALAIS; TURNER, 2009; TUNDISI, 2003).

A Lagoa da Conceição, localizada na porção Centro-Sul da Ilha de Santa Catarina, desempenha um papel de destaque como fonte de recursos e serviços ecossistêmicos, sendo local de abrigo e de reprodução para diversas espécies de organismos marinhos (BORGO *et al.*, 2015; BRANCO; VERANI, 1997; LEDO, 1999; RIBEIRO; CLEZAR; HOSTIM-SILVA, 1999). Ao mesmo tempo, a laguna é amplamente utilizada para pesca, turismo e esportes diversos, representando uma fonte importante de incrementos para vários setores do comércio local, bem como para o município. Ao longo das últimas décadas, esse ambiente sofre com o

aumento do crescimento urbano desordenado e uma notável alteração no uso e na ocupação da sua bacia hidrográfica (CAMPANÁRIO, 2007).

Ao longo dos últimos 20 anos, diversos estudos na laguna vêm contribuindo com dados importantes para uma melhor compreensão da evolução dos impactos antrópicos nesse ambiente (ANDRADE, 2001; FONSECA, 2004; FONSECA, 2006; GODOY, 2008; FONSECA; BRAGA; EICHLER, 2000; FONTES, 2009; FONTES *et al.*, 2011; ODRESKI, 2012; SILVA, 2013; PORTO FILHO *et al.*, 2019). Esses trabalhos buscaram avaliar os ciclos biogeoquímicos e quantificar a produção primária líquida nos diferentes setores da laguna e verificar o efeito do verão e do pós-verão na qualidade da água e o efeito das mudanças de uso e de ocupação do solo na paisagem da laguna, entre outros. Entretanto, a laguna é um sistema aberto e seus contornos naturais inserem uma grande quantidade de variações da qualidade da água por efeito de chuvas, entradas hidrológicas, trocas com o oceano e mistura pelo vento, o que dificulta uma avaliação contínua da qualidade de água da laguna (MIRANDA; DE CASTRO; KJERFVE, 2002; BIANCHI, 2006).

Segundo Ji (2008), a hidrodinâmica é o mecanismo condutor do transporte de nutrientes e de sedimentos e é crítico para estudar o movimento de poluentes através do ambiente. Devida à grande diversidade de fatores que influenciam a hidrodinâmica das lagunas, a modelagem numérica desempenha um papel importantíssimo pois se constitui de uma ferramenta capaz de integrar essas variáveis de influência. Os modelos numéricos que acoplam equações hidrodinâmicas representam o transporte e a mistura de massas de água com processos biogeoquímicos que regem a qualidade da água.

Alguns trabalhos de modelagem hidrodinâmica e de dispersão e decaimento bacteriano (do grupo Coliformes) já foram realizados na Lagoa da Conceição, como os trabalhos de Andrade (2001), Rocha (2007), Godoy (2009), Odreski (2012), Silva (2013) e Bier (2018). Os objetivos buscados nesses trabalhos são definir as condições de contorno que possibilitam a construção de um modelo numérico que represente a laguna, como a definição de um mapa de rugosidade de fundo que signifique consistentemente o atrito de fundo na laguna e a definição de contornos físicos do modelo hidrodinâmico e de padrões de circulação.

Contudo, a calibração e a validação de um modelo hidrodinâmico com a definição de entradas hidrológicas de água e nutrientes ainda representam uma lacuna para o conhecimento dos padrões hidrodinâmicos da laguna, bem como da evolução temporal e espacial da qualidade da água da Lagoa da Conceição frente às mudanças de uso e de ocupação do solo previstas para Bacia Hidrográfica.

## 1.1 HIPÓTESES

A presente pesquisa está fundamentada nas seguintes hipóteses:

Primeira hipótese: a laguna se comporta como um ambiente de mistura de águas continentais e oceânicas, e devido à sua restrita conexão com o oceano e ao alto tempo de residência das águas, ela se torna um ambiente sensível ao lançamento de nutrientes.

Segunda hipótese: as características naturais e antrópicas da bacia hidrográfica modulam qualidade da água da laguna, sendo que, em escala anual, o crescimento populacional é um fator notável de alteração de sua qualidade.

Terceira hipótese: possui zonas com diferentes comportamentos hidrodinâmicos, por exemplo, mistura e transporte, mas também zonas de estagnação que influenciam fortemente a qualidade da água de cada região.

## 1.2 OBJETIVOS

Nesta seção serão apresentados os objetivos geral e específicos desta pesquisa.

### 1.2.1 Objetivo Geral

Analisar a hidrodinâmica e a biogeoquímica de uma laguna costeira subtropical em bacia hidrográfica urbanizada, avaliando o efeito da estrutura física e do aumento populacional na qualidade da água desta.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta tese consistem em:

- a) Descrever o ambiente físico e climatológico da bacia hidrográfica e quantificar as descargas fluviais da laguna.
- b) Setorizar a laguna a partir de padrões hidrodinâmicos e avaliar a importância relativa entre as forçantes meteo-oceanográficas sobre os padrões de transporte e dispersão, identificando o papel das entradas de vazões regionalizadas, as oscilações de nível do mar e da atuação do vento.

- c) Identificar a dinâmica trófica da laguna e a relação com a dinâmica populacional na bacia hidrográfica na janela temporal de dados disponíveis na literatura e obtidos no decorrer deste trabalho.
- d) Verificar os efeitos do aumento populacional na BH na qualidade de água da laguna em projeção para o futuro.

### 1.3 ESTADO DA ARTE

Um grande número de modelos matemáticos foi desenvolvido ao longo das últimas décadas para representar uma variedade de processos ecossistêmicos em lagunas, por exemplo, o modelo de Jørgensen (2010). O interesse científico em compreender os processos fundamentais em ecossistemas lagunares foi primeiramente publicado por Forbes (1887) no artigo “The lake as a microcosm”. A partir dessa principal motivação de compreender as leis por detrás dos processos biogeoquímicos de um lago ou de laguna naturais, surgiram outros trabalhos com a motivação de formar uma ferramenta para gestão interdisciplinar e previsão. E, mais recentemente, surgiram modelos que buscam avaliar a qualidade ecológica dos lagos submetidos a diferentes níveis de *stress* antropogênico, como exploração de recursos, rejeitos urbanos e industriais, problemas sanitários, eutrofização, mudanças no uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica e mudanças climáticas (HONG *et al.*, 2020; ACHETE *et al.*, 2017; ALOSAIRI; POKAVANICH, 2017; TRANG *et al.*, 2020).

Nixon (1995) e Carpenter *et al.* (1999) sugeriram valores de referência para as concentrações de nitrogênio e de fósforo inorgânico como abordagem para avaliar o grau de eutrofização dos lagos. Vollenweider e Giovanardi (1998) e Cloern (2001) procuraram montar índices para avaliar parâmetros físico-químicos, como a concentração de oxigênio dissolvido, e parâmetros biológicos, como a concentração de clorofila-a em conjunto com os nutrientes em um índice de qualidade trófica.

Os modelos numéricos baseados nas equações hidrodinâmicas de Navier-Stokes, em especial os modelos de águas rasas, permitiram estimativas mais precisas sobre as trocas de massas de água entre lagunas e oceano e os padrões de mistura e de transporte no corpo de água. Pode-se afirmar que existe uma busca constante por melhorias dos modelos numéricos (WANG *et al.*, 2020) e, também, dizer que essa evolução está sempre na dependência do desenvolvimento de computadores melhores (ASHRAF; BASHIR, 2012), já que esses modelos exigem uma grande capacidade de cálculo para solução numérica das equações de transporte e de conservação da quantidade de movimento de Navier-Stokes.

O primeiro modelo numérico para águas costeiras foi desenvolvido em 1970 pela Danish Hydraulic Institute (DHI) e é chamado MIKE 11, e esse modelo numérico permitiu modelagem dinâmica em 1D. Depois vieram as versões 2D e 3D (MIKE 21) e outros modelos foram lançados, como MOHIDwater (Portugal), SisBaia (Brasil) e Delft-3D (Holanda), além disso, inúmeros modelos estão sendo construídos. Segundo Wang *et al.* (2020), no ano de 2013, existiam aproximadamente 100 modelos numéricos diferentes.

Recentemente, os modelos numéricos permitiram o aprofundamento e o detalhamento da hidrodinâmica dos estuários, lagos e lagoas. Dabrowski and Berry *et al.* (2009) utilizaram um modelo numérico para encontrar o tempo de residência e os pontos de monitoramento mais apropriados para avaliar a qualidade da água do lago Lough Corrib na Irlanda.

Zainol, Akhir e Zainos (2021) usaram um modelo numérico e encontraram o tempo de residência e os caminhos de transporte de poluentes da laguna Setiu na Malásia.

Kim *et al.* (2017) avaliaram o efeito sazonal das descargas de água doce nos padrões hidrodinâmicos e na produtividade biológica do estuário do rio Yeongsan na Korea, utilizando modelagem numérica. Alosairi e Pokavanich (2017) aplicaram modelagem numérica para avaliar o efeito das entradas hidrológicas regionalizadas da região de Shatt Al-Arab na hidrodinâmica e no tempo de residência do Golfo de Northern Arabian, na região fronteiriça entre Kuwait e Iraque.

Ouni *et al.* (2020) utilizaram modelagem numérica para avaliar os padrões de circulação do tempo de residência do lago Ichkeul na Tunisia. Mais recentemente, Ciglencečki *et al.* (2021) usaram um modelo numérico para encontrar o padrão de transporte do mar Adriático e investigar as causas do acúmulo de um zooplâncton que provocou aumento expressivo das concentrações de carbono orgânico dissolvido em um evento de floração de algas muito intenso no verão de 2017

Em adição, o acoplamento dos modelos hidrodinâmicos com a biblioteca de processos biológicos e geoquímicos que influenciam a qualidade da água possibilitou uma grande quantidade de análises sobre a biogeoquímica, a eutrofização e a poluição de lagos e de lagoas, como, a dispersão de uma pluma e a degradação de um poluente específico como Hong *et al.* (2020) (com E. Coli), análise da influência das mudanças climáticas nos ambientes aquáticos (ACHETE *et al.*, 2017).

Mais recentemente, Trang *et al.* (2020) utilizaram modelagem de qualidade da água associada à modelagem hidrodinâmica da laguna Tam Giang-Cau Hai no Vietnam para encontrar a capacidade de depuração natural de poluentes da laguna e os limites de expansão

urbana e industrial, além dos requisitos mínimos de saneamento básico para melhorar a qualidade de água da laguna.

#### 1.4 ESTRUTURA DA TESE

Neste Capítulo 1, foram apresentados a importância e a motivação desta tese, seus objetivos, o estado da arte e a revisão bibliográfica.

O Capítulo 2 apresenta os materiais e os métodos utilizados para esta pesquisa e uma descrição da área de estudo.

No Capítulo 3 estão descritos os resultados da tese em quatro tópicos: a seção 3.1 aponta a análise da Bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição, que permitiu a quantificação e a regionalização das descargas fluviais que aportam na laguna em sua linha de costa; a seção 3.2 traz o processo de construção da modelagem hidrodinâmica e as etapas de calibração, validação que permitiu a avaliação do padrão de circulação hidrodinâmica da Lagoa da Conceição e o tempo de residência médio dos setores da laguna; a seção 3.3 destaca a projeção da população na bacia hidrográfica e a quantificação das cargas de nutrientes de fonte natural e antrópica para a laguna, a essa análise se soma a avaliação da resposta da laguna aos aumentos de carga forçados pelo aumento populacional; a seção 3.4 expõe o processo de desenvolvimento da modelagem da qualidade da água associada à hidrodinâmica da laguna e a análise das possíveis mudanças da qualidade da água no cenário de aumento populacional previsto para a BH.

Para melhor entendimento, elaborou-se o Quadro 1, que traz sinteticamente os principais conteúdos e as contribuições científicas obtidos pelos resultados da atual pesquisa em tópicos.

Quadro 1 – Principais conteúdos e contribuições científicas

Capítulo	Hipóteses	Objetivos específicos	Materiais e Métodos
3.1	As entradas de descarga hidrológica são importantes para o balanço hídrico da laguna, uma vez que é um ambiente restrito. Para representar corretamente a hidrodinâmica e biogeoquímica do ambiente, é preciso considerar essas entradas	Agrupamento das sub-bacias em unidades de resposta hidrológicas homogêneas; Encontrar a importância das entradas de descarga superficial na laguna.	Agrupamento das SBHs em Unidades de resposta Hidrológicas. Monitoramento de vazões e cargas de nutrientes. Regionalização.

Capítulo	Hipóteses	Objetivos específicos	Materiais e Métodos
	regionalizadas ao longo da linha de costa.		
3.2	Devida as entradas regionalizadas da vazão e as características morfológicas da laguna e da bacia hidrográfica as forçantes (oscilações do nível do mar, entradas de descarga superficial e vento) atuam de forma heterogênea no corpo de água, provocando regiões com circulação e padrões hidrodinâmicos distintos que acumulam ou transportam nutrientes de maneira diferente.	Setorização hidrodinâmica a partir de campos de velocidade gerados em modelo numérico. Análise da resposta em termos de tempos de residência e padrões de transporte e dispersão.	Análise de séries temporais de dados meteo-oceanográficos Aplicação – calibração e validação de modelo hidrodinâmico e biogeoquímico Delft-3D na área de estudo. Análise dos tempos de residência e compartimentação hidrodinâmica.
3.3	Devida a estacionariedade de longo termo das forçantes meteo-oceanográficas é possível verificar as mudanças no metabolismo líquido da laguna devido ao aumento populacional a partir de cenários populacionais de um modelo biogeoquímico estacionário.	Quantificação do metabolismo líquido da produção primária em diferentes níveis de pressão antrópica.	Geoprocessamento de imagens de uso e ocupação do solo/projeção populacional/Compatibilização de banco de dados; Aplicação do modelo LOICZ aos dados obtidos.
3.4	A ciclagem de nutrientes no corpo lagunar responde de forma direta aos padrões de circulação hidrodinâmicos e ao aumento populacional	Correlação dos padrões de concentração de nutrientes, bem como metabolismo líquido com a circulação hidrodinâmica	Implementação do modelo DELFT WAQ e correlação com dados obtidos em campo

Fonte: Elaborado pelo autor desta tese

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Lagunas costeiras constituem ambientes aquáticos de transição entre o ambiente terrestre e o oceano. Em geral, são corpos de águas rasas e separados do oceano por algum tipo de barreira. As lagunas são conectadas ao oceano por pelo menos um canal que se abre, mesmo que de forma intermitente (KJERFVE, 2002; EKAU; KNOPPERS, 2003; BIANCHI, 2006).

As formas das lagunas conferem uma característica muito particular de mistura das águas em seu interior. Elas podem ser classificadas de diferentes maneiras, conforme segue:

- a) pela salinidade média (água doce, salina ou hipersalina);
- b) pelo regime de marés (não, micro-meso-macromaré);
- c) pelo tipo de seção geológica;
- d) pela conexão com o mar (aberta, restrita, estrangulada); e
- e) pelo clima (equatorial, tropical, subtropical, temperado).

#### 2.1.1 A Lagoa da Conceição

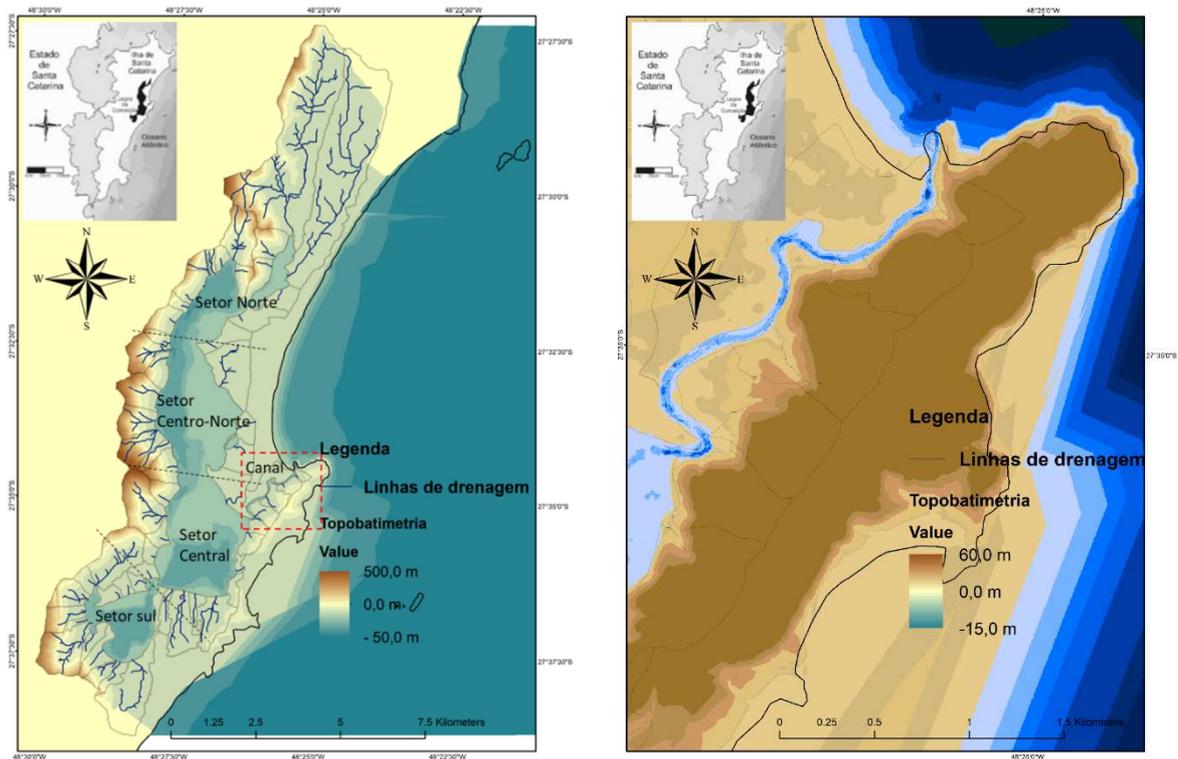
A Lagoa da Conceição (LdC) possui uma área superficial de 22 km<sup>2</sup>, volume de 66.648.179 m<sup>3</sup> e uma bacia hidrográfica de 78 km<sup>2</sup>. É uma laguna costeira estrangulada subtropical localizada no Município de Florianópolis (Figura 1), capital do Estado de Santa Catarina (27°34'S 48°27'O). Segundo a classificação de Guerra (1962), essa lagoa é considerada um estuário de micromarés (com amplitudes de até 2 m). Quanto às seções geológicas, a LdC faz parte da Costa Granítica do Sul do Brasil (20°S a 29°S).

A LdC desempenha um papel de destaque como fonte de recursos e de serviços ecossistêmicos, sendo local de abrigo e de reprodução para diversas espécies de organismos marinhos (BORGIO *et al.*, 2015; BRANCO; VERANI, 1997; LEDO, 1999; RIBEIRO, CLEZAR; HOSTIM-SILVA, 1999). Ao mesmo tempo, a laguna é amplamente utilizada para pesca, turismo e esportes aquáticos, representando uma fonte importante de incrementos para diversos setores econômicos locais, bem como para o Município.

Os contornos da laguna são dados por sub-bacias formadas por maciços graníticos em maior parte da Costa Oeste e depósitos arenosos a Leste. Essa característica confere um contorno alongado ao longo do eixo Norte-Sul, sendo que um único morro a Leste forma o Canal da Barra da Lagoa que conecta a laguna ao mar.

A LdC é formada por quatro células elípticas (Norte, Centro-Norte, Central e Sul) e pode ser dividida em quatro setores em termos de influência das componentes hidrológicas e oceânicas – verificada pela sua salinidade (SILVA, 2016).

Figura 1 – Área de estudo: a) Topobatimetria da Lagoa da Conceição com destaque para as entradas fluviais e os setores; b) Topobatimetria do Canal da Barra da Lagoa



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

A laguna é um corpo de água majoritariamente raso, com profundidade média de 2 metros. Contudo, a profundidade varia muito ao longo do corpo de água, desde algumas dezenas de centímetros em grandes bancos de areias, chegando a 4 metros no setor Sul, 5 metros no setor Central e 9 metros nas regiões mais profundas do setor Norte e Centro-Norte.

### 2.1.2 Canal da Barra da Lagoa da Conceição

Estudos hidrodinâmicos realizados no Canal da Barra da Lagoa mostram que este exerce a função de atenuar os sinais de alta frequência das oscilações do nível do mar, conforme apontam Bier (2018), Godoy (2009) e Andrade (2001). Esses autores justificam tal efeito pelas características de batimetria, rugosidade e meandramento do canal. As amplitudes das

oscilações de nível no interior da laguna estão por volta de 1,0 m, enquanto no oceano as oscilações são da ordem de 1,7 m.

Godoy (2009) realizou um estudo de modelagem numérica do Canal da Barra da Lagoa, a fim de verificar a atenuação do sinal de maré ao longo do Canal. O autor concluiu que o Canal funciona com um filtro natural de maré, com uma atenuação total da onda de maré (alta frequência) da ordem de 84% da energia do sinal.

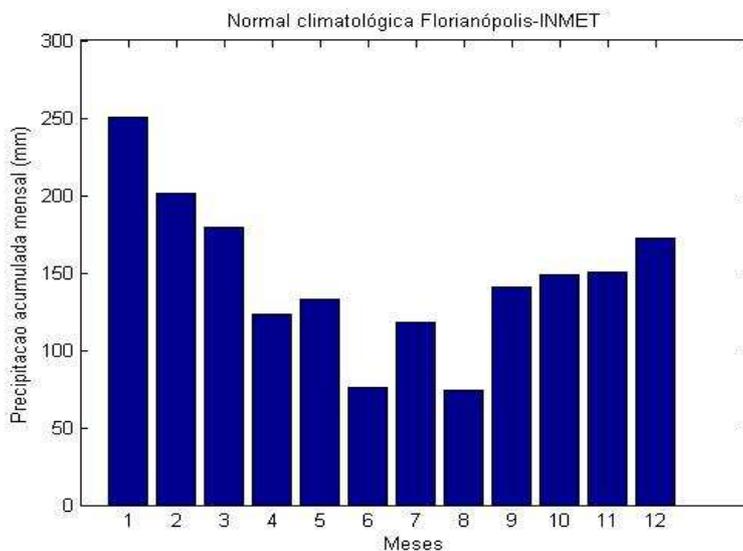
### 2.1.3 Padrão Climático Local

O clima em Florianópolis é subtropical, classificado como mesotérmico úmido. A média da temperatura anual é de 21°C, sendo que, no mês mais quente, a média das temperaturas máximas varia de 28 a 33°C e no mês mais frio varia de 7,5 a 12°C. A umidade relativa do ar é alta, com média anual de 82%, segundo o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 1992).

Há predominância de ventos do quadrante Norte-Nordeste (N-NE) durante todos os meses do ano, sendo que é comum a passagem de frentes frias que geram fortes ventos do quadrante Sul-Sudeste (S-SE). Esses quadrantes oscilam entre o primeiro e o segundo mais frequentes com predominâncias mensais que vão até 88% para o quadrante Norte (HESP *et al.*, 2007; SILVEIRA; ALVES; MURARA, 2014).

Segundo INMET (1992), a precipitação normal acumulada anual média é de 1.768 mm, sendo que os três meses mais chuvosos do ano são no verão, em dezembro com 172 mm, em janeiro com 250 mm e em fevereiro com 201 mm (Figura 2).

Figura 2 – Precipitação normal climatológica do INMET para região de Florianópolis

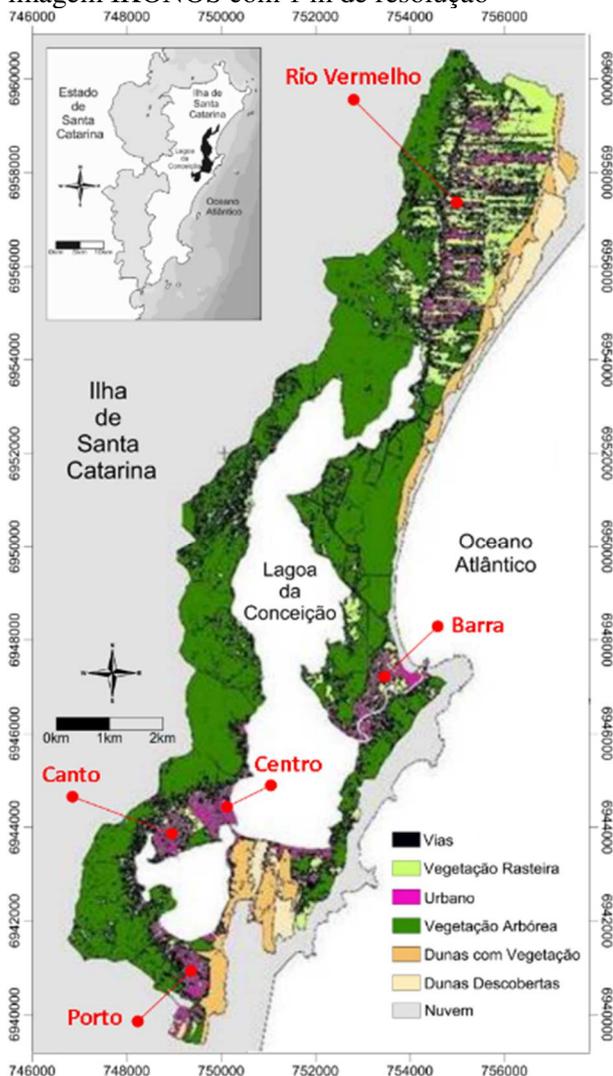


Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

### 2.1.4 Ocupação Urbana na Lagoa da Conceição

A população está distribuída principalmente em cinco bairros ao redor da Lagoa da Conceição (Figura 3), ao Norte no rio Vermelho, ao longo do Canal da Barra, e ao Sul no Porto, Canto e Centro. Segundo o estudo populacional de Campanário (2007), o aumento populacional na Lagoa da Conceição foi em média 6,3% ao ano no período de 2001 a 2015.

Figura 3 – Uso e ocupação da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição em 2010 a partir de uma imagem IKONOS com 1 m de resolução



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

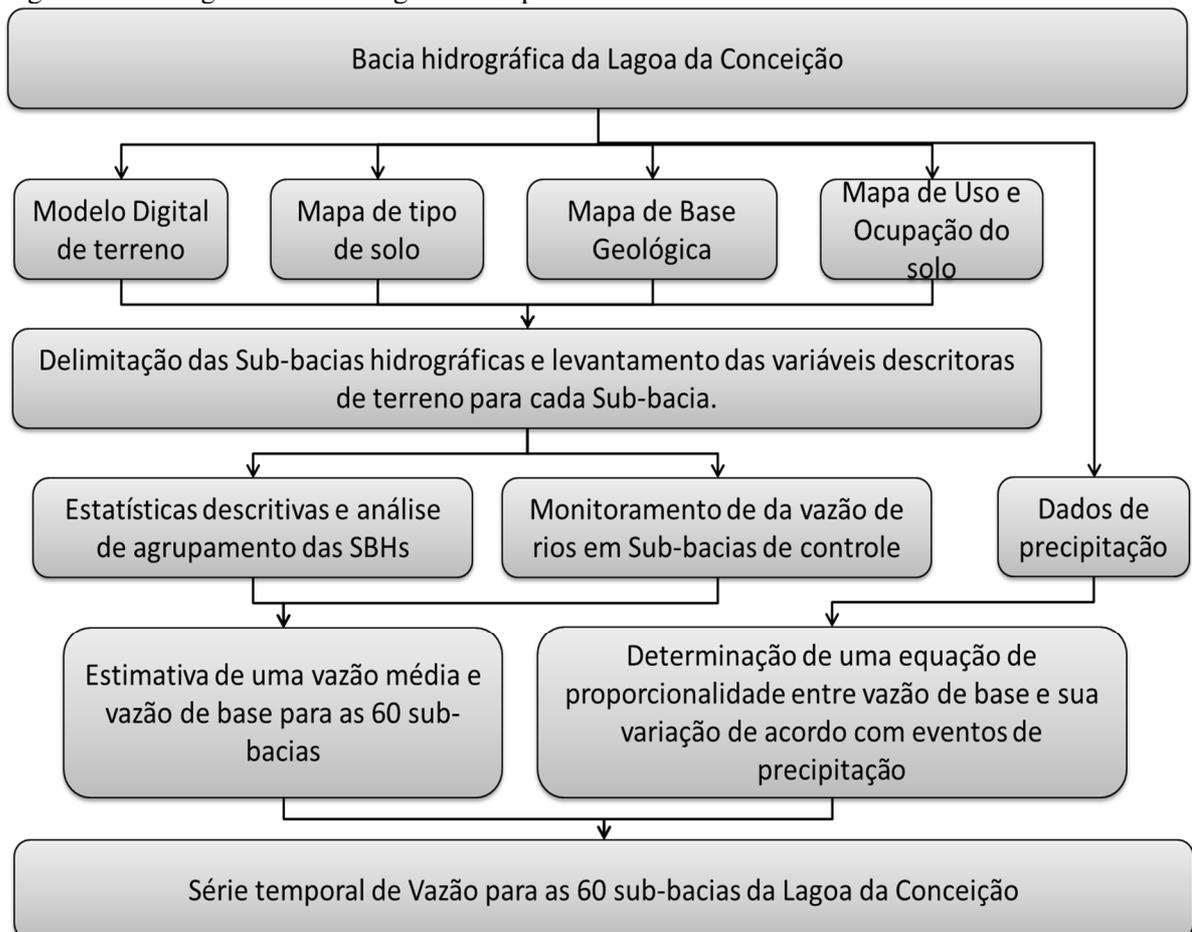
Ao longo das últimas décadas, esse ambiente vem sofrendo com o aumento do crescimento urbano desordenado e uma notável alteração no uso e na ocupação da sua bacia hidrográfica, sendo que esse processo está provocando mudanças importantes na qualidade da água. Segundo dados do IBGE (2010), a população de Florianópolis era de 421.240 habitantes no ano de 2010, um valor oito vezes maior quando comparado ao de 1940, quando havia apenas

46.770 habitantes, representando, ao longo desses 70 anos, uma taxa de crescimento de 3,2% ao ano. Devido ao incremento populacional crescente e significativo ocorrido nas últimas décadas, pensar estrategicamente na cidade tornou-se questão de sobrevivência de todos os negócios em Florianópolis, sejam eles econômicos, sociais ou ambientais (GUARDA, 2010).

## 2.2 REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES

Para atingir os objetivos do presente estudo, foi elaborada uma metodologia de análise de dados espaciais da bacia hidrográfica, das medições em campo, das estatísticas de agrupamento e regionalização e da modelagem de chuva-vazão, como apresentado no fluxograma metodológico da Figura 4 a seguir.

Figura 4 – Fluxograma metodológico do Capítulo 1



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese (2020)

Com o intuito de atingir os objetivos deste capítulo, foram seguidos os seguintes passos metodológicos: a) delimitação das Sub-Bacias Hidrográficas (SBH) por meio do Modelo

Digital de Terreno (MDT), determinação de parâmetros de forma (declividade média, índice de compacidade e densidade de drenagem), os tipos (argissolo, organossolo, dunas, areais marinhas), formação geológica (granito ilha, dunas, depósito lagunar praiado, depósito lagunar marinho, etc.) e usos do solo (urbano, vegetação arbórea, vegetação rasteira, dunas descobertas, dunas com vegetação) em cada SBH, verificação dos parâmetros geomorfológicos mais importantes por meio da Análise de Componentes Principais (PCA); b) agrupamento em Unidades de resposta Hidrológica (UrH) por meio de uma análise de *Cluster Complet Linkage* e uma ANOVA; c) campanhas de monitoramento da vazão no exutório de cinco sub-bacias da bacia hidrográfica da LdC; d) regionalização de vazões médias para todos os rios da Bacia Hidrográfica da LdC; e) acoplamento de um modelo de modulação da vazão a partir da chuva para obter a vazão diária; f) monitoramento da salinidade ao longo da laguna e cálculo do tempo de detenção hidráulica dos setores da laguna em estado estacionário.

### 2.2.1 Geoprocessamento

Para a caracterização morfométrica e hidrológica da bacia hidrográfica, foram utilizadas informações de relevo com uso de Modelo Digital de Terreno (MDT) com resolução espacial de 1 m, disponibilizado pelo Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis (IPUF), cadastro hidrográfico realizado pela Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI), informações do mapa de tipo de solo obtidas do IPUF (LUIZ, 2004) e informações do mapa de uso e ocupação da terra para o ano de 2010, elaborado por Lemétayer e Odreski (2011) a partir da imagem de satélite IKONOS adquirida da empresa Americana Geoeye pelo Laboratório de Hidráulica Marítima (LAHIMAR) e o mapa geoevolutivo da Ilha de Santa Catarina (HORN FILHO, 2013).

Para validar a segmentação obtida, foram confrontadas as linhas de drenagem com o cadastro hidrográfico e com registros visuais das contribuições hidrológicas pontuais ao corpo hídrico da Lagoa da Conceição georreferenciado em campo realizado em 2009.

O índice de escoamento utilizado para cada sub-bacia hidrográfica foi adaptado do método Curve Number do Soil Conservation Service da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (SCS-EPA).

Tabela 1 – Dados da Bacia Hidrográfica em Sistemas de Informação Geográfica

<b>Produto</b>	<b>Fonte/Datum</b>	<b>Resolução</b>
<b>Modelo digital de terreno</b>	IPUF/WGS84	1 m
<b>Tipo de solo</b>	EMBRAPA/WGS84	1:250.000

<b>Cadastro hidrográfico</b>	EPAGRI/WGS84	350 m
<b>Uso e ocupação do solo – Imagem IKONOS</b>	Lemétayer e Odreski (2011) – Americana Geove/WGS84	1 m
<b>Mapa Geoevolutivo da Ilha de Santa Catarina</b>	Horn Filho (2013)	1 m

Fonte: IPUF (on-line), Epagri (doc), Lemétayer e Odreski (2011), Embrapa (doc)

## 2.2.2 Agrupamento das SBHs em Unidades de Resposta Hidrológica

A fim de realizar as Análises de Componentes Principais (ACP) e a Análise de Agrupamentos (*Cluster Analysis*), os parâmetros descritores de terreno foram normalizados por meio do método Box-Cox, sendo posteriormente padronizados. Para definição das Unidades de Resposta Hidrológicas mais homogêneas que serviram como pressupostos para a regionalização de vazões, foi realizada uma Análise de Componentes Principais (ACP) para verificar as variáveis mais importantes e descrever a variabilidade das bacias. Após uma Análise de Agrupamento (*Cluster – Complet Linkage*) com as variáveis mais importantes identificadas na PCA, o resultado do agrupamento foi submetido a um teste de Kruskal Wallis, com  $\sigma=0,05$ .

Tabela 2 – Descritores de terreno observados em dados SIG

<b>Forma</b>	<b>Declividade média</b>	<b>Obtido por Geoprocessamento do modelo digital de terreno</b>
	Densidade de drenagem	
	Índice de compacidade	
<b>Cobertura</b>	Vegeta rasteira	Obtido através da classificação de imagens IKONOS de Lemétayer e Odreski (2011) – Americana Geove/WGS84
	Urbano	
	Vegeta arbórea	
	Vegeta dunas	
	Dunas descobertas	
<b>Tipo de solo</b>	Areias quartzólicas	Obtido através da vetorização dos dados de tipo de solo classificados pela EMBRAPA EMBRAPA/WGS84
	Argissolo	
	Dunas	
	Areias marinhas	
	Organossolo / gleissolo	
<b>Formação geológica</b>	Deposito sedimentar lagunar praial	Obtidos através da vetorização dos dados de formação geológica de Horn Filho (2013)
	Dique	
	Granito Ilha	

Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Para a organização do banco de dados e a realização das análises estatísticas, foram utilizados os *softwares* Microsoft Excel, Statistica 8.0 e MATLAB.

### 2.2.3 Monitoramento dos Aportes Fluviais e da Precipitação

Foram definidas cinco SBH-Controle (SBH-C) na bacia hidrográfica. A medição da vazão foi feita, utilizando-se o método da meia seção com auxílio de um medidor de fluxo (Flowmeter) da marca YSI. O levantamento geométrico das seções consistiu em medir a profundidade da seção transversal do rio a cada 30 cm, seguindo Rantz (1982) e EPA (1997). Nos pontos que apresentavam variações abruptas de batimetria foram medidas as profundidades entre distâncias menores na seção.

Em uma das SBH-C, foi escolhida uma seção em que havia um vertedor retangular. A equação utilizada para o cálculo de vazão foi a fórmula de Francis para vertedores retangulares com duas contrações laterais, adaptada de Santos *et al.* (2001).

Ao todo, foram realizadas 40 campanhas de medições nos quatro rios, distribuídas, aproximadamente, a cada 21 dias no primeiro ano – de março de 2015 até março de 2016 – e a cada dois meses de março de 2016 a novembro de 2018.

Os dados de precipitação foram obtidos de forma gratuita pelo *site* do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) – e são da estação convencional de Florianópolis – SC (código 83897 – latitude -27,58° e longitude -48,56°) mantida pelo INMET.

### 2.2.4 Estimativa das Vazões Específicas e Regionalização

A regionalização das vazões em toda a bacia hidrográfica foi calculada a partir das vazões específicas de cada SBH-C. A vazão específica relaciona as vazões medidas com a área drenada em cada sub-bacia. Os valores dão uma noção quantitativa da produção de vazão específica de cada SBH e permitem encontrar as diferenças provocadas pelas características da bacia de drenagem, como tipo e uso do solo e as diferentes características morfométricas (declividade e tempo de concentração). O cálculo é feito por meio da seguinte equação:

$$q_{ps\_UH} = \frac{\bar{Q}_{(SBH\ Controle)} - Q_{a(SBH\ Controle)}}{Área_{(SBH\ Controle)}} \quad (1)$$

Onde:

$\bar{Q}_{(SBH\ Controle)}$  = Média geométrica das vazões medidas na SBH de controle;

$Q_{A(SBH\ Controle)}$  = Vazão antrópica da SBH de controle.

Por meio da  $q_{ps}$  de cada UH e da vazão antrópica encontrada em cada SBH, é possível obter a vazão de cada SBH ( $Q_{SBH}$ ).

A vazão antrópica produzida foi calculada pela vazão *per capita* e pela população residente na SBH. Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2015), o consumo de água *per capita* médio dos últimos oito anos para o município de Florianópolis é  $q_{PC} = 175$  L/hab.dia.

$$Q_{SBH} = Q_{a(sbh)} + (q_{ps} \cdot UH * \text{Área}_{(SBH \text{ Controle})}) \quad (2)$$

Com as vazões de todas as SBHs, é possível estimar a vazão total lançada para o corpo lagunar ( $Q_{BH}$ ).

$$Q_{BH} = \sum Q_{SBH} \quad (3)$$

Para encontrar o intervalo de confiança de 95% sobre os valores de vazão obtidos, foram realizadas as seguintes operações:

Normalização dos dados de vazão.

$$X = \ln(Q) \quad (4)$$

Encontrada a média geométrica.

$$\Pi = (\pi, X_i)^{1/n} \quad (5)$$

Os limites para o intervalo de confiança de 95% da distribuição dos dados

$$\mu \geq \bar{X} \pm t_{\frac{\alpha}{2}} * \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

Retornado os valores de vazão para as unidades originais

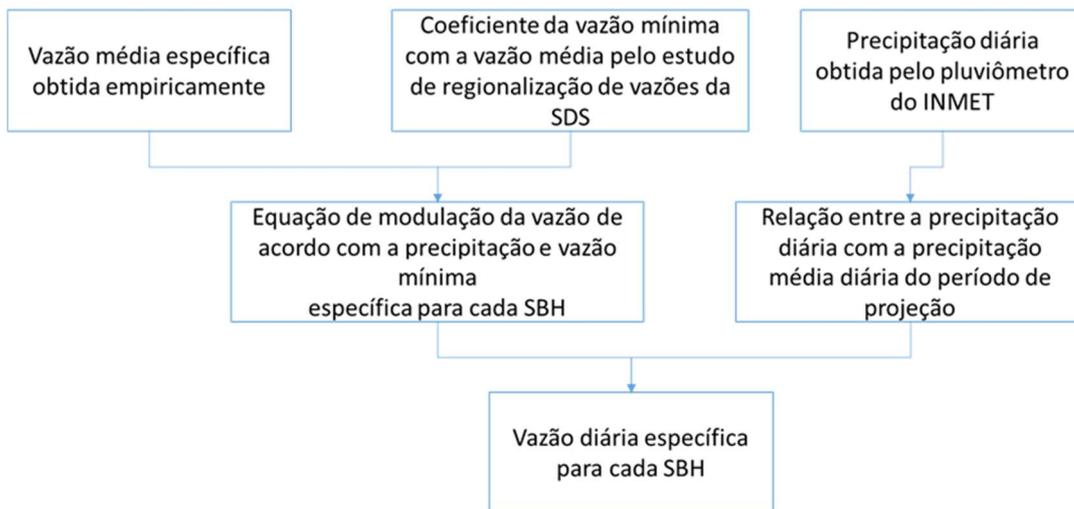
$$Q_{ic+95\%} = e^{\mu^1} \text{ e } Q_{ic-95\%} = e^{\mu^2} \quad (7)$$

### 2.2.5 Modelo de Regionalização de Vazão em Escala Diária

A fim de obter valores de vazão para cada bacia ao longo do tempo, de forma a possibilitar estudos de modelagem numérica da laguna em escala diária, foi necessário realizar uma adaptação do método de regionalização de vazões. O modelo utilizou as vazões médias obtidas pelo monitoramento realizado *in loco*, e foi adaptada do método de regionalização da SDS a relação entre a vazão média e as vazões mínimas.

Para completar o balanço de massa, foram atribuídas as vazões acima da mínima para os períodos de chuva, modulando a vazão a partir da precipitação como aponta o diagrama de fluxo da Figura 5:

Figura 5 – Fluxograma de cálculo da vazão diária específica para cada SBH



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Para encontrar a vazão diária, foram determinadas uma vazão mínima – que responde de forma percentual à média das vazões medidas – e uma componente variável que modula sua intensidade de acordo com a intensidade dos eventos de precipitação ao longo do tempo.

Dessa forma, chegou-se à seguinte equação:

$$q_d = \text{Equação 1 } q_{Hidro} * \left[ \alpha + (1 - \alpha) \cdot \frac{R_d}{\bar{R}} \right] \quad (8)$$

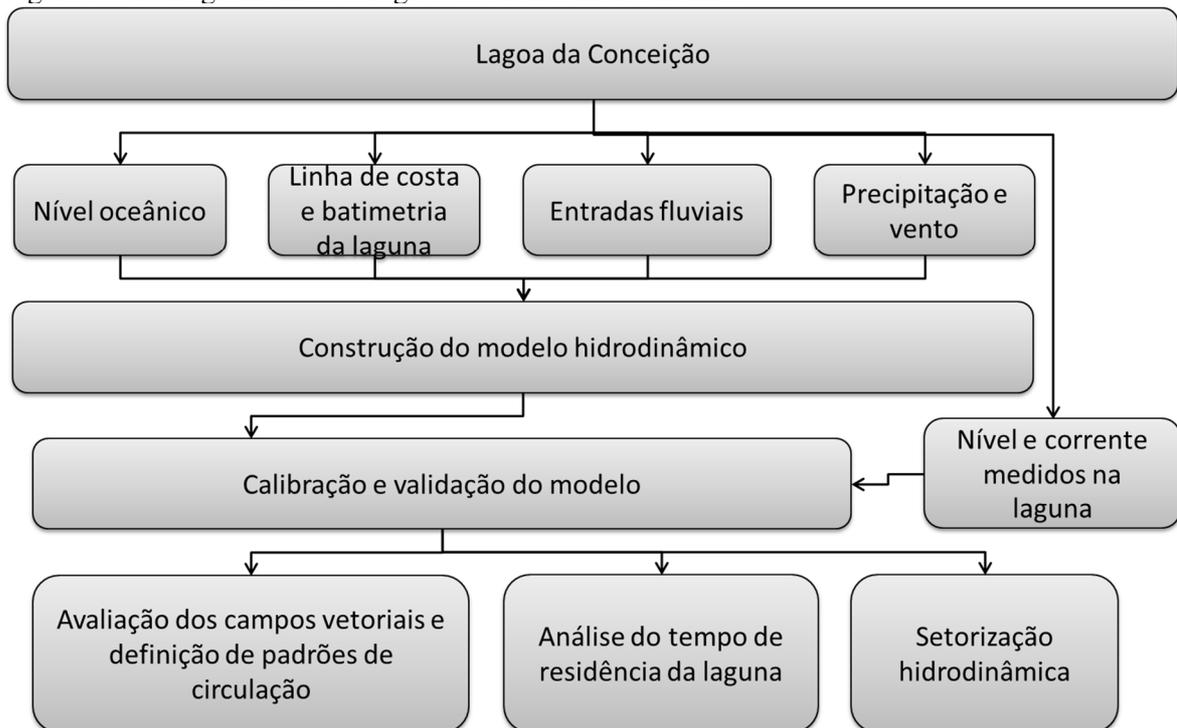
Onde  $q_{Hidro}$  é a vazão média diária,  $\alpha$  é a proporção entre a parte variável e constante da vazão dos rios (proporção da vazão mínima);  $R_d$  é a precipitação diária em mm, e  $\bar{R}$  é a precipitação média diária ao longo do período de observação.

A fim de validar o modelo de regionalização diária, foram realizadas oito campanhas adicionais nos rios de controle – três em 2018 e cinco em 2020 – nas três sessões de controle das sub-bacias hidrográficas que foram monitoradas para gerar as vazões de referência. Os erros do modelo foram calculados a partir do erro quadrático médio e do coeficiente de Nash Sutcliffe e Maccuen (2006) e de Jain e Sudheer (2008).

### 2.3 CONSTRUÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO E ANÁLISE DOS PADRÕES HIDRODINÂMICOS DA LAGOA DA CONCEIÇÃO

Para caracterizar a hidrodinâmica da laguna e avaliar a importância relativa entre as forçantes meteo-oceanográficas sobre os padrões de transporte e dispersão dos poluentes, serão seguidos os passos metodológicos ilustrados na Figura 6 a seguir.

Figura 6 – Fluxograma metodológico da análise hidrodinâmica



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

### 2.3.1 Modelo Numérico Delft-3D Flow

Para o presente estudo, foi utilizado o modelo numérico Delft-3D, desenvolvido pela Deltares, em Delft, Holanda. O Delft-3D é um avançado sistema de modelos numéricos 2D/3D (duas e três dimensões) que inclui vários módulos para possibilitar a simulação de processos costeiros complexos, como hidrodinâmica, transporte de sedimentos e mudanças da morfologia (erosão e deposição sedimentar, variação da linha de costa). A modelagem numérica hidrodinâmica para o presente estudo considera diversos processos físicos atuantes, como elevação de nível (maré astronômica e maré meteorológica), correntes, precipitação e ventos.

O módulo hidrodinâmico Delft- 3D Flow resolve um sistema de equações de águas rasas em modo bidimensional (ou integrado na vertical) ou tridimensional. O sistema de equações consiste nas equações horizontais de movimento (conservação da quantidade de movimento), na equação de continuidade, nas equações de transporte para constituintes conservativos e um modelo de fechamento turbulento. A equação vertical de quantidade de movimento é reduzida à relação da pressão hidrostática, e as acelerações verticais são assumidas como sendo muito pequenas em relação à aceleração da gravidade. Isso faz com que o Delft-3D Flow seja adequado para a predição de fluxos em mares rasos, áreas costeiras, estuários, lagos, rios e lagoas (WL DELFT HYDRAULICS, 2011). No Delft-3D, as equações hidrodinâmicas podem

ser resolvidas em grades cartesianas retangulares, curvilineares ortogonais (*boundary fitted*) ou esféricas (LESSER *et al.*, 2004). Esse modelo foi extensivamente calibrado e validado através de experimentos de campo e de laboratório e é considerado o estado da arte em modelagem hidrodinâmica

### **2.3.2 Modelo de Transporte Delft-3D Part**

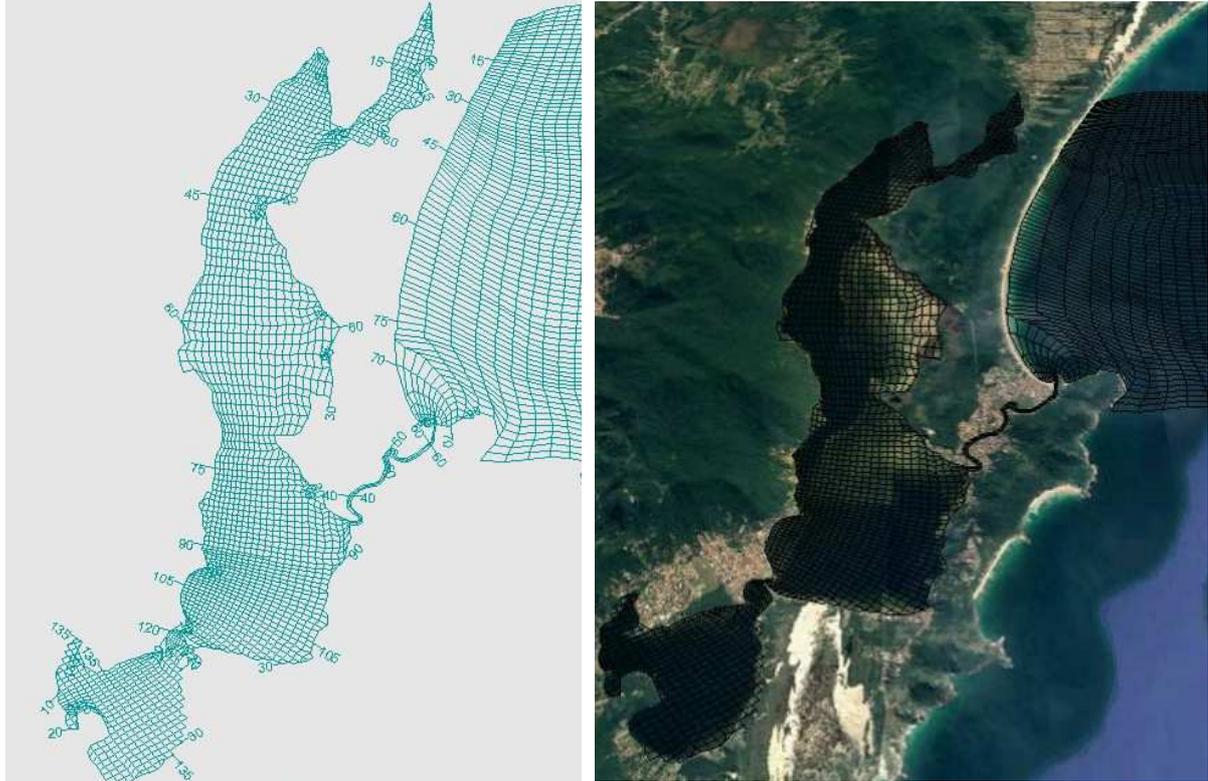
O Delft-3D Part, pertencente ao sistema de modelagem Delft-3D, é um modelo tridimensional na escala intermediária entre os campos próximo e afastado, que estima uma distribuição dinâmica da concentração de substâncias por meio do cálculo de trajetórias de milhares de partículas ao longo do tempo de simulação. O Delft-3D Part utiliza os campos hidrodinâmicos do Delft-3D Flow e aplica a cada passo de tempo uma parcela de deslocamento randômico das partículas com base no método Random-Walk (WL DELFT HYDRAULICS, 2011).

