



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

PRISCILLA KERN

**ESTIMATIVA DE FLUXOS NA INTERFACE SEDIMENTO-ÁGUA EM  
DIFERENTES REGIÕES DE UMA LAGUNA SUBTROPICAL: LAGOA  
DA CONCEIÇÃO – FLORIANÓPOLIS/SC**

FLORIANÓPOLIS

2019

Priscilla Kern

**ESTIMATIVA DE FLUXOS NA INTERFACE SEDIMENTO-ÁGUA EM  
DIFERENTES REGIÕES DE UMA LAGUNA SUBTROPICAL:  
LAGOA DA CONCEIÇÃO – FLORIANÓPOLIS/SC**

Dissertação submetida ao Programa de pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de mestre em Engenharia Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Davide Franco

Florianópolis

2019

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

Kern, Priscilla

Estimativa de fluxos na interface sedimento-água em diferentes regiões de uma laguna subtropical : Lagoa da Conceição - Florianópolis/SC / Priscilla Kern ; orientador, Davide Franco, 2019.

153 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Ambiental. 2. Lagunas costeiras. 3. Descarga de água subterrânea. 4. Seepage meter. 5. Fluxo de nutrientes. I. Franco, Davide . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. III. Título.

Priscilla Kern

**Estimativa de fluxos na interface sedimento-água em diferentes regiões de uma laguna subtropical: Lagoa da conceição – Florianópolis/SC**

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

Prof. Nilson Guiguer Jr., Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Profa. Patricia Kazue Uda, Dra.

Universidade Federal de Santa Catarina

Profa. Alexandra Rodrigues Finotti, Dra.

Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em engenharia ambiental.

---

Profa. Dra. Maria Eliza Nagel Hassemer  
Coordenadora do Programa

---

Prof. Dr. Davide Franco  
Orientador

Florianópolis, 24 de outubro de 2019.

Este trabalho é dedicado aos meus colegas de laboratório e a minha mãe.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Davide Franco, pelo entusiasmo, horas de conversa e paciência. Pela orientação e a confiança depositada para buscar novas linhas conhecimento, no mundo das águas subterrâneas, na nossa querida Lagoa da Conceição.

Aos colegas do Laboratório de Hidráulica Marítima (LaHiMar), que sempre se dispuseram a trabalhar junto comigo. Sem vocês esta pesquisa não passaria de um plano. Vou sempre lembrar das nossas saídas de campo, das diversas dificuldades encontradas, e do sorriso e leveza, com os quais vocês me ajudaram a resolver todos os problemas que surgiram ao longo deste estudo. Um agradecimento especial ao Thiago, meu colega desde a graduação, que me apresentou ao LaHiMar, minha dupla nos trabalhos de campo e no desenvolvimento das metodologias.

À professora Patricia, pelos ensinamentos, disposição e pela determinação em sempre buscar o melhor de todos ao seu redor.

Aos membros da banca, Dr. Nilson Guiguer e Dra. Alexandra Finotti e Dra. Patricia UDA, pela disponibilidade e pelas contribuições na melhoria deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo apoio na bolsa de pesquisa.

À empresa Socioambiental, que nos apoia com equipamentos e logística de campo.

Ao Laboratório de Oceanografia Costeira (LOC), pela disponibilização de pessoal e equipamento para realizar as análises de granulometria.

À Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI), por disponibilizar os dados de nível e chuva, sempre que solicitados.

Ao professor Henry Xavier Corseuil, que me inspirou a entrar para o curso de Engenharia Ambiental, pelos grandes ensinamentos, incentivos e conversas ao longo da graduação. Obrigada por me apresentar à hidrogeologia e ao gerenciamento de áreas contaminadas.

Aos meus amigos do Colégio de Aplicação, vocês são a minha família. Muito obrigada por todo o carinho e suporte durante todos esses anos, vocês estiveram comigo nos momentos mais felizes, e nos não tão felizes assim, dessa trajetória.

À minha mãe, que me apoia e sonha comigo todos os meus sonhos. Muito obrigada por acreditar no meu potencial e me ajudar a abrir todos os caminhos pelos quais eu passei para chegar até aqui.