### **2.3.3 Domínio do Modelo e Grade Numérica**

O domínio do modelo foi gerado para simular o corpo de água da Lagoa da Conceição e do canal. Dessa forma, o oceano foi considerado a fronteira aberta na qual foi imposta a condição de contorno (dados de nível medido na Costa da Ilha de Santa Catarina). Essa abordagem tem como pressuposto que o sinal da série temporal das oscilações do nível do mar já inclui em si os sinais da maré astronômica e da maré meteorológica, dispensando a necessidade de criar um GRID maior no oceano para gerar ondas de maré meteorológica.

A grade numérica do modelo hidrodinâmico foi gerada com auxílio da ferramenta RGFRID do Delft-3D, é uma grade curvilinear com 144 x 83 elementos de cálculo, largura de aproximadamente 11 km e comprimento aproximado de 15 km, estendendo-se por toda a área interna do corpo de água da Lagoa da Conceição até 4 km mar adentro. A grade apresenta resolução variando de 7 m a 70 m nas regiões de interesse a 200 m nas regiões mais afastadas (Figura 7).

Figura 7 – Grade numérica utilizada para modelagem da Lagoa da Conceição



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

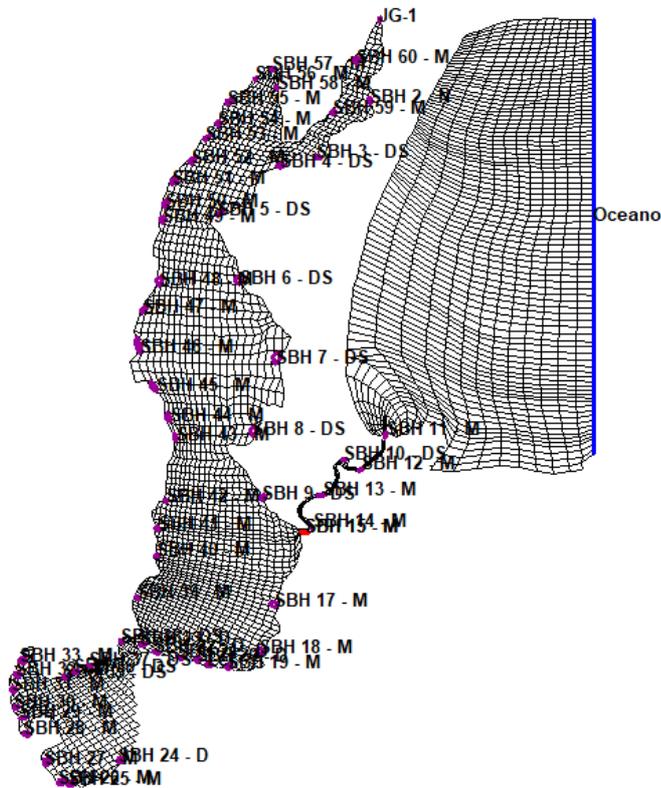
Foi escolhido o formato de GRID curvilíneo devido ao *design* das linhas de campos de velocidade esperada, assim como orientam Lesser *et al.* (2004).

No Canal da Barra da Lagoa foram detalhados em três secções para que fosse possível observar os detalhes de cada ponto intermediário e na interface com as bordas do canal. A desratização vertical do modelo foi em cinco camadas com camadas do tipo *sigma layer*, de forma que a camada 1 ficou com 15%, a camada 2 com 20%, a camada 3 com 30%, a camada 4 com 20% e a camada 5 com 15%.

### 2.3.4 Condições de Contorno

A fronteira aberta e as descargas fluviais mapeadas foram inseridas no *setup* do modelo numérico e estão apresentadas na Figura 8 a seguir.

Figura 8 – Definição das 60 entradas fluviais e da fronteira aberta com o Oceano



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

### 2.3.5 Disponibilidade de Dados para Construção do Modelo

A partir da compilação dos dados medidos pelo Laboratório de Hidráulica Marítima neste trabalho e em trabalhos anteriores pelo CIRAM-EPAGRI, os dados de batimetria da lagoa foram obtidos do estudo de Aeroconsult (2001), e a batimetria do Canal da Barra da Lagoa foi cedida pela empresa Socioambiental em estudo realizado em 2005. As linhas de costa foram obtidas a partir de imagens de satélites Landsat disponíveis *on-line* no *site* do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2021).

Dados primários de nível do mar foram disponibilizados a partir do monitoramento realizado pelo Laboratório de Hidráulica Marítima (LaHiMar), pela Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI-CIRAM) e pelo Laboratório de Oceanografia Costeira (LOC) através de equipamentos maregráficos localizados nas baías de Florianópolis. O marégrafo da Baía Sul (EPAGRI) foi instalado na localidade da Caieira da Barra do Sul, Ilha de Santa Catarina ( $48^{\circ}33'54''\text{O } 27^{\circ}49'15''\text{S}$ ).

O resumo dos dados utilizados para modelagem hidrodinâmica se encontra na Tabela 3.

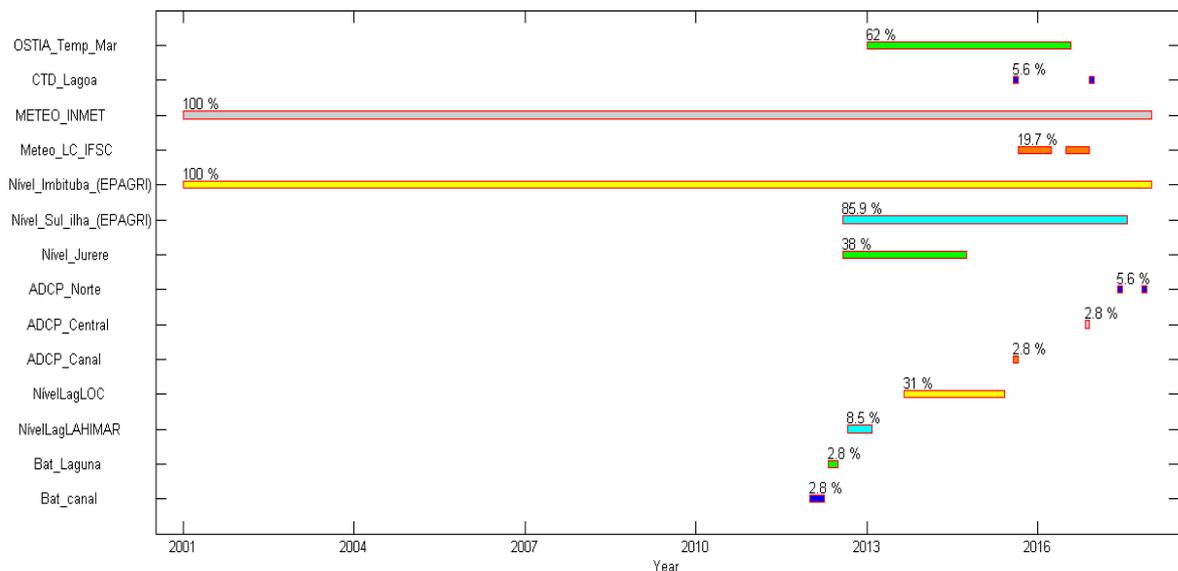
Tabela 3 – Resumo da base de dados utilizados para modelagem das fronteiras para entrada no modelo Delft-3D

<b>Batimetria</b>	AEROCONSUT (2001) / WGS84	Variável (aprox. 200m)
<b>Modelo digital de terreno</b>	IPIUF /WGS84	1 metro
<b>Tipo de solo</b>	EMBRAPA/WGS84	1:250.000
<b>Cadastro hidrográfico</b>	EPAGRI/WGS84	350m
<b>Definição da rede hidrográfica e sub-bacias</b>	ArcHydro (autor) / WGS84	1metro
<b>Níveis oceânicos (estações maregráficas)</b>	LAHIMAR / EPAGRI	Variável (máx. 1cm)
<b>Níveis medidos na laguna (estações maregráficas e ADCP)</b>	LAHIMAR / LOC	Variável (máx. 1cm)
<b>Medições de vazão nos rios</b>	LAHIMAR	5 rios
<b>Meteorológicos</b>	EPAGRI / INMET	Variável
<b>População</b>	Campanário (2007); IBGE (2000 e 2010)	
<b>Concentração de nutrientes nos rios</b>	LAHIMAR	5 rios
<b>Concentração de nutrientes na Laguna</b>	LabGeoQuiMar / LAHIMAR	
<b>Uso e ocupação do solo - Imagem IKONOS</b>	Lemétayer (2011) - Americana Geove / WGS84	1 metro

Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Apesar de muitos anos de monitoramento, existem poucos momentos em que houve medições concomitantes do nível do mar e interno da laguna, como ilustra a Figura 9 a seguir.

Figura 9 – Disponibilidade temporal de dados medidos para calibração e validação do modelo hidrodinâmico



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

A partir dos dados descritos na Tabela 4, é possível definir cenários de calibração e de validação do modelo Delft-3D.

### 2.3.6 Dados de Corrente

De modo a verificar o comportamento da circulação do sistema lagunar e adquirir informações para validação das simulações numéricas, foram coletados dados da direção e da magnitude das correntes e do nível da água em três pontos na laguna. O levantamento de dados foi realizado com auxílio de um ADCP da Marca Sontek modelo 1.0MHz.

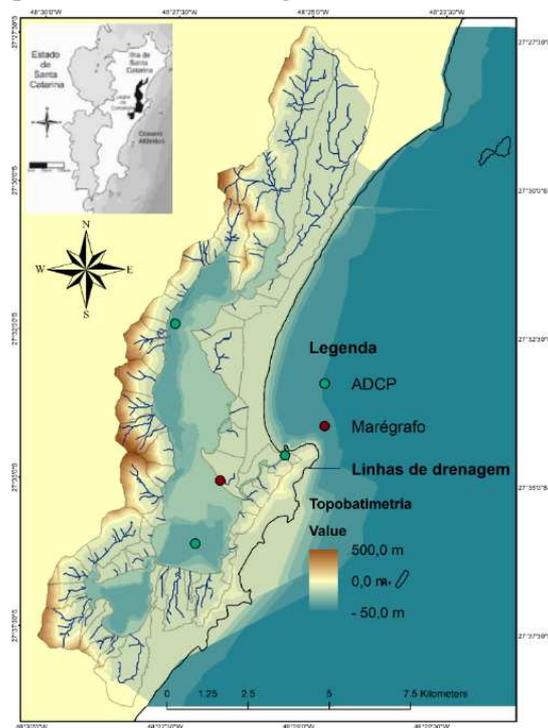
A localização do ADCP durante as campanhas foi registrada com auxílio de DGPRS de alta precisão. O equipamento foi configurado para adquirir os dados com intervalo de amostragem a cada 10 minutos e células de 0,25m. Nesse mesmo dia, foram coletados dados de temperatura e de salinidade ao longo da coluna d'água com auxílio de um CTD. A localização dos pontos e o período de operação do equipamento estão dispostos na Tabela 4 e Figura 10 a seguir.

Tabela 4 – Localização e período de operação do ADCP na Lagoa da Conceição

<b>Estação</b>	<b>Longitude</b>	<b>Latitude</b>	<b>Período de Operação</b>	<b>Dias de Operação</b>
<b>CANAL DA BARRA DA LAGOA</b>	-48.422683	-27.575595,	De 31/07/2015 a 13/08/2015	14 dias
<b>CANAL SETOR NORTE</b>	-48.457831	-27.539276	De 1º/06/2017 a 27/07/2017	57 dias

Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Figura 10 – Batimetria e pontos de fundeio do ADCP – Lagoa da Conceição



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

### 2.3.7 Calibração, Validação e Cálculo de Erros do Modelo Hidrodinâmico

A partir das séries temporais de nível e de corrente extraídas do modelo hidrodinâmico, foram analisadas as tendências lineares, a raiz do erro quadrático médio (RMSE) e do erro absoluto médio relativo (EAMR) e o Skill Score dos dados modelados com relação aos dados observados por medições *in loco*.

Walstra *et al.* (2001) e Blogg (2001) definem as faixas de valores para o EAMR, cujos valores menores do que 0,20 são classificados como excelentes, entre 0,20 e 0,40 são considerados bons e, acima destes, o modelo é razoável ou ruim. Já o RMSE possui a mesma unidade da variável aplicada, portanto, reflete o grau de distância entre os valores modelados e os observados, sendo que quanto mais próximo de zero, melhor. A Tabela 5 a seguir mostra as equações e os valores ideais para os erros calculados.

Tabela 5 – Erros utilizados para o cálculo da acurácia do modelo

Erro calculado	Equação	Faixas aceitáveis para o erro do modelo
RMEA	$RMAE = \frac{\sum_{i=1}^n  Obs_{(i)} - Mod_{(i)} }{\sum_{i=1}^n  Obs_{(i)} }$	<p>&lt;0,2 bom</p> <p>de 0,2 a 0,4 razoável</p> <p>&gt;0,4 ruim</p>

RMSE	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Obs_{(i)} - Mod_{(i)})^2}$	Mais próximo de zero melhor
------	--------------------------------------------------------------------	--------------------------------

Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

A Tabela 6 a seguir mostra os cenários de modelagem para as etapas de calibração e de validação do modelo.

Tabela 6 – Cenários de simulação hidrodinâmica da lagoa para calibração, validação e para caracterização hidrodinâmica

Calibração/ validação	Período de simulação – período de dados observados	Dados de entrada	Dado utilizado verificar a aderência do modelo	Parâmetros de calibração/erros calculados
<b>Calibração</b>	165 dias (12/09/2013 a 23/02/2014)	Nível armação observado/ Precipitação INMET/Vento Copérnicus My Ocean/Vazão	Nível observado na laguna (LOC)	Calibração do fator de atrito – Chezy/ verificação do balanço hídrico vazão e precipitação.
<b>Validação (1)</b>	57 dias (01/06/2017 a 27/07/2017)	Nível armação previsto/ Precipitação INMET/Vento Copérnicus My Ocean/Vazão	Nível e correntes observados no setor Norte da LdC com ADCP (LaHiMar)	Calculo de erros a partir do nível e corrente medidos pelo ADCP
<b>Cenário de análise de tempo de residência e análise de qualidade de água</b>	365 dias (1º/01/2015 a 31/12/2015)	Nível armação previsto/ Precipitação INMET/Vento Copérnicus My Ocean/Vazão	Nível e correntes observados no Canal da Barra da Lagoa com ADCP por 14 dias (LaHiMar)	Calculo de erros a partir do nível e corrente medidos pelo ADCP

Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

### 2.3.8 Obtenção do Tempo de Residência e da Conectividade Hidrodinâmica dos Setores da lagoa

O tempo de residência para lagunas costeiras não é um termo bem definido. Alguns autores definem como o tempo necessário para uma partícula de água viajar de um local para o limite da região (BOLIN RODHE, 1973; ZIMMERMAN, 1976; DRONKERS; ZIMMERMAN, 1982; DE KREEKE, 1983; PRANDLE, 1984). Nessa definição, o tempo de residência depende das condições iniciais (posição e nível meteorológico inicial, vazão inicial), quando as partículas são inicialmente liberadas, e pode ser facilmente associado ao conceito de tempo de trânsito. Em outros trabalhos, é definido como o tempo médio para toda a água

permanecer domínio inicial (WANG *et al.*, 2020). Este é semelhante ao tempo de concentração de uma bacia, porque representa uma média em todo o domínio.

Algumas abordagens para encontrar o tempo de residência utilizam apenas informações como batimetria, prisma de maré e vazões dos rios para estimar as vazões de trocas do sistema em estudo com o ambiente externo, contudo, são métodos que foram muito questionados ao longo do tempo devido ao fato da não estacionariedade dos estressores meteo-oceanográficos nos ambientes naturais, como as lagunas costeiras. Com a modelagem numérica, surgiram abordagens que incluem os fatores de não estacionariedade, o que trouxe resultados mais precisos, uma delas é a Lagrangiana (MONSEN *et al.*, 2002).

A abordagem lagrangiana proposta por Monsen *et al.* (2002) permite ao usuário simular traçadores para serem lançados no momento inicial em toda a região de interesse e rastreados até deixarem o domínio de interesse. Essa abordagem, no entanto, requer a simulação de um grande número de partículas traçadoras para alcançar alta resolução para qualquer hora e localização inicial, tornando a tarefa novamente bastante extensa. Uma abordagem ainda mais precisa pode ser feita dividindo o domínio em um pequeno número de sub-regiões. Nessa situação, é possível calcular os tempos médios de residência para cada sub-região, esse método é adotado neste estudo.

No estágio inicial da simulação, se adota que 100% das partículas estão concentradas na região de interesse do domínio, e as demais regiões possuem concentração igual a 0, como mostra a equação a seguir.

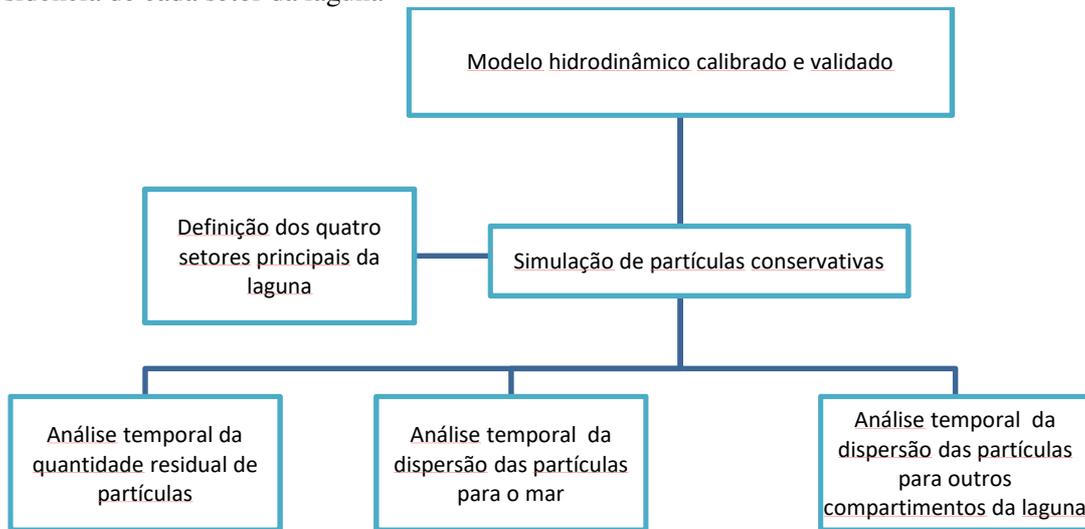
$$C_i(t_0, x \in \Omega_i) = 1 \text{ and } C_i(t_0, x \notin \Omega_i) = 0, \quad i = 1, \dots, n \quad (8)$$

Onde gama  $i$  representa a parte do domínio correspondente ao setor de interesse. E finalmente o tempo de residência é encontrado pela soma das quantidades do traçador para cada setor no tempo, como mostra a equação a seguir.

$$R_i(t_0) = \frac{\int_0^\infty \int_{\Omega} H(t, x) C_i(t, x) dx dt}{\int_{\Omega_i} H(t_0, x) C_i(t_0, x) dx} \quad (9)$$

Quando o valor da concentração desse traçador alcançou 0,5% da concentração inicial, considera-se que se alcançou a diluição total desse traçador e, então, é calculado o tempo de residência (BRAUWERE *et al.*, 2012). O diagrama de fluxo a seguir (Figura 11) apresenta o passo a passo para realização dessa análise.

Figura 11 – Fluxograma de análise do modelo de partículas conservativas para encontrar o tempo de residência de cada setor da laguna



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

### 2.3.9 Análise das Regiões com Tendência à Dispersão e à Acumulação de Materiais no Corpo de Água Lagunar e Índice de Richardson

A partir dos campos de velocidade, foram calculados o campo de divergência e o campo do rotacional médio para cada ponto do GRID numérico.

Sendo que o divergente calculado para o campo de velocidade em coordenadas cartesianas é dado por.

$$\text{div } \mathbf{F} = \nabla \cdot \mathbf{F} = \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} \quad (10)$$

Sendo  $\mathbf{F}$  o vetor velocidade, e  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$  são as componentes do vetor nos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ , respectivamente.

Já o rotacional do campo vetorial é calculado por.

$$\vec{\nabla} \times \vec{F} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ F_x & F_y & F_z \end{vmatrix} \quad (11)$$

Sendo então possível avaliar os padrões de dispersão e de acumulação de materiais e sedimentos na coluna d'água.

A estabilidade de estratificação pode ser descrita pelo gradiente do número de Richardson,  $Ri$ , definido por:

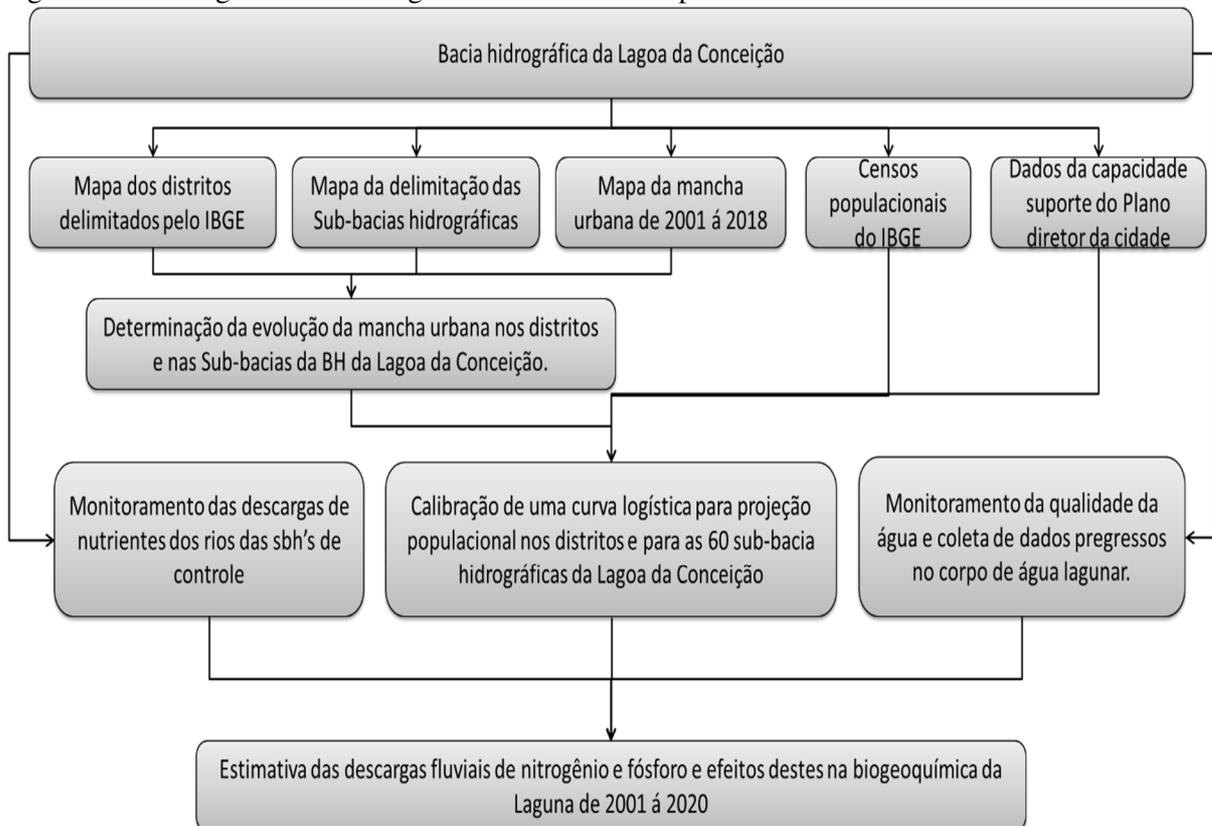
$$Ri = \frac{-g \frac{\partial \rho}{\partial z}}{\rho \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]} \quad (12)$$

Onde: para  $Ri \geq 1/4$ , a estratificação é estável, pelo que, para  $Ri < 1/4$ , existe mistura. A estratificação estável leva ao amortecimento da mistura turbulenta, enquanto a estratificação instável leva a uma mistura mais alta.

#### 2.4 ESTIMATIVA DOS APORTES DE NUTRIENTES DE FONTE NATURAL E ANTRÓPICA PARA A LAGOA DA CONCEIÇÃO

A fim de alcançar os objetivos deste capítulo, foram necessários o desenvolvimento e as adaptações de metodologias que envolveram a análise de imagens de satélite no Sistema de Informação Geográfica (SIG), coleta e análise de amostras de qualidade da água dos rios adjacentes à laguna e, por fim, a utilização de análises estatísticas e de modelos para representar os processos naturais e antrópicos no ambiente. A Figura 12 ilustra os dados necessários e os resultados esperados.

Figura 12 – Fluxograma metodológico da estimativa de aporte de nutrientes



Fonte: Elaborado pelo autor desta tese

Os dados da área de estudo foram obtidos diretamente por meio de campanhas de amostragem e análise em laboratório, além de coleta de dados retirados com outros pesquisadores que realizaram estudos entre os anos de 2001 a 2018. Os dados foram submetidos a uma análise de consistência e de tendências espaciais e temporais, utilizando as análises estatísticas de *Cluster*, Análise de Variância, Análise de Componentes Principais (ACP) e a modelagem LOICZ.

Em adição, foi aplicado o índice TRIX (VOLLENWEIDER; GIOVANARDI, 1998) que objetiva integrar dados físico-químicos em um único valor que represente o estado trófico de ambientes aquáticos. Os tópicos a seguir detalham os passos metodológicos.

#### 2.4.1 Aumento Populacional na Bacia Hidrográfica – Modelo Logístico (Verhulst)

O aumento populacional na cidade de Florianópolis tem se mostrado muito expressivo. Segundo dados do IBGE (2010), a cidade possuía 196 mil habitantes em 1970 e, após 40 anos, esse número subiu para 421 mil habitantes. Esse aumento populacional representa um crescimento de 114% da população em um período de 40 anos. Com essa taxa de crescimento populacional, Florianópolis é a capital brasileira que mais cresceu nesse período. Devido a esse grande crescimento populacional e ao fato de os dados de censo demográfico serem espaçados em 10 anos em média (muito escassos), se faz necessário que se compreenda a sua dinâmica para fazer projeções e compreender melhor essa tendência de crescimento.

O crescimento populacional segue uma relação matemática, segundo Cavallini (1993), a população tende assintoticamente a chegar a um número de saturação, chamado de capacidade-suporte. Cavallini (1993) apresenta a logística desta forma:

$$\frac{dm}{dt} = rm \left( 1 - \frac{m}{K} \right) \quad (13)$$

Sendo que  $t$  é o tempo;  $m = m(t)$  é a população;  $r$  = taxa máxima de crescimento; e  $K$  = capacidade suporte (população máxima).

Utilizando a separação de variáveis, tem-se como solução da equação logística:

$$m(t) = \frac{K}{1 + C_e^{-rt}} \quad (14)$$

Onde  $C$  é uma constante arbitrária. Calculando-se a derivada segunda de  $m$  com respeito a  $t$  e multiplicando-se o numerador e o denominador por  $e^{3rt}$ , tem-se que:

$$m''(t) = \frac{CKr^2 e^{rt} (C - e^{rt})}{(C + e^{rt_0})^3} \quad (15)$$

O gráfico de  $m = m(t)$  possui um ponto de inflexão quando a derivada segunda da equação acima é zero, que ocorre quando o numerador for zero, ou seja, quando  $C = e^{rt}$ . Substitui-se então  $C = e^{rt_0}$ , onde  $t_0$  é o momento em que o ponto de inflexão ocorre, tendo como solução:

$$m(t) = \frac{K}{1 + e^{-r(t-t_0)}} \quad (16)$$

#### 2.4.2 Definição da Capacidade-Suporte

No ordenamento territorial da cidade de Florianópolis, a população deve seguir a Lei n. 482, de 2014, que traz os usos prioritários do território em cada região do município. Essa lei foi elaborada considerando as diretrizes do desenvolvimento sustentável, à luz dos direitos humanos, e priorizando o patrimônio natural e cultural da cidade como prevê o artigo 2º.

O Plano Diretor do Município de Florianópolis é o pacto que visa organizar a ocupação do território municipal de forma a proporcionar qualidade de vida para o conjunto da população, baseado nos valores sociais e deve garantir o desenvolvimento sustentável, praticado em estreita correlação com o meio ambiente e o patrimônio cultural. O conjunto de princípios e regras desta Lei Complementar é o compromisso que transcende os interesses da população atual, trata-se de um pacto que protege a herança recebida da natureza e dos que no passado viveram na cidade e configura um trato de responsabilidade das atuais para com as futuras gerações de cidadãos de Florianópolis, para tanto, o Plano Diretor precisa ter como ponto de partida o reconhecimento geral e a proteção que couber ao patrimônio herdado pelas atuais gerações, formado pelas dotações da natureza e realizações do gênero humano. As áreas a serem ocupadas, as transformações que forem introduzidas, em maior ou menor intensidade, não podem deixar de considerar a responsabilidade sobre esses acúmulos. (BRASIL, 2014, art. 2º)

No entanto, existem muitas irregularidades no zoneamento da cidade. Conforme apontam Siqueira *et al.* (2020), o Plano Diretor da Cidade de Florianópolis foi aprovado às pressas e teve muitas alterações, o que mostra que o texto original foi escrito de forma inconsistente. De toda forma, segue valendo o zoneamento disponibilizado pela Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano (SMDU), que disponibilizou o mapa que está em vigência, ou seja, o aprovado pela Lei n. 482, de 2014, e suas alterações posteriores. Por meio do mapa, foi feita uma estimativa da população máxima permitida através da densidade máxima de ocupação para cada categoria de ocupação estabelecida pela lei.

### 2.4.3 Distribuição da População dos Distritos nas Sub-Bacias Hidrográficas

O plano diretor define no mapeamento quais são os distritos que compõem a cidade. A fim de determinar a população em cada sub-bacia hidrográfica ao longo do tempo, foram utilizadas as ferramentas de geoprocessamento e a partir do mapa em *shape file* da mancha urbana e do mapa dos distritos da Cidade de Florianópolis. Com a tabulação cruzada, foi possível obter a área urbana de cada distrito dentro das SBHs. Também foram calculadas a densidade populacional da mancha urbana de cada distrito para cada ano. A partir da densidade, foi feita a atribuição da população pela área de mancha urbana do distrito em cada SBH.

### 2.4.4 Monitoramento da Qualidade da Água da Laguna

Para avaliar as alterações na qualidade da água ao longo de um período de 20 anos, foi necessário realizar campanhas de amostragem, mas também a elaboração de um inventário com os dados de qualidade da água da Lagoa da Conceição que foram obtidos na literatura referente a estudos pretéritos realizados nos anos de 2001, 2003, 2005 e 2007. Uma descrição mais detalhada da bibliografia consultada ano a ano está apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 – Referência dos dados secundários utilizados para a análise histórica de qualidade da água da Lagoa da Conceição

Ano	Autor/ano de publicação	Método/número de amostras	Parâmetros
2001	Fonseca <i>et al.</i> (2002; 2004; 2006)	Amostragem em toda laguna/N=118	Qualidade da água
2003	Fontes (2004)	Amostragem em toda laguna/N=155	Qualidade da água
2005	Fontes (2009)	Amostragem em toda laguna / N=44	Qualidade da água
2007	Fontes (2009) Fontes <i>et al.</i> (2011)	Amostragem em toda laguna / N=70	Qualidade da água
2012	Bier (2013) Odreski (2012)	SIG/Modelagem	Entradas Hidrológicas
2013	Silva (2013)	Modelagem	Circulação hidrodinâmica
2015 a 2017	Este estudo	Amostragem em toda laguna e	Qualidade da água/ descargas de nutrientes/vazão dos rios

Foram obtidos dados referentes aos parâmetros: temperatura (°C, T), salinidade (PSU, S), concentração de fósforo inorgânico dissolvido ( $\mu\text{g}$ ).

Fonte: Elaborado pelo autor desta tese

Para cada ponto, foi medida a profundidade, utilizando um ecobatímetro da marca FishTaker, a temperatura e a salinidade na coluna de água foram coletadas a cada 0,5 m com auxílio de um perfilador CTD modelo CastAway da marca YSI. O pH e o oxigênio dissolvido foram medidos com um pHmetro da marca YSI modelo Ecosense e com um oxímetro da marca Schott modelo Handlab OX12. Para a análise de nutrientes e clorofila-a, foram coletadas amostras de água em superfície e em fundo com auxílio de garrafa Van Dorn de fechamento horizontal.

Após a realização das coletas, as amostras foram preservadas em caixas térmicas devidamente aclimatadas e abrigadas da luz até o processamento em laboratório, de acordo com as diretrizes para análise de qualidade da água de estuários de Lana *et al.* (2006). Uma vez em laboratório, as amostras de água foram filtradas utilizando filtro de microfibras de vidro de 47mm GF-5, conforme descrito por Strickland e Parsons (1972). Após a filtração, as amostras foram congeladas a -20°C até o momento da análise. Por ser a fração assimilável pelo fitoplâncton, o nitrogênio foi quantificado na forma inorgânica dissolvida (NID). O NID foi estimado pela soma das concentrações de N-amoniaco ( $\text{NH}_4$ ), nitrato ( $\text{NO}_3$ ) e nitrito ( $\text{NO}_2$ ), sendo estas estimadas por métodos colorimétricos com precisão de 0,7  $\mu\text{g.L}^{-1}$  (GRASSHOLF; KREMLING; EHRHARDT, 1999). O ortofosfato, o fósforo inorgânico dissolvido (PID) e o silicado ( $\text{SiOH}$ ) foram quantificados pelo método colorimétrico com precisão de 0,9  $\mu\text{g.L}^{-1}$ . As absorbâncias foram lidas em espectrofotômetro de duplo feixe Hitachi UV-290 a partir de calibração com soluções certificadas Merck® (GRASSHOLF; KREMLING; EHRHARDT, 1999). A biomassa fitoplantônica (clorofila-a) foi quantificada por fluorimetria com auxílio de um fluorímetro modelo da marca Turner Designer-Trilogy (STRICKLAND; PARSONS, 1972).

De modo a padronizar o esforço amostral, foi selecionado aleatoriamente um subgrupo dos dados por ano quando possível e foram descartados os anos com menor quantidade de dados. A Tabela 8 apresenta a densidade de amostragem por região e por datas de coletas.

Tabela 8 – Distribuição dos números de amostras utilizados para análise de tendência espacial e temporal da Lagoa da Conceição para cada região: Norte, Centro-Norte, Central e Sul

Ano	Dados por região				Total	Meses amostrados	Estações amostrais
	N	CN	C	S			
2001	7	3	10	12	32	5, 8, 9, 11	17
2003	8	8	8	8	32	6,7	17
2005	8	8	8	8	32	7	17
2007	4	4	13	11	32	4,5	16
2011	2	2	2	2	08	3	4

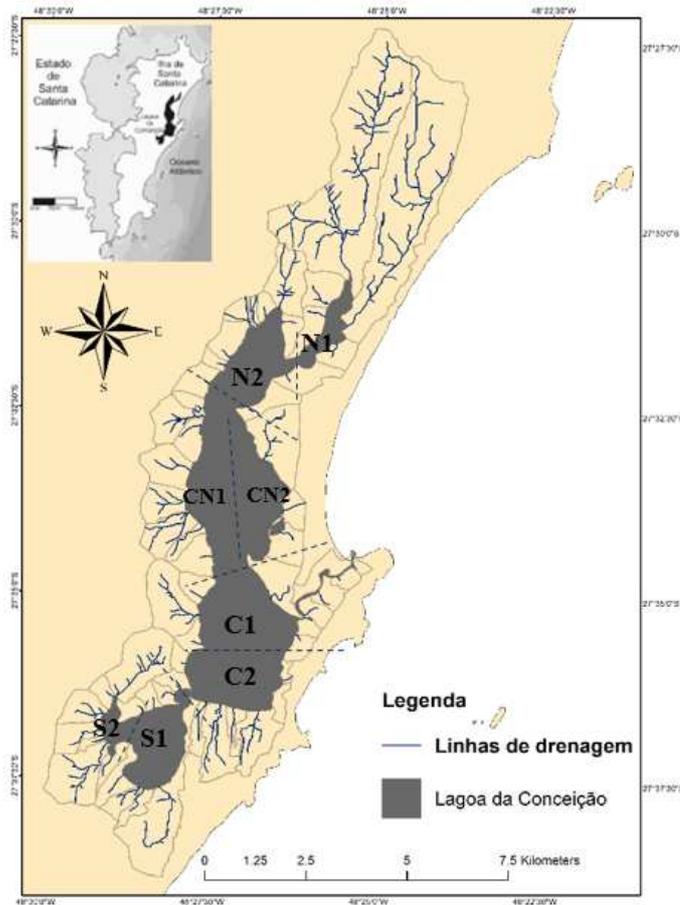
Ano	Dados por região					Meses amostrados	Estações amostrais
	N	CN	C	S	Total		
2015	8	4	10	10	32	3,8,9	16
2017	4	4	8		16	7,8	8
Total	41	33	59	51	184	4,5,6,7,8,9,11	91

São indicados os meses amostrados e o número de estações amostrais por ano de estudo.

Fonte: Elaborado pelo autor desta tese

A fim de aumentar a definição das análises de qualidade da água, cada setor foi ainda subdividido em duas partes, totalizando oito setores. Essa mesma setorização pode ser vista no trabalho de Silva *et al.* (2018) e se justifica pelos padrões de circulação hidrodinâmica da laguna (Figura 13).

Figura 13 – Oito setores hidrodinâmicos da laguna



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

## 2.4.5 Índice de Estratificação e Índice de Estado Trófico (TRIX)

A massa específica da água foi calculada para todas as amostras, utilizando-se dados de temperatura e de salinidade com o pacote de rotinas em MatLab TEOS 10 (MCDUGALL;

FEISTEL; MILLERO, 2010). O índice de estratificação da coluna d'água é feito pela diferença entre a massa específica de superfície e fundo, segundo Miranda, De Castro e Kjerfve (2002).

O processo de eutrofização no corpo de água foi estimado pelo Índice de Estado Trófico (TRIX). A metodologia do índice trófico (TRIX) foi primeiramente proposta por Vollenweider e Giovanardi (1998), que utilizaram uma série temporal de mais de 10 anos (1982-1993) de dados coletados no Mar Adriático para avaliar o seu grau de eutrofização.

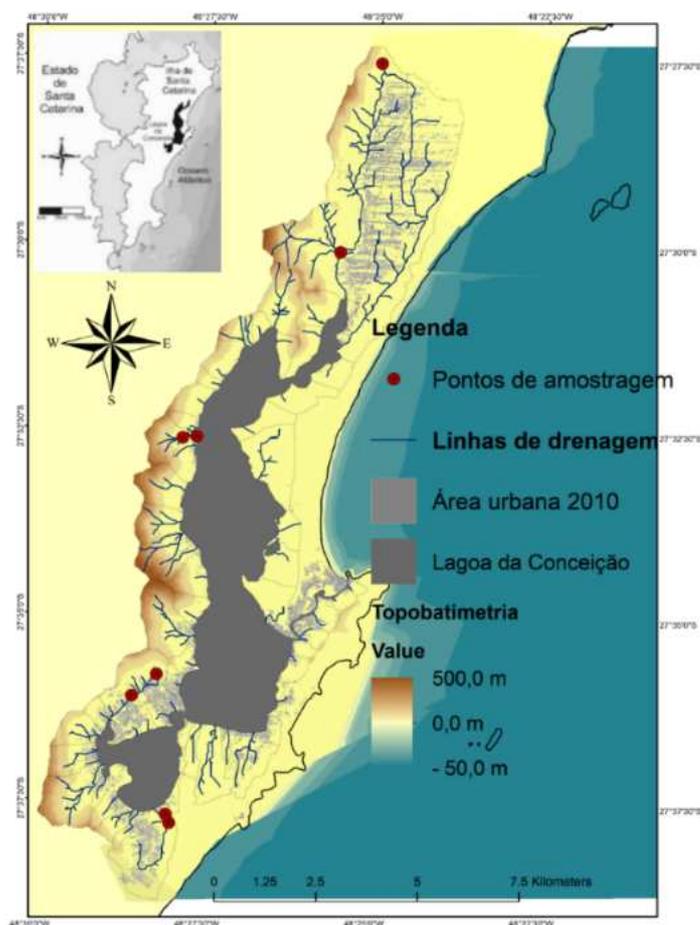
Esse índice trata-se de uma combinação linear logarítmica de quatro variáveis de estado, a qual agrega indicadores de pressão (nutrientes), resposta biológica (Cloro-a como estimativa de biomassa fitoplanctônica) e distúrbio na qualidade da água (através do OD). A formulação do TRIX pode ser encontrada na publicação de Vollenweider e Giovanardi (1998).

A classificação para águas estuarinas usando o TRIX foi feita por meio de valores limiares propostos por Penna, Capellacci e Ricci (2004), aplicados por Nasrollahzadeh *et al.* (2008) e adotados pela Legislação Ambiental da Itália (CARUSO *et al.*, 2010).

#### **2.4.6 Monitoramento dos Aportes Fluviais**

Os pontos de monitoramento escolhidos para representar as descargas fluviais foram a montante e a jusante da urbanização da SBH. As SBHs foram escolhidas de acordo com a relevância da bacia em termos de área em comparação com a área das UrHs. Também foram considerados sua representatividade em termos de declividade, o tipo de solo, o uso e a ocupação e taxa de ocupação urbana. A Figura 14 mostra os pontos de amostragem.

Figura 14 – Mapa da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição com os pontos de amostragem nos rios monitorados



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

A medição de velocidade do escoamento superficial dos quatro rios foi feita através dos métodos do Flutuador e do Flowmeter. Na primeira etapa de amostragem, foram realizadas 16 campanhas para levantamento de vazões e coleta de amostras para análise de nutrientes. As campanhas foram distribuídas aproximadamente a cada 21 dias e compreenderam o período de março de 2015 até março de 2016. Na segunda etapa de amostragens, foram realizadas oito campanhas para levantamento de vazões, no período de agosto a novembro de 2018. As amostragens de nutrientes nas nascentes dos rios foram realizadas também em duas etapas em seis campanhas de agosto a outubro de 2016 e três campanhas de agosto a novembro de 2018.

#### 2.4.7 Regionalização das Cargas de Nutrientes (N e P)

O planejamento amostral permitiu estimar as concentrações de nutrientes por fonte geoquímica (das nascentes) e o montante (geoquímica e antrópicas) na foz de cada rio. Dessa

forma, as cargas de nutrientes (nitrogênio e fósforo) foram calculadas considerando uma parcela geoquímica e outra geração de carga predominante de origem antrópica. Essa consideração foi feita, pois a ocupação urbana tem maior relevância para produção de cargas do que os demais usos do solo da Bacia Hidrográfica, que possui apenas áreas de vegetação ou urbanas em sua predominância.

A carga *per capita* foi calculada a partir da razão entre a diferença das cargas na nascente e foz dos rios pela população da SBH. Portanto, a carga *per capita* produzida por SBH é dada por:

$$W_{pcpa(SBH)} = \frac{\bar{W}_{(exutório)} - \bar{W}_{(nascente)}}{P_{(SBH)}} \quad (17)$$

As cargas *per capita*s para cada sub-bacia monitorada foram atribuídas para as bacias de mesma Unidade de Resposta Hidrológica, portanto, a carga por SBH não monitorada foi calculada.

$$W_{(SBH)} = \bar{W}_{(nascente)} + (W_{pcpa(SBH)} * P_{(SBH)}) \quad (18)$$

Onde:  $\bar{W}_{(nascente)}$  = Carga de N ou P na nascente do rio;  $W_{pcpa(SBH)}$  = Carga *per capita* da SBH.

Fazendo a soma das cargas de todas as SBHs, tem-se a carga total lançada para o corpo lagunar, como mostra a equação a seguir.

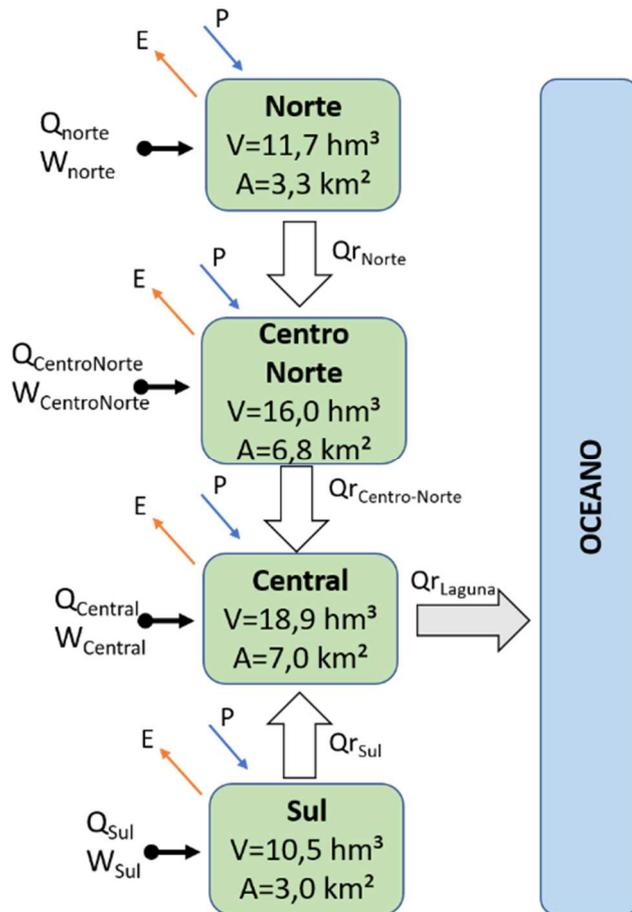
$$W_{BH} = \sum W_{SBH} \quad (19)$$

#### 2.4.8 Balanço de Fósforo e Nitrogênio no Sistema em Estado Estacionário – Aplicação do Modelo LOICZ

A Lagoa da Conceição foi modelada, considerando-se que ela se encontra na condição de equilíbrio dinâmico (estado estacionário) ano a ano, em períodos que a qualidade da água foi considerada uniforme. Para isso, a laguna foi compartimentada em quatro setores definidos por qualidade da água e por salinidade uniforme no setor. A Figura 15 apresenta o diagrama de setorização da laguna, no qual são indicados a área (km<sup>2</sup>) e o volume (hm<sup>3</sup>) de cada compartimento.

Como os processos estão sendo avaliados na média interanual, a evaporação (E) e a precipitação (P) foram consideradas uniformes sobre a superfície d'água no espaço e no tempo. Na Figura 15 são indicadas as vazões (Q), as descargas hidrológicas (W) e a vazão residual (Qr) que são trocadas entre os compartimentos e entre a laguna e o oceano, também a nível de médias anuais.

Figura 15 – Modelo conceitual de balanço de massa LOICZ-2D para a Lagoa da Conceição



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Onde:  $Q_h$  = Vazão das descargas hidrológicas;  $Q_a$  = Descargas antrópicas geradas na Bacia hidrográfica;  $P$  = Precipitação na lamina d'água;  $E$  = Evaporação;  $Q_r$  = Volume trocado ou vazão residual entre os compartimentos.

A evaporação ( $\text{mm.mês}^{-1}$ ) foi calculada a partir da temperatura atmosférica, conforme descrito por Miranda, De Castro e Kjerfve (2002). O escoamento superficial (VQ) da bacia hidrográfica foi calculado pelo método de regionalização desenvolvido e apresentado neste trabalho. O equacionamento para o balanço de sal e de nutrientes é explicado em detalhes em Gordon *et al.* (1996).

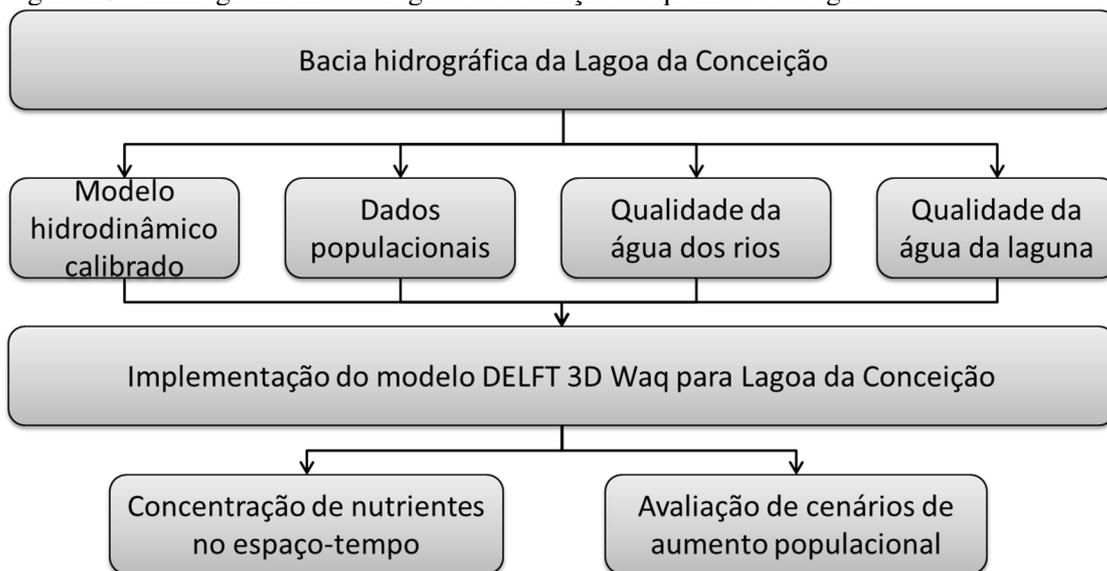
O balanço tem como meta determinar o metabolismo do ecossistema costeiro em estudo, identificando-o como fonte ou sumidouro desses elementos. A diferença entre a produção primária e a respiração de um ecossistema é definida como “produção ou metabolismo líquido”. Para tanto, esse cálculo tem como base o modelo estequiométrico da matéria orgânica prevalente no ecossistema estudado. Ao considerar que a base da produção primária é a comunidade fitoplanctônica, os processos de produção primária dessa matéria

orgânica são resumidamente descritos pela razão estequiométrica de Redfield, de 106C:16N:1P, caracterizada para o fitoplâncton.

## 2.5 CONSTRUÇÃO DO MODELO NUMÉRICO ACOPLADO À QUALIDADE DA ÁGUA DA LAGUNA – DELFT-3D WAQ

A fim de avaliar a implicação do crescimento populacional na Lagoa da Conceição, foi implementado o modelo hidrodinâmico e de qualidade da água. Essa implementação envolveu a análise de imagens de satélite e as análises em SIG para determinar as contribuições hidrológicas, a coleta e a análise de amostras de qualidade da água dos rios adjacentes à laguna e ao oceano para determinar as concentrações de nutrientes nos rios, na laguna e no oceano, e a utilização de métodos estatísticos e modelos para representar o aumento populacional na bacia hidrográfica. A Figura 16 ilustra os dados necessários e os resultados esperados.

Figura 16 – Fluxograma metodológico da avaliação da qualidade da água



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Os dados da área de estudo foram obtidos diretamente através de campanhas de amostragem e de análise em laboratório, além de coleta de dados retirados com outros pesquisadores que realizaram estudos entre os anos de 2001 a 2018.

### 2.5.1 Modelo de Qualidade da Água Delft-3D Waq

Para o presente estudo, foi utilizado o modelo numérico Delft-3D, desenvolvido pela Deltares, em Delft, Holanda. O modelo Delft-3d possibilita o acoplamento entre o modelo

hidrodinâmico (Flow) e o de qualidade da água (Waq), sendo que as condições hidrodinâmicas (velocidades, elevação da água, densidade, salinidade, viscosidade vertical e difusividade) calculadas no módulo Delft-3D Flow são utilizadas como entrada para os módulos D-Water Quality qualidade de água (D-Waq).

O modelo de qualidade da água do Delft (D-Water Quality) aplica a lei de conservação da massa em um reator bem misturado para cada célula da grade numérica. A equação a seguir representa os cálculos realizados para cada parâmetro de qualidade da água utilizado.

$$M_i^{t+\Delta t} = M_i^t + \Delta t \times \left( \frac{\Delta M}{\Delta t} \right)_{Tr} + \Delta t \times \left( \frac{\Delta M}{\Delta t} \right)_P + \Delta t \times \left( \frac{\Delta M}{\Delta t} \right)_S \quad (20)$$

Onde:  $M_i^t$  é a massa no início de um passo de tempo:

- a)  $M_i^{t+\Delta t}$  é a massa no final de um passo de tempo;
- b)  $\Delta M / \Delta t_{Tr}$  é a transferência de massa pelo transporte;
- c)  $\Delta M / \Delta t_P$  são as mudanças por meio de física (processos bio) químicos ou biológicos; e
- d)  $\Delta M / \Delta t_S$  são as mudanças por fontes (por exemplo, cargas de resíduos, descargas de rios).

A massa transportada pela água que flui de uma célula para a próxima serve como um termo negativo no balanço de massa na primeira célula computacional e como um termo positivo na segunda célula computacional. Ao combinar células computacionais em uma, duas ou três dimensões, cada sistema de água pode ser representado, e as substâncias podem ser transportadas por meio de células computacionais e, portanto, através do sistema de água. Quando se leva em consideração que, dentro de uma célula computacional, as substâncias podem ser convertidas em outras substâncias, deve-se incluir processos de qualidade da água. Por exemplo, a nitrificação converte amônio ( $\text{NH}_4$ ) em nitrato ( $\text{NO}_3$ ), resultando em um termo negativo no balanço de massa de amônia dessa célula computacional e um termo positivo no balanço de massa de nitrato. Finalmente, é possível adicionar massa a uma célula computacional que se origina de fora do sistema de água modelado. Os processos biogeoquímicos da água estão associados ao modelo Delft-3D Waq através da biblioteca de processos biogeoquímicos.

### 2.5.2 Construção do Modelo de Qualidade da Água

O modelo de qualidade da água foi construído a partir do cenário de modelagem do Delft-3D Flow com cinco camadas verticais descrito no Capítulo 4 desta tese. Para obter

resultados de concentração próximos aos valores encontrados usualmente na laguna, foi realizada uma análise de sensibilidade dos parâmetros de calibração para o ano de 2015.

Os dados de vazão e de concentração de nutrientes dos rios foram atribuídos a cada uma das 60 entradas hidrológicas apresentadas nos resultados anteriores da tese de forma que essa é a integração total dos resultados alcançados nesta pesquisa.

Os valores das concentrações de nutrientes, de salinidade e de temperatura da fronteira oceânica utilizados na modelagem foram obtidos por coletas realizadas por outros pesquisadores apontados na literatura. A Tabela 9 apresenta os dados e a fonte dos dados utilizados.

Tabela 9 – Condições de contorno de qualidade da água na fronteira oceânica do modelo

<b>Parâmetro de qualidade da água</b>	<b>Valores constantes na fronteira oceânica</b>	<b>Fonte</b>
<b>Temperatura da água</b>	16°C	Dalbosco (2019)
<b>Salinidade</b>	34 PSU	Dalbosco (2019)
<b>Amônio (NH<sub>4</sub>)</b>	0,05 gN/m <sup>3</sup>	Relatório projeto Maare (SEGAL <i>et al.</i> , 2017)
<b>Nitrato (NO<sub>3</sub>)</b>	0,08gN/m <sup>3</sup>	Relatório projeto Maare (SEGAL <i>et al.</i> , 2017)
<b>Fosfato (PO<sub>4</sub>)</b>	0,005gP/m <sup>3</sup>	Relatório projeto Maare (SEGAL <i>et al.</i> , 2017)

Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Destaca-se que o modelo foi construído sobre os processos que poderiam ser calibrados com o banco de dados disponível, portanto, foram utilizados amônio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) e fosfato (PO<sub>4</sub><sup>-</sup>).

### 2.5.3 Estimativa de Aumento das Cargas de Nutrientes de Fonte Antrópica

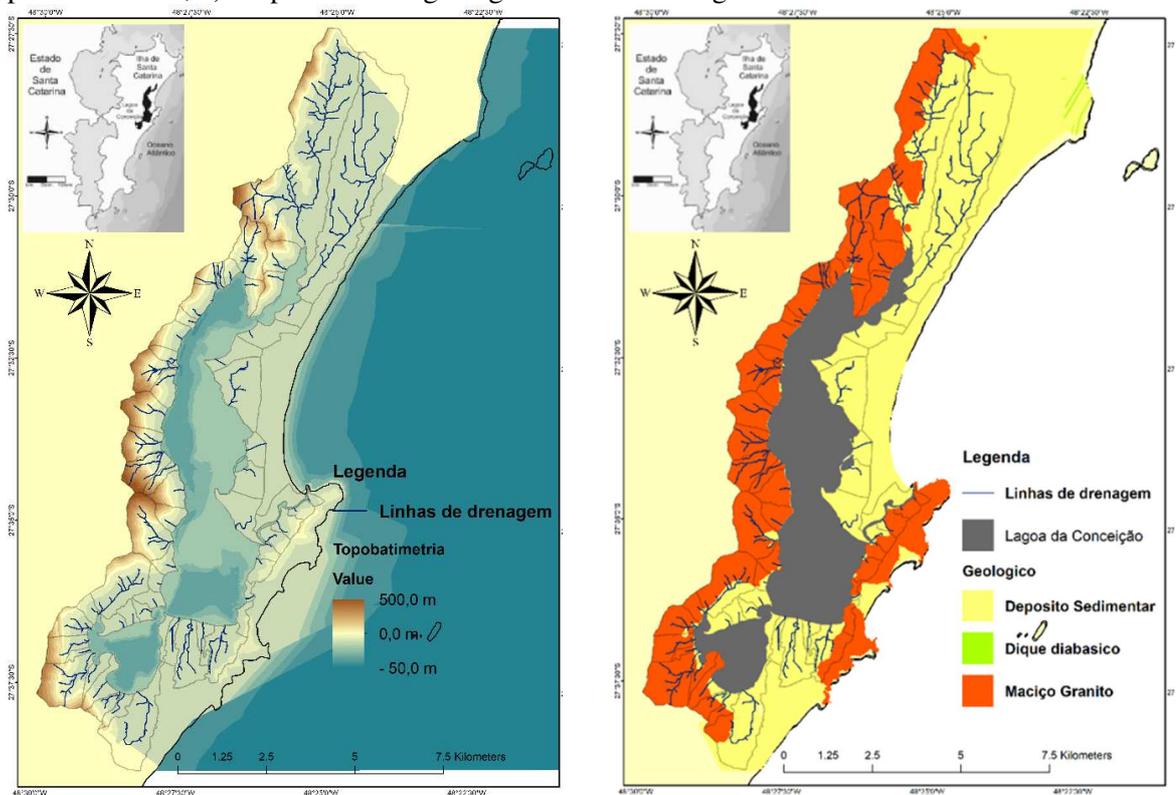
As entradas fluviais foram caracterizadas de acordo com as concentrações de nutrientes encontradas nas coletas de campo no ano de 2015 e 2016 e pelo modelo de aumento populacional calibrado para a Bacia Hidrográfica. Os resultados preliminares desse levantamento serão apresentados nas seções 3.1 e 3.3 desta tese.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 ESTIMATIVA DOS APORTES POR DESCARGA SUPERFICIAL PARA O CORPO DE ÁGUA

A fim de analisar os aportes fluviais, foi realizada uma descrição do ambiente físico da bacia hidrográfica. A partir do Modelo Digital de Terreno, foi possível identificar 60 SBHs, como mostra a Figura 17.

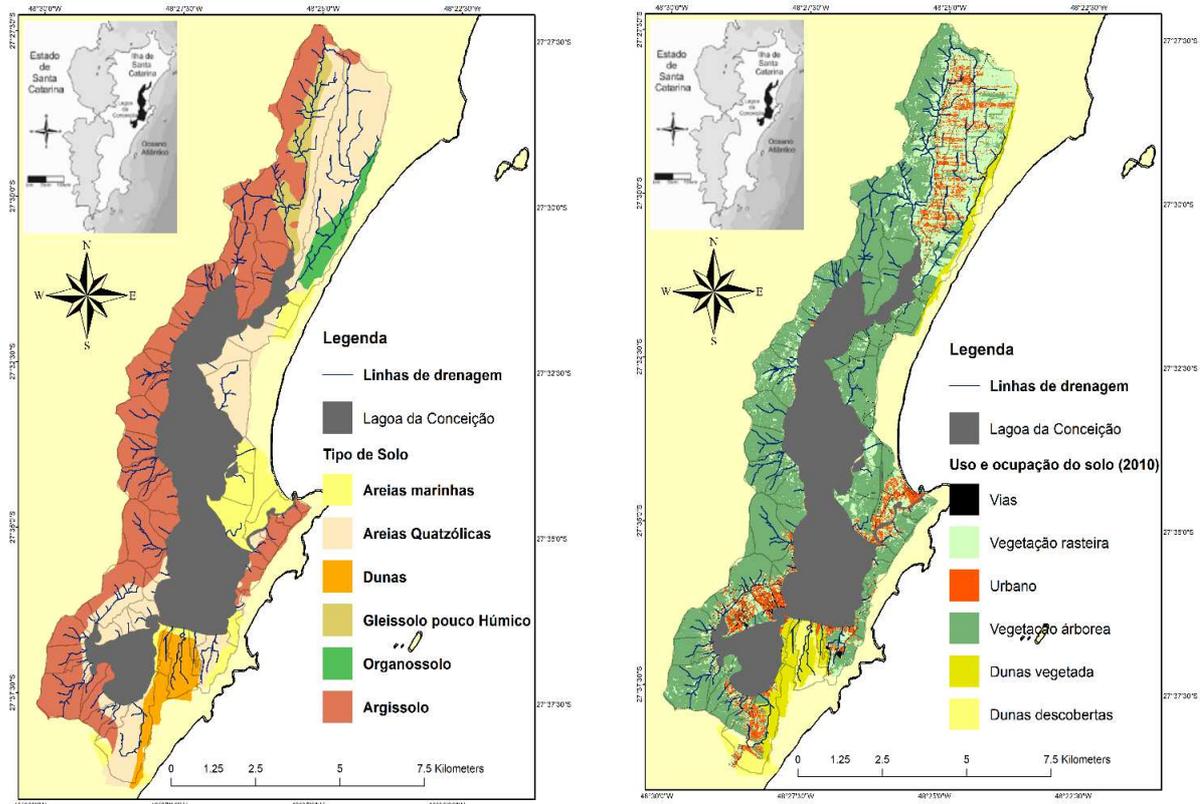
Figura 17 – a) Topo Batimetria da Bacia hidrográfica da LdC com as linhas drenagem obtidas por geoprocessamento; b) Mapa da matriz geológica da bacia hidrográfica da LdC



Fonte: a) Elaborada pelo autor desta tese (2020); b) Adaptada de Horn Filho e Livi (2013)

As porções Oeste, Sul e nas proximidades do Canal da Barra da Lagoa apresentaram maior quantidade de SBHs, sendo essas menores em área ( $< 1 \text{ km}^2$ ), circulares (índice de compacidade próximo de 1 e com declividades muito acentuadas ( $22^\circ$  a  $51^\circ$ ). Essas áreas representam os afloramentos granito-Ilha e granito-Itacorubi (Figura 18b) que compõem o maciço central da Ilha de Santa Catarina (HORN FILHO; LIVI, 2013).

Figura 18 – a) Mapa de tipo de solo da Bacia hidrográfica da LdC; b) Mapa de uso e ocupação do solo da Bacia Hidrográfica da LdC de 2010



Fonte: a) Adaptada de Embrapa (2004); b) Adaptada de Lemétayer e Odreski (2011)

Ainda sobre a porção Oeste, essa área é caracterizada por tipo de solo Argissolos pouco profundos como mostra a Figura 18-A (EMBRAPA SOLOS, 2004) e presença de floresta ombrófila densa (LEMÉTAYER; ODRESKI, 2011) e baixa ocupação urbana (<10%). Esse conjunto de características geomorfológicas favorece o escoamento superficial ( $70 < CN < 90$ ).

A porção Leste da BH foi formada por depósitos eólicos, marinho-praial, lagunar e flúvio-lagunar apresentando SBHs com baixa declividade ( $1^\circ$  a  $8^\circ$ ), tamanho intermediário (até  $2,5\text{km}^2$ ) e formato mais alongado (índice de compacidade entre 1,5 e 2,5). Com exceção das áreas de parque (bosques de pinheiros), as SBHs apresentam taxas elevadas de ocupação (até 30%), dunas descobertas, vegetação rasteira e solo composto de areias quartzólicas e areias marinhas, resultando em baixo escoamento superficial ( $20 < CN < 40$ ), isso faz com que a maior parte do volume precipitado seja infiltrada no solo.

A porção Norte é composta das duas maiores SBHs da BH ( $> 8,7\text{ km}^2$ ), sendo a porção Oeste caracterizada por afloramento granítico, elevada declividade ( $30^\circ$ ), vegetação arbórea e elevado escoamento ( $CN = 76$ ). A SBH Leste é caracterizada por depósitos lagunar praial e dique flúvio-lagunar com baixa declividade ( $\sim 5^\circ$ ) vegetação rasteira, escoamento baixo ( $CN = 40$ ) e ocupação urbana em torno de 15%. Na região Sul da BH, destacaram-se as porções

sedimentares de formação de dunas, nas quais os valores de CN são extremamente baixos ( $20 < CN < 30$ ) e se espera predomínio da infiltração da água da chuva.

Para compreender a importância das variáveis descritoras de terreno nas sub-bacias hidrográficas da laguna, foi realizada a análise de componentes principais. A matriz de variância explicada e os autovalores são apresentados na Tabela 10.

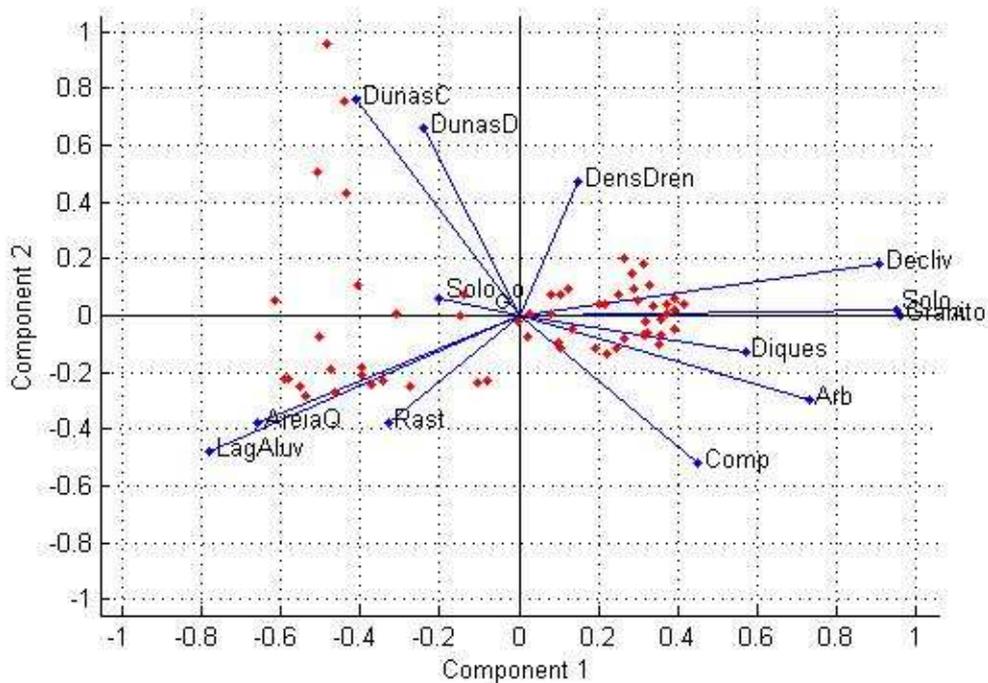
Tabela 10 – Variância explicada para os fatores da PCA para os descritores de terreno – componentes até autovalor de 1,0

Componentes	Autovalor	% da variância	Autovalor acumulado	% da variância acumulada
1	5.2	39.7	5.2	39.7
2	2.2	16.7	7.3	56.4
3	1.5	11.5	8.8	68.0
4	1.2	9.2	10.0	77.2

Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

A partir da análise de componentes principais, verificou-se que as três primeiras componentes explicam 68% da variabilidade total dos dados, dando subsídios para uma boa análise da bacia. O diagrama biplot dos resultados é apresentado na Figura 19.

Figura 19 – Diagrama biplot da primeira e segunda componente da PCA para os descritores de terreno da Bacia Hidrográfica da LdC



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

A declividade média, o percentual da bacia com formação granítica, o percentual da bacia com o tipo de solo argissolo e percentual de cobertura florestal dominaram a primeira componente da PCA, mostrando a relevância da segregação longitudinal da bacia hidrográfica – Costa Leste composta em maior parte de bacias planas, formação sedimentar e solo arenoso e Costa Oeste Continental caracterizada por ser montanhosa, com formação granítica, tipo de solo argiloso e cobertura florestal. O segundo fator explica o índice de compacidade e a densidade de drenagem – que descrevem a forma mais alongada ou arredondada da bacia e sua capacidade de drenagem – revelando que existem também grandes diferenças para esses parâmetros nas SBHs da Lagoa da Conceição. Ainda no segundo fator aparece a formação geológica de dunas e dunas descobertas, mostrando ser uma característica relevante para distinguir as diferentes SBHs da laguna. O terceiro fator está fortemente relacionado ao solo orgânico, que é encontrado em maior porção na região Norte da BH, com destaque para as bacias do rio João Gualberto Soares e o rio Vermelho, os dois maiores tributários da BH. A Tabela 11 mostra a correlação das variáveis com os fatores da PCA.

Tabela 11 – Importância das variáveis nos fatores da PCA

	Componente 1	Componente 2	Componente 3	Componente 4
Declividade média (%)	<b>-0.91</b>	0.18	0.11	0.11
Granito	<b>-0.96</b>	0	0.14	-0.04
Areias	<b>-0.95</b>	0.02	0.13	-0.05
Vegetação Arbórea	<b>-0.73</b>	-0.3	-0.26	-0.41
Diques	<b>-0.57</b>	-0.13	0.28	0.47
Índice de compacidade	-0.45	<b>-0.52</b>	-0.35	0.15
Densidade de drenagem	-0.15	<b>0.47</b>	0.21	<b>-0.69</b>
Solo Orgânico	0.2	0.06	<b>0.75</b>	-0.26
Dunas Descobertas	0.24	<b>0.66</b>	-0.19	0.16
Vegetação Rasteira	0.33	<b>-0.38</b>	0.7	0.27
Dunas Cobertas	0.41	<b>0.76</b>	-0.08	0.25
Areias	<b>0.66</b>	-0.38	0.08	-0.21
Quartzolíticas	<b>0.66</b>	-0.38	0.08	-0.21
Lagunar Aluvional	<b>0.78</b>	-0.48	-0.2	-0.13

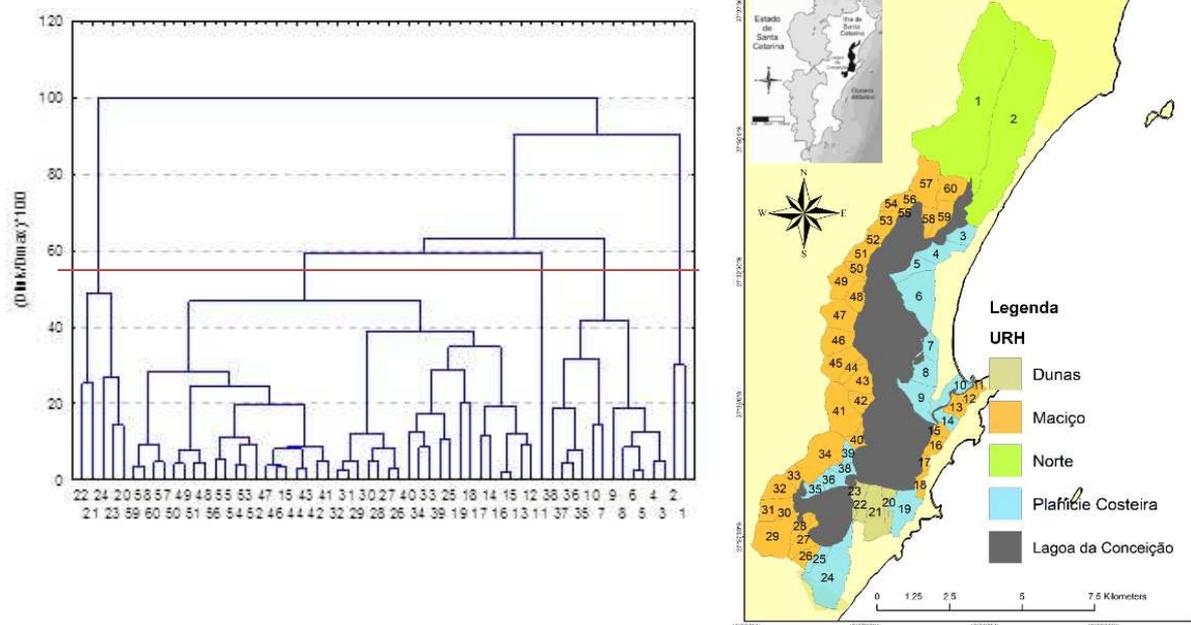
Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

A análise de agrupamento (*Complete Linkage*) foi realizada com os principais parâmetros de cada componente da PCA e resultou em quatro grupos de SBHs (Figura 20). O grupo mais distinto dos demais são as SBHs 1 e 2, situadas no setor Norte (cinza), estas possuem as maiores áreas, os maiores índices de compacidade e as maiores densidades de drenagem. Os

demais agrupamentos (até 55% da maior distância) foram o Maciço Oeste, canal e Centro-Sul (verde), as Areias Leste (amarelo) e Dunas do Porto (roxo).

A análise de agrupamento (*Complete Linkage*) foi realizada com os principais parâmetros de cada componente da PCA e resultou em quatro grupos de SBHs (Figura 20). O grupo mais distinto dos demais são as SBHs 1 e 2, situadas no setor Norte (verde), estas possuem as maiores áreas, os maiores índices de compacidade e as maiores densidades de drenagem. Os demais agrupamentos (até 55% da maior distância) foram o Maciço Oeste, canal e Centro-Sul (amarelo), as Planície Costeira (azul) e Dunas do Porto (bege).

Figura 20 – Dendograma do agrupamento das Sub-Bacias Hidrográficas da Lagoa da Conceição pelos parâmetros geomorfológicos



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Utilizando como fatores os grupos obtidos pelo dendograma e a variável de resposta aos componentes principais da PCA, o teste de Kruskal Wallis confirmou com 99,9% de confiança que existem diferenças significativas na distribuição das SBHs da Lagoa da Conceição. O teste *post-hoc* de múltiplas comparações mostrou nível de significância de 0,01%, já que podem ser considerados quatro grupos principais de SBHs ou Unidades de Resposta Hidrológica (UrH) (Figura 5), sendo UrH Norte, UrH Maciços, UrH Planície Costeira e UrH Dunas (Sul) (Figura 9).

As principais características de forma podem ser visualizadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Características fisiográficas e morfológicas das Bacias Hidrográficas agrupadas por UrHs

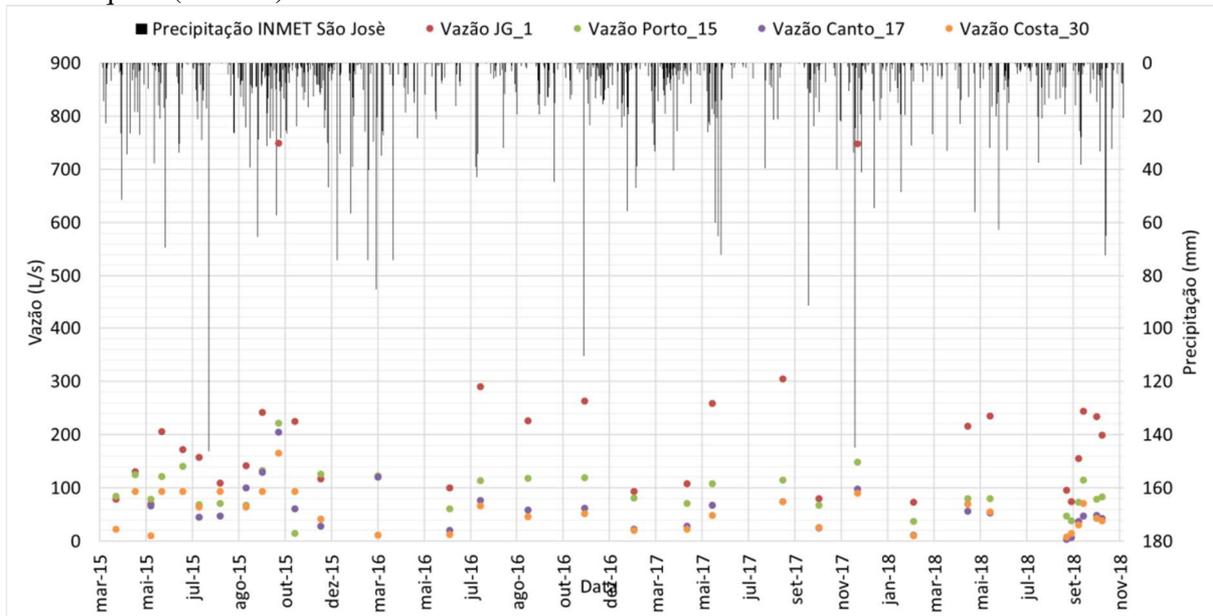
	<b>Norte 19km<sup>2</sup></b>		<b>= Planície costeira 8km<sup>2</sup></b>		<b>= Maciços = 24 km<sup>2</sup></b>		<b>= Dunas = 5 km<sup>2</sup></b>		<b>BH = 56km<sup>2</sup></b>	
	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
<b>Declividade média (%)</b>	16	15.0	3.5	2.4	37.3	7.8	19.4	6.6	28.4	16
<b>Densidade de drenagem</b>	3	0.2	0.9	0.5	1.8	1.5	2.1	1.3	1.7	1
<b>Índice de compacidade</b>	2	0.0	1.5	0.2	1.5	0.2	2.1	0.3	1.5	0
<b>Urbanização (%)</b>	11	2.4	24.5	29.0	6.2	8.3	13.2	11.4	10.6	16
<b>CN</b>	59	24.2	35.2	12.9	80.5	15.1	40.3	2.7	67.4	24

Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

### 3.1.1 Determinação das Vazões nas SBHs de Controle

Os quatro rios monitorados são corpos d'água rasos, com profundidade máxima de um metro e largura e média de dois metros. As vazões monitoradas nas cinco SBHs se mantiveram entre 20 e 200 L/s em todos os anos de monitoramento (Figura 4). Segundo a climatologia de chuva da estação convencional de Florianópolis – SC (código 83897 – latitude -27.58° e longitude -48,56°) do INMET, a precipitação acumulada mensal média no período de janeiro de 2015 a janeiro de 2016 foi de 145 mm, 15% acima do normal climatológico da região que é de 126 mm mensais (Figura 4). Apenas no rio João Gualberto foram observadas vazões maiores do que 200 L/s, sendo que, em períodos chuvosos, as vazões aumentam progressivamente, alcançando uma vazão de 748 L/s em outubro de 2015, após uma precipitação acumulada nos cinco dias anteriores de 78 mm e uma vazão de 749 L/s em novembro de 2017, após uma precipitação acumulada nos cinco dias anteriores de 118 mm (Figura 21).

Figura 21 – Vazão dos rios nas SBH de controle da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição de março de 2015 a novembro de 2018 e no eixo secundário a precipitação acumulada diária em Florianópolis (INMET)



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

A característica do rio João Gualberto em termos de resposta aos eventos de chuva foi diferente das demais bacias. Isso pode ser atribuído à área da SBH e às características de baixa declividade, fazendo com que suas vazões pudessem continuar aumentando em ritmo maior do que as outras SBHs no último período. A SBH em questão apresenta uma área total de 10 km<sup>2</sup>, sendo a maior SBH da bacia, enquanto as outras SBHs monitoradas variam de 0,97 a 2,37 km<sup>2</sup>. A declividade média do talvegue é relativamente baixa, fazendo com que o tempo de concentração seja mais alto, isso fez com que essa bacia apresentasse maiores valores de vazão associados às chuvas acumuladas nos dias anteriores.

As vazões médias e os valores mínimos e máximos ao intervalo de confiança populacional (IC-95%) dos valores de vazão encontrados, bem como as características das SBHs, podem ser verificados na Tabela 13.

Tabela 13 – Descrição hidrológica das sub-bacias monitoradas

SBH	Área km <sup>2</sup>	Declividade média	Densidade de	Índice de Compacidade de	CN	% de Urbanização	Q min. L/s (IC 95%)	Q média geométrica	Q max. (IC 95%)	Q específica média
1	9.9	27%	2.7	2.1	76	9%	127.86	167.39	212.03	15
24	2.4	18%	1.6	1.8	44	25%	19.21	51.06	31.85	16
34	1.9	29%	2.1	1.5	64	16%	37.71	46.96	62.54	21
49	0.9	41%	2.6	1.6	90	2%	28.21	43.59	46.78	49

Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Os valores da média geométrica das vazões de cada rio indicam que a maior vazão é a do rio João Gualberto (167 L/s), seguido pelo rio do Porto (51 L/s), Costa (43 L/s) e Centrinho (46 L/s) da Lagoa. Os valores nos limites superior e inferior do intervalo de confiança (IC-95%) mostram que a vazão dos rios está entre 32 L/s (Centrinho) e 212 L/s (rio João Gualberto).

A vazão específica média (qps) das SBHs monitoradas foi de 30 L/s.km<sup>2</sup>, maior do que o valor encontrado por Garbossa *et al.* (2017) de 20 L/s.km<sup>2</sup> para 48 BHs de pequeno porte localizadas nas proximidades da ilha de Florianópolis. A qps da sub-bacia da Costa da Lagoa apresentou valores mais elevados (49 L/s.km<sup>2</sup>), e isso pode estar associado com o tipo de solo predominante (argissolo) e com a alta declividade do terreno (declividade=0,42m/m). A vazão específica média da sub-bacia do Canto da Lagoa foi a segunda mais expressiva (21 L/s.km<sup>2</sup>), em virtude do solo argiloso e da declividade do terreno (declividade = 0,37 m/m), fazendo com que a água das chuvas não infiltre no solo, o que provoca um maior escoamento superficial. Essa SBH também tem a maior amplitude de valores de vazão específica, provavelmente se deve à pequena área da bacia hidrográfica (0,96 km<sup>2</sup>), uma vez que normalmente bacias de pequena dimensão são mais sensíveis a precipitações intensas devido ao menor amortecimento do escoamento, assim como relatado por Nadal-Romero, Regüés e Latron (2008).

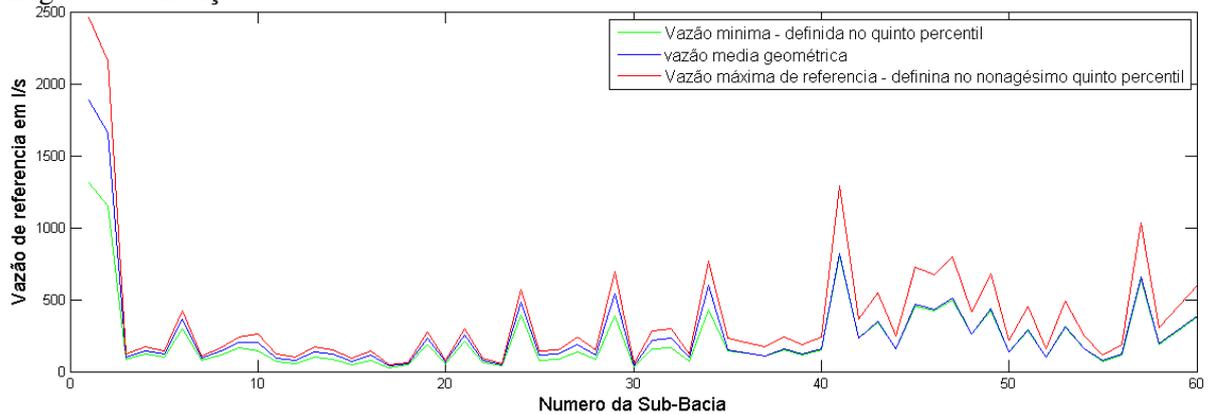
A SBH do rio João Gualberto tem a menor vazão específica média entre as SBHs monitoradas (15 L/s.km<sup>2</sup>). Essa SBH possui significativa porcentagem de areias quartzólicas (43%) em sua composição de solo, ocasionando elevada infiltração no solo. É interessante notar que a bacia do rio João Gualberto apresenta a maior área de contribuição drenante. Isso foi verificado em estudos anteriores (PRUSKI *et al.*, 2004; ERMENEGILDO *et al.*, 2012), nos quais os autores observaram uma redução da vazão específica com o aumento da área de contribuição.

A SBH do Porto da Lagoa, mesmo apresentando solo predominantemente composto de areias e dunas, teve uma vazão média específica similar à do rio João Gualberto (15 L/s.km<sup>2</sup>). Isso poderia ser explicado pela alta urbanização, que cobre aproximadamente 19% da área da SBH, sendo essa a maior porcentagem urbana entre as SBHs monitoradas. Além disso, segundo Borges (1996), a região da SBH do porto faz parte do aquífero Campeche, que possui grande influência nos corpos d'água superficiais da região, pode ser alimentada por escoamentos subterrâneos provenientes de bacias vizinhas, essa característica é observada em regiões planas, de depósitos sedimentares permeáveis, conforme apontam Garcez e Alvarez (1988).

### 3.1.2 Regionalização de Vazões de Referência

Com os valores de vazão específica calculados através da média geométrica das vazões e para o intervalo de confiança de 95% e os valores de vazões antrópicas, foi possível representar as entradas de vazão ao longo da linha de costa como apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Vazões de referência regionalizadas para as Sub-Bacias Hidrográficas que drenam para a Lagoa da Conceição



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

As maiores vazões foram observadas nos exutórios da UrH Norte, isso se deve a sua maior proporção em área das demais bacias. As SBHs da margem Oeste predominam em áreas pequenas, porém a declividade é alta e o tipo de solo é argiloso, favorecendo o escoamento superficial. Na margem Sul (dunas), uma das bacias se destaca (porto da lagoa) pela maior área de contribuição. As SBHs da margem Leste apresentam as menores contribuições de vazão devido à pequena área de contribuição, tipo de solo arenoso com baixo CN e baixa declividade.

A Tabela 14 apresenta o valor da vazão média hidrológica, da vazão antrópica total por Unidades Hidrológicas e da vazão total estimada para bacia da Lagoa da Conceição.

Tabela 14 – Vazões estimadas e descritores explicativos para as Unidades de Resposta Hidrológica da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição

	Vazão Hidrológica (L/s)	Vazão Antrópica (L/s)	Vazão total (L/s)	% da Vazão total	Área km <sup>2</sup>	CN
<b>Q UrH Norte</b>	354.44	23.17	377.61	22%	18.62	59.1
<b>Q UrH Planície costeira</b>	116.31	4.97	121.28	7%	5.86	25.9
<b>Q UrH Maciços</b>	1031.27	29.53	1060.80	63%	24.15	78.4
<b>Q UrH Dunas</b>	121.47	12.12	133.59	8%	6.12	37.8
<b>Total da BH</b>	1623.48	69.80	1693.28	100%	54.75	50.3

Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Verifica-se que a UrH dos Maciços é responsável por 63% da vazão total de água doce que entra na laguna, essa contribuição se dá ao longo de toda extensão da margem Oeste, e a UrH possui apenas 34% de área de superfície da BH, o que mostra a importância das características físicas dessa UrH na produção de vazão. As SBHs da UrH apresentam alta declividade e baixa permeabilidade pelo tipo de solo argiloso (CN 78). A UrH Norte contribui com aproximadamente 22% da vazão total e possui cerca de 22% da área superficial da bacia e tipo de solo composto de áreas de argissolo e de áreas de gleissolo pouco húmico (CN 60) e uma área urbanizada de 9,7%, porém com baixa declividade e alta permeabilidade. As UrHs de menor contribuição são as UrHs das Dunas com 8%, e a UrH Planície sedimentar com 7% da vazão, ambas possuem 11% da área cada e o solo predominantemente é composto de areias e dunas (CN 26 e CN 38), além da baixa declividade.

A vazão antrópica total é de aproximadamente 70 L/s, que representa 4% de toda água doce que entra no corpo de água. Segundo Cabral, Bercovich e Fonseca (2019), os sistemas individuais e coletivos de tratamento de esgotos da bacia são insuficientes para o tratamento destes, e o lançamento das águas residuárias representa um dos fatores mais importantes para eutrofização encontrada no corpo de água.

### 3.1.3 Importância Hidrológica para os Setores da Laguna

A vazão total de água doce que incide na laguna pelas entradas hidrológicas é de 1.630 L/s, e sua vazão específica média é de 30 L/s km<sup>2</sup>, representando um valor expressivo em termos de usos nobres como abastecimento público. Estima-se que seria possível atender aproximadamente a uma população de 44 mil pessoas, considerando o uso de 5% da vazão média de água doce que entra na laguna e um consumo *per capita* de 160 L/ hab. dia. Algumas

bacias já servem como abastecimento, como é o caso das bacias prístinas da Costa Oeste – onde não existe rede de abastecimento público. Segundo a Prefeitura Municipal da cidade, a água que abastece essa região é majoritariamente do sistema de abastecimento de água do rio Cubatão (bacia continental) tendo que ser transportada por dezenas de quilômetros até chegar a seu destino final.

Aproximadamente 63% da contribuição hidrológica total é drenada para a parte Norte da laguna, demonstrando o efeito das entradas hidrológicas na região. A região Sul recebe 20% do total de água doce drenada para laguna e, apesar de ser uma contribuição menor do que a região Norte, apresenta a menor salinidade do corpo de água devido à existência de uma única conexão restrita com a região Central e, portanto, maior influência das águas doces – isso torna essa região ainda mais abrigada e uma circulação de embarcações ainda menores do que a da laguna, porém as concentrações de nutrientes e os índices de eutrofização são altíssimos quando comparados aos demais setores da laguna – como apresentado por Silva *et al.* (2017). Já a região Central recebe aproximadamente 17% do escoamento superficial e se encontra próxima ao canal da Barra da Lagoa (tendo maior influência marinha) e maiores salinidades.

### **3.1.4 Regionalização de Vazão em Escala Diária**

Do estudo de regionalização do estado (SANTA CATARINA, 2006), obteve-se para a Bacia Hidrográfica da LdC a vazão total média de longo termo de 1,13 m<sup>3</sup>/s, valor que se encontra dentro do intervalo de confiança de 95% da média das vazões hidrológicas estimadas por regionalização com os dados locais que foi de 1,63 m<sup>3</sup>/s.

Contudo, para avaliar a importância da vazão no escoamento da laguna, é importante considerar suas variações na escala diária. Para isso, foi calibrada a equação 8 para cada UrH. O valor inicial da constante de variância diária (alfa) foi obtido do estudo de regionalização de Santa Catarina, como sendo proporção entre a vazão média para vazão de base (Q mínima de 7 dias com um ano de tempo de retorno) que representa 15% da média.

A análise de sensibilidade e de calibração dos parâmetros alfa para cada UrH foi realizada buscando o menor erro de estimativa para oito campanhas para três rios da BH da Lagoa da Conceição. Os coeficientes de desvio quadrático médio e o Nash Sutcliffe mínimos encontrados para cada uma delas estão apresentados na Tabela 15.

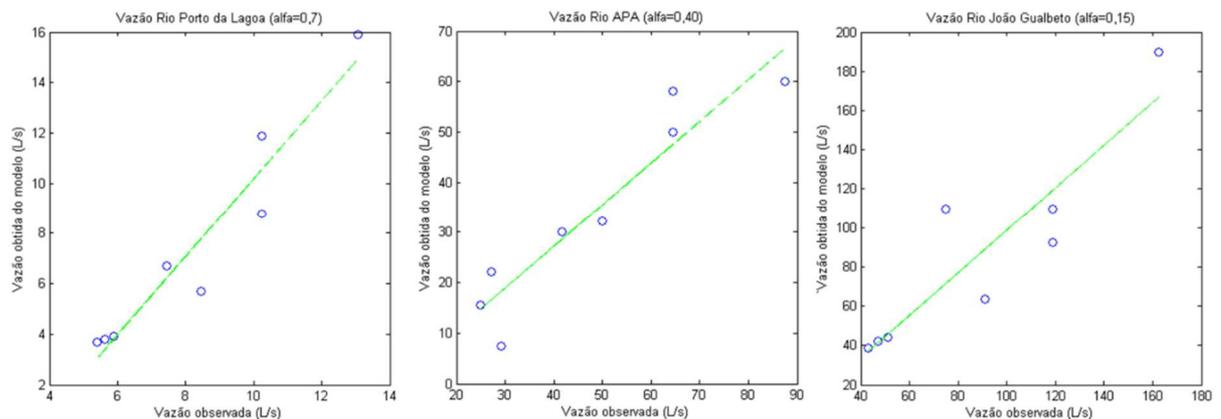
Tabela 15 – Erros associado à estimativa da vazão para as bacias hidrográficas de controle

	<b>Rio João Gualberto (SBH 1)</b>	<b>Rio APA (SBH 34)</b>	<b>Rio Porto da Lagoa (SBH 24)</b>
<b>Desvio quadrático médio</b>	0,81	0,88	0,91
<b>Nashutcliffe</b>	0,80	0,82	0,77

Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Os valores apresentados sugerem uma faixa de erro muito pequena, da ordem de 10% na média, sendo que o índice Nashutcliffe atingiu valores muito próximos de 1. Segundo Maccuen (2006) e Jain e Sudheer (2008), os valores do RMSE e do índice Nashutcliffe encontrados se enquadram em uma faixa de boa aderência do modelo aos dados experimentais. O resultado de melhor ajuste dos três modelos é ilustrado na Figura 23.

Figura 23 – Comparação dos dados medidos e estimados para as bacias hidrográficas de controle

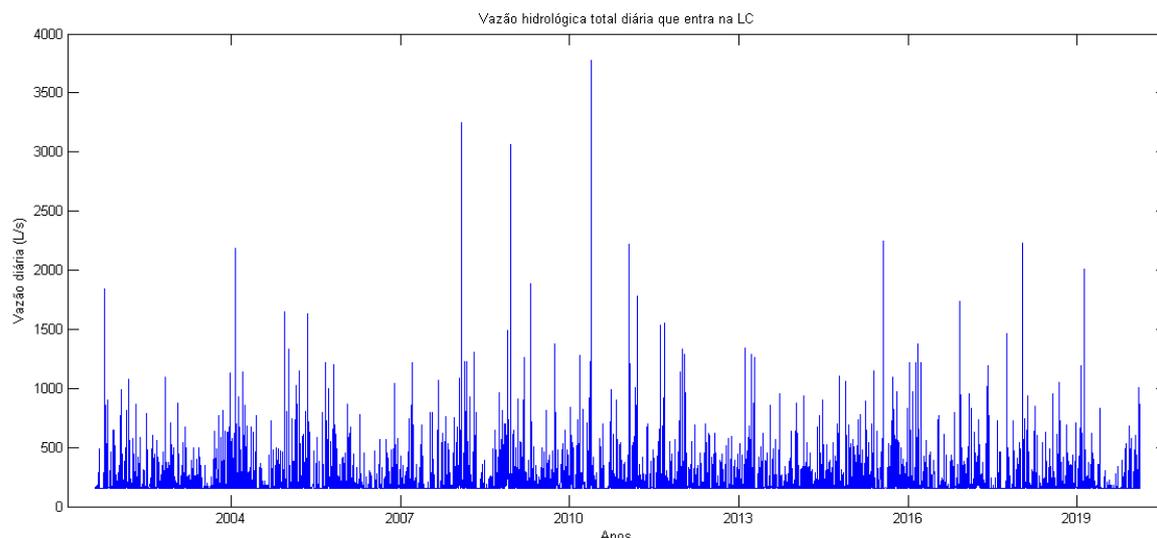


Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Pela figura é possível observar uma boa aderência aos dados, sendo que os dados cobriram valores de vazão em uma gama diferente de regiões da curva de recessão do rio. Além disso, é possível observar uma relação importante sobre os valores de alfa e as características de cada bacia monitorada, sendo que os valores de alfa obtidos para a bacia do rio João Gualberto (UrH – Norte) e do rio APA (UrH – Maciço) sugerem uma maior importância a componente variável da vazão e da bacia do Porto (que está na UrH Planície Costeira) possuem maior relevância na vazão de base.

Utilizando a expressão com os valores de alfa ajustados para cada UrH, pode-se encontrar a vazão de cada rio de controle e a vazão total da laguna (Figura 24).

Figura 24 – Vazão fluvial total modelada para laguna



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

### 3.1.5 Conclusão

A metodologia de regionalização das vazões pelas características geomorfológicas das SBHs apresentou resultados satisfatórios para compreender a importância dos aportes fluviais no sistema lagunar. A BH da Lagoa da Conceição é composta de 60 SBHs agrupadas em quatro Unidades de Resposta Hidrológica: a) a região de Maciços que possui maiores declividades, tipo e uso do solo, que caracterizam maiores escoamentos superficiais (CN médio = 78); b) a região Oceânica ao Leste que possui as menores declividades, tipo e uso do solo, que caracterizam menores escoamentos superficiais (CN médio=38); c) a região das Dunas que são predominantemente de recargas e pouca vazão superficial; d) a região Norte que possui declividade intermediária, CN médio = 59 e as maiores bacias, consequentemente, as maiores vazões superficiais. As vazões medidas responderam em concordância com as características geomorfológicas de cada SBH, em que as microbacias da UrH dos Maciços tiveram as vazões específicas mais altas, e as microbacias do lado oceânico UrH Dunas e Areias possuíram menor geração de vazão.

As vazões medidas tiveram direta relação com regime pluvial, sobretudo no rio João Gualberto, onde a vazão variou de 69 L/s (período de estiagem) a 750 L/s (período chuvoso), enquanto o escoamento superficial da sub-bacia do Centro da Lagoa variou de 28 a 214 L/s (período de estiagem e chuvoso, respectivamente). A vazão específica média (qps) foi (28L/s.km<sup>2</sup>) maior do que as encontradas para BHs continentais encontradas por Garbossa *et al.* (2017) de (20L/s.km<sup>2</sup>). Para cada sub-bacia, o qps variou de 12,5 L/s.km<sup>2</sup>, na sub-bacia do

rio João Gualberto (arenosa, com pouca declividade e com grande área), a 40 L/s.km<sup>2</sup> no Porto da Lagoa (grande área urbana, pouca declividade e arenosa – sugerindo aporte subterrâneo) e 38,7 L/s.km<sup>2</sup>, na sub-bacia da Costa da Lagoa (argilosa, de maior declividade e pequena em área). As sub-bacias do Canto e Centrinho resultaram em uma vazão específica média de 30,5 e 19,8 L/s.km<sup>2</sup>, respectivamente.

Através dos valores de salinidade, ficou clara a relevância das trocas de maré para a salinidade do corpo de água. Sendo que as extremidades Norte e Sul ficaram com valores menores de salinidade que foi aumentando em direção ao canal de conexão com o mar no setor Central (15 PSU para o Sul, 21 PSU para o Norte, 24 para Centro-Norte e 26 PSU para região Central).

A modulação da vazão ao longo do tempo através da série de precipitação se mostrou eficaz para representar as vazões de três rios que foram monitorados e mostraram coeficiente de Nashutcliffe mínimo de 0,77, indicando um ótimo ajuste do modelo aos dados medidos em campo.

Sugere-se que sejam realizados estudos e coleta de dados, para verificar o efeito de eventos de precipitação extrema, e modelagem hidrodinâmica, para verificar o efeito das oscilações do nível do mar no tempo de residência da laguna.