## RESUMO

O presente estudo, teve como objetivo estimar os fluxos de água subterrânea e de nutrientes na interface sedimento-água em diferentes regiões da Lagoa da Conceição. A Lagoa da Conceição é uma laguna costeira. Atualmente, mais da metade da população mundial habita a zona costeira. Grande parte desta ocupação é feita de forma desordenada e sem planejamento, resultando em impactos ambientais e na perda dos bens e serviços ecossistêmicos. Possuir conhecimento sobre o comportamento sazonal e espacial dos principais parâmetros hidrológicos e de nutrientes do corpo hídrico, é fundamental para a compreensão dos processos físicos e qualitativos, visando a proteção do sistema estuarino. Para tal, foram desenvolvidos equipamentos de baixo custo de quantificação de descargas de água subterrânea (DAS) de maneira direta, *seepage meter*, e, indireta, piezomanômetro. A laguna é dividida em dois subsistemas principais, o sul e o central. Em geral, os fluxos na interface sedimento-água do subsistema central fluem no sentido laguna-aquífero, com descargas médias entre -1,1 a -3,1 cm/dia. Ainda no subsistema central, está locada a seção de monitoramento na Av. das Rendeiras, que recebe a recarga artificial gerada por uma lagoa de evapo-infiltração (LEI), localizada próxima à seção. Esta é a única seção na laguna, cuja, a descarga média é positiva, de 2,5 cm/dia. No subsistema sul, as DAS médias variam de -14,7 cm/dia a -17,1 cm/dia. O fluxo de nutrientes gerado pela LEI, vai, principalmente, em direção as seções localizadas na Av. das Rendeiras e, em parte, para o subsistema Sul, para a seção presente na Osni Ortiga (OOR). Os fluxos de nutrientes refletem no potencial enriquecimento das águas e na, consequente, elevação das taxas de produção primária. As seções presentes na Av. das Rendeiras e na Osni Ortiga são onde ocorre a maior concentração de nutrientes no meio subterrâneo. Os valores máximos de nitrogênio inorgânico dissolvido encontrados foram de 74,0 ug/l e 213,6 ug/l, os valores para fósforo inorgânico dissolvido foram de 12,8 ug/l e 184,4 ug/l para o meio superficial, e, subterrâneo, respectivamente. A laguna apresenta pouca variabilidade espacial em relação ao índice de estado trófico TRIX. Os valores encontrados para a Lagoa da Conceição, variaram entre 3,0 a 5,7, com classificação do estado trófico entre do alto (oligotrófico) a moderado (mesotrófico a eutrófico). Indicando ambientes com a produtividade primária e concentração de nutrientes baixas até ambientes altamente produtivos e estado trófico alto, respectivamente. Existe a lacuna de dados medidos na laguna de 2007 a 2015, porém, em relação aos dados analisados em anos anteriores, é possível afirmar que a qualidade da água no corpo lagunar está melhorando.

**Palavras-chave:** Lagunas costeiras; Descarga de água subterrânea; *Seepage meter*; Piezomanômetros; Fluxo de nutrientes; TRIX.

## ABSTRACT

The present study aimed to estimate the groundwater and nutrient flows at the sediment-water interface in different regions of Lagoa da Conceição. Lagoa da Conceição is a coastal lagoon. Today, more than half of the world's population lives in the coastal zone. Most of this occupation is disorderly and unplanned, resulting in environmental impacts and loss of ecosystem riches and services. Having knowledge about the seasonal and spatial behavior of the main hydrological and nutrient parameters of the water body is fundamental for the understanding of the physical and qualitative processes, aiming at the protection of the estuarine system. To do that, low cost groundwater discharge (DAS) quantification equipment were developed, in direct manner, a seepage meter, and indirectly, a piezomanometer. The lagoon is divided into two main subsystems, the south and the central. In general, flows at the sediment-water interface of the central subsystem flow in the lagoon-aquifer direction, with average discharges ranging from -1.1 to -3.1 cm/day. Still in the central subsystem, the monitoring section is located at Das Rendeiras Avenue, which receives artificial recharge generated by an evapo-infiltration pond (LEI), located near the section. This is the only section in the lagoon whose average discharge is positive at 2.5 cm/day. In the southern subsystem, mean DAS ranges from -14.7 cm/day to -17.1 cm/day. The nutrient flow generated by the LEI goes mainly towards the sections located at Das Rendeiras Avenue, and partly to the Southern subsystem, to the section present at Osni Ortiga (OOR). Nutrient flows reflect the potential enrichment of the waters and the consequent increase in primary production rates. The sections present at Das Rendeiras Avenue and Osni Ortiga are where the highest concentration of nutrients occurs in the underground environment. The maximum dissolved inorganic nitrogen values found were 74.0 µg/l and 213.6 µg/l, the values for dissolved inorganic phosphorus were 12.8 µg/l and 184.4 µg/l for the surface medium, and, underground respectively. The lagoon presents little spatial variability in relation to the trophic state index (TRIX). The values found for Lagoa da Conceição ranged from 3.0 to 5.7, with the trophic state classification from high (oligotrophic) to moderate (mesotrophic to eutrophic). Indicating environments with low primary productivity and nutrient concentration to highly productive environments and high trophic state, respectively. There is a gap of data measured in the lagoon from 2007 to 2015, but compared to data analyzed in previous years, it is possible to state that the water quality in the lagoon body is improving.

**Keywords:** Coastal lagoons; Groundwater discharge; Seepage meter; Piezomanometers; Nutrient flow; TRIX.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma de desenvolvimento da pesquisa .....	24
Figura 2 - Esquema representativo do escoamento na bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição. ....	27
Figura 3 - Classificação de ambientes lacustres em seis classes principais baseadas em tipos e influências relativas ao movimento das águas superficiais e subterrâneas .....	30
Figura 4 - Seção transversal da instalação típica do <i>seepage meter</i> .....	32
Figura 5 - Esquema do funcionamento de um piezomanômetro.....	34
Figura 6 - Diferença entre a precipitação acumulada mensal da climatologia e dos anos estudados. ....	46
Figura 7 – Mapa das unidades hidrogeológicas da área de estudo.....	48
Figura 8 – Tipos de solo da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição .....	49
Figura 9 - Topobatimetria da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição .....	51
Figura 10 - Divisão da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição em URHs.....	52
Figura 11 - Mancha urbana para bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição para o ano de 2010. ....	54
Figura 12 - Esquema de funcionamento do <i>seepage meter</i> e convenção dos sentidos do fluxo.....	57
Figura 13 - Materiais utilizados na confecção dos <i>seepage meter</i> .....	59
Figura 14 - Componentes do sistema de calibração para <i>seepage meter</i> .....	60
Figura 15 - Dimensões da base difusora do tanque de fluxo, acoplamentos de PVC para sustentação e o sistema de distribuição de água. ....	61
Figura 16 - Base difusora encaixada no fundo do tanque de fluxo, com massa para calafetação e fita “silvertape” para selar a borda.....	61
Figura 17 - Dimensões itens componentes do sistema de calibração.....	63
Figura 18 - Posicionamento dos <i>seepage meters</i> no tanque de calibração. À esquerda planta do posicionamento dos tambores em relação ao sistema de distribuição de água e à direita tambores já instalados no tanque. ....	63
Figura 19 - Fotos do projeto tanque de calibração executado.....	64
Figura 20 - Regressão linear entre a soma dos pulsos emitidos pelo sensor de fluxo e o volume medido em um minuto.....	67