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO E CONECTIVIDADE HIDRODINÂMICA DA LAGOA DA CONCEIÇÃO ATRAVÉS DE MODELAGEM NUMÉRICA COM DELFT-FLOW E DELFT-PART

#### 3.2.1 Dados de nível do mar

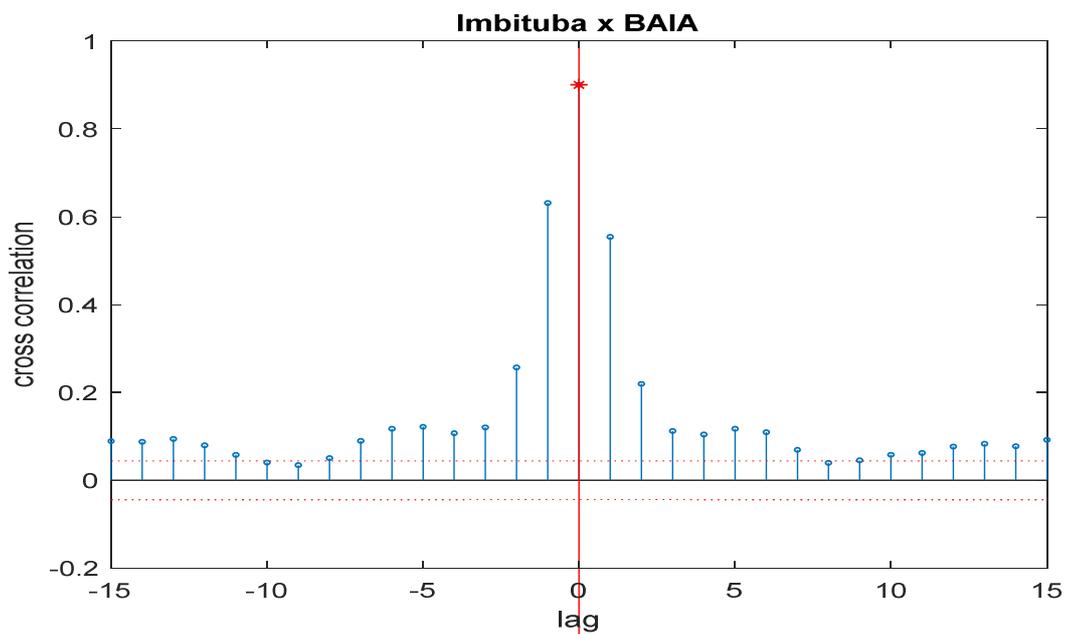
As séries de nível do mar utilizadas para reconstituir uma série temporal de níveis nas proximidades do Canal da Barra da Lagoa foram três. A primeira série, e a considerada ideal para modelagem, foi obtida pelo marégrafo instalado na praia da Armação pelo Laboratório de Oceanografia Costeira da UFSC. Essa série foi utilizada para obter as componentes harmônicas de maré e também como base para obter uma correlação do nível meteorológico com séries medidas por maior período como das Baías de Florianópolis (Fornecido pela EPAGRI em 2021) e do porto de Imbituba SC (Fornecido pelo IBGE em 2021).

A série de maior período foi a série de Imbituba que vai de 23 de agosto de 2001 até 8 de março de 2020. Contudo, os dados são coletados em escala diária (para esse marégrafo).

A série de dados de nível do mar da Baía Sul de Florianópolis, feita de 2 de janeiro de 2012 a 15 de agosto de 2020, é de escala horária, motivo pelo qual ela foi reconstituída das suas componentes diárias a partir de Imbituba para depois ser transferida para a Armação.

A fim de obter a relação entre o nível do mar em Imbituba e o das Baías, foi feita a análise de correlação cruzada entre as duas séries, a Figura 25 apresenta os resultados.

Figura 25 – Correlação cruzada entre a série de nível do mar de Imbituba e da Baía Sul em escala diária



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

A Figura apresenta que a maior correlação ocorre em lag 0, ou seja, as duas séries mostram que as variações do nível do mar em Imbituba e na Baía Sul estão concomitantes quando vistas em uma escala diária. A correlação entre as séries foi de 0,9004.

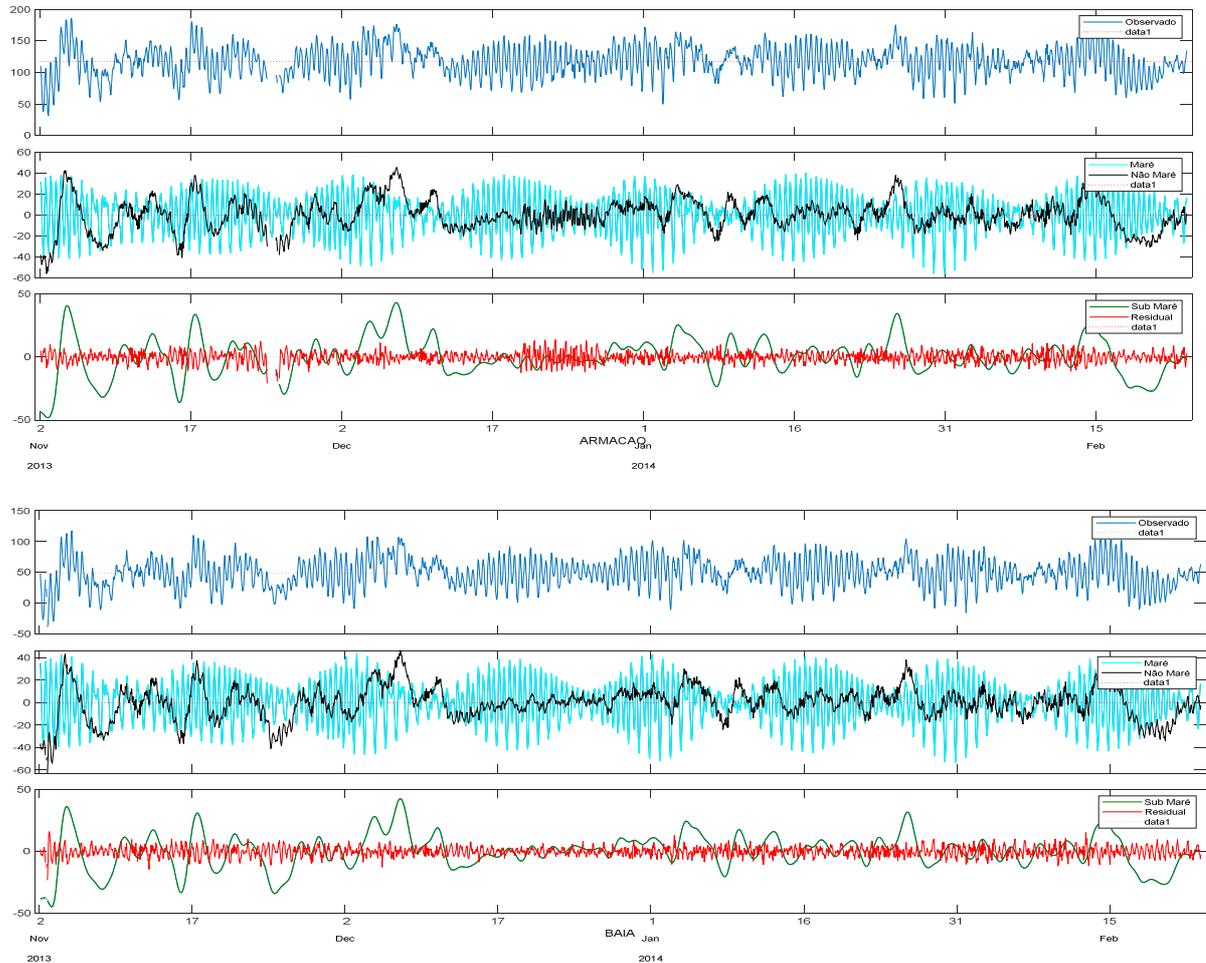
Portanto, a série de dados da Baía foi reconstituída para todo período a partir da equação.

$$y_B = \overline{x_B} + CM * (x_I - \overline{x_I}) \quad (21)$$

Onde  $y_B$  é a série reconstituída na Baía,  $\overline{x_B}$  é a média da série medida na Baía,  $CM$  é a correlação obtida no lag zero (0,9004) e  $x_I$  é o nível medido em Imbituba.

A série de dados do marégrafo da Armação vai de 2 de novembro de 2013 a 24 fevereiro de 2014. A Figura 26, a seguir apresenta o sinal observado na Armação e na Baía Sul nesse mesmo período.

Figura 26 – Série de nível do mar observado e suas componentes de maré astronômica, meteorológica e residual; a) Praia da Armação; b) Baía Sul

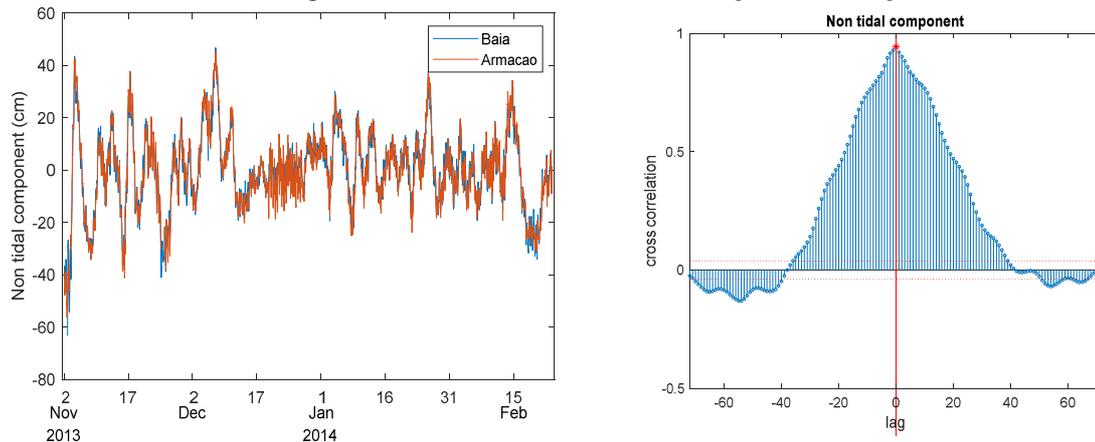


Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

É possível observar que as séries são muito parecidas em todos os trechos da série temporal. A análise de variância do sinal da praia da Armação mostra que 60,74% da importância da variação do nível do mar está relacionada à componente astronômica de maré e que 39,21% está relacionada às componentes submareais. Na Baía, a série horária apresentou características muito similares, com valores de variância do sinal da componente astronômica de 62,31% e de 37,69% para as componentes submareais.

A correlação de nível na escala meteorológica foi de 0,94 em lag 0, ou seja, as séries estão sincronizadas na escala horária para componente meteorológica. A Figura 27 mostra a correlação cruzada e as séries meteorológicas medidas nos dois marégrafos.

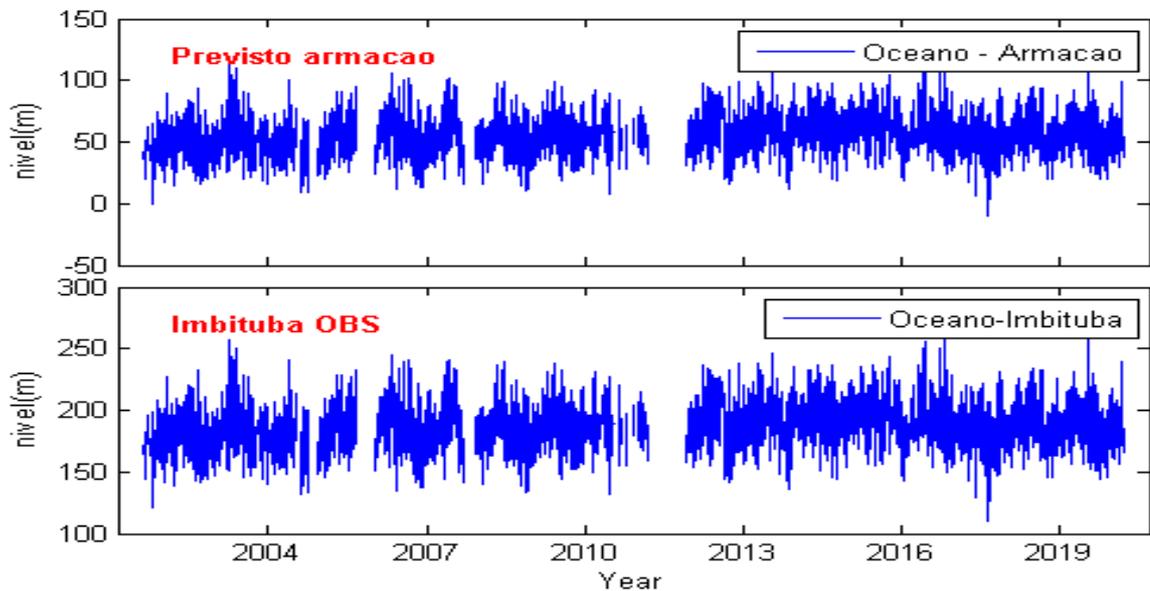
Figura 27 – Séries meteorológicas observadas na Baía e na Armação e correlação cruzada entre elas



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Da mesma forma foi obtida a previsão dos níveis na Armação a partir da série original de Imbituba. A correlação entre as séries diárias foi de 0,91 em lag=0, portanto, as duas séries são síncronas na escala diária. Os níveis observados em Imbituba e previstos na Armação estão apresentados na Figura 28.

Figura 28 – Dados de nível do mar obtidos em Imbituba e estimados para a Armação



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

A série de dados previstos na praia da Armação iniciam 23 de agosto de 2001 e vão até 8 de março de 2020.

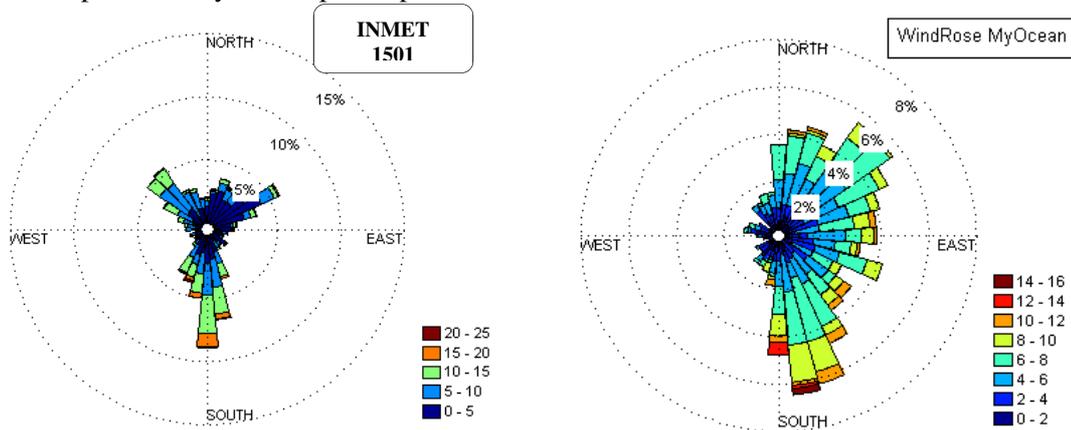
### 3.2.2 Análise dos Padrões dos Dados de Ventos Disponíveis

Para representar os processos de mistura no estuário da laguna da Conceição, foram analisados os dados de vento disponíveis para o período. Os dados analisados foram os ventos obtidos do banco de dados do Copérnicus Marine Science – My Ocean, na coordenada espacial 27°31'S 48°10'W na zona de mar adjacente à costa (produto Cer Sat Global Blended Wind L4 com resolução espacial de 0,20° e resolução temporal de 4h). Também foram avaliados os dados de vento obtidos pela estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) 1501 em São José, instalada nas coordenadas 27°36'S 48°37'W.

A fim de verificar qual é o melhor dado de entrada para esse parâmetro, foi realizada uma comparação dos dados obtidos com os valores predominantes para área de estudo. Segundo o estudo de Silveira, Alves e Murara (2014) que analisou os padrões de vento na mesorregião da grande Florianópolis de 1996 a 2012, a predominância de ventos do quadrante Norte-Nordeste (N-NE), Leste (E) e Sul-Sudeste (S-SE) durante todos os meses do ano, sendo que esses quadrantes oscilam entre o primeiro, o segundo ou o terceiro mais frequentes e com predominâncias mensais que vão até 88%.

A Figura 29 apresenta os dados de vento para o período modelado neste estudo.

Figura 29 – Rosa dos Ventos dos dados obtidos pela Estação INMET 1501 e do modelo de reanálise de vento Copernicus My Ocean para o período



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

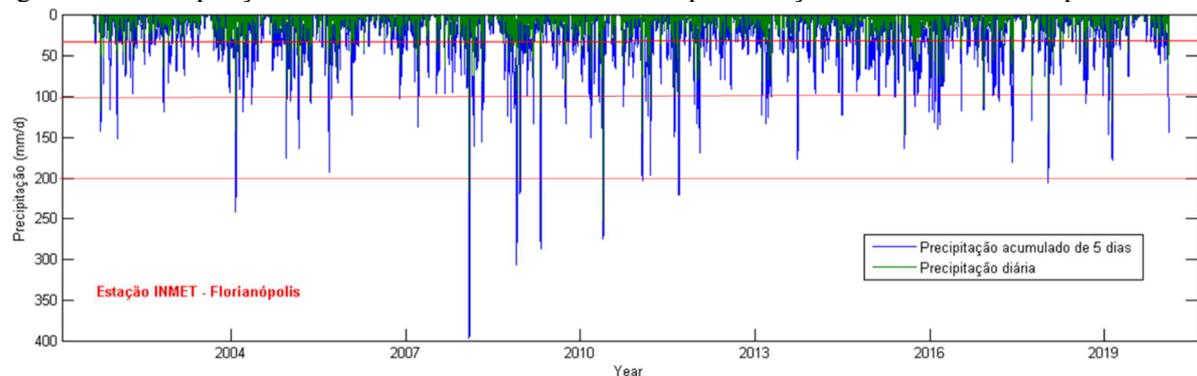
Em ambos os dados foi verificado que os ventos mais intensos foram do quadrante Sul, chegando a valores máximos modais de 20 a 25 m/s na estação INMET 1501 e de 14 a 16 m/s no modelo Global de reanálise de vento obtido do banco de dados Copérnicus My Ocean. Contudo, pode-se observar que os dados do modelo representam melhor os ventos do quadrante N-NE e E, que são mais frequentes e que não aparecem nos dados da estação INMET 1501.

Isso se deve pelo fato de que os sensores dessa estação possuem um cobrimento por montanha do quadrante (N-NE) pela parte continental urbana da cidade. Dessa forma, foram escolhidos os dados do modelo global de reanálise para gerar os fluxos de mistura provocados pelo vento na laguna.

### 3.2.3 Clima de Precipitação nas Proximidades da Lagoa da Conceição

Os dados de precipitação da estação da INMET de Florianópolis estão apresentados na Figura 30.

Figura 30 – Precipitação diária e acumulada em cinco dias para estação INMET – Florianópolis



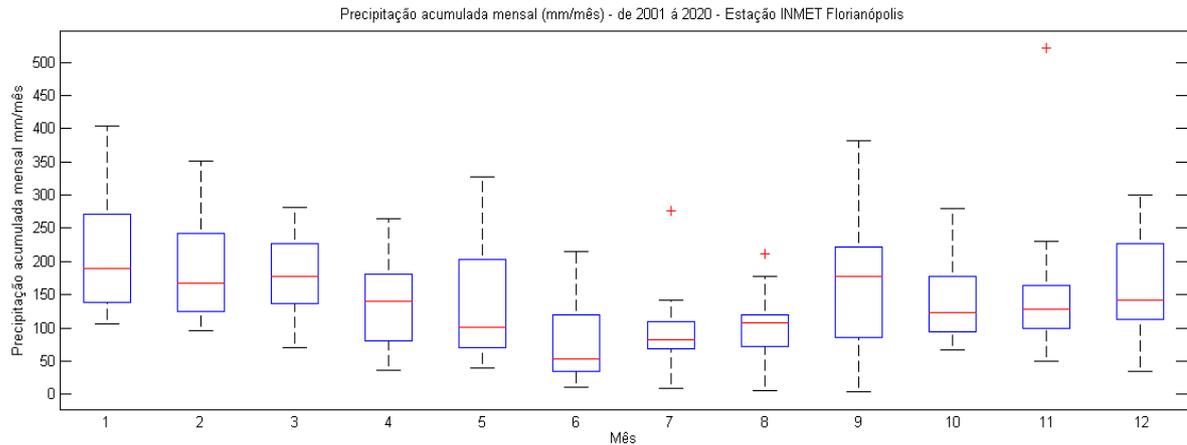
Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

As linhas utilizadas no gráfico são referências para o volume de chuva recebido pela Bacia: Linhas 1 – solo molhado USGS (37 mm)/2 – Moderado alto (100 mm)/3 – Extremo (>200 mm).

A precipitação diária atinge valores acima de 37 mm, porém, com pouca frequência e raramente, as Linhas 2 e 3. Já quando se olha a precipitação acumulada em cinco dias, pode-se ver que esse limite é ultrapassado muitas vezes no ano, sendo que se pode contar aproximadamente 10 eventos extremos (>200 mm) de 2002 a 2019.

A Figura 31 apresenta os acumulados mensais de 19 anos de monitoramento da estação INMET 1501.

Figura 31 – BoxPlot mensal da precipitação observada na estação INMET 1501 pelo período de 01/2001 a 12/2020



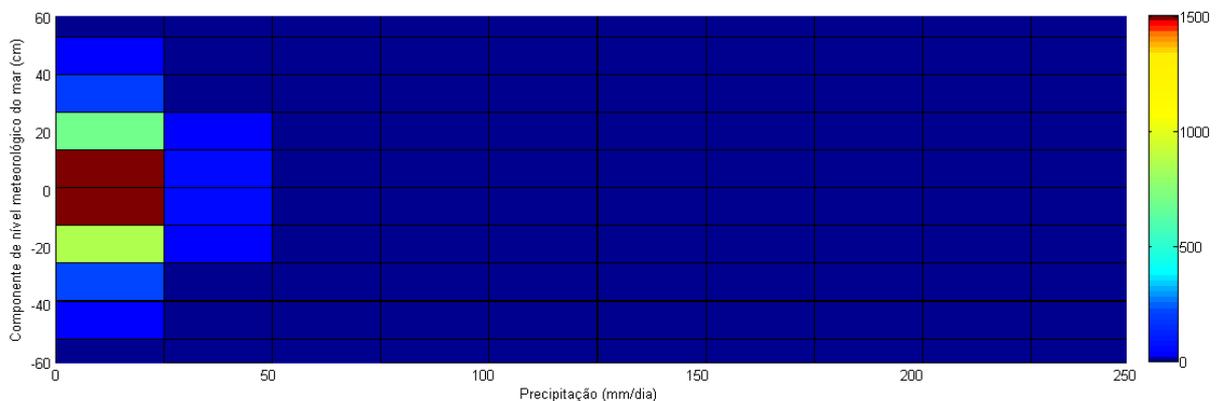
Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

É possível observar que os dados mensais acompanham a normal climatológica esperada para Florianópolis. Os meses de verão têm com precipitação média superiores aos meses de inverno, sendo que a variabilidade dos acumulados mensais também aumentam nos meses de verão.

### 3.2.4 Cenários Meteo-Oceanográficos da Bacia da Lagoa da Conceição

A avaliação dos possíveis cenários meteo-oceanográficos mostra que, em geral, a laguna está submetida a precipitações diárias de 0 até 25 mm. Também é possível observar que as sobre-elevações do nível do mar se encontram na faixa de -40 a +40 cm na maioria dos casos observados, como mostra a Figura 32.

Figura 32 – Histograma de frequência bivariado para os cenários meteo-oceanograficos de 2001 a 2020 – precipitação e níveis médios



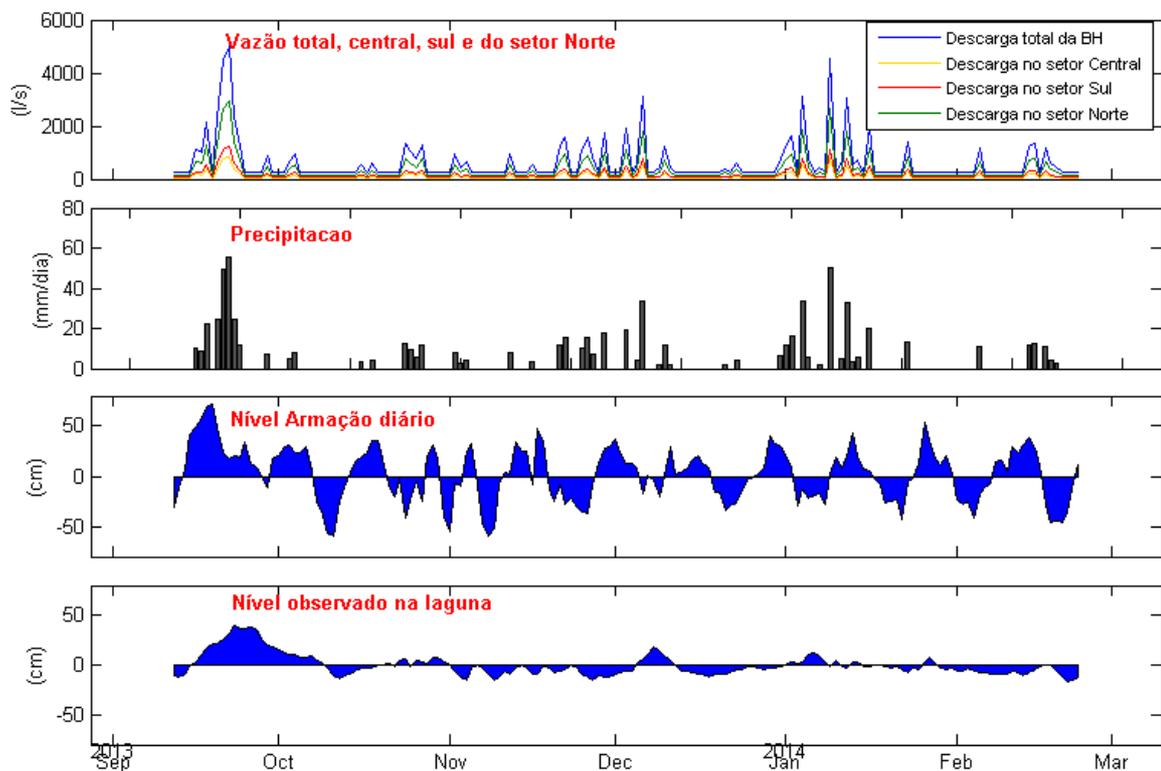
Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

### 3.2.5 Cenário de Calibração do Modelo Hidrodinâmico

O período escolhido para calibração foi de 165 dias (de 12/09/2013 a 23/02/2014). Nesse tempo, observou-se um cenário meteo-oceanográfico típico da laguna, já que o tempo amostrado é suficiente para se observar a resposta média da hidrodinâmica frente às forçantes às quais a laguna está submetida.

O cenário meteo-oceanográfico e a vazão total e por setores que drenam para laguna são apresentados na Figura 33.

Figura 33 – Cenário meteo-oceanográfico da Lagoa da Conceição para o período de calibração



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

O coeficiente de rugosidade de Manning adotado foi inicialmente calibrado por Bier, 2018 (Manning = 036) para o Canal da Barra da Lagoa, sendo que outros autores corroboram com a adoção desse valor (ODRESKI, 2012; SILVA, 2012). Realizou-se uma análise da influência desse valor no Canal da Barra da Lagoa, variando em algumas unidades para mais e para menos.

Os valores do coeficiente multiplicativo de variação diária das vazões (alfa) obtidos pelos modelos de regionalização de vazões hidrológico foram variados em 0,10 para mais e para menos, a fim de se fazer um refinamento e encontrar os valores que apresentam menor

erro no modelo hidrodinâmico adotado, sendo que os valores iniciais de alfa foram de 0,15 para UrH Norte; 0,40 para UrH dos Maciços; e 0,70 para UrH da Planície Costeira e Dunas. O resultado da análise de erros é apresentado na Tabela 16.

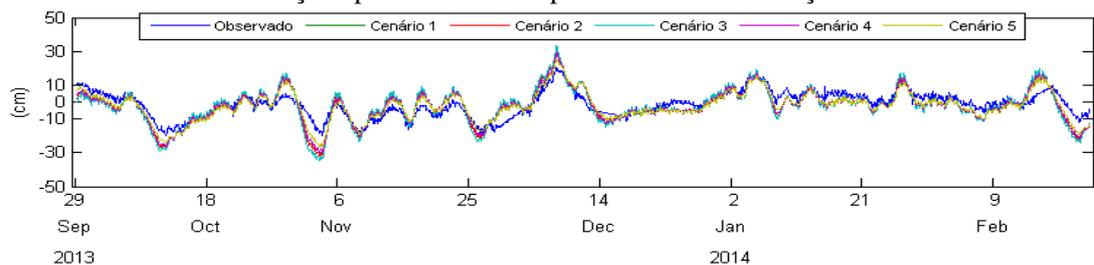
Tabela 16 – Erros associados aos níveis modelados e o nível observado no período de calibração – escolha do valor de Manning no Canal da Barra

	Alfa (UrH – Norte)	Alfa (UrH – Maciço)	Alfa (UrH – Planície Costeira e Dunas)	Manning do canal	RMSE	Correlação	EAMR
<b>Cenário 1</b>	0,15	0,40	0,70	036	0,0085	0,8192	0,0035
<b>Cenário 2</b>	0,15	0,40	0,70	030	0,0096	0,7938	0,0074
<b>Cenário 3</b>	0,15	0,40	0,70	040	0,0097	0,8223	0,0554
<b>Cenário 4</b>	0,15	0,40	0,70	050	0,0144	0,8549	0,1054
<b>Cenário 5</b>	0,25	0,50	0,80	036	0,0084	0,8013	0,0032
<b>Cenário 6</b>	0,05	0,30	0,60	036	0,0092	0,8188	0,0047

Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

As faixas de valores de EAMR para todos os cenários são consideradas excelentes por Walstra *et al.* (2001) e Blogg (2001), contudo, o cenário 5 apresentou o melhor ajuste com relação aos demais cenários. A correlação entre as séries modeladas e as observadas variou de 0,79 a 0,85 e mostra igualmente bom ajuste. A Figura 34 mostra as séries modeladas e as observadas.

Figura 34 – Resultado das simulações para análise dos parâmetros de calibração e os erros associados

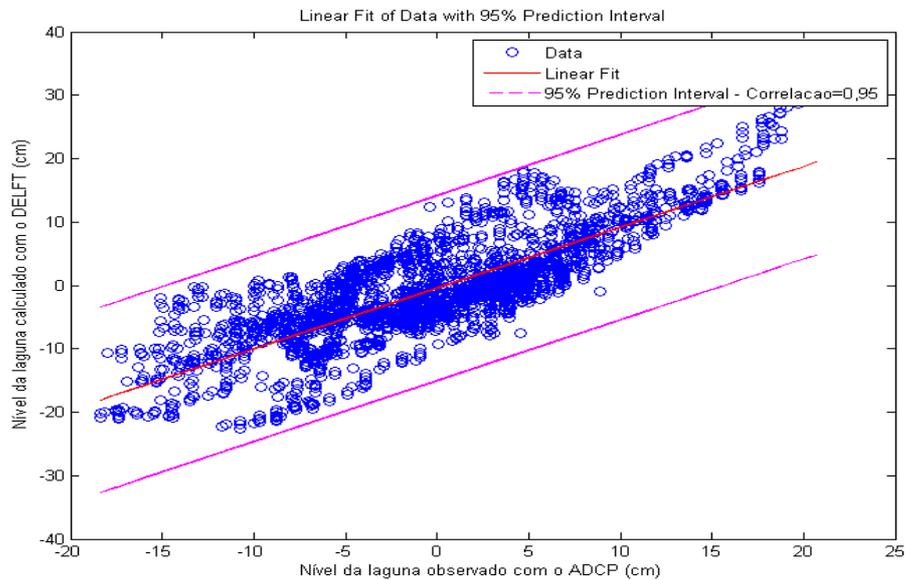


Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Dessa forma, o valor para o coeficiente de rugosidade de Manning com menor erro foi de 0,036 (no canal), corroborando com os resultados de Bier (2018), Odreski (2012) e Silva (2013). Para o parâmetro alfa do modelo de vazão, o menor erro foi associado a valores de 0,25 para UrH Norte; 0,50 para UrH dos Maciços; e 0,80 para UrH da Planície Costeira e Dunas, sendo valores próximos, mas 10% maiores do que os encontrados pela análise de erro do modelo hidrológico, contudo, dentro de um limite de variação esperado.

O *Scatter plot* da Figura 35 mostra a correlação entre os valores medidos e modelados para o nível da laguna.

Figura 35 – *Scatter plot* dos níveis modelados e observados no período de calibração (set/2013 a mar/2014)

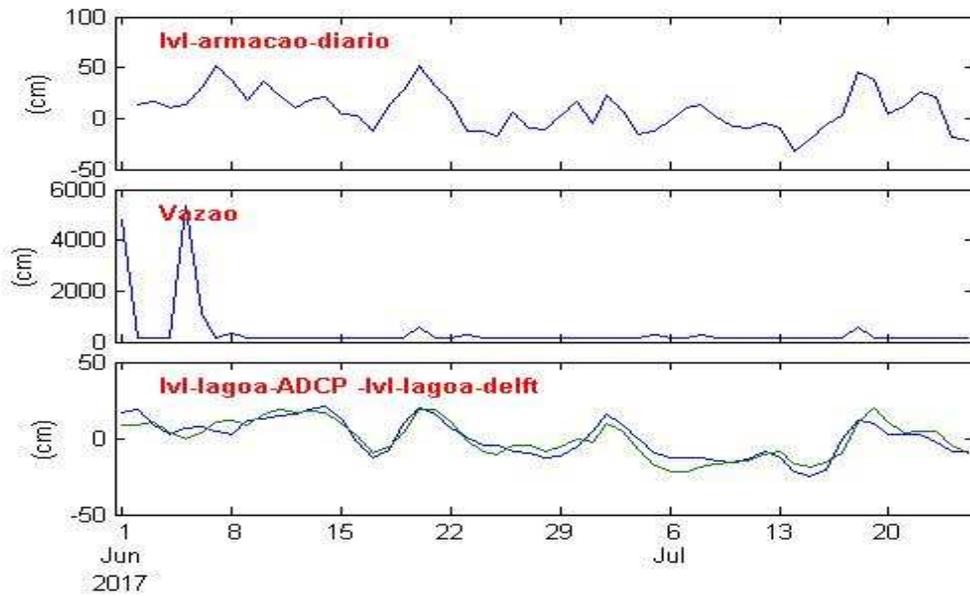


Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

### 3.2.6 Validação dos Valores de Alfa e Coeficiente de Rugosidade de Manning – Cenário com Dados de ADCP de junho e julho de 2017

A fim de validar os parâmetros de calibração encontrados, foi feita uma comparação dos resultados do modelo com dados observados no período entre junho e julho de 2017 com auxílio do ADCP. A análise dos níveis teve EAMR de 0,091, considerada excelente por Blogg (2001). O modelo representou bem os períodos de sobre-elevação e de redução dos níveis da laguna nesse ponto, como mostra a Figura 36.

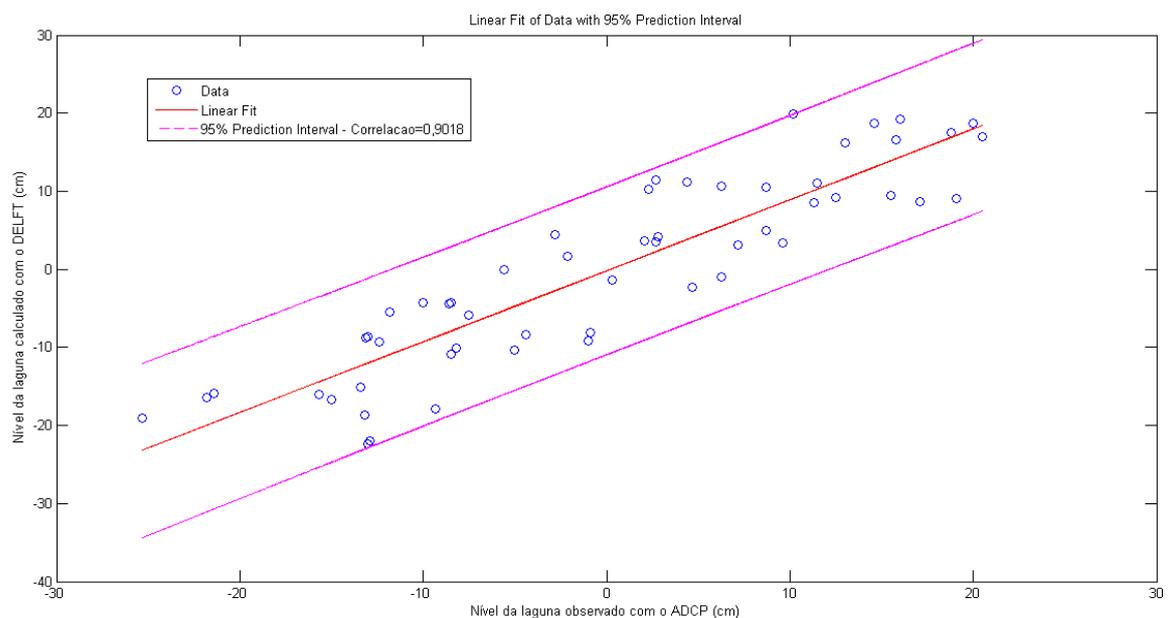
Figura 36 – Níveis modelados e observados para o período de validação do modelo



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

O coeficiente de determinação  $R^2$  foi de 0,91, o que mostra um bom ajuste, além disso, os valores obtidos se encontram dentro de um limite de confiança de 95%, como mostra o *Scatter plot* dos níveis medidos e modelados pelo Delft (Figura 37).

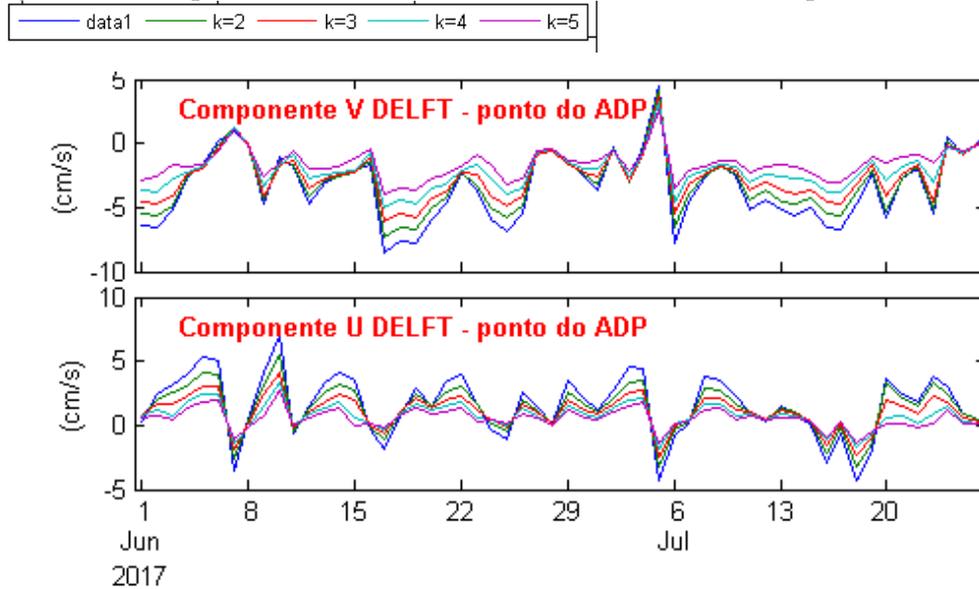
Figura 37 – *Scatter plot* do nível médio diário observado e modelado para o período de validação



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

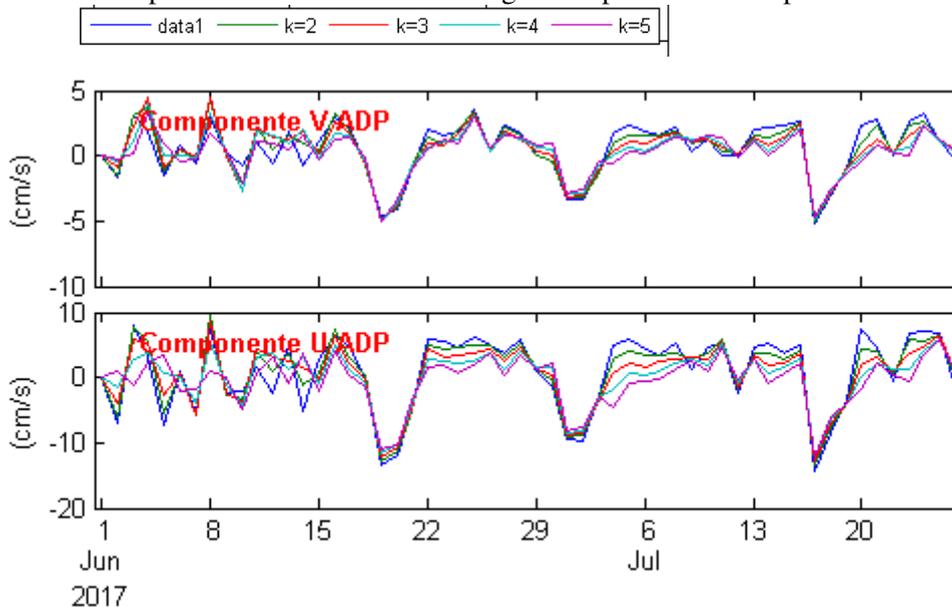
As correntes obtidas pelo modelo neste local apresentam valores entre -5 e +5 cm/s para componente U e de -10 e + 10 cm/s para componente V, como mostram as Figuras 38 e 39.

Figura 38 – Componentes U e V do modelo na célula de cálculo em que foi fundeado o ADCP



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Figura 39 – Componentes U e V da corrente registrada pelo ADCP no período de fundeio



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

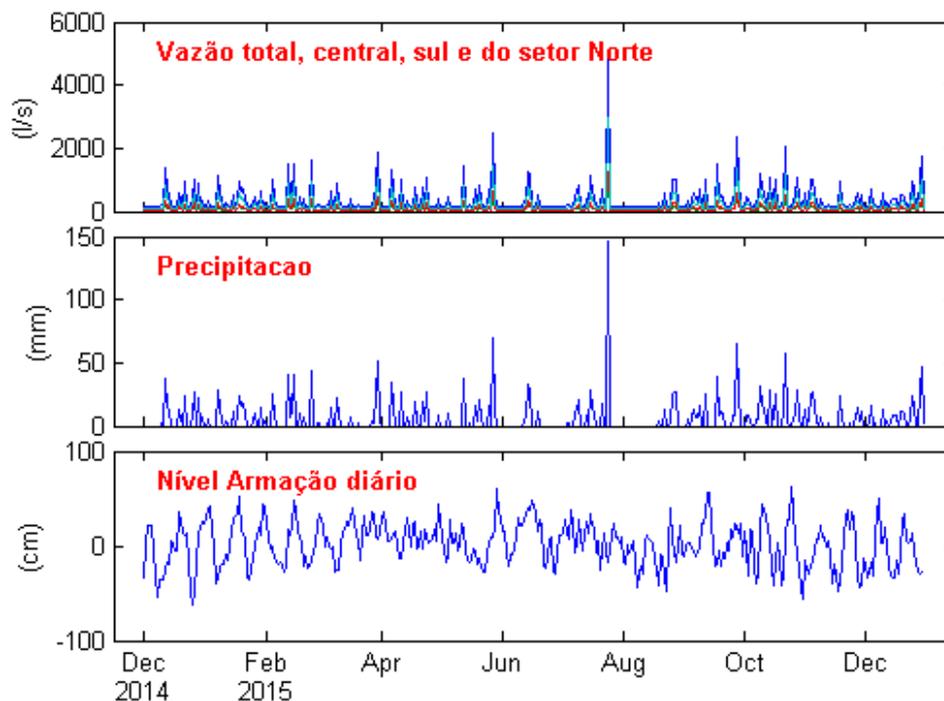
Os valores de EAMR para a velocidade da corrente na componente U foi de 0,33 e da componente V foi de 0,42, isso indica concordância entre boa e razoável para Blogg (2001). Segundo o autor, valores de EAMR para os campos de velocidade maiores do que os de níveis

podem ser explicados pela complexidade hidrodinâmica do corpo de água (BLOGG, 2001). Contudo, a amplitude dos valores é a mesma, tanto para correntes medidas quanto para as correntes modeladas.

### 3.2.7 Análise do Padrões Hidrodinâmicos Estacionários da Lagoa da Conceição – Intervalo de 1º/01/2015 a 31/12/2015

A fim de encontrar os padrões médios de circulação hidrodinâmico e o tempo de residência médio de cada compartimento, foi realizada a modelagem da laguna pelo período de um ano (365 dias). Os dados meteo-oceanográficos impostos ao modelo estão apresentados na Figura 40.

Figura 40 – Dados de nível, precipitação e vazão impostos ao modelo para cenário de análise dos padrões hidrodinâmicos – ano de 2015



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

O cenário de meteo-oceanográfico apresentou oscilações meteorológicas de níveis oceânicos entre -60 e +075 cm com período médio de entrada de frentes de 5 a 9 dias, como é o padrão regional. A precipitação anual registrada foi de 1.740 mm, aproximadamente 14% acima da normal climatológica do INMET de 1970 a 2001. No período, verificou-se a presença de um evento de precipitação extrema em julho de 2015.

### 3.2.8 Padrão Hidrodinâmico da Lagoa da Conceição – Atenuação do Sinal de Maré no Canal da Barra da Lagoa

A análise dos dados de nível interno da laguna e do mar mostram que as oscilações na maré astronômica são filtradas pelo canal da Barra da Lagoa, sendo que o sinal resultante na laguna é praticamente nulo – menor de 1% da variância observada na série da Armação – como mostra a Tabela 17. Já as oscilações meteorológicas de períodos maiores chegam com 45% da variância original.

Tabela 17 – A matriz de variância obtida para as componentes de nível astronômica e meteorológica – para laguna e mar adjacente

	<b>Variância armação (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>%</b>	<b>Variância laguna (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>%</b>
Nível medido	568.22	100.0%	122.77	100.00%
Componente astronômica	308.74	54.3%	0.87	0.71%
Componente meteorológica	260.98	45.9%	122.33	99.64%

Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

A componente astronômica possui uma relevância muito pequena. Já a componente não astronômica possui 99,64% da variância. Contudo, nem toda variância meteorológica se deve às oscilações do nível do mar, mas também estão relacionadas à entrada de sistemas frontais que trazem também momentos de chuva que podem ocasionar modificações de nível provocadas pela precipitação direta na laguna, assim como pela vazão dos rios.

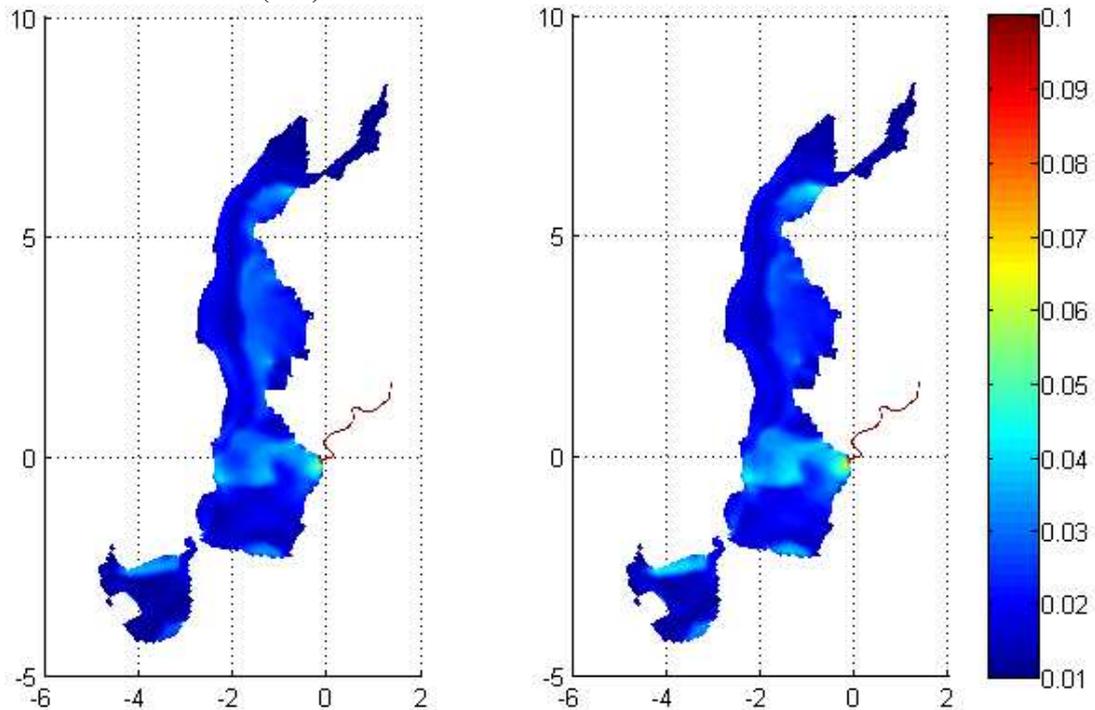
Através da modelagem de cenários sem influência de vazão e de precipitação, verificou-se que a variância de nível oceânico é responsável por cerca de 92,4% da variância nos níveis do setor Central e 89,6% no setor Sul da laguna.

Por meio da análise de correlação cruzada do nível não determinístico, foi possível encontrar que a maior correlação acontece em 24 horas (crosscorr= 0,6), ou seja, as variações de nível meteorológico levam aproximadamente 24 horas para se deslocar pelo canal até alterar o nível da Lagoa da Conceição, e as oscilações nessa escala temporal possuem 60% de concordância com o sinal do oceânico.

### 3.2.9 Intensidade Média do Campo Vetorial da Laguna

A fim de avaliar os locais de maior intensidade de transporte e outros locais com tendência de acúmulo de materiais e de nutrientes, foram gerados mapas com a intensidade e o desvio da velocidade de corrente média na coluna d'água para todo o domínio do modelo. A Figura 41 apresenta os valores na laguna.

Figura 41 – a) Intensidade média do campo vetorial de correntes (m/s); b) Desvio-padrão médio do campo vetorial de correntes (m/s)



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Os valores de velocidade média e de desvio-padrão médio variam espacialmente de maneira semelhante em toda a laguna. Nas partes mais profundas do domínio da laguna, as velocidades médias são da ordem de 0,01m/s ou menores. Já algumas regiões mais rasas e nas proximidades de rios e de canais, as velocidades médias chegam a 0,04m/s. O desvio-padrão associado às velocidades possui a mesma ordem de grandeza das velocidades médias, em que a maior parte do domínio do modelo.

A Tabela 18 mostra os valores da velocidade e o desvio da velocidade por setor.

Tabela 18 – Velocidades média, máxima e desvio-padrão médio dos setores da laguna

	<b>Velocidade (m/s)</b>	<b>média</b>	<b>Desvio-médio (m/s)</b>	<b>Velocidade (m/s)</b>	<b>máxima</b>
<b>Canal</b>	0.218		0.247	1.912	
<b>Sul</b>	0.015		0.018	0.149	
<b>Central</b>	0.042		0.048	0.437	
<b>Centro-Norte</b>	0.021		0.020	0.125	
<b>Norte</b>	0.014		0.016	0.114	

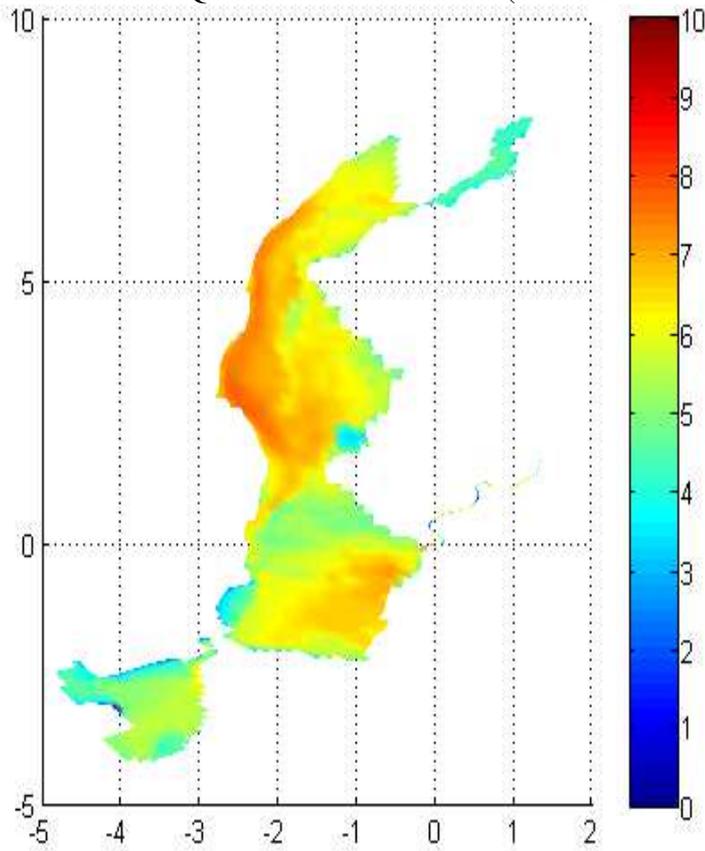
Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

De maneira geral, a intensidade média das velocidades é maior quanto maiores forem a proximidade e a conexão com o oceano. As maiores velocidades de escoamento estão próximas à desembocadura interna do Canal da Barra da Lagoa. Os padrões das velocidades encontradas no canal apresentam intensidades que chegaram a 191 cm/s durante todo ano, com valores mais frequentes na escala de 21 cm/s – mesmo valor médio encontrado com o ADCP. Em geral, o canal passa mais tempo em vazante (fluxo sentido laguna oceano) do que em enchente (fluxo oceano laguna), contudo, as maiores intensidades de corrente foram registradas nas enchentes.

As regiões de menor velocidade de escoamento são os setores Sul e Norte (mais distantes do canal da Barra da Lagoa), o setor Centro-Norte se comporta como um ambiente de transição entre o Norte e a região Central. Já na região Central, a velocidade média é superior aos demais setores por uma influência grande do oceano através do canal, seja pela entrada de massas de água, seja pela saída de água lagunar.

Contudo, observando as trocas de massa quantificadas pelo fluxo de quantidade de movimento (Figura 42), verifica-se que, ao contrário da velocidade, o fluxo de massa residual da laguna tem as maiores intensidades nas áreas profundas, já que a tensão de cisalhamento apresenta menor resistência ao fluxo. Pode-se observar fluxos residuais importantes que geram as contribuições fluviais da encosta Oeste da laguna e conecta a região Norte com a região Central. Da mesma forma, na região Sul para a Central e da região Central em direção ao Canal da Barra da Lagoa.

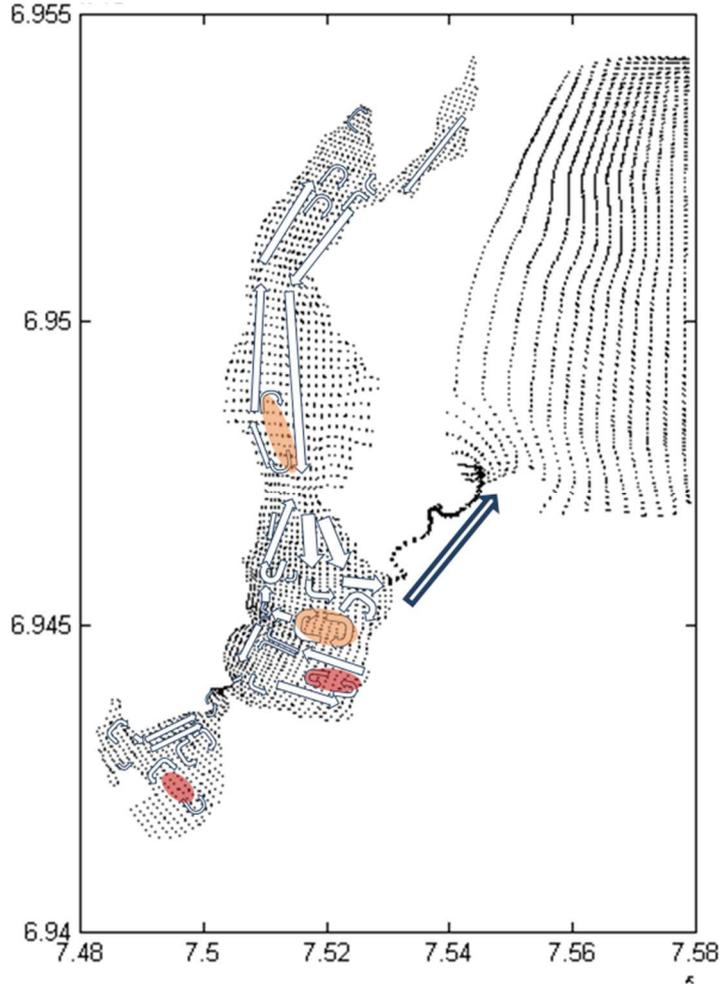
Figura 42 – Fluxo de Quantidade de movimento (os valores estão em escala Log10)



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

A dominância da quantidade de movimento dos rios no comportamento do fluxo próximo à desembocadura de rios importantes e dos canais de ligação é comum nas lagunas (MIRANDA; DE CASTRO; KJERFVE, 2002). Os campos vetoriais médios da laguna são apresentados na Figura 43.

Figura 43 – Campo vetorial médio no interior da laguna – as regiões marcadas em vermelho indicam giros anticiclônicos de alta pressão, e as regiões marcadas em laranja indicam giros ciclônicos de baixa pressão



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

O campo vetorial apresenta fluxos preferenciais, pontos de encontro, ou convergência de fluxo, e pontos de espalhamento, ou divergência de fluxos. As regiões marcadas em laranja sinalizam células de recirculação de baixa pressão, que, segundo Miranda, De Castro e Kjerfve (2002) e Bianchi (2006) indicam uma região de fluxo ascendente de matéria, possibilitando uma suspensão de material do fundo. Já as regiões marcadas em vermelho são células de recirculação de alta pressão, ou seja, regiões onde a tendência é de acúmulo de material no fundo do corpo de água.

O setor Norte apresenta fluxo residual constante no sentido Norte a Sul, indicando que este segue um padrão de escoamento que vem do rio João Gualberto e do rio Vermelho, os dois rios de maior vazão da BH (somados, eles fornecem aproximadamente 22% da vazão total de água doce). A predominância do rio João Gualberto Soares e do rio Vermelho no fluxo residual

do setor Norte da laguna já havia sido identificada por modelagem numérica por Odreski (2012) e Costa (2014).

O setor Centro-Norte apresenta uma célula de recirculação de baixa pressão, que, segundo Miranda, De Castro e Kjerfve (2002) e Bianchi (2006) indica uma região de fluxo ascendente de matéria, possibilitando uma suspensão de material do fundo. O fluxo desse setor está dividido longitudinalmente em duas partes, uma a Oeste, com um fluxo residual sentido Sul, mostrando a importância desse fluxo que vem dos maiores rios do Norte da BH. A Leste existe um fluxo residual no sentido Norte que surge como um vai do setor Central para o Norte, que possui menor intensidade.

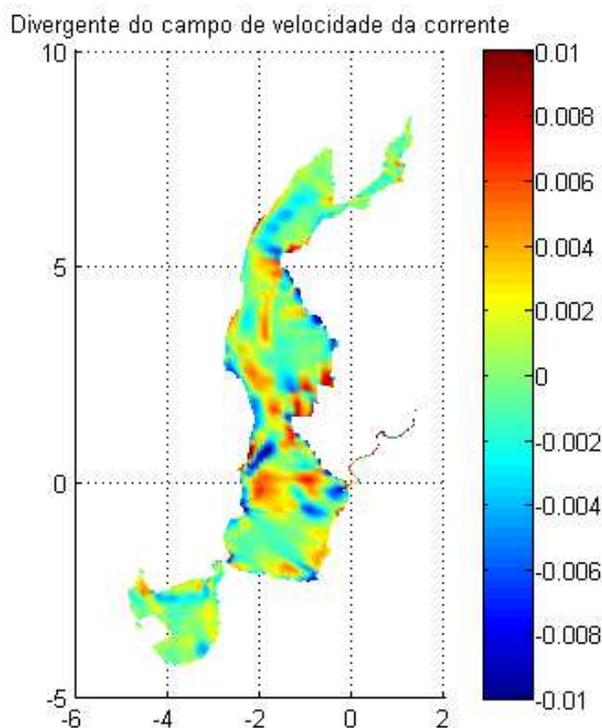
A região Central é um setor de confluência de correntes, com muitas trocas com os demais setores. Ela apresenta duas células de recirculação: uma de alta pressão na região Centro-Leste do setor, portanto, uma região de acúmulo de material particulado; e uma outra região de baixa pressão mais próximo ao canal. A tendência ao acúmulo hidrodinâmico nessa região pode ser uma das causas da estratificação termohalina vertical, que se apresenta na região Central e foi documentada por Fonseca (2006), Fontes (2009), Barros (2017) e Silva (2017). Além disso, essa região apresentou valores muito abaixo da saturação para oxigênio dissolvido.

O setor Sul apresenta fluxo residual no sentido para o Norte, contudo, possui uma recirculação de alta pressão na área mais profunda, o que indica uma região de possível acumulação de material e onde pode se desenvolver estratificação vertical, assim como na região Central.

Os campos vetoriais mostram fluxo predominantemente de vazante e que grande parte da margem Oeste da laguna (próxima a linha de costa dos Maciços graníticos) apresenta fluxo em direção transversal à linha de costa. Isso se dá devido à entrada de fluxo de águas fluviais provenientes das bacias hidrográficas da UrH Maciços (responsável por 63% da vazão total de água doce que entra na laguna).

O cálculo do divergente do campo vetorial (Figura 44) mostra maiores valores nas zonas de choque entre as correntes residuais (Figura 45). Os pontos em verde, amarelo e em vermelho apresentam divergente positivo, o que representa locais em que o fluxo é predominantemente de espalhamento das propriedades e de mistura. Já as regiões de cores em tons de azul apresentam valores de divergentes negativos, ou seja, são regiões onde é possível o acúmulo de substâncias e de sedimentação.

Figura 44 – Divergente do campo vetorial de correntes na Lagoa da Conceição (365 dias de simulação)

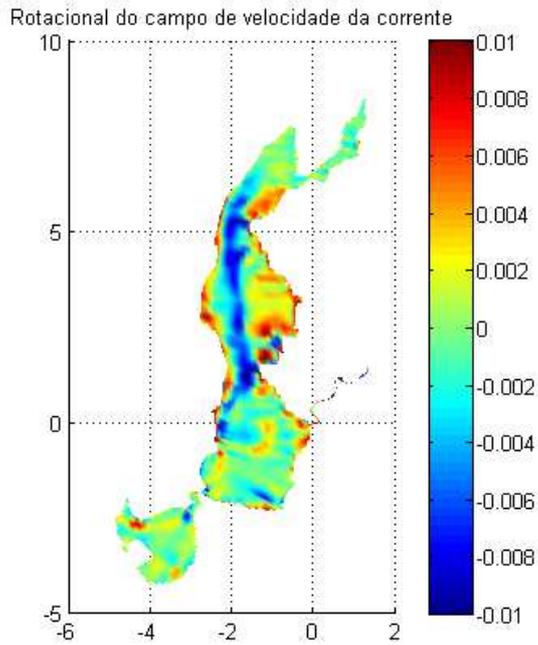


Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Pode-se observar que os quatro setores da laguna possuem grandes regiões com tendência ao acúmulo (divergente negativo). Também é possível notar que os dois giros de alta pressão estão localizados nesses ambientes de  $div < 0$ . Nas regiões onde o fluxo é disperso por encontro de massas d'água, o divergente é mais alto ( $div > 0$ ), sendo que as duas células de circulação de baixa pressão (tendência a espalhamento) das regiões Central e Centro-Norte, possuem divergente positivo.

O rotacional do campo de velocidades médias (Figura 45) apresenta três tipos de resultados – rotacional igual a zero representa o fluxo irrotacional (ideal) e valores diferentes de zero são comumente associados a ambientes irregulares, como é o caso da Lagoa da Conceição (MIRANDA; DE CASTRO; KJERFVE, 2002). A LdC apresenta algumas regiões que possuem campo rotacional próximo de zero, contudo, regiões com valores que vão de -0,01 a +0,01 representam tendência à formação de vórtices de diferentes sentidos de rotação, como foi apresentado na Figura 40.

Figura 45 – Rotacional do campo vetorial de correntes na Lagoa da Conceição (365 dias de simulação)

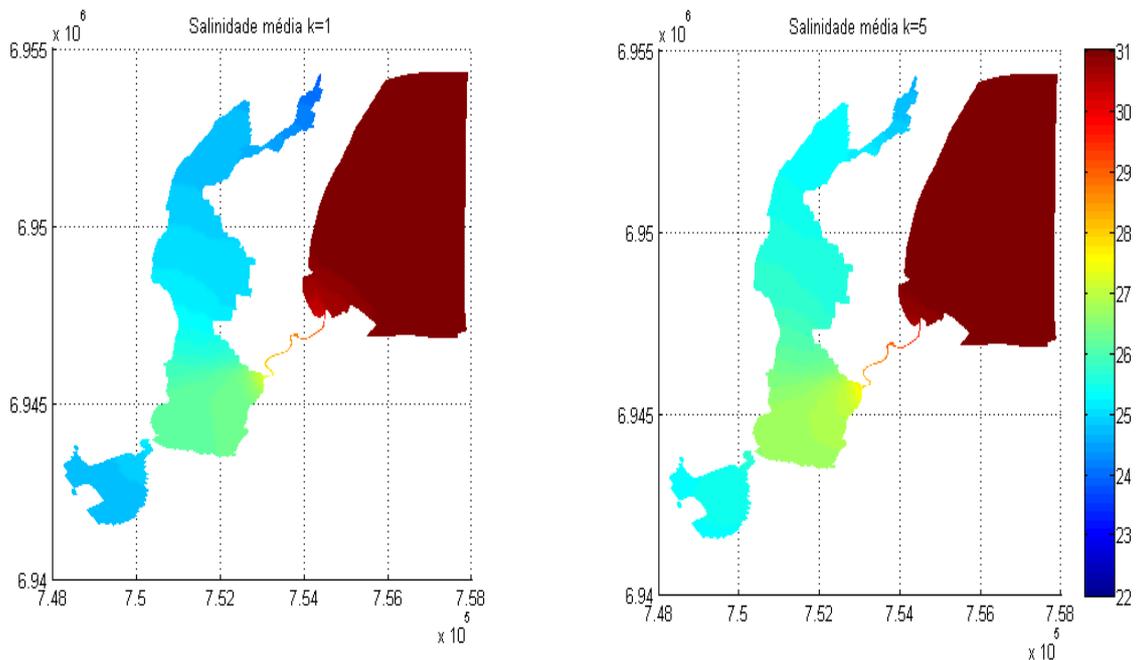


Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

### 3.2.10 Salinidade e Índice de Richardson

A Figura a 46 mostra o mapa da salinidade média na superfície e no fundo da laguna,  $k=1$  e  $k=5$ , respectivamente.

Figura 46 – Salinidade média na superfície e no fundo simulada para LdC

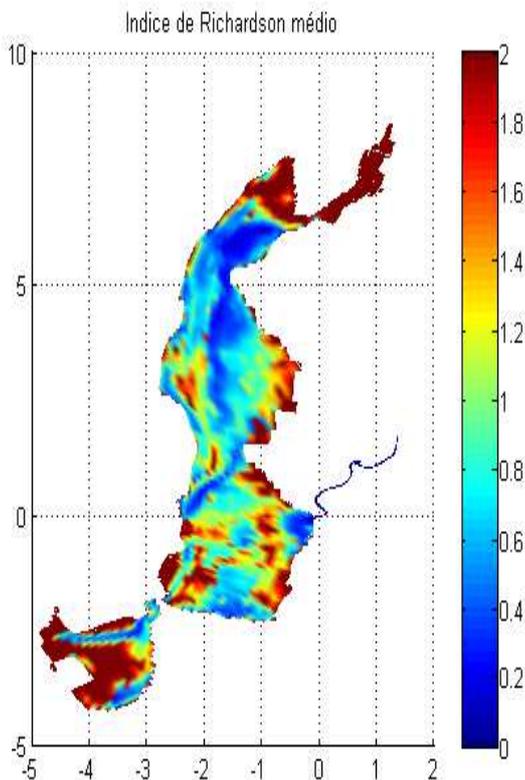


Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Na Figura 46, observa-se que existe uma diferença na média entre as salinidades de superfície e de fundo em toda a laguna que foi representada pelo modelo hidrodinâmico. A diferença é mais acentuada (de 2 a 3 PSU) na região Central da laguna, nas proximidades do canal da Barra da Lagoa e no setor Norte nas proximidades do rio João Gualberto Soares e rio Vermelho. A acentuada estratificação na porção central da laguna é conhecida, pois mostra que o modelo tende a representar bem essa estratificação.

O índice de Richardson (Figura 47) mede o quanto é significativa a variação das velocidades horizontais ao longo do eixo vertical associado à diferença de salinidade de superfície e de fundo, ou seja, a tendência do ambiente em formar colunas d'água estratificadas, sendo que os valores mais próximos de zero possuem tendência maior e pontos com valores maiores são pontos de coluna d'água homogêneas.

Figura 47 – Índice de Richardson do campo vetorial de correntes na Lagoa da Conceição (365 dias de simulação)



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Os valores encontrados mostram regiões de proximidade aos rios mais importantes e em proximidade a regiões de fluxo muito elevado com valores maiores do índice de Richardson, sendo que grandes regiões do setor Norte, Centro-Norte e Central apresentam potencial para

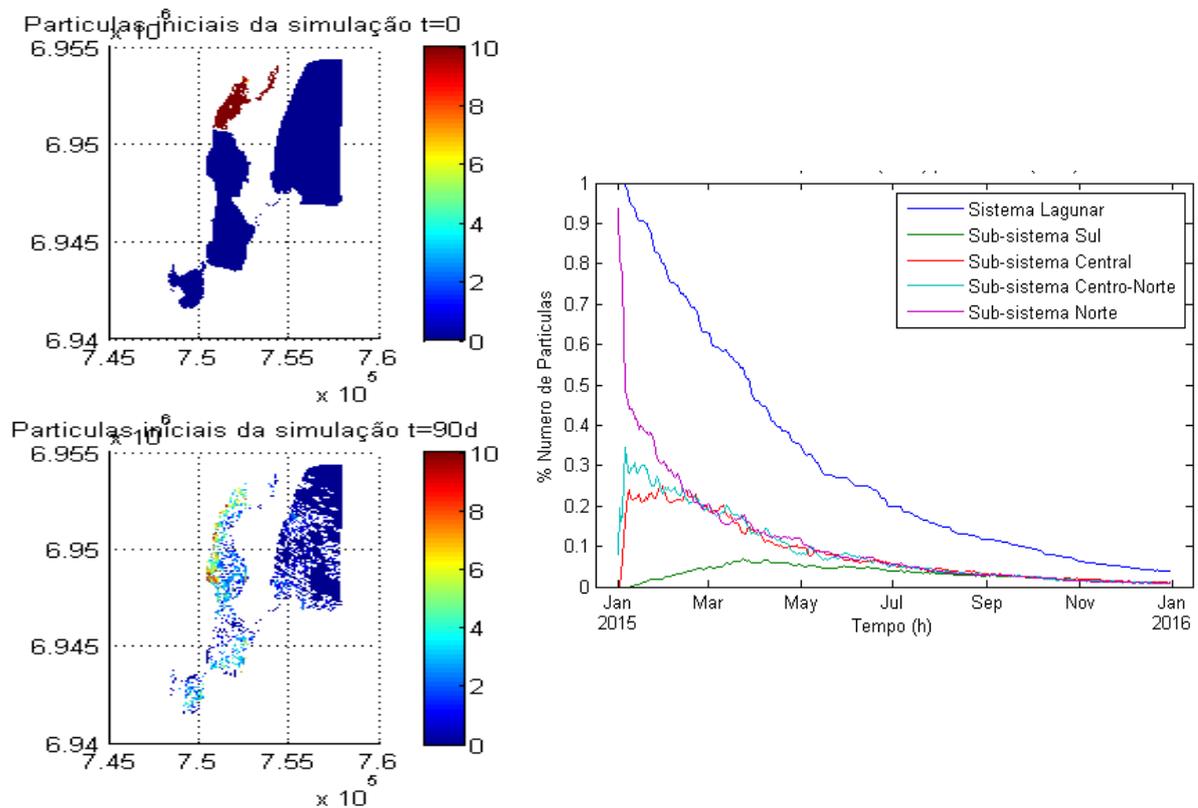
estratificação elevado pelo índice de Richardson. A região Sul apresenta valores muito altos, o que dificulta a formação de estratificação, apesar da tendência mostrada pela circulação de alta pressão (Figura 47).

### 3.2.11 Tempo de Residência dos Compartimentos e Conectividade

O tempo de residência médio dos setores da laguna foi estimado por meio do método do balanço de massa em estado estacionário do LOICZ (GORDON *et al.*, 1996) e através do método de modelagem laringiana (MONSEN *et al.*, 2002) com o Delft-3D Part.

A simulação para cada setor da laguna foi realizada lançando separadamente 10.000 partículas uniformemente espalhadas em cada setor, depois foi avaliado o tempo necessário para que as partículas se dispersassem até sair da laguna. A Figura 48 apresenta o resultado da simulação lagrangeana do setor Norte ao longo do tempo.

Figura 48 – Simulação do tempo de residência do setor Norte da LdC: a) Mapa em  $t=0$  e  $t=90d$ ; b) Somatório de partículas acumuladas ao longo do tempo

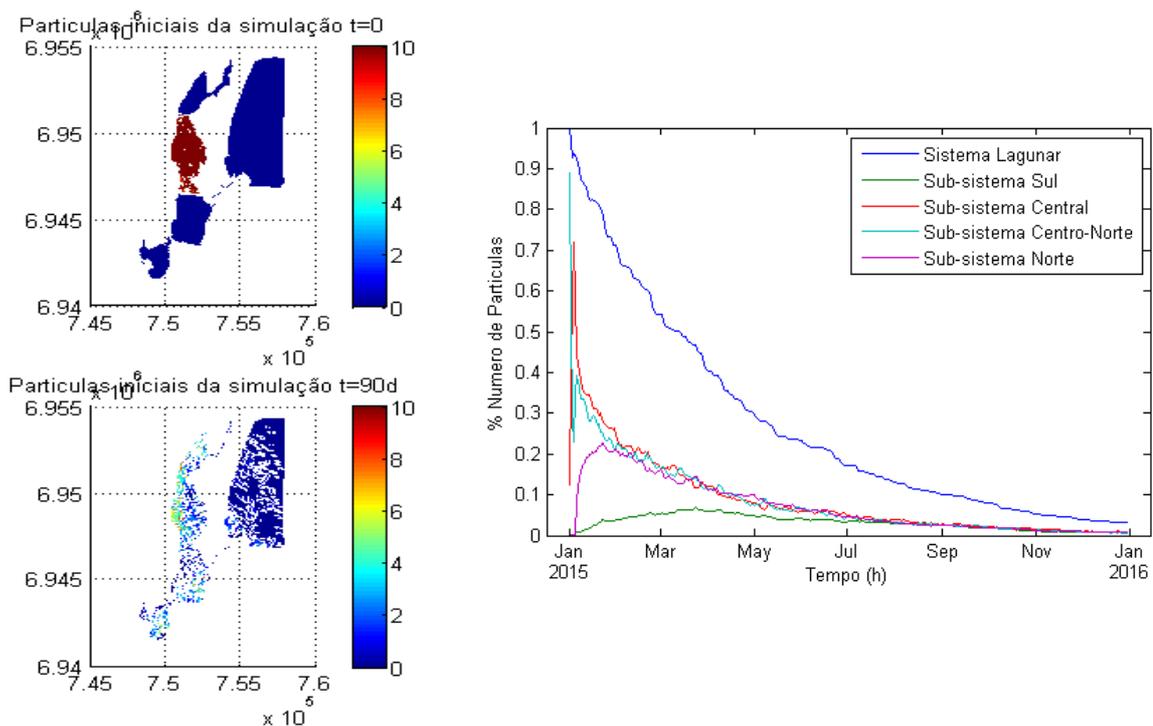


Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Para a simulação do setor Norte, pode-se verificar que as partículas lançadas inicialmente são rapidamente levadas aos setores Centro-Norte e Central. Esses setores alcançam 35% e 25% da quantidade total das partículas lançadas inicialmente, respectivamente, o que mostra uma grande conectividade entre eles. Já o setor Sul demora aproximadamente quatro meses para alcançar a concentração máxima do traçador, e o valor não ultrapassa 5%. A taxa de 50% de redução das partículas no setor acontece em aproximadamente 10 dias, alcançando 20% de partículas residuais em aproximadamente 90 dias. Outra verificação é que em aproximadamente 180 dias apenas 10% das partículas permanecem na laguna.

O setor Centro-Norte se apresenta como uma etapa de transição entre o setor Central e Norte, como mostra a Figura 49.

Figura 49 – Simulação do tempo de residência do setor Centro-Norte da LdC: a) Mapa em  $t=0$  e  $t=90$ d; b) Somatório de partículas acumuladas ao longo do tempo



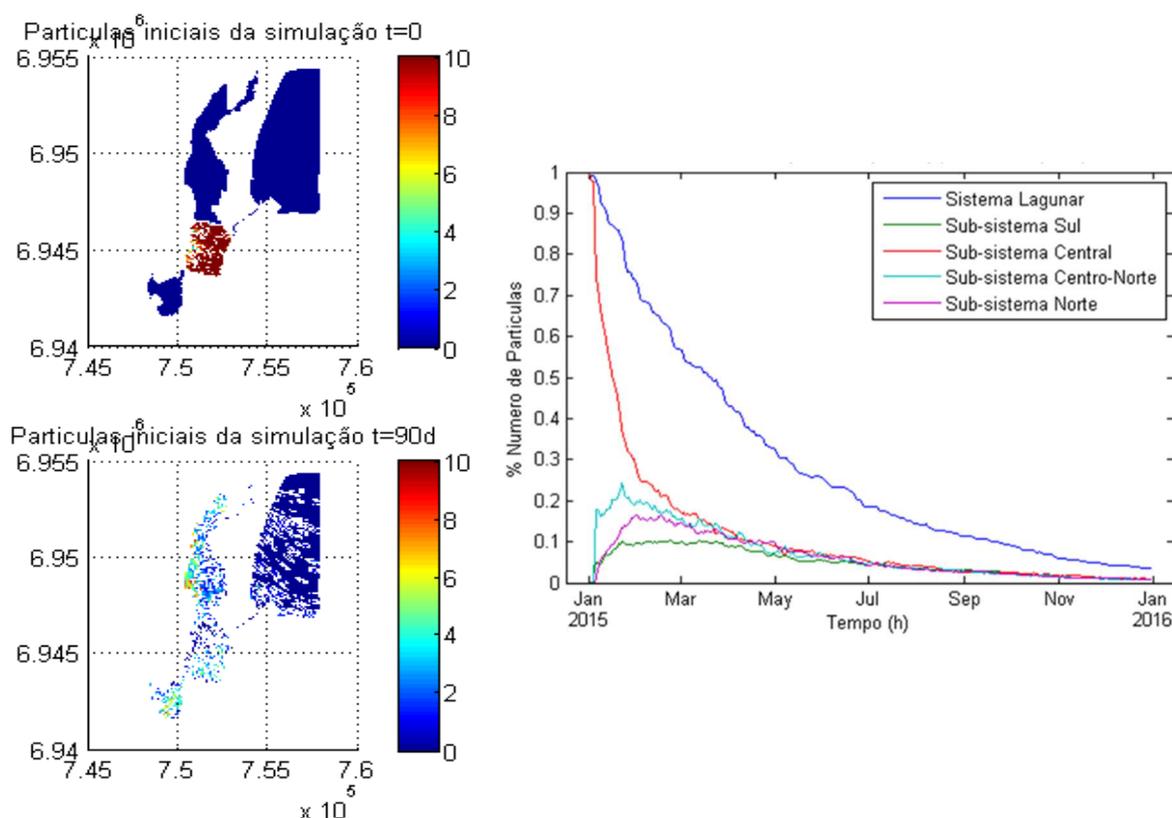
Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

As partículas lançadas inicialmente nesse setor são rapidamente levadas aos setores Central e Norte. Esses setores alcançam 70% e 25% da quantidade total das partículas lançadas inicialmente em apenas alguns dias, o que mostra uma grande conectividade entre eles, sobretudo o setor Central. Já o setor Sul demora aproximadamente quatro meses para alcançar a concentração máxima do traçador, e o valor não ultrapassa 7%. A taxa de 50% de redução das

partículas no setor acontece em aproximadamente cinco dias alcançando 10% de partículas residuais em aproximadamente 150 dias.

O setor Central é o mais próximo do Canal e se encontra como setor de transição entre todos os outros setores e o mar, portanto, uma pequena porção dos traçadores chegou a todos os outros setores, mas a maioria foi diretamente para o oceano (Figura 50).

Figura 50 – Concentração de partículas ao longo da simulação de tempo de residência do setor Central da laguna

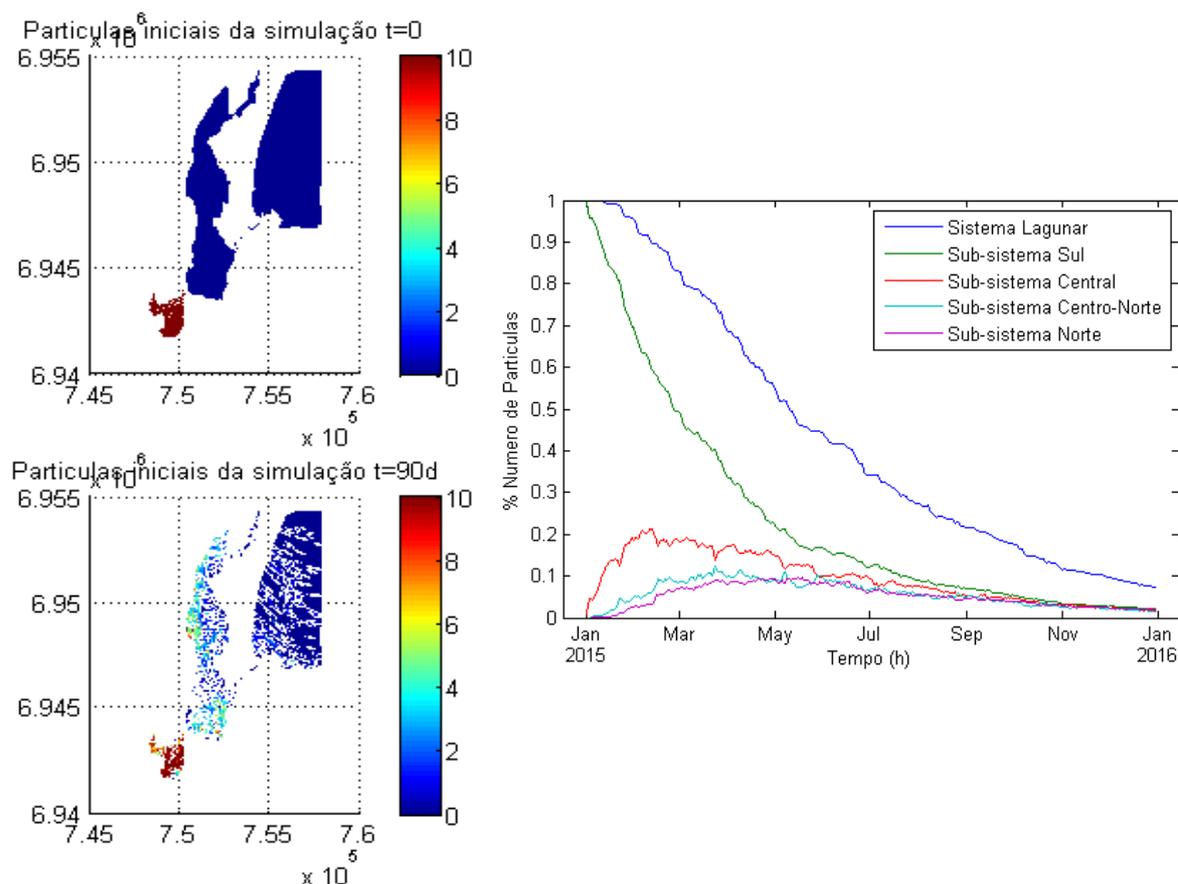


Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

As partículas lançadas inicialmente nesse setor são rapidamente levadas aos demais, contudo, a quantidade de partículas que fica nos outros setores é baixa, sendo que no setor Centro-Norte o valor máximo é 25%, no Norte é 17% e no Sul é 10%. A taxa de 50% de redução das partículas no setor acontece em aproximadamente 20 dias, alcançando 10% de partículas residuais em aproximadamente 120 dias.

O setor Sul é o mais isolado da laguna, sendo aquele que possui maior dificuldade de dispersão das partículas (Figura 51).

Figura 51 – Concentração de partículas ao longo da simulação de tempo de residência do setor Sul da laguna



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

As partículas lançadas inicialmente são lentamente levadas aos demais setores da laguna. O setor Central recebe 23% das partículas. Nos setores Norte e Centro-Norte, os valores alcançam máximos de 10% e 9%, respectivamente. Esse resultado evidencia a pequena conectividade entre o setor Sul e os demais setores da laguna, com exceção do setor Central que é o único caminho para as suas águas alcançarem o oceano. A taxa de 50% de redução das partículas no setor acontece em aproximadamente 60 dias, alcançando 10% de partículas residuais em aproximadamente 180 dias.

Os valores do tempo de residência de cada setor estimado pelo método da modelagem numérica com traçador lagrangeano foram maiores do que o tempo estimado pelo método do balanço de massa LOICZ (Tabela 19). Provavelmente, esse efeito ocorre pela superestimação do termo de fluxo difusivo entre os compartimentos devido à diferença de salinidade e reduziu em 60% o Tempo de Residência. Esse efeito de aumento dos valores estimados para o tempo de residência pelo uso de modelagem numérica em comparação ao LOICZ foi encontrado também por Warner, Geyer e Arango (2010) para o cálculo do tempo de residência, já que o

TR do estuário do rio Hudson nos EUA foi 50% menor usando o LOICZ em comparação ao método do traçador lagrangeano, e por Andutta *et al.* (2016) no Sistema Estuarino dos rios Caravelas e Peruípe. Recentemente, Silva *et al.* (2019) também verificaram através do método da modelagem de partículas que o tempo de residência da Lagoa Mirim no Rio de Janeiro é pelo menos o dobro do que o estimado pelo método do LOICZ.

Tabela 19 – Tempo de Residência (TR) dos setores, da laguna e conectividade entre os setores

<b>Setor</b>	<b>TR do setor (dias)</b>	<b>TR através do LOICZ</b>	<b>TR estimado do Salinidade média (PSU)</b>	<b>Setores de mais conectividade e % máximo de concentração de partículas</b>
<b>Norte</b>	210	58	21,2	CN (30%) e Central (26%)
<b>Centro-Norte (CN)</b>	180	32	25,5	Central (70%) e Norte (20%)
<b>Central</b>	150	16	27,2	Centro-Norte (20%)
<b>Sul</b>	270	131	15,5	Central (20%)
<b>LdC</b>	365	160	18,0	-

Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

O setor da laguna com o maior tempo de residência é o setor Sul (270 dias), característica que era esperada devido à menor conexão com o oceano observada pela menor salinidade (18 PSU). O setor Norte é distante do oceano, porém não possui célula de estrangulamento como o setor Sul, sendo o segundo maior TR (210 dias) e salinidade média de 21 PSUs. O setor Centro-Norte possui uma característica de transição, que faz com que ele tenha um TR menor do que a extremidade Norte (180 dias) e uma salinidade mais próxima da oceânica (25 PSU). O setor Central possui o menor tempo de residência da laguna (150 dias) devido a sua conexão muito próxima com o oceano.

Segundo Oliveira e Kjerfve (1993), as lagunas de Madaú e Manguaba, localizadas no litoral do Estado de Alagoas, apresentam áreas superficiais de 24 e 43 km<sup>2</sup>, superiores do que a LdC, com tempos de residência de 16 e 36 dias. Porém essas lagunas possuem canais mais largos de conexão com o oceano e estão localizadas em região de influência de macromarés.

Já a laguna de Guarapina, localizada no litoral do Estado do Rio de Janeiro apresenta, segundo Knoppers *et al.* (1991), área superficial de 6,4 km<sup>2</sup>, uma vazão de 0,5 m<sup>3</sup>/s e tempo de residência de 14 dias. A laguna de Piratininga, também no Estado do Rio de Janeiro, apresenta, segundo Sterza e Fernandes (2006), área superficial de aproximadamente 3 km<sup>3</sup> de descarga hidrológica de 01m<sup>3</sup>/s e tempo de residência de 30 dias (Tabela 20).

Tabela 20 – Enquadramento da Lagoa da Conceição em comparação com outras lagunas costeiras do Sul do Brasil

<b>Características</b>		<b>MUL</b>	<b>MAL</b>	<b>GL</b>	<b>PL</b>	<b>LC</b>
<b>Localização</b>	Latitude	9°35''	9°46''	22°56''	22°56''	27°28''
	Longitude	35°44''	35°58''	42°42''	43°00''	48°24''
<b>Área superficial (km<sup>2</sup>)</b>		24	43	6,38	2,9	20,1
<b>Volume (10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>)</b>		69,8	97,7	6,5	2	57
<b>Profundidade média (m)</b>		1,5	2,1	1	0,7	2,5
<b>Amplitude de maré (m)</b>		0,2	0,03	0,03	0,04	
<b>Prisma de maré (10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>)</b>		17,3	6,1	0,38	0,11	
<b>Média da descarga hidrológica m<sup>3</sup>/s</b>		Chuvoso	65,9	57,2		2,2
		Seco	14,1	15,9		1,3
		Média anual	30	28	0,46	0,1
<b>Tempo de residência (dias)</b>		16	36	14	30	360

MUL Laguna de Mandaú, MAL Laguna de Manguaba, GL Laguna de Guarapina, PL Laguna de Piratininga e LC Lagoa da Conceição.

Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

### 3.2.12 Conclusão

Verificou-se que o modelo teve boa precisão para representar os níveis da laguna (considerado excelente pela literatura), os erros associados às estimativas de nível da ordem de 8,5 cm (RMSE = 0,0085) e o coeficiente de correlação  $R^2$  de 0,81. Para as correntes, também foi possível observar uma boa aproximação em termos de intensidade, de direção e de sentido em comparação com os dados de corrente observados com o ADCP no setor Norte da laguna.

As velocidades médias no corpo de água são maiores nas áreas rasas e menores nas áreas profundas. A velocidade média por setor é relativamente baixa, da ordem de 1,5 cm/s em média no setor Sul, 4,2 cm/s na região Central, 2,1cm/s no Centro-Norte e 1,4cm/s no setor Norte. Entretanto, no Canal da Barra da Lagoa, as velocidades de fluxo foram uma ordem de grandeza maior (média de 21,8cm/s), isso se deve ao fato de o canal ser relativamente estreito e raso, tendo que escoar toda vazão de vazante e enchente da laguna que passa exclusivamente por ele.

Dos estressores meteo-oceanográficos aos quais a Lagoa da Conceição está submetida, a componente de oscilação de nível oceânico é a que mais influencia o nível da laguna (cerca de 92,4% da variância nos níveis do setor Central).

O fluxo residual da laguna é vazante, sendo que os maiores fluxos são provenientes do rio João Gualberto e rio Vermelho (setor Norte) e do somatório das contribuições da margem Oeste da laguna (linha de Costa Oeste – UrHs Maciços).

Através dos campos vetoriais, é possível identificar quatro células de recirculação de importância hidráulica para a laguna, sendo uma de alta pressão na margem Centro-Leste do setor Central (onde existe tendência à deposição de material no fundo) na região da estratificação vertical encontrada por outros autores na literatura. Foi identificada ainda outra célula de recirculação de alta pressão no setor Sul da laguna (na parte mais profunda) e duas células de baixa pressão (com tendência ao espalhamento de material e ressuspensão de nutrientes do fundo) nos setores Central e Centro-Norte da laguna.

O índice de Richardson corroborou com valores abaixo de 0,25 na região estratificada do setor Central, indicando uma tendência hidrodinâmica e estratificação além da célula de recirculação identificada pelas linhas de fluxo hidrodinâmico. Por outro lado, na celular de recirculação do setor Sul, os valores do índice foram superiores, o que indica que uma possível estratificação seria mais difícil do que na região Central.

Os tempos de residência estimados pelo método do traçador lagrangiano foi de 365 dias, cerca de duas vezes maiores do que os estimados por balanço de massa LOICZ (160 dias), resultado encontrado por outros pesquisadores na literatura. Este se deve ao fato de o LOICZ estimar um alto fluxo difusivo que aumenta virtualmente as trocas entre os compartimentos.

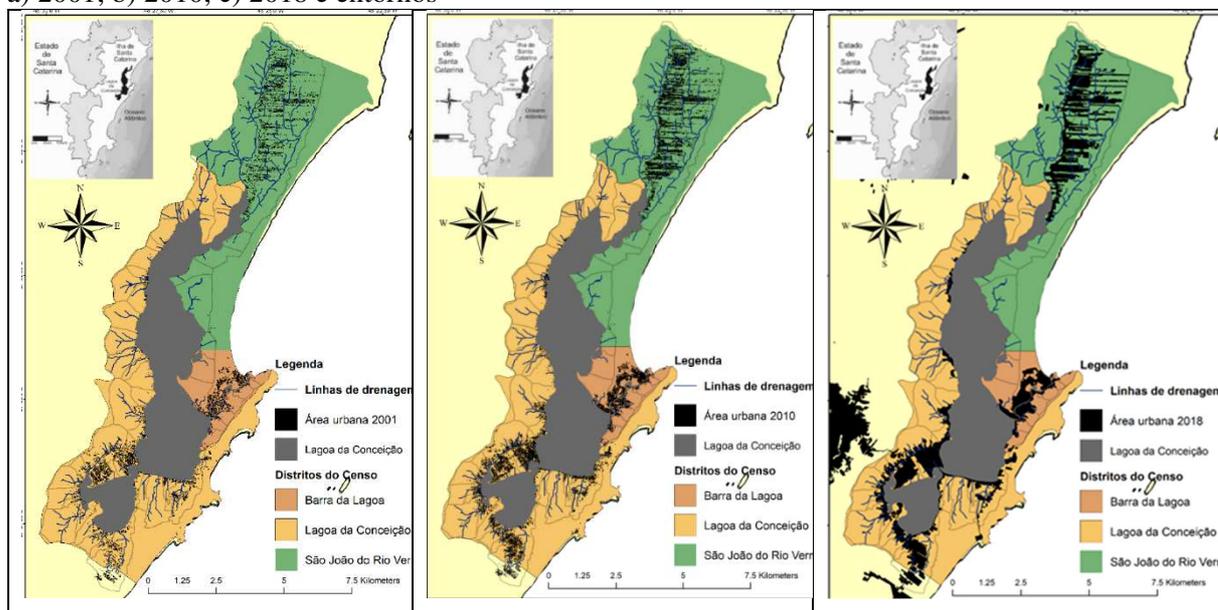
Os tempos de residência da LdC são relativamente maiores quando comparados a lagunas de tamanhos similares, como Mandaú e Manguaba no Estado do Alagoas, isso se deve ao fato de a LdC possuir um canal mais estreito de conexão com o oceano e influência oceânica reduzida devido ao filtro da maré astronômica provocada pelo Canal. Mesmo assim, a laguna possui grande influência oceânica nos tempos de residência. Dos setores da laguna, o de maior tempo de residência é o setor Sul com 270 dias (mais longe do canal), o setor Norte chegou a 210 dias, Centro-Norte 180 dias, sendo o setor Central o com menor tempo de residência (150 dias).

### 3.3 ESTIMATIVA DAS DESCARGAS DE NUTRIENTES NATURAL E ANTRÓPICA NA LAGUNA ATRAVÉS DOS ESCOAMENTOS SUPERFICIAIS E DAS PROJEÇÕES FUTURAS

#### 3.3.1 Expansão da Mancha Urbana da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição

Segundo os dados disponibilizados pelo Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis (IPUF) e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) existem três Distritos Administrativos importantes para a Bacia da Lagoa da Conceição, são eles: Lagoa da Conceição, Barra da Lagoa e São João do Rio Vermelho. O mapa é apresentado na Figura a 52.

Figura 52 – Mapa dos Distritos Administrativos e da mancha urbana da bacia hidrográfica da LdC em: a) 2001; b) 2010; c) 2018 e entornos



Fonte: Adaptada de IBGE e IPUF

Como é possível verificar na figura, os três distritos possuem mancha urbana em descimento contínuo. A aquisição dos dados populacionais, referentes aos distritos da bacia, ocorreu através do banco de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 – Dados populacionais para os distritos que compõem a bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição

Distritos	1970	1980	1991	2000	2010
São João do Rio Vermelho	981	1,223	1,864	6,791	13,513
Barra da Lagoa	1,061	1,656	2,919	4,331	5,674
Lagoa da Conceição	1,883	4,258	6,654	9,849	11,811
Total Bacia da Lagoa	3,925	7,137	11,437	20,971	30,998

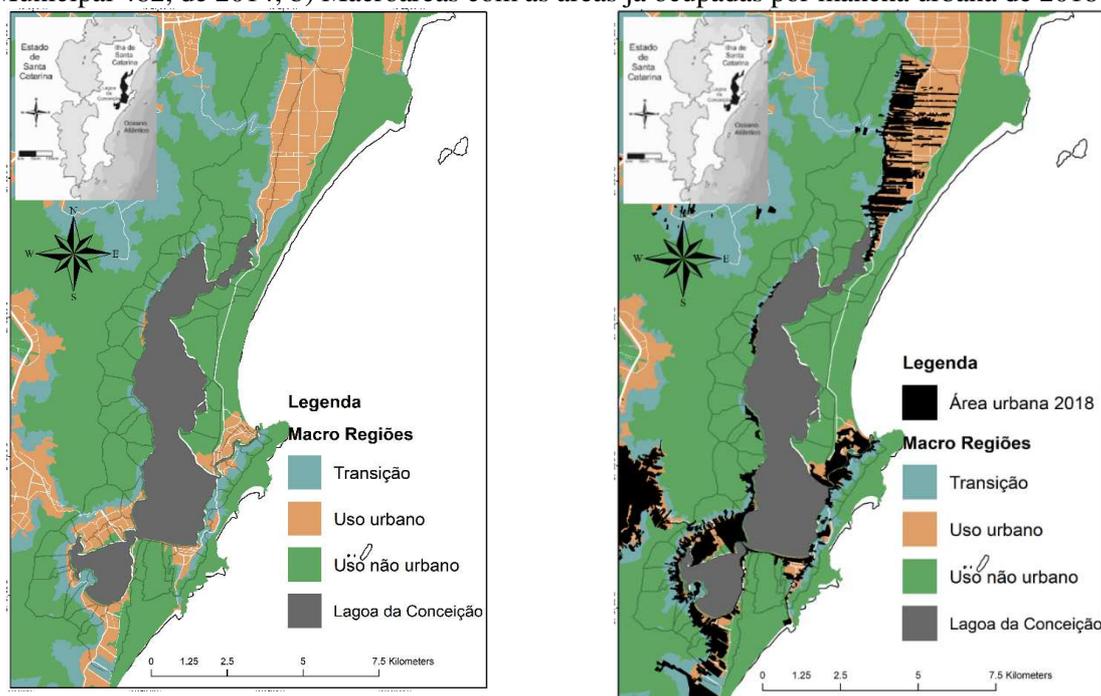
Fonte: Censos do IBGE

Através dos dados, é possível observar um crescimento de 3,9 mil para 30,9 mil habitantes de 1970 para 2010, configurando um crescimento populacional de 689% ao longo desses 40 anos. Um crescimento muito grande que mostra a importância do planejamento urbano para evitar possíveis alterações deletérias na qualidade da água da laguna.

### 3.3.2 Definição da População Máxima da Bacia Hidrográfica ou Capacidade Suporte – A Partir do Plano Diretor da Cidade de Florianópolis

Para definição da população máxima de ocupação para o modelo estatístico, foi utilizado o mapa do Plano Diretor de Florianópolis, Lei Municipal n. 482, de 2014. Para a caracterização das taxas de ocupação, da taxa de impermeabilização e da densidade populacional líquida máxima, foram utilizadas as tabelas F01 e F02 do Plano Diretor (Lei n. 482, de 2014). A Figura 53 mostra as macroáreas de uso urbano, não urbano e de transição.

Figura 53 – a) Macroáreas definidas pelo planejamento urbano do Plano Diretor de Florianópolis: Lei Municipal 482, de 2014; b) Macroáreas com as áreas já ocupadas por mancha urbana de 2018



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Como é possível observar, as áreas de uso urbano ainda não foram totalmente ocupadas nos três distritos, contudo, a região Norte se destaca por ainda possuir muitas áreas aptas para a urbanização (segundo o Plano Diretor da cidade), portanto, deve ser a próxima região a dominar a dinâmica populacional da BH. Além disso, pode-se verificar algumas regiões de uso não urbano que foram ocupadas, nas quais se destacam porções da margem Oeste da laguna.

Considerando que os distritos apresentam dinâmicas populacionais muito distintas, foi ajustado o melhor modelo logístico de crescimento populacional separadamente para cada um deles (Tabela 22).

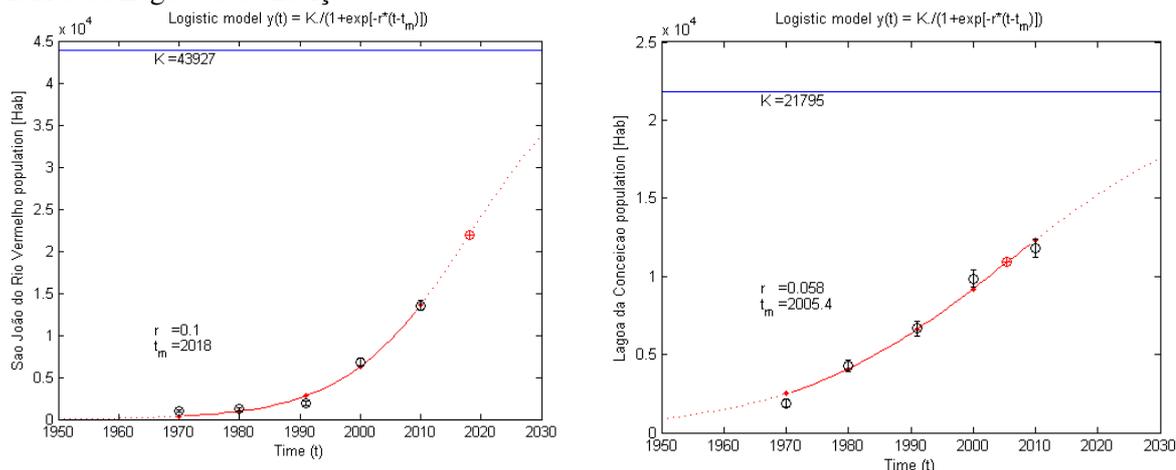
Tabela 22 – Parâmetros de ajuste da projeção logística para os distritos da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição

Distrito	Capacidade suporte (k)	Taxa de crescimento máximo (r)	Taxa de crescimento máximo (hab./ano)	Tempo para atingir 50% da população (tm)
São João do Rio Vermelho	<b>44.085 habitantes</b>	<b>0.110</b>	<b>1.091</b>	<b>2018</b>
Barra da Lagoa	<b>5.421 habitantes</b>	<b>0.080</b>	<b>108</b>	<b>1986</b>
Lagoa da Conceição	<b>22.285 habitantes</b>	<b>0.057</b>	<b>318</b>	<b>2005</b>
Total	<b>71.792</b>	<b>0,07</b>	<b>1.256</b>	<b>2015</b>

Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

O Distrito de São João do Rio Vermelho demonstrou o maior tempo para alcance de 50% da população total ( $t_m=2018$ ). A Barra da Lagoa, por sua vez, apresentou a maior taxa de crescimento máximo estimado ( $r=0,11$ ). Com relação à Lagoa da Conceição, foi o distrito que apresentou os valores de  $r$  e  $t_m$  intermediários aos demais. As Figuras 54 mostram os resultados.

Figura 54 – Projeção populacional logística ajustada aos dados populacionais do: a) Distrito de São João do Rio Vermelho; b) Projeção populacional logística ajustada aos dados populacionais do Distrito da Lagoa da Conceição



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

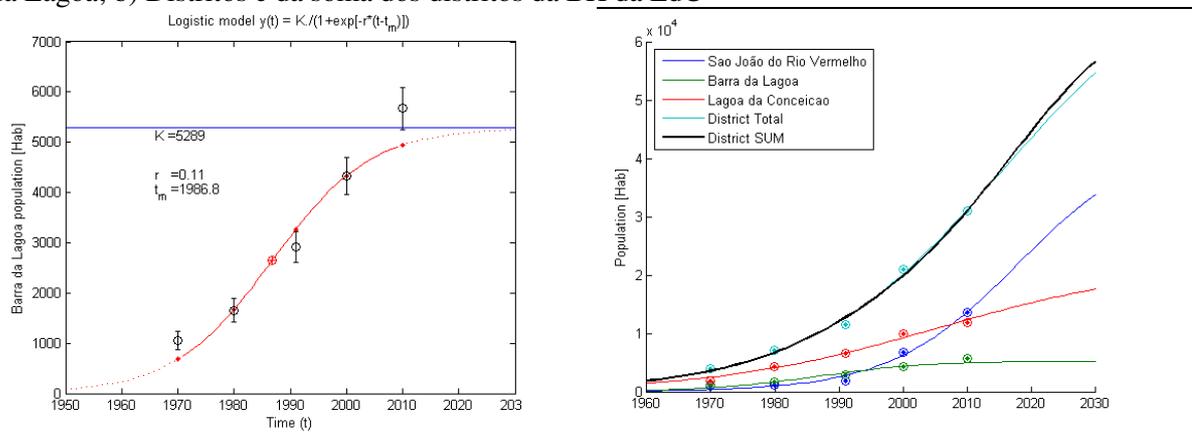
Como se pode ver nas figuras, o ano de 2020 mostrou uma tendência à redução do crescimento populacional nos três distritos, porém pode-se destacar que o Distrito São João do Rio Vermelho está ainda próximo da taxa de crescimento máximo que foi no ano de 2018, e a tendência de relaxamento da curva de crescimento e sua estabilização possivelmente por volta

do ano de 2050, atingindo a população máxima esperada pelo Plano Diretor de 2014, que é de 43.927 habitantes.

Para o Distrito da Lagoa da Conceição, verificou-se que em 2020 houve um momento de relaxamento da curva que atingiu seu máximo crescimento em 2005 e que esse distrito entrará em estabilidade por volta do ano 2040, atingindo seu limite populacional previsto pelo Plano Diretor de aproximadamente 21.795 habitantes.

A Figura 55 apresenta os resultados da projeção populacional para o distrito da Barra da Lagoa e a soma dos distritos da Bacia Hidrográfica

Figura 55 – Projeção populacional logística ajustada aos dados populacionais do: a) Distrito da Barra da Lagoa; b) Distritos e da soma dos distritos da BH da LdC



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

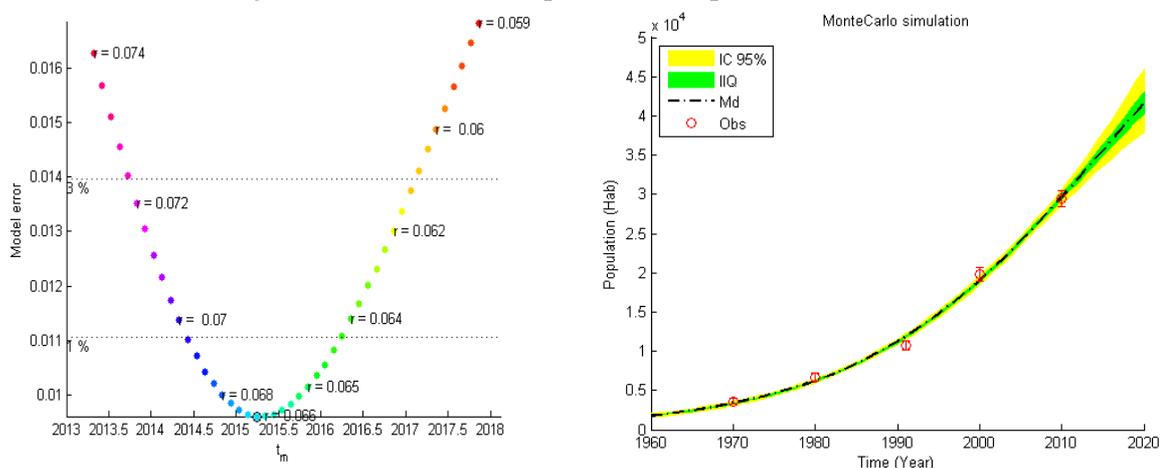
Para o Distrito da Barra da Lagoa, verifica-se que o aumento populacional já atingiu uma taxa de relaxamento madura, sendo que a população em 2010 já excedia o máximo permitido pelo Plano Diretor de Florianópolis de 2014. Uma das razões para isso pode ser verificada na Figura 53 na qual se vê que a mancha urbana do distrito se estende para regiões que seriam consideradas de transição às margens da região reservada para urbanização. Outra razão provável para essa diferença pode ser pela taxa de ocupação não estar sendo respeitada por parte dos moradores do distrito.

A Figura 55 mostra como aconteceu a dinâmica populacional nos distritos. Pode-se observar que, desde o início do período analisado, o Distrito de São João do Rio Vermelho era o menos expressivo e que a partir de 2008 passou a ser o mais populoso dos distritos da bacia hidrográfica, tendência esta que se apresenta como dominante para os próximos anos devido a sua alta capacidade de suporte definida pelo Plano Diretor. Isso indica que há cada vez mais influências antrópicas nas Sub-Bacias 1 e 2 (rio João Gualberto e rio Vermelho) e que, no

momento das coletas de amostras de qualidade da água dos rios (2015/2016 e 2018), a população na BH já era mais concentrada nessas bacias.

A fim de quantificar os erros associados à estimativa dos parâmetros  $r$  e  $t_m$ , foi feita uma análise de sensibilidade realizando o ajuste dos parâmetros para o menor erro possível para os anos 1970, 1980, 1990, 2000 e 2010 – dos quais se possuem dados censitários. A Figura 56 mostra o melhor ajuste para o modelo da soma dos três distritos. A partir dos erros estimados, foi possível realizar a estimativa de Monte Carlo para definir os padrões de distribuições de probabilidade da população censitária ao longo do tempo.

Figura 56 – a) Erro associado à estimativa dos parâmetros de  $r$  e  $t_m$  para os modelos ajustados aos dados censitários do IBGE (para erro < 5%); b) Curva da evolução do aumento populacional e erros estimados através do algoritmo de Monte Carlo para o desvio-padrão dos dados censitários do IBGE



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Pela figura, é possível observar que o erro associado à projeção é muito pequeno (erro < 5%), mesmo para grandes variações de  $r$  ( $r$  variando 0,059 a 0,074) e  $t_m$  ( $t_m$  variando de 2013,5 a 2017,5).

A Tabela 23 resume os resultados de projeção até 2040, quando a população chegará à cerca de 90% da capacidade-suporte das bacias hidrográficas.

Tabela 23 – Síntese dos resultados obtidos pela projeção logística para os três distritos que compõem a Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição

Distrito/Ano censo	População Distrito na BH [hab.]					Modelo Logístico			Taxa de ocupação em 2040
	1970	1980	1991	2000	2010	2020	2030	2040	2040/K
<b>São João do Rio Vermelho</b>	975	1,216	1,853	6,748	13,427	24,002	33,629	39,520	90%
<b>Barra da Lagoa</b>	795	1,240	2,186	3,243	4,249	4,775	5,110	5,277	97%
<b>Lagoa da Conceição</b>	1,883	4,258	6,654	9,849	11,811	15,312	17,721	19,452	87%
<b>Soma Distritos</b>	3,653	6,714	10,693	19,840	29,487	44,089	56,461	64,249	89%
<b>Soma modelos</b>	3,071	5,927	11,683	19,195	30,411	42,843	53,755	61,538	86%

Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

A partir da população estimada pela curva logística, foi possível fazer a projeção das descargas antrópicas de nutrientes e avaliar o impacto desse aumento populacional, como será visto nos itens seguintes.

### 3.3.3 Monitoramento das Descargas Superficiais de Nutrientes

Os rios monitorados foram escolhidos por representarem unidades hidrológicas diferentes. Além disso, eles também estão em distritos políticos diferentes, como mostra a Tabela 24.

Tabela 24 – Características populacionais das sub-bacias monitoradas

NOME DO RIO	SUB-BACIA HIDROGRÁFICA	UNIDADE HIDROLÓGICA	DISTRITO DEFINIDO PELA SMDU	POPULAÇÃO EM 2010 (CENSO)	POPULAÇÃO ESTIMADA	TAXA DE OCUPAÇÃO URBANA
RIO JOÃO GUALBERTO	01	Norte	São João do Rio Vermelho	6540	8900	19%
PORTO DA LAGOA	24	Dunas	Lagoa da Conceição	2025	2379	14%
APA (CENTRINHO)	34	Deposito Sedimentar	Lagoa da Conceição	1818	2133	34%
COSTA DA LAGOA	49	Maciço Oeste	Lagoa da Conceição	106	124	2%

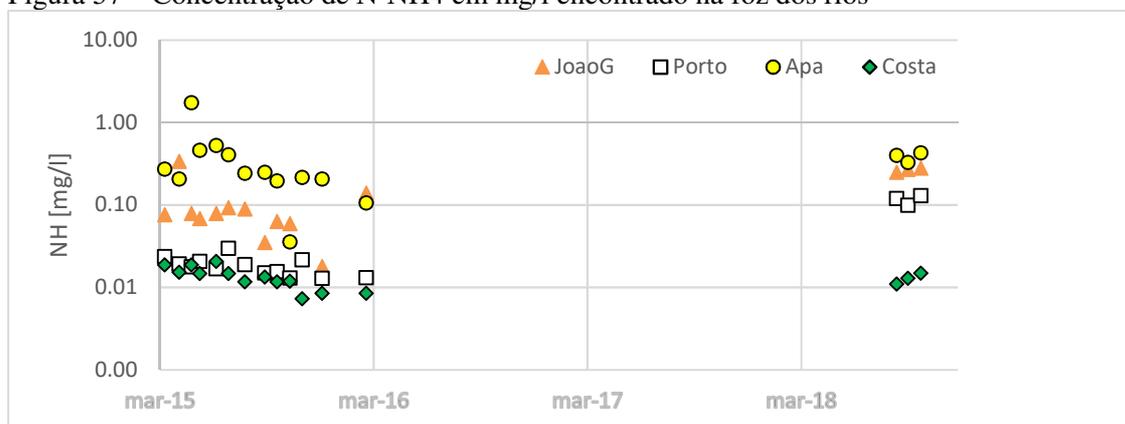
Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

A concentração de nutrientes observadas na jusante dos rios deve representar tanto a contribuição natural da bacia hidrográfica quanto as contribuições de origem antrópica geradas

majoritariamente na Bacia da Lagoa da Conceição por esgoto doméstico tratado ou parcialmente tratado.

O nitrogênio amoniacal é a forma de nitrogênio mais próxima da ureia (excreta humano) presente no esgoto doméstico. A presença desse nutriente em elevadas concentrações dessa forma de nitrogênio em ambientes aquáticos é um indicador de presença de esgoto não tratado ou tratado parcialmente. A Figura 57 mostra que as três sub-bacias mais populosas monitoradas – rio João Gualberto e rio APA no Centrinho e Porto da Lagoa – apresentam valores de concentrações de N-NH<sub>4</sub> maiores, e no rio João Gualberto e no rio APA há mais de uma ordem de grandeza maior do que a concentração da SBH do rio da Costa Cachoeira que não possui ocupação urbana.

Figura 57 – Concentração de N-NH<sub>4</sub> em mg/l encontrado na foz dos rios



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Como é possível ver, os valores para a concentração de nutrientes na foz dos rios seguem uma correlação com a urbanização, sendo que o rio da bacia mais densamente urbanizada possui as maiores concentrações de N-NH<sub>4</sub>, ou seja, o rio APA (0,8 a 1,0 mg/l) com 34% de taxa de ocupação em 2018. Na sequência, tem-se a bacia do rio João Gualberto (0,08 a 0,8 mg/l) que apresentou 19% de taxa de ocupação em 2018. A bacia do rio Porto da Lagoa apresentou valores intermediários de concentração (0,04 a 0,12 mg/l) com taxa de ocupação em 2018 de 14%. Já o rio da Costa da Lagoa apresentou menores valores de N-NH<sub>4</sub> – da ordem de 0,01 mg/L – e possui taxa de ocupação de 2%. Apesar da grande discrepância entre os rios urbanizados e não urbanizados, os valores encontrados estão abaixo dos valores máximos permitidos pela legislação Conama 357 para rios de classe 2 (que é o enquadramento dos rios estudados).

O nitrogênio amoniacal após uma oxidação natural se torna nitrito (forma instável) e nitrato (forma estável). Da mesma maneira que o nitrogênio amoniacal, essa forma de

nitrogênio também possui efeito deletério para o ambiente aquático quando encontrado em elevadas concentrações. A Figura 58 apresenta os valores de nitrato encontrados nos rios.

Figura 58 – Concentrações de N-NO na foz dos rios

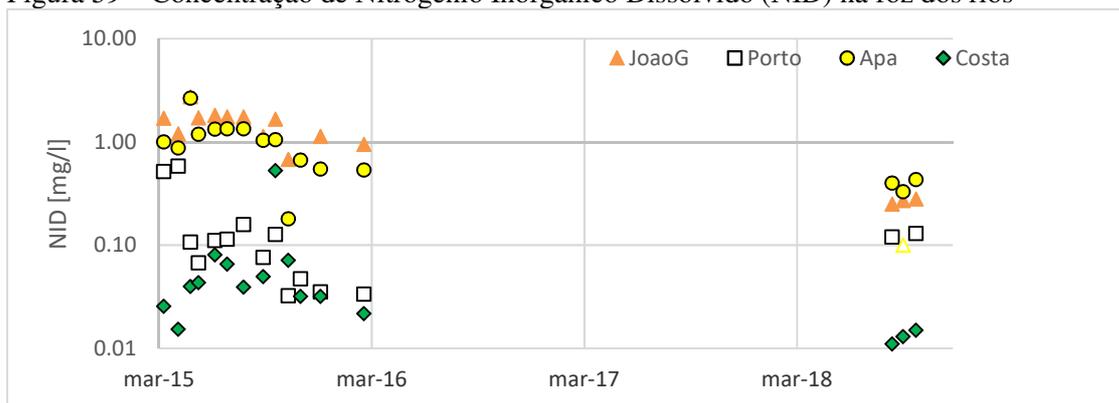


Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Como é possível observar na figura, as concentrações de nitrato nos rios João Gualberto e APA (Centinho) são de uma ordem de grandeza a mais do que a que do rio da Costa da Lagoa e do rio do Porto da Lagoa, que possuem valores intermediários. Esse resultado é similar ao encontrado no nitrogênio amoniacal, o que indica que o nitrato também possui fonte antrópica e que este é proveniente do processo de nitrificação que ocorre no interior dos rios.

Para uma avaliação do efeito total das concentrações de nitrogênio na laguna, é necessário avaliar o somatório das formas reduzidas e oxidadas desse nutriente. A Figura 59 apresenta os valores de NID (nitrogênio inorgânico dissolvido –  $N-NH + N-NO_x$ ).

Figura 59 – Concentração de Nitrogênio Inorgânico Dissolvido (NID) na foz dos rios

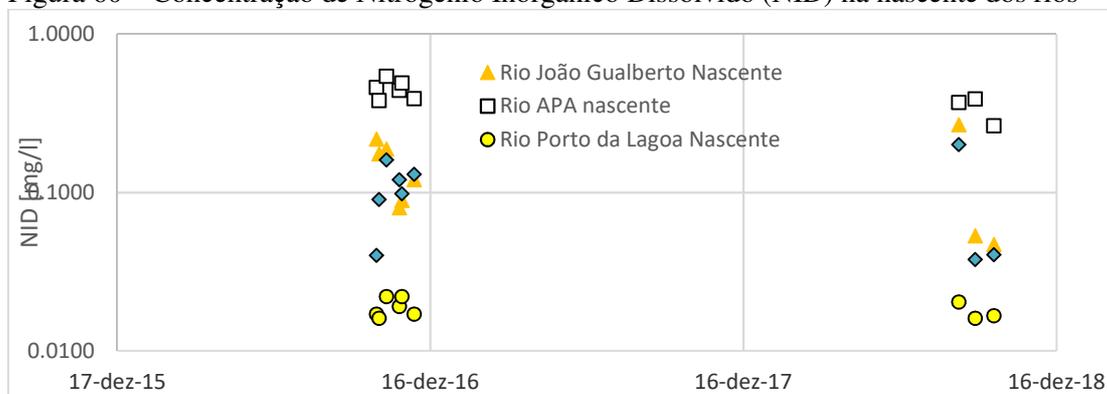


Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

O padrão de distribuição dos valores continua o mesmo, evidenciando uma diferença clara de acordo com o grau de urbanização da BH. Já nos resultados das nascentes, é possível observar uma inversão da importância dos rios, nesse caso, não se tem a influência humana na

qualidade da água, e o que se espera ver é as concentrações de nitrogênio de fonte geoquímica de cada rio. A Figura 60 apresenta os resultados obtidos nas nascentes para o NID.

Figura 60 – Concentração de Nitrogênio Inorgânico Dissolvido (NID) na nascente dos rios



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

As amostras foram colhidas em dois períodos, de agosto a novembro de 2016 e de agosto a outubro de 2018. As concentrações de NID mostram para rios urbanizados uma redução de uma ordem de grandeza em comparação a foz dos rios, mostrando que as descargas de NID por fonte geoquímica são muito pequenas quando comparadas com a fonte antrópica. Em contrapartida para o rio Costa Cachoeira, observa-se que as concentrações de NID são muito parecidas na nascente e na foz, o que indica que para esse rio a fonte predominante é geoquímica, resultado esperado pela sua baixa taxa de urbanização (2%).

O fósforo é outro nutriente muito importante para os processos ecológicos em ambientes aquáticos. Sua fonte pode ser igualmente geoquímica e antrópica e sua forma biodisponível é a forma inorgânica dissolvida. A Figura 61 mostra as concentrações de fósforo biodisponível ou PID na foz dos rios monitorados.

Figura 61 – Concentração de PID na foz dos rios

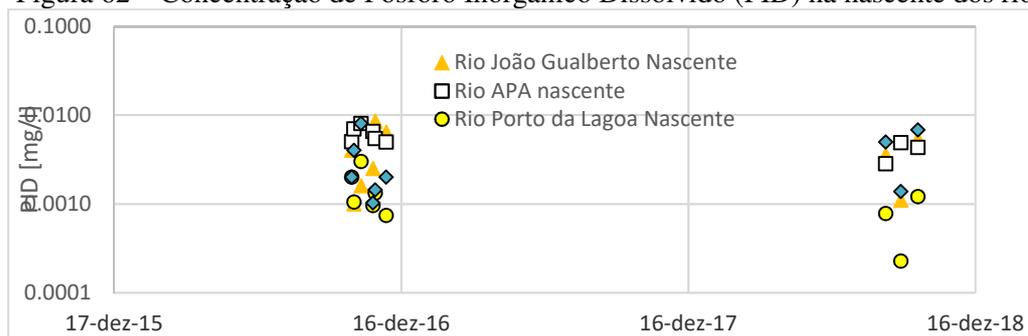


Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

As concentrações do rio APA foram de 0,05 a 0,5 mg/L, sendo as maiores encontradas, sugerindo um efeito de descargas de esgoto sanitário pela alta urbanização nessa SBH. O rio da Costa da Lagoa mostra-se mais uma vez com valores menores, resultado similar ao encontrado com o nitrogênio.

A fim de segregar as fontes geoquímicas das antrópicas de fósforo, também foram coletadas amostras nas nascentes dos rios monitorados. A Figura 62 apresenta os resultados.

Figura 62 – Concentração de Fósforo Inorgânico Dissolvido (PID) na nascente dos rios



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

As concentrações de PID nas nascentes variam de 0,001 a 0,01 mg/. Esses resultados foram menores do que na foz em todos os rios, sobretudo nos rios APA e João Gualberto, que tiveram um aumento de uma ordem de grandeza ou mais, sendo que ambos são rios mais urbanizados e monitorados.

A fim de avaliar o efeito desses lançamentos no corpo de água, se faz necessário quantificar a carga desses nutrientes, ou seja, o produto entre as concentrações e as vazões, quantificando a massa total destes que entram na laguna ao longo do tempo. A Figura 63 apresenta as descargas de N-NH em kg/dia lançadas por cada um dos rios na Lagoa da Conceição.

Figura 63 – Descargas de N-NH nos rios

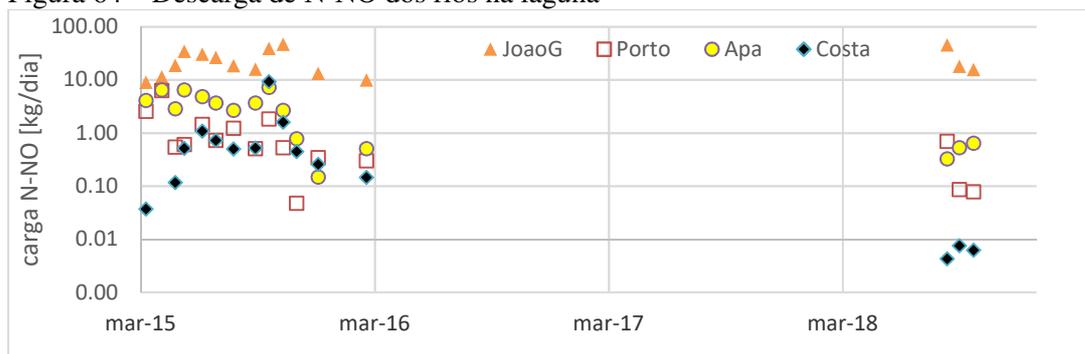


Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

A Bacia que apresentou descargas maiores foi a do rio APA, com valores da ordem de 1,0 a 10 kg/dia. A bacia do rio João Gualberto apresentou valores intermediários de 0,1 a 8 kg/d e as demais sub-bacias contribuem com descargas da ordem de 0,1 a 2 kg/dia.

Na Figura 64 é possível observar que as maiores cargas de nitrato estão associadas às sub-bacias do rio João Gualberto, de 0,1 a 5 mg/L, seguida pela SBH do rio APA, 0,8 a 1,2 mg/L.

Figura 64 – Descarga de N-NO dos rios na laguna



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Observando os valores de concentração das formas reduzidas e oxidadas de nitrogênio, é possível verificar que as formas reduzidas são ligeiramente preponderantes, o que sugere que o tempo de deslocamento dos nutrientes dissolvidos provenientes do esgoto domésticos não seja suficiente para oxidar completamente seu conteúdo no curto trajeto desses pequenos rios, chegando à laguna com uma demanda por oxigênio para nitrificação do N-NH<sub>4</sub> que entra pelas bacias ao longo de sua linha de costa.

As descargas de fósforo resultam relativamente mais estáveis no tempo, como mostra a Figura 65.

Figura 65 – Descargas fluviais de Fósforo Inorgânico Dissolvido



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Os rios APA e João Gualberto tiveram os maiores valores 0,1kg/dia a 2 kg/dia, seguido pelas demais SBHs. O rio da Costa da Lagoa (baixa urbanização) apresentou valores

intermediários (0,01 a 1 kg/dia), mostrando que as descargas fósforo inorgânico dissolvido se mostram relevantes para a Bacia Hidrográfica, apesar de sua pequena taxa de ocupação.

### 3.3.4 Relação entre as Concentrações de Nutrientes nas Demais Variáveis Físico-Químicas na Qualidade da Água

A fim de verificar as correlações entre as variáveis amostradas, foi utilizada a matriz de correlação não paramétrica de Spearman. Os valores estão apresentados na Tabela 25, e estão indicados em negrito os valores significativos ao 95% de confiança.

É possível verificar a relevância das concentrações de NID para produção primária, o que sugere que o nitrogênio pode ser o nutriente limitante para produção primária nesses ambientes (STERNER; ELSER, 2002; VREDE, 2004; ESTEVES, 2011).

Tabela 25 – Matriz de correlação não paramétrica de Spearman

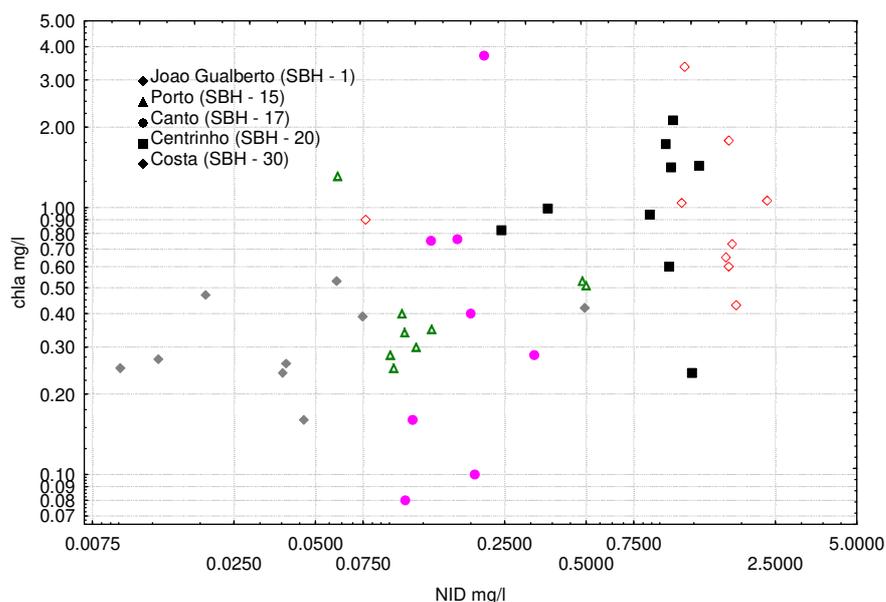
	<b>Chla</b>	<b>NID</b>	<b>PID</b>	<b>SiOH</b>	<b>OD</b>	<b>pH</b>
<b>NID</b>	<b>0.55</b>					
<b>PID</b>	<b>0.15</b>	<b>0.05</b>				
<b>SiOH</b>	<b>0.14</b>	<b>0.14</b>	<b>0.88</b>			
<b>OD</b>	<b>-0.45</b>	<b>-0.14</b>	<b>-0.07</b>	<b>-0.01</b>		
<b>pH</b>	<b>-0.03</b>	<b>-0.23</b>	<b>0.28</b>	<b>0.34</b>	<b>0.04</b>	
<b>Q</b>	<b>-0.10</b>	<b>0.08</b>	<b>-0.51</b>	<b>-0.52</b>	<b>0.15</b>	<b>-0.36</b>

Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Além disso, observa-se uma correlação negativa entre a clorofila e as concentrações de Oxigênio Dissolvido (OD), o que sugere que o aporte de nutrientes orgânicos das sub-bacias provoca uma depleção no OD pelo processo de mineralização de modo mais intenso do que o incremento devido à produção primária. Observa-se também uma correlação positiva e acentuada entre as concentrações de PID e SiOH, o que sugere um incremento mineral da concentração desses nutrientes por parte da característica da matriz rochosa das SBH. As correlações negativas da vazão com PID e SiOH sugerem que existe uma diluição dos nutrientes com o incremento da vazão, o que aponta que os minerais são dissolvidos das rochas com uma taxa constante nesses ambientes.

A Figura 66 mostra a tendência de correlação positiva entre as concentrações de clorofila e de NID em todas as SBH monitoradas.

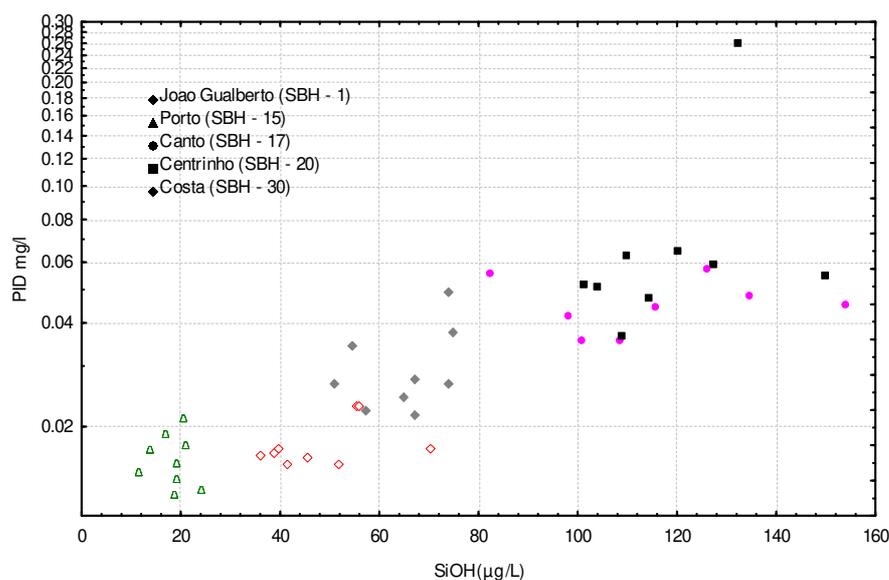
Figura 66 – Scatter plot da clorofila pelo NID



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Observa-se uma correlação positiva entre as concentrações de NID e clorofila, mostrando um efeito do aumento das concentrações de NID que fornece um incremento da produtividade primária, sendo que as sub-bacias hidrográficas que apresentam os maiores valores são as mais populosas, Centrinho e João Gualberto, e as que apresentam menores concentrações e produção primária são as menos populosas, Costa e Porto da Lagoa. A Figura 67 apresenta as tendências de comportamento das concentrações de PID com SiOH.

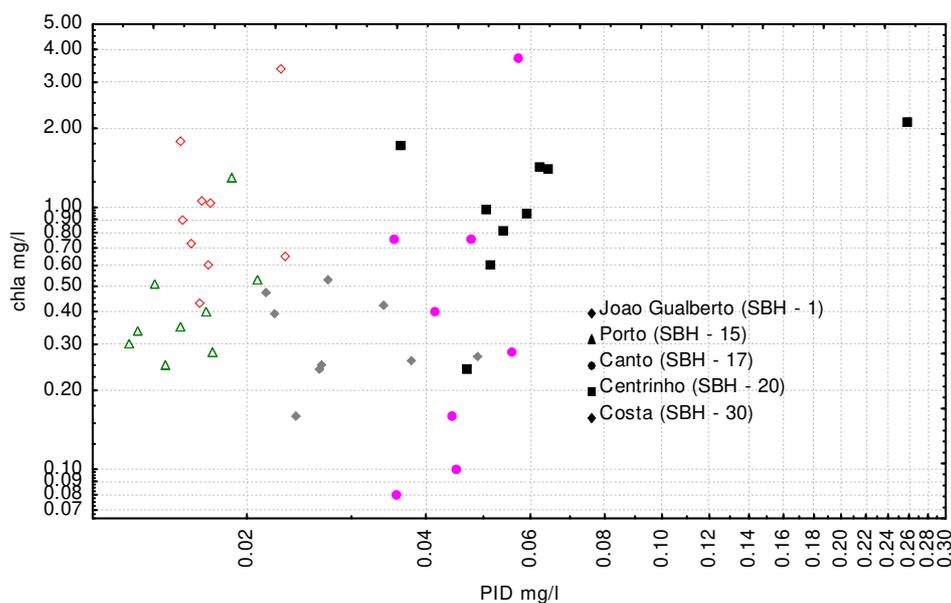
Figura 67 – Scatter plot do PID pelo SiOH



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Na Figura 68, observa-se que existe uma correlação positiva entre PID e SiOH. As entradas de fósforo inorgânico dissolvido e de hidróxido de silício são maiores nas sub-bacias formadas no Maciço do Canto da Lagoa e Costa da lagoa, sendo que as sub-bacias do Porto da Lagoa e do rio João Gualberto possuem valores bem menores. Isso mostra que as descargas desses nutrientes no corpo de água têm maior relação com a matriz mineral que compõe a rocha do que com as descargas de efluente sanitário.

Figura 68 – Scatter plot da relação entre PID e clorofila



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Na Figura 68 observa-se que não existe correlação expressiva do PID na produção primária. A razão de Redfield para plâncton marinho tem sido comumente utilizada ainda hoje em estudos que visam a avaliar a suficiência-deficiência nutricional dos organismos fitoplanctônicos. Quando um sistema possui sua razão  $N:P \geq 16:1$ , assume-se que esse sistema seja limitado por P, entretanto, quando tem  $N:P < 16:1$ , assume-se que a limitação é por N (LOURO, 2011). Outros autores utilizam razão  $N:P$  de 10:1 (CARAPETO, 1999). A sub-bacia hidrográfica do rio João Gualberto (SBH-1) possui relação  $N:P$  de 113:1, indicando forte limitação por fósforo. O rio do Porto da Lagoa possui relação de 1:15, sendo que esse valor é intermediário e bem próximo do esperado para o fitoplâncton. Já no caso dos rios do Canto, Centrinho e Costa, a limitação é por nitrogênio, com relação  $N:P$  de 1:6, 1:7, 1:2, respectivamente.

### 3.3.5 Estimativas das Descargas de Nitrogênio e Fósforo ao Longo da Linha da Costa da Lagoa da Conceição

A partir das concentrações de nutrientes encontradas nos rios à montante e à jusante da ocupação urbana, foi possível observar que:

- a) Para os rios em bacias urbanizadas, as concentrações mudaram substancialmente ao longo do percurso do rio da nascente até a foz.
- b) As concentrações se mostraram praticamente constantes ao longo do tempo, com pequenas variações, o que indica um comportamento estacionário dessas concentrações.

Dessa forma, para estimar as descargas de nutrientes, foram adotados valores de descargas naturais – de fonte geoquímica – que são proporcionais à área da bacia e atribuídas às bacias de mesma unidade de resposta hidrológica. E uma outra contribuição que se deve à urbanização, que foi atribuída à população residente das SBHs.

Os valores médios geométricos representam uma estimativa da importância ao longo do tempo, considerando que se está em estado estacionário e tendo oscilações diversas devido às oscilações climáticas e aos adensamentos populacionais em veraneios e feriados. Dessa forma, considerando um cenário médio, tem-se a tabela a seguir que mostra a geração de cargas específicas de NID de fonte geoquímica em quilogramas de NID por quilometro quadrado de bacia hidrográfica por dia ( $\text{kg}/\text{km}^2$  dia) e de fonte antrópica em gramas por habitante dia ( $\text{g}/\text{hab. dia}$ ), (Tabela 26).

Tabela 26 – Descargas naturais e antrópicas específicas de Nitrogênio Inorgânico Dissolvido para os rios monitorados

	NID			
	Rio João Gualberto	Rio APA	Rio Porto da Lagoa	Rio Costa da Lagoa
[ ] Média Geométrica das Nascentes (mg/l)	<b>0.117</b>	<b>0.233</b>	<b>0.018</b>	<b>0.086</b>
[ ] Média Geométrica da Foz (mg/l)	<b>0.981</b>	<b>0.604</b>	<b>0.477</b>	<b>0.091</b>
Diferença entre nascente e foz	<b>0.865</b>	<b>0.371</b>	<b>0.459</b>	<b>0.005</b>
Área ( $\text{km}^2$ )	<b>9.92</b>	<b>1.87</b>	<b>2.43</b>	<b>0.86</b>
População 2010	<b>5395</b>	<b>772</b>	<b>843</b>	<b>88</b>
Vazão média geométrica (l/s)	<b>109</b>	<b>36</b>	<b>78</b>	<b>23</b>
Vazão $\text{m}^3/\text{dia}$	<b>9425</b>	<b>3140</b>	<b>6712</b>	<b>2011</b>
Cargas totais médias (kg/dia)	<b>9.250</b>	<b>1.897</b>	<b>3.203</b>	<b>0.183</b>
Cargas naturais (kg/dia)	<b>1.101</b>	<b>0.732</b>	<b>0.123</b>	<b>0.174</b>
% da carga geoquímica	<b>12%</b>	<b>39%</b>	<b>4%</b>	<b>95%</b>

Cargas antrópicas (kg/dia)	<b>8.148</b>	<b>1.165</b>	<b>3.080</b>	<b>0.009</b>
% da carga antrópica	<b>88%</b>	<b>61%</b>	<b>96%</b>	<b>5%</b>
Cargas naturais específicas (kg/km <sup>2</sup> .dia)	<b>0.111021</b>	<b>0.391323</b>	<b>0.050542</b>	<b>0.202066</b>
Cargas antrópicas específicas (g/hab.dia)	<b>1.510370</b>	<b>1.509176</b>	<b>3.653651</b>	<b>0.107462</b>

Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Para os rios com ocupação urbana, a descarga antrópica de nitrogênio representa em média 82%, enquanto para bacia não urbana, a carga antrópica é de aproximadamente 5%. Em termos de cargas específicas, tem-se que as bacias do rio APA e do rio Costa Cachoeira possuem maiores contribuições naturais com relação aos demais rios. Isso pode se dar devido às características florestais da parte da bacia que não possui ocupação urbana. Já a bacia do rio João Gualberto possui características mistas entre montanhas e planícies costeiras com florestas e pastos, o que conferiu uma carga natural intermediária. Para o rio Porto da Lagoa, as cargas naturais são as mais baixas, acredita-se que isso se deve ao fato de que a parte não urbana da bacia é composta majoritariamente de dunas e há pouca vegetação (que poderia conferir alguma carga de nitrogênio). Para as cargas de PID, obteve-se o seguinte resultado – considerando um cenário médio – Tabela 27.

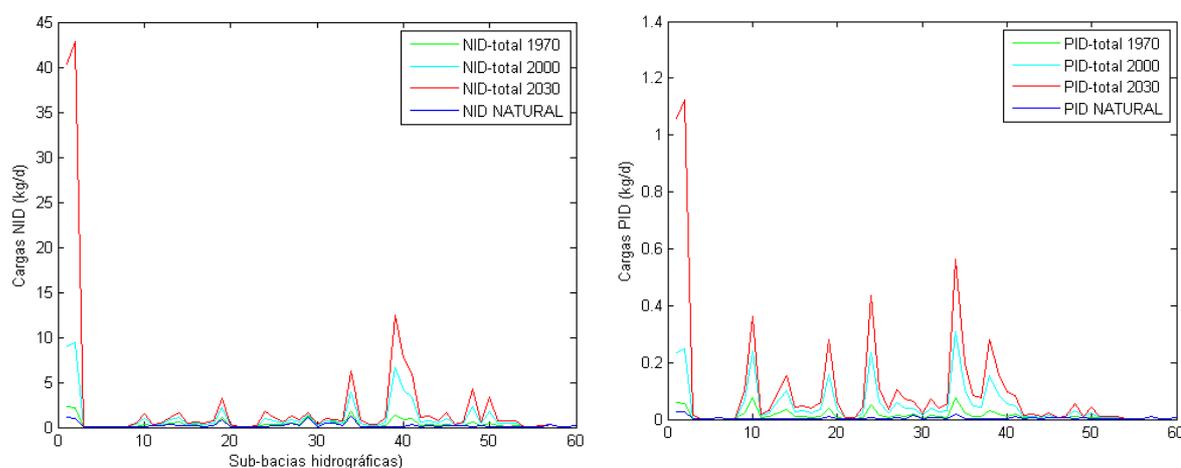
Tabela 27 – Descargas naturais e antrópicas específicas de Fósforo Inorgânico Dissolvido para os rios monitorados

	PID			
	Rio João Gualberto	Rio APA	Rio Porto da Lagoa	Rio Costa da Lagoa
[ ] Média Geométrica das Nascentes (mg/l)	<b>0.003</b>	<b>0.005</b>	<b>0.001</b>	<b>0.004</b>
[ ] Média Geométrica da Foz (mg/l)	<b>0.031</b>	<b>0.040</b>	<b>0.038</b>	<b>0.014</b>
Diferença entre nascente e foz	<b>0.028</b>	<b>0.034</b>	<b>0.037</b>	<b>0.010</b>
Área (km <sup>2</sup> )	<b>9.92</b>	<b>1.87</b>	<b>2.43</b>	<b>0.86</b>
População 2010	<b>5395</b>	<b>772</b>	<b>843</b>	<b>88</b>
Vazão média geométrica (l/s)	<b>109</b>	<b>36</b>	<b>78</b>	<b>23</b>
Vazão m <sup>3</sup> /dia	<b>9425</b>	<b>3140</b>	<b>6712</b>	<b>2011</b>
Cargas totais médias (kg/dia)	<b>0.293</b>	<b>0.124</b>	<b>0.253</b>	<b>0.028</b>
Cargas naturais (kg/dia)	<b>0.028</b>	<b>0.016</b>	<b>0.007</b>	<b>0.008</b>
% da carga geoquímica	<b>10%</b>	<b>13%</b>	<b>3%</b>	<b>29%</b>
Cargas antrópicas (kg/dia)	<b>0.265</b>	<b>0.108</b>	<b>0.246</b>	<b>0.020</b>
% da carga antrópica	<b>90%</b>	<b>87%</b>	<b>97%</b>	<b>71%</b>
Cargas naturais específicas (kg/km <sup>2</sup> .dia)	<b>0.002832</b>	<b>0.008782</b>	<b>0.002837</b>	<b>0.009373</b>
Cargas antrópicas específicas (g/hab.dia)	<b>0.049058</b>	<b>0.139383</b>	<b>0.291917</b>	<b>0.229450</b>

Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Com as cargas específicas, foi possível calcular a quantidade em kg/dia que é descarregada de nitrogênio e de fósforo inorgânico dissolvido – de fonte geoquímica e antrópica – na Lagoa da Conceição ao longo da sua linha de costa pelas 60 sub-bacias hidrográficas que a circundam. Como o principal fator de mudança na bacia é o aumento populacional, foi feita uma estimativa da mudança na importância dessas descargas ao longo do tempo, como mostra a Figura 69.

Figura 69 – a) Estimativa das descargas de NID na linha de costa da LdC; b) Estimativa das descargas de PID na linha de costa da LdC



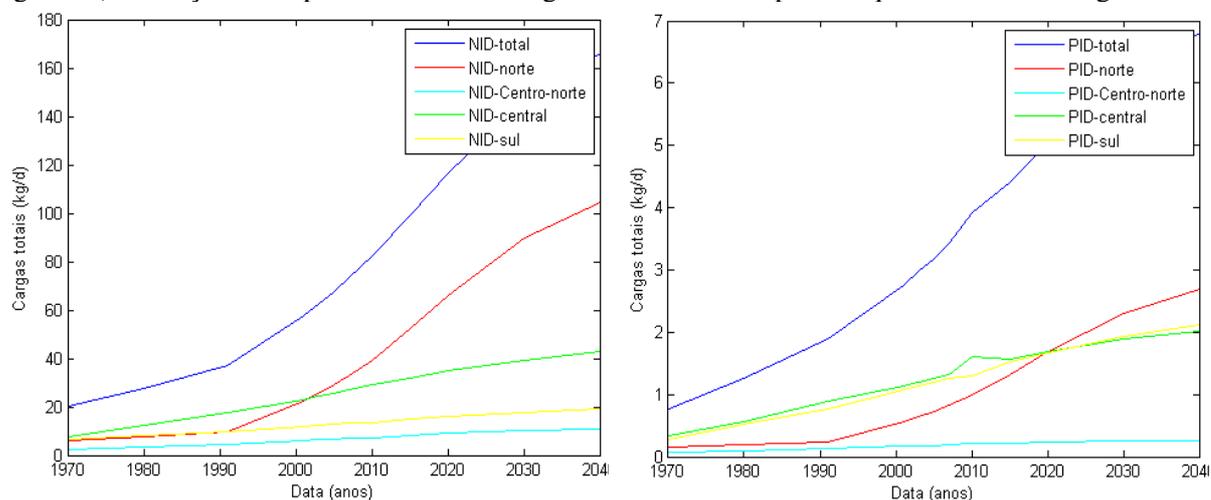
Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Observa-se que existe uma variação muito grande ao longo da linha de costa, confirmando a necessidade de uma avaliação das sub-bacias de forma individual – de acordo com suas características geoquímicas e sua taxa de ocupação urbana.

Ainda pode-se observar que a carga nutritiva média descarregada anualmente na Lagoa da Conceição através das 60 entradas hidrológicas foi de 8,1 para 45,85 toneladas de nitrogênio inorgânico dissolvido entre 1970 e 2020, respectivamente, e de 0,3 para 1,9 tonelada de fósforo inorgânico dissolvido (Figura 70). Sendo um aumento de cinco vezes a mais para as descargas de nitrogênio e de seis vezes a mais para o fósforo – aumentos proporcionais ao aumento populacional na BH que foi de 1.200% (de cerca de 4 mil habitantes em 1970 para 44 mil em 2020) - essas cargas correspondem aos seguintes valores médios por unidade de área da bacia hidrográfica: 0,4 para 2,26g N/m<sup>2</sup> ano e de 0,01 para 0,19g P/m<sup>2</sup> ano, sendo considerados valores moderados a altos de acordo com Vollenweider e Giovanardi (1998). A análise desse aumento por setor também mostra que os aumentos foram mais expressivos nos setores Norte

e Central para o NID, já para o PID, todos os setores tiveram aumento expressivo, com exceção do setor Centro-Norte.

Figura 70 – a) Evolução da importância das descargas fluviais de NID para os quatro setores da laguna; b) Evolução da importância das descargas fluviais de PID para os quatro setores da laguna

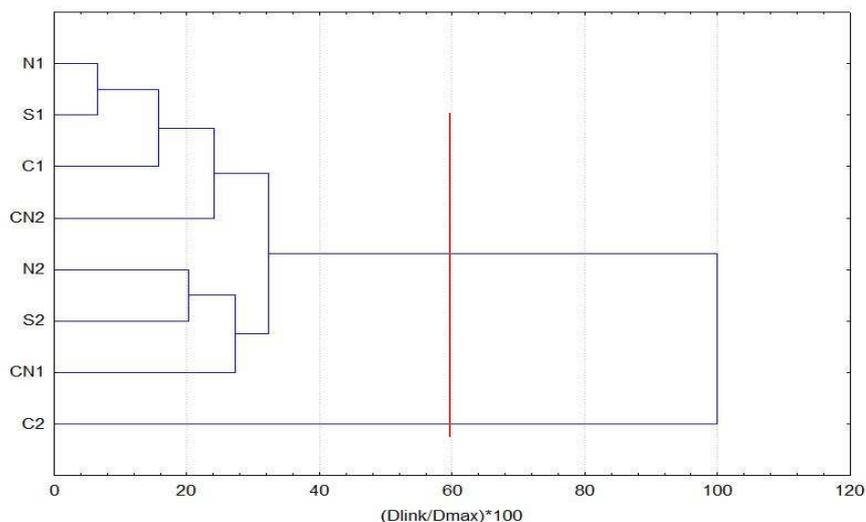


Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

### 3.3.6 Análise da Qualidade da Água da Lagoa da Conceição e seus Compartimentos de 2001 a 2017

O setor Central (C2) apresentou estratificação da estrutura vertical da coluna d'água bem acentuada, em contraste com os demais setores da laguna (Figura 71).

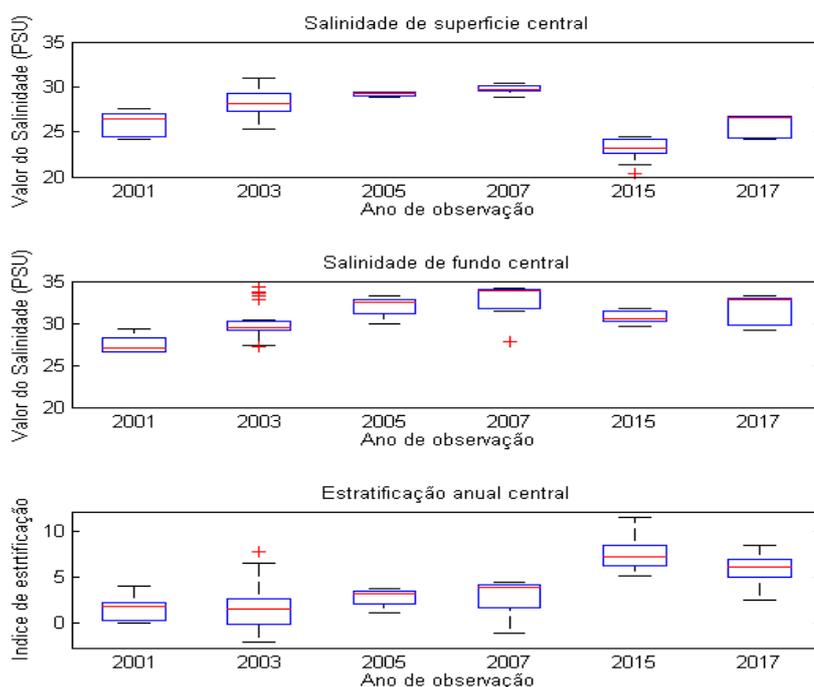
Figura 71 – Agrupamento pelo índice de estratificação para os setores hidrodinâmicos da Lagoa da Conceição utilizando o método de ligação completa e distância euclidiana



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

A partir de 2005, a estratificação no setor C2 aumentou significativamente (Kruskal-Wallis test,  $p=0,01$ ), chegando na ordem de 700% em 2015 e 2017 (Figura 72). O teste *post-hoc* para os dados desse setor ( $p<0,05$ ) evidenciou dois grupos distintos, um formado por 2001, 2003 e 2005 e outro formado por 2007, 2015 e 2017, sendo este último período caracterizado como estratificado.

Figura 72 – Evolução da estratificação da coluna d'água no setor C2 da laguna ao longo do período avaliado

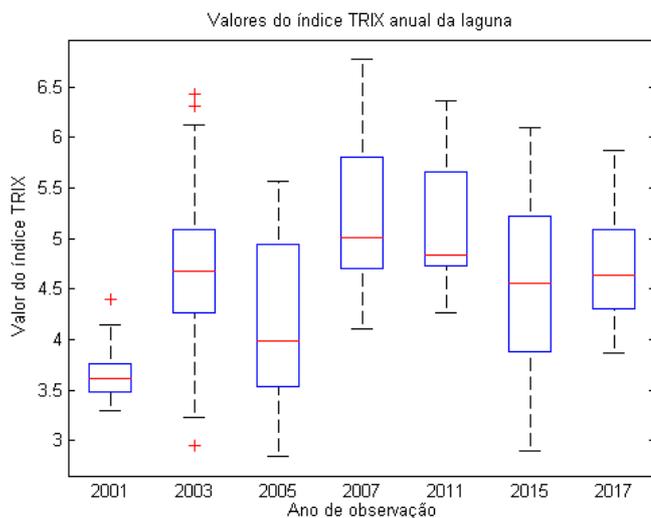


Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Observa-se que houve um aumento da salinidade de funda e possível estabilização desse valor a partir de 2005 até 2017. Da mesma forma, uma redução acentuada na salinidade da superfície no ano de 2015 e 2017 explica os altos valores do índice de estratificação nesse ano. Kjerfve e Magill (1989) apontam que a estratificação vertical em lagunas costeiras representa um fenômeno devido, principalmente, a fatores hidrodinâmicos, já que fluxos pouco elevados podem favorecer a estratificação na coluna de água (SMITH *et al.*, 2000).

Os valores TRIX variaram de 3,0 a 6,5, indicando condições de oligotrófico a hipereutrófico, apresentando aumento gradual ao longo dos anos (Figura 73).

Figura 73 – Evolução temporal dos valores do TRIX para a Lagoa da Conceição para o período monitorado



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

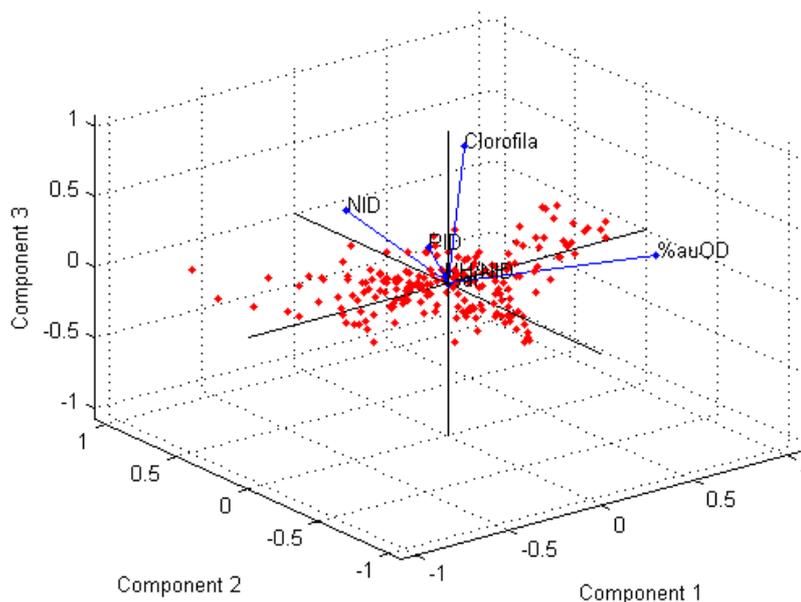
A Figura 51 mostra que a Lagoa da Conceição passou de um estado mesotrófico para eutrófico, o teste de Kruskal-Wallis identificou dois períodos de variância significativamente diferentes de 2001 a 2005 e de 2007 a 2017 ( $p=0,01$ ). Os testes de Kolmogorov-Smirnov ( $p\leq 0,001$ ) e Wald-Wolfowitz ( $p\leq 0,001$ ) mostraram que o período de 2001 a 2005 permaneceu estável com valores médios do TRIX em torno de 3,8 ( $\sigma=0,46$ ). A partir de 2007 foi observado um aumento dos valores médios para 4,85 ( $\sigma=0,62$ ).

O índice trófico TRIX tem sido efetivo no diagnóstico do estado de eutrofização em diversas lagunas costeiras (BRANDINI; FERNANDES, 1996; COELHO; GAMITO; PÉREZ-RUZAFÁ, 2007; CAÑEDO-ARGÜELLES *et al.*, 2012; COTOVICZ, 2013; ACQUAVITA *et al.*, 2015). Os resultados obtidos pelos referidos autores mostraram que o índice representou de forma satisfatória as variações encontradas nas concentrações das formas dissolvidas de nitrogênio e fósforo total, das formas reduzidas de nitrogênio, da redução das concentrações de oxigênio dissolvido e do aumento das concentrações de clorofila-a.

### 3.3.7 Efeitos da Eutrofização nos Ciclos Biogeoquímicos

A primeira componente principal da PCA apresentou aproximadamente 62,9%, a segunda componente explicou 26% e a terceira 5,6% da variância total dos dados. A Figura 74 apresentam os diagramas de biplot para a análise.

Figura 74 – Diagrama de Biplot tridimensional para PCA dos parâmetros físico-químicos de qualidade da água da Lagoa da Conceição de 2001 a 2017



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Esses resultados mostram que as três variáveis mais importantes para descrever as mudanças na qualidade da água da laguna são oxigênio dissolvido, nitrogênio e clorofila. O oxigênio, sendo o mais importante elemento receptor de elétrons no processo de decomposição e de mineralização da matéria orgânica, aparece na primeira componente e possibilita os processos de mineralização de matéria orgânica com maior liberação de energia (decomposição aeróbia), sendo essa a via preferencial de decomposição na presença de oxigênio. Isso revela que a laguna está sofrendo variações importantes das concentrações de oxigênio, um fator preponderante na perda da qualidade de água da laguna ao longo do tempo.

O nitrogênio inorgânico dissolvido (NID), sendo o segundo mais importante parâmetro pela PCA, mostra que a concentração de nitrogênio tem mudado muito ao longo do tempo, sendo esse elemento lançado em grandes quantidades na laguna pelo esgoto doméstico não tratado, ou tratado apenas em nível secundário (apenas para matéria orgânica – DBO).

A clorofila aparece relacionada fortemente à terceira componente da PCA, o que mostra uma grande variabilidade desse parâmetro, que representa a abundância de fitoplânctons e a produtividade primária, se mostrando um parâmetro relevante para qualidade de água da laguna, uma vez que, nesse ambiente, devido às grandes concentrações de nutrientes e clima subtropical, as algas podem se tornar abundantes.

### **3.3.8 Ciclagem de Nutrientes e Produção Primária Líquida**

Considerando a diferença das descargas hidrológicas de NID e PID por setor e as descargas de troca entre os setores, é possível verificar a função efetiva da laguna na transformação desses compostos da forma inorgânica dissolvida para outras formas como orgânica (na composição do fitoplâncton) nos dois períodos identificados pela análise de variância (Período A de 2001 a 2006 e período B de 2007 em diante), como mostra a Tabela 28.

Tabela 28 – Descargas de NID e PID da Bacia Hidrográfica e trocas entre os setores da laguna para os dois períodos identificados pela ANOVA

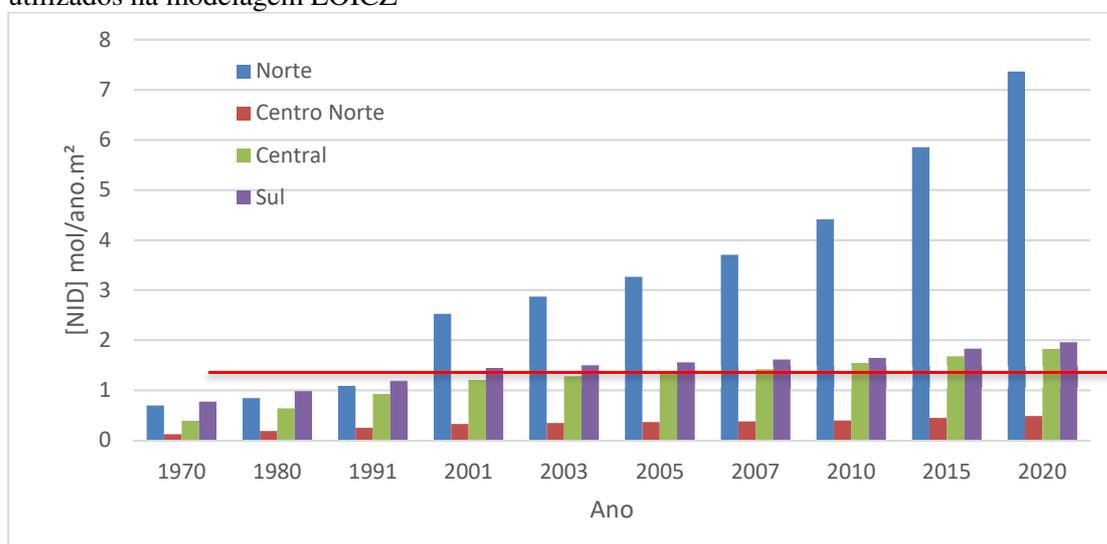
Períodos	Setores	Entradas				Compartimento			Trocas		
		Q (m <sup>3</sup> /s)	Precipitação – Evapo. (m <sup>3</sup> /s)	NID (kg/d)	PID(kg/ d)	Salinidade (PSU)	NID (ug/l)	PID (ug/l)	NID (kg/d)	PID (kg/d)	
Período Mesotrófico (2001 a 2006)	Norte	0.55	0.08	25.81	0.65	25.43	26,0	2,2	0.26	0.54	Para Centro- Norte
	Centro- Norte	0.27	0.09	6.38	0.17	26.38	19,7	1,3	0.14	0.04	Para Central
	Central	0.22	0.06	24.44	1.19	27.74	14,8	1,5	0.14	0.31	Para oceano
	Sul	0.32	0.02	12.29	1.13	22.82	25,1	2,6	0.00	0.06	Para Centro
	LdC	1.36	0.24	68.91	3.15	25.59	24,9	2,1	15.41	2.38	Para oceano
Período Eutrófico (2007 a 2017)	Norte	0.55	0.08	42.72	1.08	23.50	253,0	4,2	3.48	1.60	Para Centro- Norte
	Centro- Norte	0.27	0.17	7.63	0.20	23.71	140,0	2,5	4.72	-1.83	Para Central
	Central	0.22	0.18	29.54	1.45	29.00	86,8	3,7	1.72	1.48	Para oceano
	Sul	0.32	0.08	14.09	1.40	22.83	161,9	10,9	0.10	0.15	Para Centro
	LdC	1.36	0.50	93.98	4.12	24.76	160,4	8,3	225.41	7.47	Para oceano

Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

O setor Central tem destaque, pois possui as cargas mais elevadas mesmo com vazões intermediárias, seguido do setor Sul com altas descargas de fósforo e as menores vazões com relação aos demais setores.

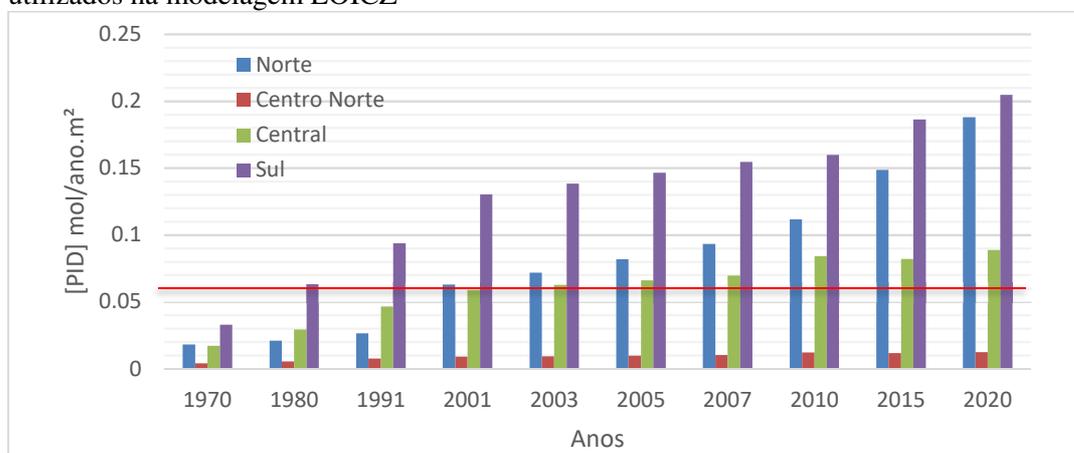
Comparando os resultados com 94 lagunas costeiras rasas obtidos do banco de dados internacional do programa LOICZ, Giordani (2007) relata que as cargas de NID e PID por  $m^2$  de laguna por ano possuem uma mediana de 1,25 mol/ $m^2$  ano e 0,064 mol/ $m^2$  ano, respectivamente. A Figura 75 mostra as cargas específicas por área de laguna para os quatro setores da laguna ao longo do tempo.

Figura 75 – Cargas específicas de NID por  $m^2$  da laguna ao longo do tempo pelos setores da laguna utilizados na modelagem LOICZ



A mediana encontrada pelos resultados de 94 lagunas costeiras rasas no mundo é mostrada pelo traço vermelho.  
Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Figura 76 – Cargas específicas de PID (Fósforo Inorgânico Dissolvido) por  $m^2$  da laguna ao longo do tempo pelos setores da laguna utilizados na modelagem LOICZ



A mediana encontrada pelos resultados de 94 lagunas costeiras rasas no mundo é mostrada pelo traço vermelho.  
Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Verificou-se que os setores Norte e Sul passaram os valores medianos das cargas específicas de NID e PID obtidos do LOICZ Global Data Base. O setor Central também se destaca, acompanhando a tendência observada para o setor Sul, tanto para NID e quanto para PID. Apenas o setor Centro-Norte possui cargas menores e acredita-se que isso se deve ao fato de ele possuir uma menor população contribuinte nas sub-bacias, já que estas drenam a região do patrimônio histórico cultural da Costa da Lagoa (A Lei Municipal n. 7.667/2008), sendo área protegida, e, por outro lado, as bacias das dunas. A Tabela 29 a seguir mostra as trocas e a assimilação dos nutrientes nesses compartimentos.

Tabela 29 – Eficiência na remoção/ciclagem de nutrientes por compartimento

		Setor Norte		Setor Centro-Norte		Setor Central		Setor Sul	
		<b>NID (kg/d)</b>	<b>PID (kg/d)</b>	<b>NID (kg/d)</b>	<b>PID (kg/d)</b>	<b>NID (kg/d)</b>	<b>PID (kg/d)</b>	<b>NID (kg/d)</b>	<b>PID (kg/d)</b>
Período Mesotrófico (2001 a 2006)	<b>Nutrientes</b>								
	<b>Entradas</b>	<b>25.81</b>	<b>0.65</b>	<b>6.38</b>	<b>0.17</b>	<b>24.44</b>	<b>1.19</b>	<b>12.29</b>	<b>1.13</b>
	<b>Trocas</b>	<b>0.26</b>	<b>0.54</b>	<b>0.14</b>	<b>0.04</b>	<b>0.14</b>	<b>0.31</b>	<b>0.00</b>	<b>0.06</b>
	<b>% assimilação</b>	<b>99%</b>	<b>16%</b>	<b>98%</b>	<b>79%</b>	<b>99%</b>	<b>74%</b>	<b>100%</b>	<b>95%</b>
Período Eutrófico (2007 a 2017)	<b>Entradas</b>	<b>42.72</b>	<b>1.08</b>	<b>7.63</b>	<b>0.20</b>	<b>29.54</b>	<b>1.45</b>	<b>14.09</b>	<b>1.40</b>
	<b>Trocas</b>	<b>3.48</b>	<b>1.60</b>	<b>4.72</b>	<b>-1.83</b>	<b>1.72</b>	<b>1.60</b>	<b>0.10</b>	<b>0.15</b>
	<b>% assimilação</b>	<b>92%</b>	<b>-48%</b>	<b>38%</b>	<b>1011%</b>	<b>94%</b>	<b>-11%</b>	<b>99%</b>	<b>89%</b>

Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Considerando as eficiências de conversão de NID e PID por setor e as descargas de troca entre os setores, é possível verificar a função efetiva da laguna na transformação desses compostos da forma inorgânica dissolvida para outras formas como N-gasoso, N-orgânica (na composição do fitoplâncton) e na forma particulada (adsorção pelo sedimento de fundo - P) – podem ser quantificados em próximos estudos.

No primeiro período, todos os compartimentos obtiveram alta eficiência na conversão de NID (de 98 a 100%) e PID, com exceção do setor Norte (16%), os demais obtiveram eficiências de 74 a 95%. No segundo período, o comportamento mudou consideravelmente, sendo que alguns setores começaram a se tornar exportadores de nutrientes como o setor Norte e o setor Central (para o PID), o que evidencia uma tendência desses setores a terem atingido sua capacidade máxima de assimilação desses nutrientes nas camadas tróficas – isso pode promover mudanças na composição da flora e da fauna bentônica e pelágica da laguna, conforme relatado por Netto (2018). Por outro lado, esses setores também são os que possuem maior população residente na Bacia Hidrográfica e onde ocorreu o maior crescimento populacional do período – reforçando que esse processo está sendo conduzido pelo crescimento populacional e os lançamentos de efluentes parcialmente tratados.

O setor Sul apresentou uma pequena redução de sua capacidade de armazenar/ciclar o fósforo, porém, nesse ambiente, foi documentado *blooms* de micro e macroalgas de forma frequente nos anos de 2019 e 2020 (nota pública Ecoando Sustentabilidade - UFSC), mostrando que o aumento das concentrações de nutrientes forçados pelo aumento populacional está conduzindo a uma mudança da diversidade e abundância das espécies que fazem a produção primária nesse setor. De maneira geral, a Laguna começou a ser exportadora de nutrientes para o oceano, sobretudo PID em maiores quantidades na média.

Tabela 30 – Produção primária da Lagoa da Conceição

	Sistema	TR (dias)	Produção primária	Produção primária	Fixação de N	Fixação específica	Desnitrificação	Desnitrificação
			líquida	líquida específica	fitoplâncton	de N fitoplâncton		específica
			P-R KgC/dia	P-R gC/km <sup>2</sup> .dia	KgN/dia	KgN/dia*km <sup>2</sup>	kgN/dia	kgN/dia*km <sup>2</sup>
Período Mesotrófico (2001 a 2006)	Laguna	173.62	74.47	134.43	4.78	0.24	3.64	1.37
	Norte	34.38	-189.40	-58033.10	33.92	10.39	8.59	2.39
	Centro- Norte	52.30	205.53	30494.70	-82.75	-12.28	8.18	3.45
	Central	39.13	-61.65	-20617.11	-23.94	-3.44	2.35	0.86
	Sul	95.56	43.18	6204.74	85.38	28.56	6.97	1.99
Período Eutrófico (2007 a 2017)	Laguna	220.39	281.77	508.65	56.80	2.81	13.13	4.96
	Norte	35.09	-608.50	-186448.05	24.22	7.42	38.21	10.63
	Centro-Norte	66.09	1441.66	213896.60	-202.04	-29.98	35.14	14.83
	Central	48.13	-1278.33	-427533.89	-0.02	0.00	3.32	1.22
	Sul	102.14	-1.88	-270.07	450.59	150.70	36.90	10.56

Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Quando considerado o balanço entre produção primária e respiração na laguna como um todo, verifica-se que foi positivo nos dois períodos, destacando-se um aumento de 134 para 508 gC/km<sup>2</sup> dia. Pode-se observar também que a maior parte do nitrogênio que entra na laguna não entra na cadeia trófica pelo fitoplâncton, sendo liberado na forma de N<sub>2</sub>-gasoso. O balanço entre produção primária e respiração por setores revela uma tendência dos setores Norte e Central para uma taxa mais elevada de respiração, que indica uma tendência à depleção das concentrações de oxigênio, justificando a zona anóxica presente nas águas de fundo do setor Central – sendo que houve um aumento da importância da respiração (ou oxidação da matéria orgânica) de -61,65 para -1278,23 kgC/dia.

Para a denitrificação, observa-se um aumento expressivo em todos os compartimentos da laguna do primeiro para o segundo período, indicando que a assimilação do nitrogênio pelo fitoplâncton chegou, ou está chegando, ao limite natural, mesmo em estado eutrófico. O balanço positivo indica também uma tendência à manutenção de concentrações de oxigênio ainda aceitáveis no corpo de água, exceto por setores com excesso de carga orgânica ou hidrodinamicamente isoladas, como as águas profundas do setor Central. O setor da laguna que apresenta o maior tempo de residência é o setor Sul, com 95 e 102 dias no primeiro e segundo período, respectivamente, e uma inversão de maior tendência à produção primária para respiração no segundo período – também evidenciando um estresse do ambiente pelas altas cargas orgânicas. O setor Centro-Norte se caracterizou como um setor de pouco tempo de residência, 2,3 dias e 15 dias no primeiro e segundo período, respectivamente, sendo que o transporte difusivo aconteceu nos dois sentidos, de Norte para Central e de Central para Norte. A maior taxa de produção primária líquida encontrada foi 213,89 kgC/km<sup>2</sup> dia no setor Centro-Norte segundo período, e a maior importância da respiração foi encontrada no setor Central no segundo período com -427,53 kgC/km<sup>2</sup> dia.

A comparação da Lagoa da Conceição com demais lagunas do litoral brasileiro pode ser visto na Tabela 31.

Tabela 31 – Metabolismo líquido e características geográficas de outras lagunas na costa brasileira em comparação com a Lagoa da Conceição

Nome	Long.	Lat.	Área	Profundidade média	Tempo de residência	P-PID	N-NID	$\Delta$ PID	$\Delta$ NID	nfix-ndenit	p-r
	W	S	Km <sup>2</sup>	m	(dias)	ug/l				mmol/m <sup>2</sup> .ano	
Marica-Guarapina	42.7	22.9	35.0	1.3	185.0	19.0	20.0	-17.0	<1	280.0	1850.0
Marica	42.7	22.9	29.0	1.3	314.0	21.0	17.0	-11.0	8.0	170.0	1170.0
Guarapina	42.7	22.9	6.0	1.0	25.0	27.0	112.0	-48.0	-40.0	810.0	5120.0
Piratininga-Itaipu	43.1	23.0	4.0	1.0	23.0	0.0	1.0	2.0	28.0	4.0	-159.0
Piratininga	43.1	23.0	3.0	1.0	46.0	0.0	2.0	2.0	7.0	-25.0	-212.0
Itaipu	43.1	23.0	1.0	1.0	6.0	5.0	30.0	<1	90.0	90.0	0.0
Araruama	42.2	28.8	215.0	3.0	985.0	10.0	153.0	7.0	-8.0	-120.0	-740.0
Lagoa da Conceição (2001 a 2006)	48.3	27.4	20.2	2.6	173	19,7	26	-9.0	1904.3	101.7	1281.4
Lagoa da Conceição (2007 a 2017)	48.3	27.4	20.2	2.6	220	26.5	184	39.5	8105.7	342.4	-2945.8

Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Pela tabela de resumo e comparação dos resultados observados em outras três lagunas costeiras, encontrados no Dataset do Report n. 15 do projeto LOICZ-América do Sul, nota-se que a Lagoa da Conceição já estava sob maiores descargas de nutrientes que as demais lagunas em 2001 e possuía capacidade de assimilação de fósforo assim como as lagunas de Marica e Guarapina. Contudo, no segundo período, a variação de fósforo se torna positiva, mostrando que houve uma exportação do fósforo inorgânico, e o balanço entre p-r mostra metabolismo heterotrófico, assim como a laguna de Piratininga – Itaipu, a laguna de Piratininga e a laguna de Araruama. O balanço de nfix-ndenit mostra que a laguna sempre fixou mais nitrogênio do que denitrificou.

### **3.3.9 Conclusão**

A eutrofização de lagunas tem sido documentada como efeito do aumento da população humana em centros urbanos com deficiente sistema de tratamento dos efluentes domésticos, provocando impactos ambientais. Os resultados deste capítulo apontam para um aumento populacional expressivo, mas todos os centros urbanos da Bacia Hidrográfica, em especial para os Distritos Lagoa da Conceição e São João do Rio Vermelho, que apresentam as maiores taxas de crescimento populacional e mais descargas de nutrientes da Bacia Hidrográfica com tendência ao crescimento para os próximos anos. Foi observada uma mudança expressiva no estado trófico da Lagoa da Conceição de 2001 a 2017. O índice de estado trófico (TRIX) permitiu detectar mudanças de oligo-mesotrofismo para eutrofismo a partir do ano de 2007. As menores concentrações de oxigênio dissolvido segregaram as amostras de fundo da região Central da laguna das demais, evidenciando o efeito da estratificação física da coluna da água no isolamento dessa água de fundo. O acelerado processo de eutrofização antrópica influenciou de forma significativa o metabolismo ecossistêmico, tornando-se heterotrófico nas regiões Central e Sul.

Entre os setores da laguna mais afetados pelas altas cargas de nutrientes lançadas, estão o subsistema S1 (região Sul), que apresentou estado eutrófico e hipereutrófico e um aumento expressivo da importância da oxidação com relação à produção primária no segundo período verificado pelo balanço de massa LOICZ, e o da região Central que também apresentou maior relevância para respiração do que a produção primária desde o primeiro período, porém, com intensificação para o segundo, dados que são confirmados pela presença de hipóxia e anóxia nas águas de fundo.

Observa-se ainda que a carga de nutrientes média descarregada anualmente na Lagoa da Conceição através das 60 entradas hidrológicas foi de 8,1 para 45,85 toneladas de nitrogênio inorgânico dissolvido entre 1970 e 2020, respectivamente, e de 0,3 para 1,9 toneladas de fósforo inorgânico dissolvido. Essas cargas correspondem aos seguintes valores médios por unidade de área da bacia hidrográfica: 0,4 para 2,26g N/m<sup>2</sup> ano e de 0,01 para 0,19g P/m<sup>2</sup> ano, sendo considerados valores moderados a altos de acordo com Vollenweider e Giovanardi (1998). A proporção entre cargas naturais na nascente e antrópicas na foz dos rios varia de acordo com a sub-bacia, contudo, para as SBHs mais urbanizadas, cerca de 69 a 96% do Nitrogênio Inorgânico Dissolvido é de fonte antrópica, para a SBH pouco urbanizada, esse valor foi de apenas 5%. Para o fósforo, a proporção da carga se deve à ação antrópica foi de 87 a 97% para as SBHs urbanizadas.

Os resultados obtidos evidenciam a necessidade da implementação de melhorias no sistema de saneamento básico da bacia hidrográfica em conjunto com a elaboração de planos de monitoramento contínuo que permitam acompanhar a dinâmica biogeoquímica na Lagoa da Conceição, subsidiando projetos de controle e mitigação dos impactos gerados pela excessiva urbanização nos seus entornos.

#### 3.4 AVALIAÇÃO DO EFEITO DAS DESCARGAS SUPERFICIAIS DE NUTRIENTES E DO AUMENTO POPULACIONAL NA QUALIDADE DA ÁGUA

O modelo de qualidade da água foi construído sobre o modelo hidrodinâmico calibrado e validado apresentado no subcapítulo 3.2 desta tese. As cargas de nutrientes foram estimadas pelas contribuições naturais e antrópicas estimadas a partir de dados experimentais e descritas no Subcapítulo 3.3.

##### 3.4.1 Calibração dos Processos de Qualidade da Água

A fim de calibrar o modelo de qualidade da água, foi realizada uma análise de sensibilidade do modelo aos parâmetros cinéticos e de transferência de calor e massa. Os parâmetros foram ajustados até que os valores de temperatura, salinidade e concentração de nutrientes estivessem a mais dos valores médios medidos em 2001 e em 2015. A Tabela 32 apresenta os processos e os valores das constantes utilizadas.

Tabela 32 – Parâmetros de calibração para os processos utilizados no Delft Waq

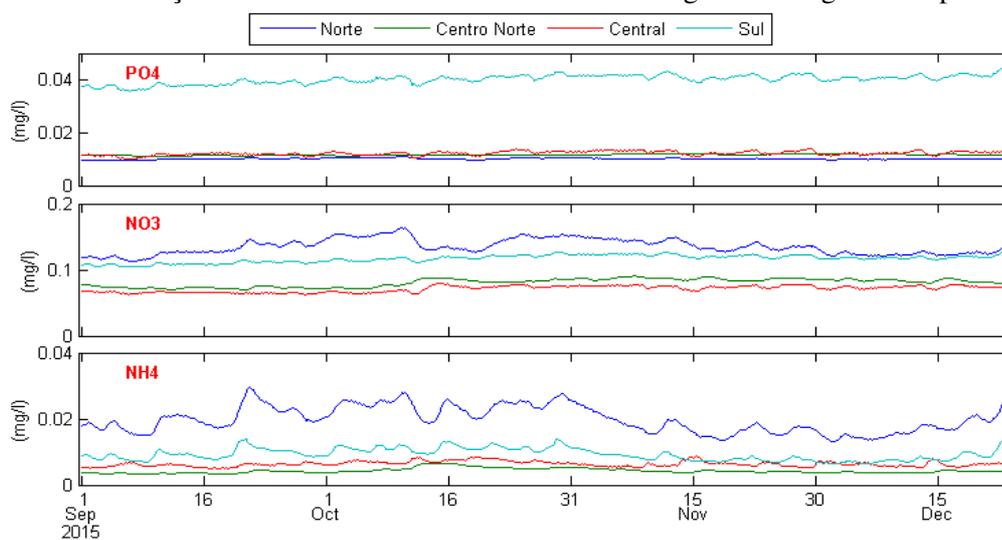
Parâmetro	Processo	Constantes calibradas
Temperatura	Trocas de calor com atmosfera	• Temp. do ar 15
	Aumento e redução da temperatura	• Cp d água 44183
	Troca de calor por vento	• Vento observado
Salinidade	Balanco de massa conservativo	• Velocidade horizontal e vertical de dispersão – modelado pelo Flow
Nitrogênio	Nitrificação Denitrificação	• Kdenit=0.00165 gN/m <sup>3</sup> /d
Fósforo	Adsorção e desorção de fosfato	• Adsorved ortho fosfato = 2.e-5 gP/m <sup>3</sup>

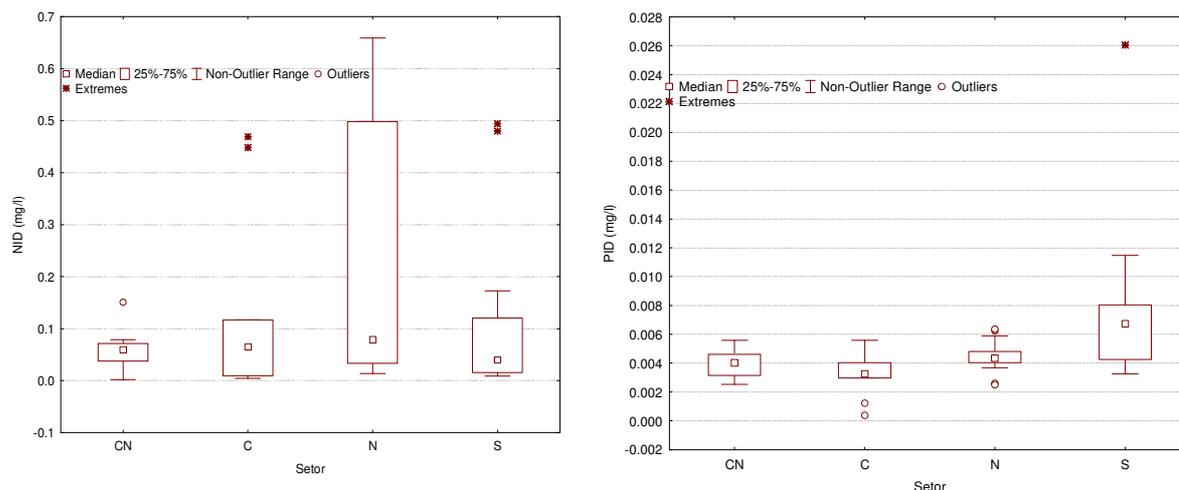
Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

### 3.4.2 Resultado das Simulações de Qualidade da Água

A concentração média de nitrogênio e fósforo em pontos de amostragem para os quatro setores da laguna é apresentada na Figura 77.

Figura 77 – Concentração média de nutrientes em cada setor da laguna ao longo do tempo em 2015



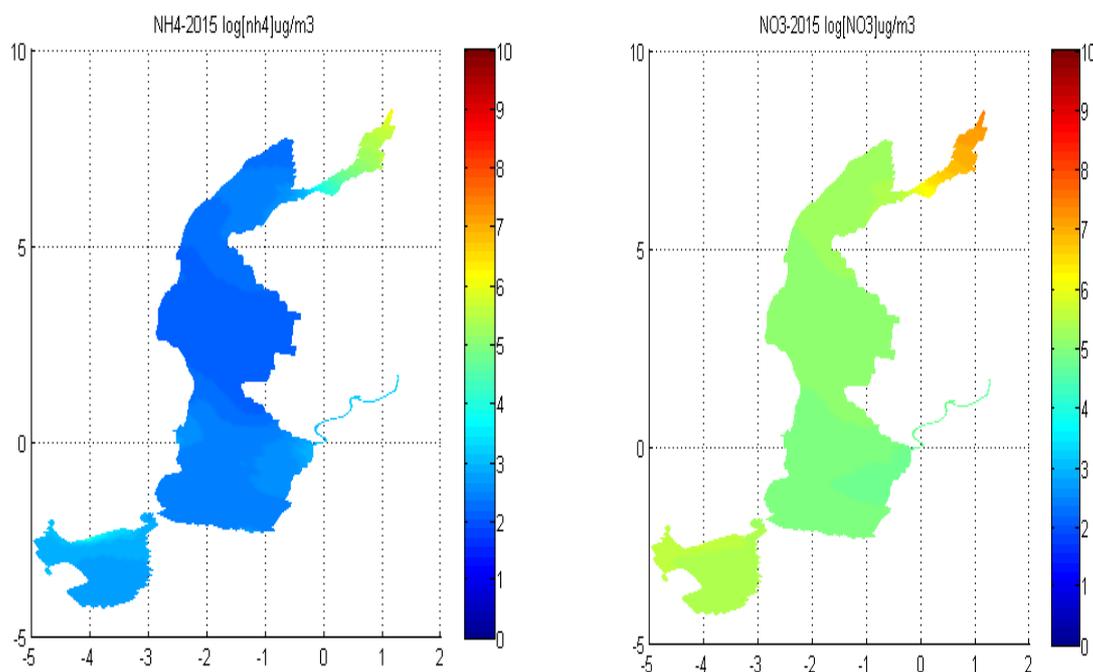


Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

As concentrações médias são diferentes para cada setor, mas se mostraram estáveis durante o tempo de simulação. A maior variabilidade nas concentrações de NID estimadas são observadas no setor Norte da laguna, variabilidade encontrada também nos dados experimentais. A região Sul apresentou os maiores valores de PID, enquanto a região Norte apresentou os maiores valores de NID. A média da concentração de NID encontrada na laguna em 2015 foi de 0,184 mg/l, e a média das concentrações desse nutriente modelada nesse período foi de 0,174. Já a concentração média de PID amostrada foi de 0,026 mg/l, e a modelada foi de 0,024. Os valores sugerem uma faixa de erro de 0,010 mg/l para o NID e de 0,002 mg/l para o fósforo, ou seja, valores bem razoáveis de erro para a complexidade do ecossistema lagunar.

A Figura 78 apresenta a concentração de N-NH<sub>4</sub>, N-NO<sub>3</sub> e de P-PO<sub>4</sub> em ug/m<sup>3</sup> ou mg/l. As variações de concentrações de nutrientes são de ordens de grandeza em escala exponencial, já que as concentrações oceânicas são bem menores do que as fluviais. Para ajustar os dados a uma representação normal, foi feita a transformada logarítmica, dessa forma, é possível ver melhor as variações na concentração desses elementos no corpo de água, já que as variações estão nessa ordem.

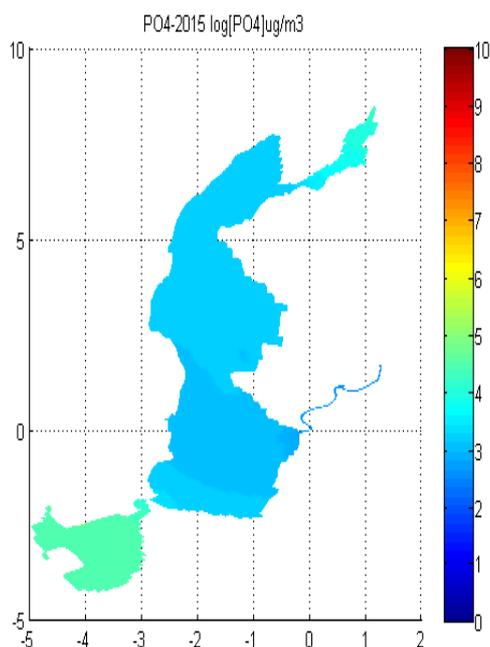
Figura 78 – Concentrações médias de Amônio e Nitrato encontradas pelo modelo em 2015



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Observando os mapas de concentração de  $\text{NH}_4$  e  $\text{NO}_3$ , verifica-se que as maiores concentrações encontradas em toda laguna são da forma oxidada do nitrogênio, uma tendência natural à nitrificação ocorre em decorrência da presença de bactérias nitrificantes nesses ambientes, associada à presença de oxigênio e de elevados tempos de residência. Pode-se observar que as concentrações das duas formas de nitrogênio inorgânico dissolvido são maiores nas proximidades das descargas fluviais, com redução considerável das concentrações em direção à região Central e ao Canal da Barra da Lagoa. A Figura 79 apresenta as concentrações de PID simuladas para LdC em 2015.

Figura 79 – Concentrações do íon fosfato encontrados pelo modelo em 2015



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

As concentrações de fósforo da LdC são menores quando comparadas com a de nitrogênio, como é de se esperar em sistemas lagunares (BIANCHI, 2006), contudo, devido a sua pouca mobilidade nos compartimentos bióticos, sua concentração é praticamente homogênea em todo o corpo de água lagunar, com leve destaque para o setor Sul que apresenta concentrações maiores desse nutriente.

A predominância de altas concentrações de nutrientes na proximidade de fontes fluviais e antrópicas importantes também foram encontradas por modelagem numérica e de qualidade da água por Faure *et al.* (2010) na laguna SW em Nova Caledônia e por Trang *et al.* (2020) na laguna de Tam Giang-Cau Hai no Vietnã. Ambos os trabalhos mostram que, nos pontos de entrada de nutrientes, as concentrações são muito maiores devido a uma condição de diluição constante com o oceano nas partes mais próximas dos canais oceânicos.

### 3.4.3 Avaliação da Importância das Descargas de Nutrientes Inorgânicos Dissolvidos em 2001

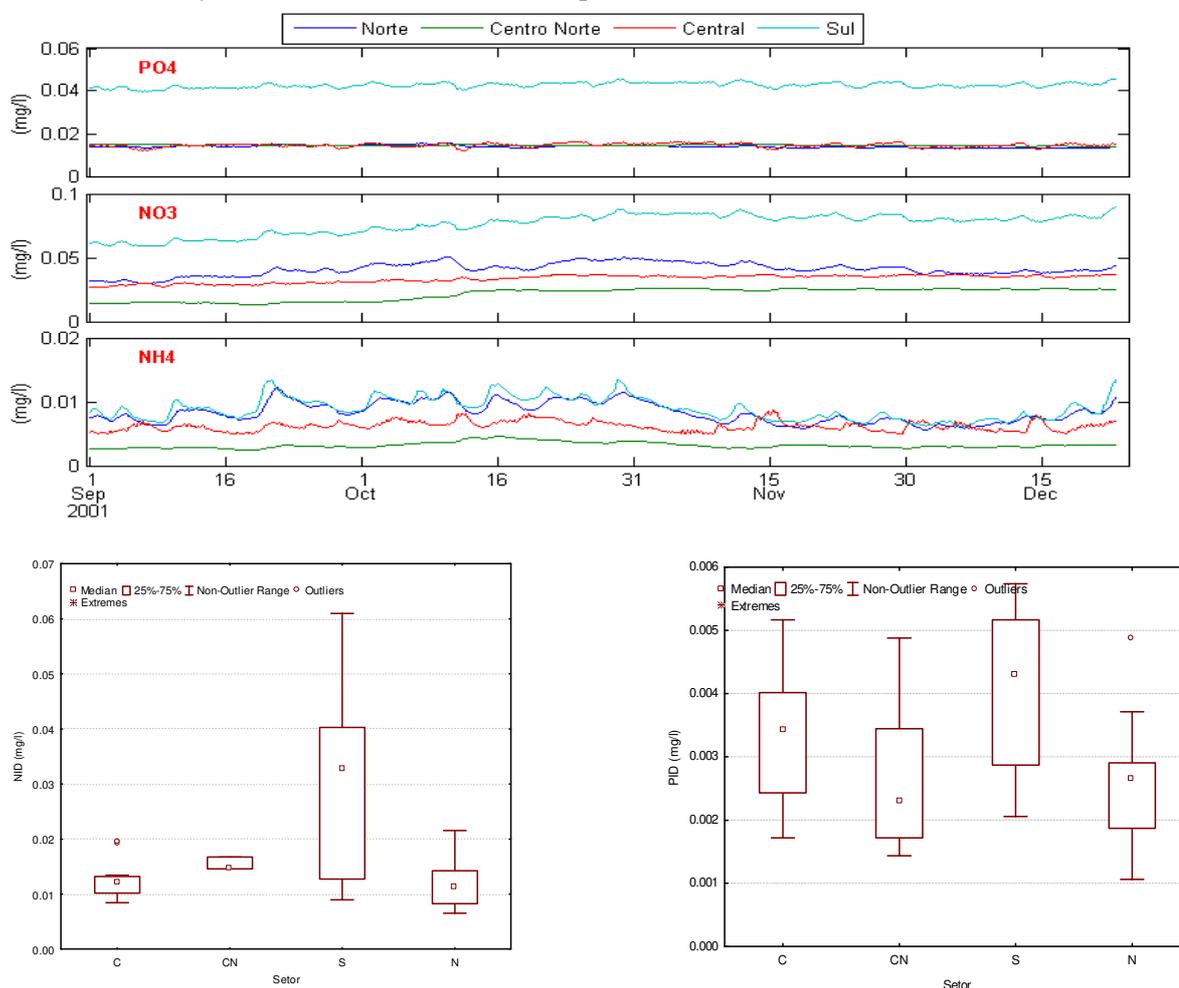
As descargas de nutrientes estimadas para o ano de 2001 são proporcionalmente menores do que no ano de 2015, isso se deve ao fato de o modelo de cargas utilizados por este estudo ser dependente da população e de que em 2001 toda laguna apresentava uma população de aproximadamente 20 mil habitantes, sendo que em 2015 alcançou 36 mil habitantes.

Destaca-se o Distrito de São João do Rio Vermelho cuja população mais do que dobrou nesse período.

As concentrações médias de NID observadas experimentalmente na laguna foram 0,026 mg/l, enquanto a média do modelo foi de 0,034 mg/l. Para o PID, os valores encontrados foram de 0,005 mg/l, já para os dados modelados, a concentração média foi de 0,012mg/l. Portanto, o erro estimado pela média é da ordem de 0,008 mg/l para NID e de 0,007 para o PID.

A Figura 80 apresenta os valores médios modelados e observados experimentalmente no período.

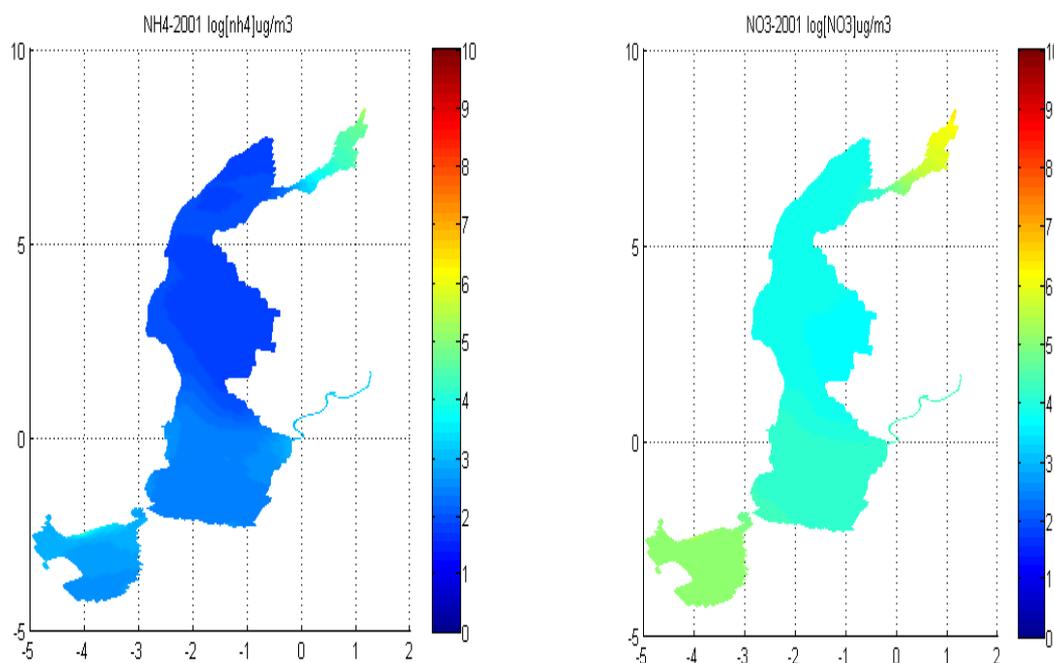
Figura 80 – a) Concentração média de NID modelada em cada setor da laguna ao longo do tempo em 2001; b) Concentração de NID e PID encontrada experimentalmente em cada setor em 2001



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

As concentrações de NID e PID foram maiores no setor Sul. A Figura 81 apresenta as concentrações médias de Amônio e de Nitrato estimadas para a LdC pelo modelo em 2001.

Figura 81 – Concentrações médias de Amônio e Nitrato encontradas pelo modelo em 2001

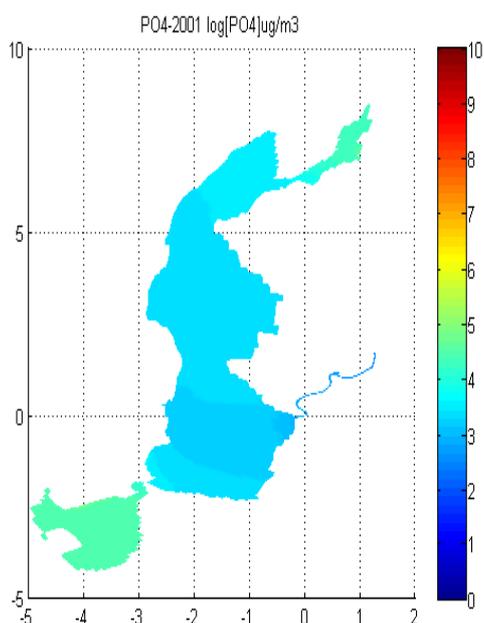


Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Observando os mapas de concentração de  $\text{NH}_4$  e  $\text{NO}_3$ , verifica-se que as maiores concentrações encontradas em toda laguna são da forma oxidada do nitrogênio, uma tendência natural à nitrificação ocorre em decorrência da presença de bactérias nitrificantes nesses ambientes (FONSECA, 2004; FONTES, 2006), associada à presença de oxigênio e de elevados tempos de residência. Pode-se observar que as concentrações das duas formas de nitrogênio Inorgânico dissolvido são maiores nas proximidades das descargas fluviais, com redução considerável das concentrações em direção à região Central e ao Canal da Barra da Lagoa.

As concentrações de fósforo já eram maiores no setor Sul em 2001 devido ao acúmulo desse nutriente nesse setor (Figura 82).

Figura 82 – Concentrações médias de Íons Fosfato encontradas pelo modelo em 2001



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

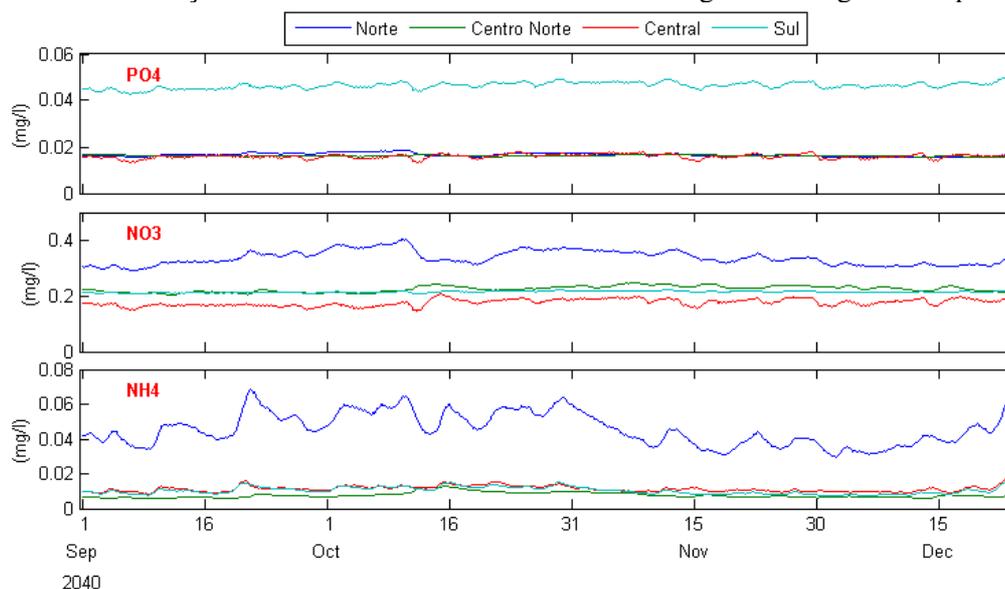
### 3.4.4 Mudanças nas Concentrações de Nutrientes Estimada pela Previsão de Aumento Populacional para 2040

O modelo populacional logaritmo ajustado para os Distritos da BH da LdC mostram que em 2040 a população terá atingido a marca aproximada de 69 mil habitantes (89% da capacidade-limite de ocupação definida pelo Plano Diretor do município em 2005), cerca do dobro da população em 2015 e 20 mil habitantes a mais do que atualmente (2022). Destaque para o Distrito de São João do Rio Vermelho, que, segundo o modelo, deve praticamente triplicar a sua população, sendo o distrito mais povoado da BH da LdC em 2040 (39 mil hab. somente nesse distrito).

As estimativas de aumento das descargas de nutrientes através de uma perspectiva de manutenção das condições de saneamento atuais resultaram em uma descarga de nutrientes bem maior do que no ano de 2015, sobretudo nas SBHs do rio João Gualberto Soares e do rio Vermelho, que drenam as duas maiores e futuramente mais populosas SBHs da BH.

Assim sendo, diferentemente dos anos de 2001 e 2015 (em que as maiores concentrações de nitrogênio eram no Sul da laguna), as maiores concentrações de nitrogênio foram no extremo Norte da LdC, e as concentrações de fósforo encontrados na desembocadura dos rios João Gualberto Soares e Vermelho foram da mesma ordem das concentrações encontradas no setor Sul. A série temporal de concentrações médias desses nutrientes nos quatro setores da laguna é apresentado na Figura 83.

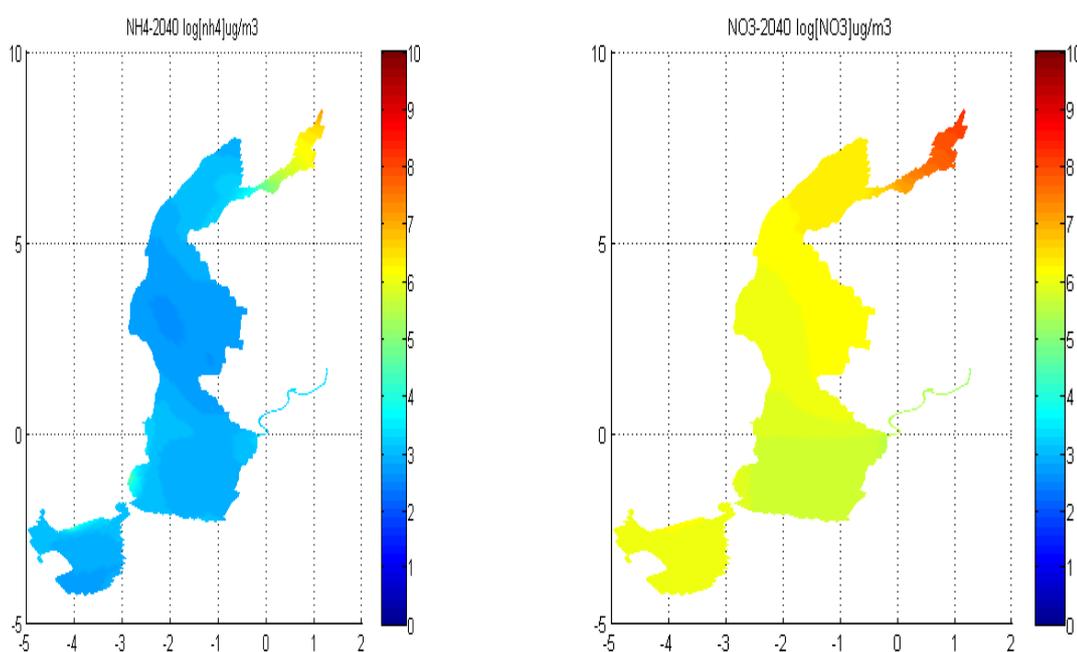
Figura 83 – Concentração média de nutrientes em cada setor da laguna ao longo do tempo em 2040



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

A figura evidencia o aumento das concentrações de Amônio e de Nitrato em toda a laguna, contudo, em maior parte no setor Norte, onde existe um crescimento populacional maior e esperado. A Figura 84 mostra o mapa das concentrações médias da forma reduzida e oxidada de nitrogênio.

Figura 84 – Concentrações médias de Amônio e Nitrato encontradas pelo modelo em 2040

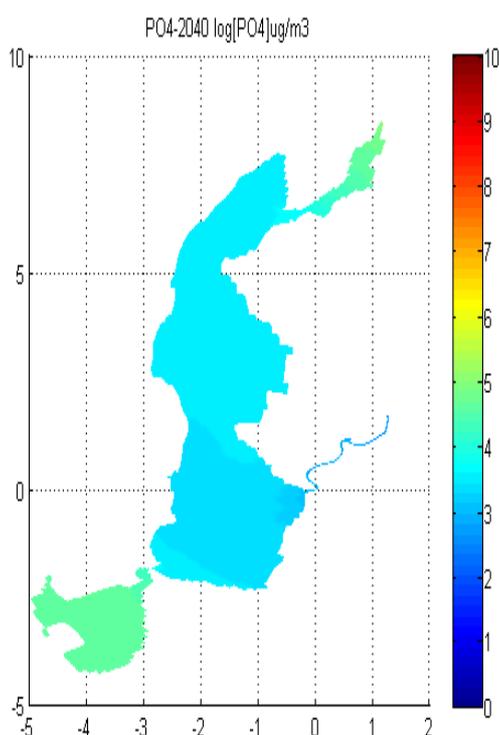


Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

É possível verificar que as concentrações de  $\text{NH}_4^+$  e  $\text{NO}_3^-$  aumentam em 10 vezes ou 100 vezes as concentrações de 2015 (uma e duas ordens de grandeza) e que o setor que apresenta os menores valores é o Central (que ainda possui uma troca mais constante com o oceano). Apesar das concentrações de Nitrogênio Amoniaco não exceder os limites estabelecidos pela legislação brasileira, Conama n. 357, as concentrações de Nitrato chegam ao máximo permitido (0,4 mg/l) na média da região Norte, passando deste no extremo Norte.

A Figura 85 mostra as concentrações médias de Fosfato.

Figura 85 – Concentrações médias de Íons Fosfato encontradas pelo modelo em 2040



Fonte: Elaborada pelo autor desta tese

Verifica-se que as concentrações de PID aumentam em toda laguna, sendo que no extremo Norte e no setor Sul da laguna, esse aumento é mais expressivo, atingindo valores de cerca de 10 vezes superiores do que em 2015.

Salas Herrero, Teixeira e Poikane (2019) fizeram um compilado de valores de concentrações de nitrogênio e fósforo em lagunas costeiras na Europa para analisar valores de referências de lagunas saudáveis. Os valores descritos pelos autores foram da ordem de 26 a 120 ug/l de fósforo inorgânico dissolvido. A LdC apresentou valores de 10 a 100 vezes mais em algumas regiões em 2015 e 2040, confirmando que o processo de eutrofização que está em curso na LdC se agravará nesse cenário.

Em lagunas de clima subtropical, a temperatura e a luz solar não se apresentam como limitantes para a produção primária. Em contrapartida, a concentração de nutrientes não é apenas limitante, mas também seu aumento pode provocar uma redução da biodiversidade bentônica e até perdas funcionais da fauna no fundo dos lagos, como verificado por Lam-Gordillo *et al.* (2022) na laguna de Coorong na Austrália. Singh (2021) afirma que as espécies de fitoplânctons também mudam de acordo com a quantidade de nutrientes, sendo que isso pode causar uma redução na transparência da água e na redução da coluna de água fotossinteticamente ativa. Além desses efeitos, pode-se citar ainda a anóxia e hipóxia que estão presentes e as centenas de lagunas e de corpos de água costeiros pelo mundo (RABALAIS *et al.*, 2010).

### 3.4.5 Conclusão

Neste capítulo, foi possível ver o processo de construção do modelo de qualidade da água da Lagoa da Conceição. A média da concentração de NID encontrada na laguna em 2015 foi de 0,184 mg/l, e a média das concentrações desse nutriente modelada nesse período foi de 0,174. Já a concentração média de PID amostradas foi de 0,026 mg/l, e a modelada foi de 0,024. Os valores sugerem uma faixa de erro de 0,010 mg/l para o NID e de 0,002 mg/l para o fósforo. Em 2001, as concentrações médias de NID observadas experimentalmente na laguna foram de 0,026 mg/l, enquanto a média do modelo foi de 0,034 mg/l. Para o PID, os valores encontrados foram de 0,005 mg/l, já para os dados modelados, a concentração média foi de 0,012mg/l. Portanto, o erro estimado pela média é da ordem de 0,008 mg/l para NID e de 0,007 para o PID, ou seja, valores bem razoáveis de erro para a complexidade do ecossistema lagunar.

O modelo estimou maiores concentrações nas desembocaduras dos rios de BH mais urbanizadas e nas regiões mais distantes do canal de conexão oceânica – característica também verificada em outras lagunas e descrito na literatura. As projeções populacionais para 2040 resultaram em concentrações muito superiores as de 2015, cerca de 10 a 100 vezes maiores para NID e 10 vezes maiores para PID, sobretudo nos setores Sul e no extremo Norte da LdC. Isso se deve ao fato de as SBHs do Sul e do Norte estarem sofrendo uma grande taxa de crescimento urbano, em especial o Distrito de São João do Rio Vermelho, ao Norte da laguna que deve ser o distrito mais populoso entre os distritos da BH até 2040.

As concentrações de Nitrogênio Amoniacal foram em geral menores do que de Nitrato, isso significa que existe uma capacidade grande de nitrificação na laguna devido ao grande tempo de residência e à disponibilidade de oxigênio e de bactérias nitrificantes (FONSECA,

2004; FONTES, 2006). Contudo, nos anos de 2015 e 2040, fica evidente que as descargas elevadas de nitrogênio na forma reduzida (de fonte antrópica) farão com que as concentrações desse nutriente aumentem muito. É importante frisar que a DBO nitrificante é cinco vezes maior do que a DBO carbonácea, mostrando que um dos possíveis impactos futuros pode ser a redução das concentrações de oxigênio em toda laguna, sobretudo no setor Sul e extremo Norte.

A LdC se apresentou como um ambiente aquático muito sensível às mudanças de uso e de ocupação da BH e se mostra em processo de eutrofização acelerada, sobretudo nas regiões de maior influência antrópica e de menor influência da diluição oceânica (extremo Norte e Sul da laguna). É importante frisar que, caso sejam feitas mudanças no Plano Diretor para aumento da capacidade-limite, esses valores podem aumentar ainda mais. E o contrário também é válido, caso as condições de saneamento da BH sejam melhoradas, as cargas de nutrientes podem reduzir, melhorando, assim, a qualidade de água da laguna. Portanto, se faz necessário o estabelecimento de legislação mais restritiva para os padrões de qualidade da água da Lagoa da Conceição em comparação com a classificação da legislação nacional, Conama n. 357. Trang *et al.* (2020) também fizeram essa verificação para a laguna de Giang-Cau Hai no Vietnã através do estudo de cenários futuros para qualidade da água da laguna por meio de modelagem numérica. Hamed e Ahmed (2022) também verificaram o mesmo processo no lago de Brullus no Egito, sugerindo mudanças em prol do desenvolvimento sustentável local.

#### 4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os métodos empíricos e numéricos usados nesta tese tiveram resposta satisfatória para as perguntas de pesquisa – sendo possível caracterizar as influências ambientais e antrópicas necessárias para testar as hipóteses.

As hipóteses iniciais foram confirmadas:

1. A mudança da qualidade da água preponderantemente pelo aumento populacional se confirmou com a aplicação do LOICZ e também pelo modelo numérico associado à qualidade da água Delft-3D.
2. O padrão de oscilações de nível da laguna é influenciado primariamente pelo oceano (cerca de 90% da variância em níveis). As maiores velocidades de escoamento estão nas áreas rasas da laguna e no canal, em contrapartida, os maiores deslocamentos de massa estão presentes nas áreas profundas. O transporte de massa residual é no sentido de vazante, e as velocidades médias variam de 1 a 4 cm/s no interior da laguna e até 29 cm/s no Canal da Barra da Lagoa.
3. Existem duas células de recirculação de alta pressão que sugerem regiões de deposição de material no fundo da laguna (uma no setor Central e outra no Centro-Norte) e duas células de recirculação de baixa pressão que sugerem pontos de espalhamento e de ressuspensão de material do fundo (um na região Central e outra na Sul).
4. A estratificação marcada na região Central apresentou aumento nos últimos anos, sendo que a região é a mesma do giro de alta pressão detalhada no campo vetorial e ainda apresenta valor de índice de Richardson na faixa entre 0 e 0,25 (tendência à estratificação).
5. O tempo de residência da Lagoa da Conceição foi estimado em 365 dias pelo método do traçador lagrangiano. Sendo que o setor Sul é o que possui maior TR dos setores da laguna (270 dias).
6. A concentração de nutrientes da laguna está aumentando ao longo do tempo e isso se deve ao aumento populacional exponencial-logaritmo que a bacia vem sofrendo, sendo que se encontra em estado eutrófico desde 2007, segundo o índice TRIX.
7. As análises de nutrientes realizadas nas amostras coletadas nas nascentes e foz de rios importantes mostram que cerca de 80% a 90% das descargas de

nutrientes nas bacias mais urbanizadas são de fonte antrópicas. Isso tanto para nitrogênio quanto para fósforo. Sendo que esse resultado é corroborado por outros pesquisadores.

8. Os resultados obtidos pela projeção futura da qualidade da água evidenciam que a continuidade do crescimento urbano sem mudanças no sistema de tratamento de efluentes causará incrementos de 10 a 100 vezes nas concentrações de NID e de 10 vezes nas concentrações médias de PID, sendo que esse efeito será sentido em maior grau no setor Sul e no extremo Norte da laguna (onde a laguna recebe a influência dos maiores rios da BH que vão drenar a maior parte da porção urbanizada da BH).
9. Os resultados encontrados foram estimados a partir da hipótese de aumento populacional apenas até o limite do permitido pelo Plano Diretor da cidade, sendo que, caso este não seja respeitado ou até mesmo sejam aumentadas as taxas de ocupação e de verticalização, o efeito na mudança na qualidade da água pode ser ainda maior. Outrossim, se ocorrerem melhorias nos sistemas de tratamento de esgoto que exijam, por exemplo, a necessidade da implementação de nível terciário (remoção de nutrientes) nas estações de tratamento de esgoto da bacia hidrográfica, os efeitos deletérios da urbanização podem ser revertidos.
10. Também se revela importante a execução de monitoramento contínuo que permita acompanhar a dinâmica biogeoquímica na Lagoa da Conceição, subsidiando projetos de controle e de mitigação dos impactos gerados pela crescente pressão antrópica.

Assim como outros autores que promovem a modelagem de qualidade da água, existem recomendações para futuros trabalhos científicos e recomendações a nível de gestão local:

1. Para melhorar a precisão dos modelos de qualidade da água e aumentar a robustez das análises de erros, é importante que sejam monitorados com uma taxa de amostragem maior (no mínimo diária) os parâmetros de qualidade da água que podem ser somados ao banco dos dados levantados por este trabalho (nutrientes, oxigênio, clorofila, temperatura e salinidade), sendo que podem ser incluídos nos parâmetros biológicos, sobretudo, o fitoplâncton, os coliformes e o carbono.

2. Dar continuidade às amostragens de qualidade da água nos rios (nascente e foz) e aumentar os parâmetros que são analisados (inclusão dos coliformes fecais e carbono).
3. Outra sugestão para pesquisas futuras é explorar mais a fundo o escoamento e o fluxo difusivo no sentido vertical do escoamento e o fluxo subterrâneo de entradas e saídas da laguna.
4. Uma estratégia importante de gestão é que os estudos ecológicos como este sirvam de base para o planejamento urbanístico da cidade, ou seja, que sirvam para repensar o modelo de saneamento e o modelo de urbanização da cidade.
5. Outra estratégia ainda é que trabalhos de modelagem de qualidade da água como este possam ser elaborados para definir parâmetros e padrões de qualidade da água e utilizados na legislação local, sendo essas mais restritivas do que a Conama n. 357, já que o ambiente da LdC é muito sensível aos aumentos de descarga de nutrientes (assim como feito em outros países) – isso pode evitar a perda da qualidade geral, a hipóxia e anóxia, a mortalidade dos peixes, a floração de algas e a perda da biodiversidade.
6. Como estratégia de gestão, sugere-se uma cooperação entre os diversos atores do poder público e a sociedade civil para modelagem operacional da laguna com disponibilização de dados *on-line* poderia dar mais importância às pesquisas, maior controle dos agentes fiscalizadores do estado e maior segurança sanitária para comunidade local.

## REFERÊNCIAS

- ACHETE, Fernanda *et al.* How can climate change and engineered water conveyance affect sediment dynamics in the San Francisco Bay-Delta system? **Climatic Change**, [S.l.], v. 142, n. 3, p. 375-389, 2017.
- ACQUAVITA, A. *et al.* Annual characterization of the nutrients and trophic state in a Mediterranean coastal lagoon: the Marano and Grado Lagoon (northern Adriatic Sea). **Regional Studies in Marine Science**, [S.l.], v. 2, p. 132-144, 2015.
- AEROCONSULT. **Relatório final da batimetria do Distrito Administrativo da Lagoa da Conceição e Barra da Lagoa**. Florianópolis, Santa Catarina, 2001.
- ALKHAWAGA, Abdalmonem; ZEIDAN, Bakenaz; ELSHEMY, Mohamed. Climate change impacts on water security elements of Kafr El-Sheikh governorate, Egypt. **Agricultural Water Management**, [S.l.], v. 259, p. 107217, 2022.
- ALOSAIRI, Yousef; POKAVANICH, Tanuspong. Residence and transport time scales associated with Shatt Al-Arab discharges under various hydrological conditions estimated using a numerical model. **Marine Pollution Bulletin**, [S.l.], v. 118, n. 1-2, p. 85-92, 2017.
- ANDERSON, M. J. *et al.* PERMANOVA+ for PRIMER: Guide to Software and Statistical Methods, p. 214, 2008.
- ANDRADE, R. C. **Estudo da Circulação Hidrodinâmica da Lagoa da Conceição-SC**. 2001. 134p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro UFRJ, Rio de Janeiro, 2001.
- ANDUTTA, Fernando P. *et al.* An assessment of transport timescales and return coefficient in adjacent tropical estuaries. **Continental Shelf Research**, [S.l.], v. 124, p. 49-62, 2016.
- ANDUTTA, Fernando Pinheiro. **O Sistema Estuarino dos rios Caravelas e Peruípe (Bahia): observações, simulações, tempo de residência e processos difusivo e advectivo**. 2011. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- ASHRAF, Muhammad; BASHIR, Sumra. Numerical simulation of MHD stagnation point flow and heat transfer of a micropolar fluid towards a heated shrinking sheet. **International journal for Numerical Methods in Fluids**, [S.l.], v. 69, n. 2, p. 384-398, 2012.
- BIANCHI, T. **Biogeochemistry of estuaries**. [S.l.: s.n.], 2006.
- BIER, F. B. **Aspectos hidrodinâmicos e sedimentológicos em um canal de maré: estudo de caso do Canal da Barra da Lagoa, Florianópolis – SC**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.
- BIER, F. **Caracterização morfométrica e hidrológica da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição, Florianópolis, SC**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental (Bacharelado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- BOLIN, Bert; RODHE, Henning. A note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs. **Tellus**, [S.l.], v. 25, n. 1, p. 58-62, 1973.
- BORGES, Sergio Freitas *et al.* **Características hidroquímicas do aquífero freático do Balneário Campeche, Ilha de Santa Catarina – SC**. [S.l.: s.n.], 1996.

- BORGO, D. *et al.* Os padrões de distribuição dos peixes de uma laguna costeira aberta no Atlântico Oeste subtropical são influenciados pelas variações espaciais e sazonais? **Biotemas**, [S.l.], v. 28, n. 3, p. 93-105, 2015.
- BRANCO, J.; VERANI, J. Dinâmica da alimentação natural de *Callinectes danae* Smith (Decapoda, Portunidae) na Lagoa da Conceição, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil. **Revista Brasileira Zoologia**, [S.l.], v. 14, n. 4, p. 1.003-1.018, 1997.
- BRANDINI, F. P.; FERNANDES, L. F. Microalgae of the continental shelf off Paraná State, southeastern Brazil: a review of studies The Paraná littoral and plane region. **Revista Brasileira de Oceanografia**, [S.l.], v. 44, n. 1, p. 69-80, 1996.
- BRASIL. **Lei n. 482, de 17 de janeiro de 2014**. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a/sc/f/florianopolis/lei-complementar/2014/48/482/lei-complementar-n-482-2014-institui-o-plano-diretor-de-urbanismo-do-municipio-de-florianopolis-que-dispoe-sobre-a-politica-de-desenvolvimento-urbano-o-plano-de-uso-e-ocupacao-os-instrumentos-urbanisticos-e-o-sistema-de-gestao>. Acesso em: 2 mar. 2022.
- BRICKER, S. *et al.* **National estuarine eutrophication assessment**: effects of nutrient enrichment in the nation's estuaries. [S.l.: s.n], 1999.
- CABRAL, A.; BERCOVICH, M.; FONSECA, A. Implications of poor-regulated wastewater treatment systems in the water quality and nutrient fluxes of a subtropical coastal lagoon. **Regional Studies in Marine Science**, [S.l.], 2019.
- CAMPANÁRIO, P. **Florianópolis**: dinâmica demográfica e projeção da população por sexo, grupos etários, distritos e bairros (1950-2050). [S.l.]: IPUF, 2007.
- CAÑEDO-ARGÜELLES, M. *et al.* Annual characterisation of four Mediterranean coastal lagoons subjected to intense human activity. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, [S.l.], v. 114, p. 59-69, 2012.
- CARAPETO, Cristina. **Poluição das águas**. Lisboa: Universidade Aberta, 1999.
- CARPENTER, Stephen; BROCK, William; HANSON, Paul. Ecological and social dynamics in simple models of ecosystem management. **Conservation Ecology**, [S.l.], v. 3, n. 2, 1999.
- CARUSO, Gabriella, Leonardi, M. *et al.* Assessment of the ecological status of transitional waters in Sicily (Italy): first characterisation and classification according to a multiparametric approach. **Marine Pollution Bulletin**, [S.l.], v. 60, n. 10, p. 1.682-1.690, 2010
- CIGLENEČKI, Irena *et al.* Dissolved organic carbon accumulation during a bloom of invasive gelatinous zooplankton *Mnemiopsis leidyi* in the northern Adriatic Sea; case of the anomalous summer in 2017. **Journal of Marine Systems**, [S.l.], v. 222, p. 103599, 2021.
- CLOERN, J. Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem. **Marine Ecology Progress Series**, [S.l.], v. 210, p. 223-253, 2001.
- COELHO, S.; GAMITO, S.; PÉREZ-RUZAFÁ, A. Trophic state of Foz de Almargem coastal lagoon (Algarve, South Portugal) based on the water quality and the phytoplankton community. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, [S.l.], v. 71, n. 1, p. 218-231, 2007.
- COSTA, M. F.; BARLETTA, M. Special challenges in the conservation of fishes and aquatic environments of South America. **Journal of Fish Biology**, [S.l.], 2016.
- COTOVICZ, L. C. Comparação de Modelos e Índices para Avaliação do Estado Trófico do Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguaba (AL). **Geochimica Brasiliensis**, [S.l.], v. 26, n. 1, 2013.

- CUADRAT, R. R.; FERRERA, I.; GROSSARTHANS-PETER, R. D. M. Picoplankton Bloom in Global South? A High Fraction of Aerobic Anoxygenic Phototrophic Bacteria in Metagenomes from a Coastal Bay (Arraial do Cabo – Brazil). **Omics: a Journal of Integrative Biology**, [S.l.], v. 20, n. 2, p. 76-87, 2016.
- CURY, V. E. S. **Análise Espaço Temporal do Estado Trófico de uma Laguna Costeira Subtropical**: Lagoa da Conceição, Florianópolis, Santa Catarina. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.
- DABROWSKI, Tomasz; BERRY, Alan. Use of numerical models for determination of best sampling locations for monitoring of large lakes. **Science of the Total Environment**, [S.l.], v. 407, n. 14, p. 4207-4219, 2009.
- DALBOSCO, Anna Luiza Pacheco *et al.* **Circulação na Plataforma Continental Interna de Santa Catarina**. 2019. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.
- DE AMORIM, Eduardo Lucena Cavalcante; DE OLIVEIRA NETTO, Antonio Pedro; MARIO, Eduardo. **Estudo de métodos para regionalização de vazão**. [S.l.: s.n], 2005.
- DE KREEKE, VAN, Jacobus; CARPENTER, James H.; MCKEEHAN, David S. Water Motions in Closed-End Residential Canal. **Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division**, [S.l.], v. 103, n. 1, p. 161-166, 1977.
- DIAZ, R.; ROSENBERG, R. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. **Science**, [S.l.], v. 321, n. 5.891, p. 926-929, 2008.
- DRONKERS, J.; ZIMMERMAN, J. T. F. Some principles of mixing in tidal lagoons. **Oceanologica Acta, Special issue**, [S.l.], 1982.
- DSIKOWITZKY, L. *et al.* Impacts of megacities on tropical coastal ecosystems – The case of Jakarta, Indonesia. **Marine Pollution Bulletin**, [S.l.], 2016.
- EKAU, W.; KNOPPERS, B. A. A review and definition of the large marine ecosystems of Brazil. **Large Marine Ecosystems of the World –Trends in Exploitation, Protection and Research**, [S.l.], v. 12, p. 355-374, 2003.
- EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Rates constants and kinetics formulations in surface water quality modeling**. 2 ed. [S.l.]: Athens. 1985. 455p.
- ESTEVES, Francisco de Assis *et al.* **Fundamentos de limnologia**. [S.l.: s.n.], 2011.
- FAURE, V. *et al.* **Marine Pollution Bulletin, Modelling the spatial and temporal variability of the SW lagoon of New Caledonia II**: Realistic 3D simulations compared with in situ data. [S.l. s.n], 2010. v. 61.
- FAUST, M.; GULLEDGE, R. Identifying harmful marine dinoflagellates. **Contributions from the United States National**, [S.l.], v. 42, p. 1-144, 2002.
- FERREIRA, J. *et al.* Does biodiversity of estuarine phytoplankton depend on hydrology? **Ecological Modelling**, [S.l.], v. 187, n. 4, p. 513-523, 2005.
- FONSECA, A. Efeito da drenagem urbana nas características físico-químicas e biológicas da água superficial na Lagoa da Conceição (Florianópolis, SC, Brasil). **Biotemas**, [S.l.], v. 19, n. 2, p. 7-16, 2006.

- FONSECA, A. **variação sazonal e espacial das características hidroquímicas, dos fluxos de nutrientes e do metabolismo na interface água-sedimento na Lagoa da Conceição.** 2004. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- FONSECA, A.; BRAGA, E. S.; EICHLER, B. B. **Distribuição espacial dos nutrientes inorgânicos dissolvidos e da biomassa fitoplanctônica no sistema pelágico da Lagoa da Conceição, Santa Catarina, Brasil.** [S.l.: s.n.], 2000.
- FONTES, M. *et al.* Primary production in a subtropical stratified coastal lagoon – contribution of anoxygenic phototrophic bacteria. **Microbial Ecology**, [S.l.], v. 61, n. 1, p. 223-237, 2011.
- FONTES, M. L. **Dinâmica e composição das comunidades bacterianas em função da disponibilidade de oxigênio na Lagoa da Conceição.** 2009. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2009.
- FONTES, M. L. S. **Breve estudo espaço-temporal e de impacto do feriado de carnaval e de corpus christi sobre variáveis ambientais nas águas da Lagoa da Conceição – Florianópolis.** [S.l.: s.n.], 2004.
- FORBES, Stephen A. **The lake as a microcosm.** [S.l.: s.n.]: 1887.
- FRANCO, Davide; MARTINS, Eloi Melo. **Caracterização do potencial energético do Estado de Santa Catarina.** Relatório de Pesquisa. [S.l.: s.n.], 2009.
- FREITAS DE MAGALHÃES, V.; MORAES SOARES, R.; AZEVEDO, S. M. F. O. Microcystin contamination in fish from the Jacarepaguá Lagoon (Rio de Janeiro, Brazil): ecological implication and human health risk. **Toxicon**, [S.l.], v. 39, n.7, p. 1.077-1.085, 2001.
- GARBOSSA, Luis H. P. *et al.* Thermotolerant coliform loadings to coastal areas of Santa Catarina (Brazil) evidence the effect of growing urbanisation and insufficient provision of sewerage infrastructure. **Environmental Monitoring and Assessment**, [S.l.], v. 189, n. 1, p. 27, 2017.
- GARCEZ, L. N.; ALVAREZ, G. A. **Hidrologia.** São Paulo: Editora Edgar Blücher, 1988.
- GASALLA, M. A.; ROSSI-WONGTSCHOWSKI, C. L. D. B. Contribution of ecosystem analysis to investigating the effects of changes in fishing strategies in the South Brazil Bight coastal ecosystem. **Ecological Modelling**, [S.l.], v. 172, n. 2-4, p. 283-306, 2004.
- GESAMP. **Protecting the oceans from land-based activities. Land-based sources and activities affecting the quality and uses of the marine, coastal and associated freshwater environment.** [S.l.: s.n.], 2001.
- GLIBERT, P. *et al.* Modeling of HABs and eutrophication: status, advances, challenges. **Journal of Marine Systems**, [S.l.], v. 83, n. 3, p. 262-275, 2010.
- GLIBERT, P. *et al.* The Role of Eutrophication in the Global Proliferation of Harmful Algal Blooms. **Oceanography**, [S.l.], v. 18, n. 2, p. 198-209, 2005.
- GODOY, F. **Modelagem hidrológico-hidrodinâmica da Lagoa da Conceição-SC.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- GODOY, Fabio *et al.* O canal da Barra da Lagoa, Florianópolis-SC – um filtro de maré natural. Laboratório de Hidráulica Marítima – UFSC. In: III SEMENGO – SEMINÁRIO DE ENGENHARIA OCEÂNICA, Rio Grande, RS, 12p. 2008. **Anais [...]**. Rio Grande, RS, 2008.

- GÓMEZ, R. C. C.; GÓMEZ, M. A. M.; BULGAKOV, S. N. Efectos de los vórtices en sistemas acuáticos y su relación con la química, biología y geología. **Interciencia: Revista de Ciencia y Tecnología de América**, [S.l.], v. 33, n. 10, p. 741-746, 2008.
- GORDON, Donald C. *et al.* **LOICZ biogeochemical modelling guidelines**. Yerseke: LOICZ Core Project; Netherlands Institute for Sea Research, 1996.
- GRASSHOLF, K.; KREMLING, K.; EHRHARDT, M. Methods of seawater analysis. 3rd, completely revised and extended edition. Wiley, VCH: Grassholf, K. Weinheim, 1999. p. 599.
- GUARDA, Antônio. Gestão urbana: projeção da população flutuante. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO – COBRAC. UFSC, Florianópolis, 7 a 11 de outubro 2012. **Anais [...]**. Florianópolis, 2012.
- HALPERN, B. S. *et al.* A global map of human impact on marine ecosystems. **Science**, [S.l.], v. 319, n. 5.865, p. 948-952, 2008.
- HALPERN, B. S. *et al.* Spatial and temporal changes in cumulative human impacts on the world's ocean. **Nature Communications**, [S.l.], v. 6, 2015.
- HAMED, Reda; AHMED, Mohamed. Water Quality Management for Sustainable Development of Lake Burullus. **Journal of Al-Azhar University Engineering Sector**, [S.l.], v. 17, n. 62, p. 161-171, 2022.
- HEILEMAN S.; GASALLA M. **South Brazil Shelf LME. The UNEP large Marine ecosystems report**: a perspective on changing conditions in LMEs of the World's regional seas. 2nd. United Nations Environmental Program (UNEP). United Nations Environmental Program. (February), p. 235-242, 2004.
- HERING, Daniel *et al.* The European Water Framework Directive at the age of 10: a critical review of the achievements with recommendations for the future. **Science of the Total Environment**, [S.l.], v. 408, n. 19, p. 4.007-4.019, 2010.
- HESP, Patrick *et al.* Regional wind fields and dunefield migration, southern Brazil. **Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group**, [S.l.], v. 32, n. 4, p. 561-573, 2007.
- HORN FILHO, N. O.; LIVI, N. S. **Mapa geoevolutivo da planície costeira da ilha de Santa Catarina, SC, Brasil**. Florianópolis: Departamento de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.
- HORN FILHO, Norberto Olmiro. Setorização da província costeira de Santa Catarina em base aos aspectos geológicos, geomorfológicos e geográficos. **Geosul**, [S.l.], v. 18, n. 35, p. 71-98, 2013.
- IGNATIADES L.; GEORGOULOS, D.; KARYDIS, M. Description of a phytoplanktonic community of the oligotrophic waters of SE Aegean Sea (Mediterranean). **P.S.Z.I. Mar. Ecol.**, [S.l.], v. 16, p. 13-26, 1995.
- INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normas Climatológicas**. [S.l.]: INMET, 1992. 155p.
- JAIN, Sharad K.; SUDHEER, K. P. Fitting of hydrologic models: a close look at the Nash – Sutcliffe index. **Journal of Hydrologic Engineering**, [S.l.], v. 13, n. 10, p. 981-986, 2008.
- JØRGENSEN, Sven Erik. A review of recent developments in lake modelling. **Ecological modelling**, [S.l.], v. 221, n. 4, p. 689-692, 2010.

- JØRGENSEN, Sven Erik. *Fundamentals of Ecological Modelling*. 1st edition. Amsterdam: Elsevier, 1988. 390p.
- KIM, Yong Hoon et al. Seasonal variability of estuarine dynamics due to freshwater discharge and its influence on biological productivity in Yeongsan River Estuary, Korea. *Chemosphere*, [S.l.], v. 181, p. 390-399, 2017.
- KJERFVE, B. Coastal Lagoons. In: KJERFVE, B. (ed.). **Costal Lagoon Processes**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 1-8.
- KJERFVE, B. Comparative Oceanography of Coastal Lagoons. In: WOLFE, D. A. (ed.). **Estuarine variability**. New York, Academic Press, 1986. p. 63- 81.
- KJERFVE, B. *et al.* Temporal and spatial considerations in measuring estuarine water fluxes. In: KENNEDY, V. S. (ed.). **Estuarine Comparisons**. New York: Academic Press, 1982. p. 37-51.
- KJERFVE, B.; MAGILL, K. E. **Geographic and hydrodynamic characteristic of shallow coastal lagoons**. Columbia: Marine Geology, 1989. p. 187-199.
- KJERFVE, B.; MCKELLAR Jr., H. N. 1980. Time series measurements of estuarine material fluxes. In: KENNEDY, V. S. (ed.). **Estuarine Perspectives**. New York: Academic Press, 1980. p. 341-257.
- KJERFVE, B.; WOLAVER, T. Sampling optimization for studies of tidal transport in estuaries. *Am. Fish. Soc. Symp*, [S.l.], v. 147, p. 26-33, 1988.
- KNOPPERS, B.; KJERFVE, B. Coastal Lagoons of Southeastern Brazil: Physical and Biogeochemical Characteristics. In: KNOPPERS, B.; KJERFVE, B. **Estuaries of South America**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1999. p. 35-66.
- KÖPPEN, Wladimir. **Climatologia**: con un estudio de los climas de la tierra. México, Fondo de Cultura Economica, 1948. 466p.
- LAM-GORDILLO, Orlando et al. Loss of benthic macrofauna functional traits correlates with changes in sediment biogeochemistry along an extreme salinity gradient in the Coorong lagoon, Australia. *Marine Pollution Bulletin*, [S.l.], v. 174, p. 113202, 2022.
- LANA, Paulo *et al.* **Avaliação ambiental de estuários brasileiros**: diretrizes metodológicas. [S.l.]: Museu Nacional, 2006.
- LEDO, S. S. de. Ecosistemas de Marismas da Lagoa da Conceição III. A Produção Primária. In: LEDO, S. de (org.). **O ecossistema da Lagoa da Conceição**. [S.l.]: SDM/FEPEMA, 1999. p. 343-357.
- LEMÉTAYER, M.; ODRESKI, L. F. R. **Elaboração e análise temporal espacial dos mapas de cobertura do solo da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição – Florianópolis – SC**. [S.l.: s.n.], 2011.
- LESSER, G. R. *et al.* Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*, [S.l.], v. 51, n. 8-9, p. 883-915, 2004.
- LISBOA, Leonardo Kleba; TEIVE, Letícia Frozza; PETRUCIO, Maurício Mello. Lagoa da Conceição: uma revisão da disponibilidade de dados ecológicos visando o direcionamento de novas pesquisas no ecossistema. *Biotemas*, [S.l.], v. 21, n. 1, p. 139-146, 2011.
- LOTZE, H. K. *et al.* Depletion, degradation, and recovery potential of estuaries and coastal seas. *Science*, New York, NY, v. 312, n. 5.781, p. 1.806-1.809, 2006.

- LOURO, M. D. E. Q. **Respostas Relacionais entre Nitrato, Ortofosfato e Biomassa Fitoplanctônica da Lagoa de Cima (RJ): uma Abordagem Experimental.** [S.l.: s.n.], 2011.
- LUIZ, E. L. Tipos de solos do município de Florianópolis. *In*: BASTOS, M.D.A. (coord). **Atlas do município de Florianópolis.** Florianópolis. Florianópolis: IPUF, 2004.
- MCCUEN, Richard H.; KNIGHT, Zachary; CUTTER, A. Gillian. Evaluation of the Nash – Sutcliffe efficiency index. **Journal of Hydrologic Engineering**, [S.l.], v. 11, n. 6, p. 597-602, 2006.
- MCDUGALL, T.; FEISTEL, R.; MILLERO, F. The International Thermodynamic Equation of Seawater (TEOS-10): Calculation and Use of Thermodynamic Properties. *Global Ship-Based*, [S.l.], v. 14, 2010.
- MIRANDA, L.; DE CASTRO, B.; KJERFVE, B. Princípios de Oceanografia Física de Estuários, [S.l.], v. 42. São Paulo: EDUSP, 2002. p. 414.
- MONSEN, Nancy E. *et al.* A comment on the use of flushing time, residence time, and age as transport time scales. **Limnology and Oceanography**, [S.l.], v. 47, n. 5, p. 1.545-1.553, 2002.
- MOSLEY, M. P. Delimitation of New Zealand hydrologic regions. **Jornal of Hydrology**, [S.l.], v. 49, p. 173-192, 1981.
- MPB ENGENHARIA. **Plano Municipal Integrado de Saneamento Básico do Município de Florianópolis.** Florianópolis, SC: IPUF, 2008.
- NADAL-ROMERO, E.; REGÜÉS, D.; LATRON, J. Relationships among rainfall, runoff, and suspended sediment in a small catchment with badlands. **Catena**, [S.l.], v. 74, n. 2, p. 127-136, 2008.
- NAKHAEI, N. *et al.* **Ecological Modelling, Three-dimensional biogeochemical modeling of eutrophication in Edmonton stormwater ponds.** [S.l.: s.n], 2021.
- NETTO, Sérgio A. *et al.* Benthic estuarine assemblages from the Southern Brazilian marine ecoregion. **Brazilian Estuaries**, Springer, Cham, p. 177-212, 2018.
- NIXON, S. Coastal marine eutrophication: a definition, social causes, and future concerns. **Ophelia**, [S.l.], v. 41, n. 1, p. 199-219, 1995.
- OBREGON, E., TUCCI, C. E. M., GOLDENFUM, J. A. Regionalização de vazões com base em séries estendidas: bacias afluentes à lagoa Mirim, RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Belo Horizonte, v. 4, n. 1, p. 57-75, 1999.
- ODRESKI, L. **Influência hidrológica nos processos hidrodinâmicos da Lagoa da Conceição – Florianópolis – SC.** 2012. 148p. Dissertação (Mestrado Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.
- ODUM, E. P. **Ecologia.** Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 1988. 434p.
- OUNI, H. *et al.* Numerical modeling of hydrodynamic circulation in Ichkeul Lake-Tunisia. **Energy Reports**, [S.l.], v. 6, p. 208-213, 2020.
- PAWLOWICZ, Rich *et al.* Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_TIDE. **Computer & Geosciences**, [S.l.], n. 28, p. 929-937, 2002.
- PENNA, N.; CAPELLACCI, S.; RICCI, F. The influence of the Po River discharge on phytoplankton bloom dynamics along the coastline of Pesaro (Italy) in the Adriatic Sea. **Marine Pollution Bulletin**, [S.l.], v. 48, n. 3, p. 321-326, 2004.
- PESSOA, Fernando. **Odes de Ricardo Reis.** Lisboa: Ática, 1946 (imp.1994).

- PORTO FILHO, É. **Sedimentometria e algumas considerações sobre a biogeoquímica dos sedimentos de fundo da Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina**. 1993. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1993.
- PORTO FILHO, Érico *et al.* **Laguna da Conceição: um " sistema singular complexo" na Ilha de Santa Catarina, SC, Brasil**. [S.l.: s.n.], 2019.
- RABALAIS, N. *et al.* Dynamics and distribution of natural and human-caused hypoxia. **Biogeosciences**, [S.l.], v. 7, n. 2, p. 585-619, 2010.
- RABALAIS, N.; TURNER, R. Global change and eutrophication of coastal waters. **ICES Journal of Marine Science**, [S.l.], v. 66, n. 7, p. 1.528-1.537, 2009.
- RANTZ, S. E. **Measurement and Computation of Streamflow**: Volume 1. Measurement of Stage and Discharge, USGS, 1982.
- RIBEIRO, G. C.; CLEZAR, L.; HOSTIM-SILVA, M. Comunidade Íctica, sua variação espacial e sazonal na Lagoa da Conceição e área adjacente, Ilha de Santa Catarina, SC, Brasil. *In*: RIBEIRO, G. C.; CLEZAR, L.; HOSTIM-SILVA, M. **O ecossistema da Lagoa da Conceição**. Florianópolis: NEMAR, SDM/FEPEMA, 1999. p. 261-273.
- ROCHA, C. B. M. DA. **Implementação e uso do modelo Mike 21 na análise de cenários hidrodinâmicos na Lagoa da Conceição – SC**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- ROCKSTRÖM, Johan *et al.* Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. **Ecology and Society**, [S.l.], v. 14, n. 2, 2009.
- RODRIGUES, A. S. *et al.* Aplicação do modelo TRIX para avaliação da qualidade da água dos rios que drenam para Estação Ecológica de Carijós, Florianópolis, SC, Brasil. *In*: XX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2016. **Anais [...]**. [S.l.], 2016.
- RODRIGUES, R. R.; LORENZZETTI, J. A. A numerical study of the effects of bottom topography and coastline geometry on the Southeast Brazilian coastal upwelling. **Continental Shelf Research**, [S.l.], v. 21, n. 4, p. 371-394, 2001.
- ROSMAN, Paulo Cezar Colonna. Um sistema computacional de hidrodinâmica ambiental. **Métodos Numéricos em Recursos Hídricos**, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Rio de Janeiro, v. 5, p. 162, 2001.
- ROVERSI, F. *et al.* Análise da renovação das águas do Sistema Estuarino de Santos usando modelagem computacional. **Ambiente e Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, [S.l.], v. 11, n. 3, p. 566, 2016.
- SALAS HERRERO, F.; TEIXEIRA, H.; POIKANE, S. A Novel Approach for Deriving Nutrient Criteria to Support Good Ecological Status: Application to Coastal and Transitional Waters and Indications for Use. **Frontiers in Marine Science**, [S.l.], v. 6. 2019. DOI: 10.3389/fmars.2019.00255.
- SANTA CATARINA. Regionalização de vazões das bacias hidrográficas estaduais do Estado de Santa Catarina. **Estudos dos instrumentos de gestão de recursos hídricos para o Estado de Santa Catarina e apoio para sua implementação**. Florianópolis: Governo do Estado de Santa Catarina, 2006.
- SANTORO, A.; RICCI, R.; ENRICH-PRAST, A. Lagoa Rodrigo de Freitas: Passado e presente. **Oecologia Australis**, [S.l.], v. 16, n. 3, p. 334-338, 2012.
- SEGAL, B. *et al.* **MAArE – Monitoramento Ambiental da Reserva Biológica Marinha do Arvoredo e Entorno**. Florianópolis: UFSC/MAArE, 2017. 134p.

- SILVA, D. V. *et al.* **Environmental Earth Sciences, Residence time patterns of Mirim Lagoon (Brazil) derived from two-dimensional hydrodynamic simulations.** [S.l.: s.n], 2019.
- SILVA, J. C. **Análise numérica da influência dos aportes fluviais e antrópicos sobre a hidrodinâmica residual e a qualidade da água da Lagoa da Conceição – Florianópolis – SC.** 2013. 152p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- SILVA, J. C. **Análise numérica da influência do Rio João Gualberto sobre a hidrodinâmica residual da Lagoa da Conceição – Florianópolis. SC.** 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.
- SILVA, V. E. C. **Análise espaço temporal do estado trófico de uma laguna costeira subtropical:** Lagoa da Conceição, Florianópolis, Santa Catarina. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.
- SILVA, V. E. C. *et al.* Space time evolution of the trophic state of a subtropical lagoon: Lagoa da Conceição, Florianópolis Island of Santa Catarina, Brazil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S.l.], v. 22, 2017.
- SILVEIRA, Rafael Brito; ALVES, Maikon Passos Amiltos; MURARA, Pedro. Estudo de caracterização da direção predominante dos ventos no litoral de Santa Catarina. *In:* 10º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CLIMATOLOGIA GEOGRÁFICA. 2014. **Anais [...]**. Curitiba: CoC-UGI, 2014.
- SIMMERS, I. A systematic problem-oriented approach to hydrological data regionalisation. **Journal of Hydrology**, [S.l.], v. 73, p. 71-87, 1984.
- SINGH, Ashwin; KUMAR, Manish. Depicting the seasonal and spatial sensitivity of anthropogenic nutrient enrichment on phytoplankton in the Bay of Bengal, India. **Marine Pollution Bulletin**, [S.l.], v. 169, p. 112554, 2021.
- SIQUEIRA, Marina Toneli; CHAVES, Larissa Siqueira; GONÇALVES, Ana Leticia Saquete. O desafio da participação popular no planejamento urbano brasileiro: o caso do Plano Diretor de Florianópolis **Revista Brasileira de Direito Urbanístico| RBDU**, [S.l.], p. 37-62, 2020.
- SMITH, S. V. *et al.* Estuarine Systems of the South American Region: carbon, nitrogen and phosphorus fluxes. Netherlands. **LOICZ Reports and Studies**, [S.l.], v. 15, 2000.
- SNIS – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Série Histórica**. 2015. Disponível em: <http://www.cidades.gov.br/serieHistorica>. Acesso em: 25 out. 2015.
- STERNER, Robert Warner; ELSER, James J. **Ecological stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere**. Princeton: Princeton University Press, 2002.
- STRICKLAND, J. D. H.; PARSON, T. **A practical handbook of seawater analysis**. 2th. (Bulletin, 122), Ottawa, Fisheries Research, Board of Can., 1972. p.172.
- TRANG, C. T. T. *et al.* Science of the Total Environment. **Assessment of the environmental carrying capacity of pollutants in Tam Giang-Cau Hai Lagoon (Viet Nam) and solutions for the environment protection of the lagoon**, [S.l.], v. 762, 2020.

- TRUCCOLO, Eliane Cristina *et al.* The low frequency sea level oscillations in the northern coast of Santa Catarina, Brazil. **Journal of Coastal Research**, [S.l.], Edição Especial, n. 39, p. 547-552, 2006.
- TRUCCOLO, Eliane Cristina; FRANCO, Davide. Characterization and Prediction of the meteorological tides at São Francisco do Sul, SC. *In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA*, Rio de Janeiro, p. 2.752-2.757, 2000. **Anais [...]**. Rio de Janeiro, 2000.
- TUNDISI, J. Água no século XXI: enfrentando a escassez. **Rima**, [S.l.], p. 248, 2003.
- UNICE, K. M. *et al.* **Science of the Total Environment, Characterizing export of land-based microplastics to the estuary – Part I: Application of integrated geospatial microplastic transport models to assess tire and road wear particles in the Seine watershed.** [S.l.: s.n], 2018.
- VOLLENWEIDER, R.; GIOVANARDI, F. Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters, with special reference to the NW Adriatic Sea: proposal for a trophic scale, turbidity and generalized water quality index. **Environmetrics**, [S.l.], v. 9, n. 3, p. 329-357, 1998.
- VOUNATSOU, P.; KARYDIS, M. Environmental characteristics in oligotrophic waters. Data evaluation and statistical limitations in water quality studies. **Environmental Monitoring and Assessment**, [S.l.], v. 18, p. 211-220, 1991.
- VREDE, Tobias *et al.* Fundamental connections among organism C: N: P stoichiometry, macromolecular composition, and growth. **Ecology**, [S.l.], v. 85, n. 5, p. 1.217-1.229, 2004.
- WALSTRA, D. J. R. *et al.* Verification and comparison of two hydrodynamic area models for an inlet system. **Coastal Dynamics**, [S.l.], v. 1, p. 433-442, 2001.
- WANG, D. *et al.* **Estuarine, Coastal and Shelf Science: Simultaneously assimilating multi-source observations into a three-dimensional suspended cohesive sediment transport model by the adjoint method in the Bohai Sea.** [S.l.: s.n], 2020.
- WANG, H. *et al.* **Estuaries and Coasts, a Modeling Study of the Impacts of Mississippi River Diversion and Sea-Level Rise on Water Quality of a Deltaic Estuary.** [S.l.: s.n], 2016.
- WARNER, John C.; GEYER, W. Rockwell; ARANGO, Hernan G. Using a composite grid approach in a complex coastal domain to estimate estuarine residence time. **Computers & Geosciences**, [S.l.], v. 36, n. 7, p. 921-935, 2010.
- WETZ, M. S. *et al.* Water quality dynamics in an urbanizing subtropical estuary (Oso Bay, Texas). **Marine Pollution Bulletin**, [S.l.], v. 104, n. 1-2, p. 44-53, 2016.
- WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines for safe recreational water environments: Coastal and fresh waters.** [S.l.]: WHO, 2003. v. 1.
- WITEK, B.; PLINSKI, M. The first recorded bloom of *Prorocentrum minimum* (Pavillard) Schiller in the coastal zone of the Gulf of Gdańsk. **Oceanologia**, [S.l.], v. 42, n. 1, p. 29-36, 2000.
- ZAINOL, Zuraini; AKHIR, Mohd Fadzil; ZAINOL, Zuraidah. Pollutant transport and residence time of a shallow and narrow coastal lagoon estimated using a numerical model. **Marine Pollution Bulletin**, [S.l.], v. 164, p. 112011, 2021.
- ZIMMERMAN, Joseph Theodoor Frans. Mixing and flushing of tidal embayments in the western Dutch Wadden Sea part I: Distribution of salinity and calculation of mixing time scales. **Netherlands Journal of Sea Research**, [S.l.], v. 10, n. 2, p. 149-191, 1976.