Figura 21 - Gráfico <i>scatterplot</i> do fluxo conhecido no tanque (cm/dia) em relação ao fluxo medido nos <i>seepage meters</i> (cm/dia).....	69
Figura 22 – Eficiência: razão entre as taxas de descargas medidas nos <i>seepages</i> e o fluxo conhecido no tanque controlado.....	71
Figura 23 - Fluxograma da quantificação e avaliação dos aportes de águas subterrâneas na Lagoa da Conceição .....	74
Figura 24 - Localização da área de estudo, tipo de solo e estações de monitoramento.....	75
Figura 25 - <i>Core sampler</i> e amostras de sedimento coletadas.....	76
Figura 26 - Esquema da disposição dos <i>seepage</i> em cada seção.....	78
Figura 27 - Esquema do funcionamento do piezomanômetro .....	79
Figura 28 - Materiais utilizados na confecção do mini piezômetro.....	79
Figura 29 - Esquema de instalação do mini piezômetro .....	80
Figura 30 - Precipitação acumulada 24 hrs e data das coletas.....	83
Figura 31 - Nivel relativo interno e externo da laguna .....	85
Figura 32 – Dendograma de agrupamento das seções monitoradas: Método Ligação completa (Distância Euclidiana) .....	87
Figura 33 - <i>Box-plot</i> das DAS agrupadas por seção.....	88
Figura 34 - Mapa de localização e sentido do fluxo das DAS em de cada seção.....	89
Figura 35 - Valores DAS (cm/d) discriminados por medidores .....	90
Figura 36 - DAS nas seções do corpo central da laguna .....	92
Figura 37 - DASm discriminadas pelas seções componentes do grupo laguna central .....	93
Figura 38 - Perfil topobatimétrico da seção PDA.....	93
Figura 39 - Variação das descargas na seção PDA ao longo das coletas.....	94
Figura 40 - Perfil topobatimétrico da seção CDC.....	95
Figura 41 - Variação das descargas na seção CDC ao longo das coletas.....	96
Figura 42 - Perfil topobatimétrico da seção CRV.....	96
Figura 43 - Variação das descargas na seção CRV ao longo das coletas.....	97
Figura 44 - Perfil topobatimétrico da seção REN. Localização da LEI e configuração do transecto dos <i>seepage meters</i> .....	99
Figura 45 - Perfil topobatimétrico da sub-bacia do ponto RDU.....	100
Figura 46 - Variação das descargas na seção REN ao longo das coletas.....	101

Figura 47 - Variação das descargas na localidade REN em relação as DASm da Laguna Central ao longo das coletas. ....	102
Figura 48 - Velocidades medidas no modelo de Santos (2018) através de um ponto de inspeção na Av. Rendeiras. ....	103
Figura 49 - Perfil topobatimétrico da seção LIC.....	104
Figura 50 - Variação das descargas na seção LIC ao longo das coletas. ....	105
Figura 51 - Perfil topobatimétrico da seção OOR.....	106
Figura 52 - Fluxograma metodológico aplicado para a determinação da qualidade de água no corpo lagunar. ....	111
Figura 53 - Variação da temperatura (°C) nas águas superficiais e subterrâneas na laguna. ....	115
Figura 54 – Variação da salinidade (psu) nas águas superficiais e subterrâneas da laguna. ....	117
Figura 55 – Variação do pH nas águas superficiais e subterrâneas da laguna. ....	119
Figura 56 - Variação do oxigênio dissolvido nas águas superficiais e subterrâneas da laguna. ....	120
Figura 57 - Variação do NID nas águas superficiais e subterrâneas da laguna.....	123
Figura 58 - Variação do PID nas águas superficiais e subterrâneas da laguna. ....	124
Figura 59 - Variação da clorofila-a nas águas superficiais da laguna.....	125
Figura 60 - Variação espacial do índice de estado trófico por localidade na Lagoa da Conceição. ....	127
Figura 61 - Evolução temporal dos valores de TRIX para a Lagoa da Conceição no período de 2001 a 2019. ....	128
Figura 62 - Precipitação mensal acumulada para o período de 2000 a 2019. ....	129
Figura 63 - PIDxNID no meio superficial e subterrâneo. ....	131
Figura 64 -Esquema geral do circuito da bomba à esquerda. Componentes do sistema à direita. Transistor, TIP 122 (direita superior) e potenciômetro (direita inferior) ambos com a identificação dos terminais para a conexão externa. Esquerda: Foto da bomba RSP385 e o circuito utilizado no experimento .....	146
Figura 65 - Diagrama do projeto do Arduino em conjunto com um sensor de fluxo de efeito hall e um leitor LCD.....	148

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Valores do TRIX e classificação do nível trófico. ....	42
---	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de DAS em estudos anteriores .....	30
Tabela 2: Fatores de correção reportados para ajustar as taxas de fluxo do <i>seepage meter</i> às taxas reais. ....	33
Tabela 3 - Limites para diferentes níveis de estado trófico, segundo o sistema de classificação proposto pela OECD (1982) .....	39
Tabela 4 - Limites para classes de estado trófico baseados em Salas e Martino (2001) .....	39
Tabela 5 - Índices tróficos calculados pela relação de nitrogênio e fósforo. ....	40
Tabela 6 - Climatologia de Florianópolis - Comparação entre o período de 1961 a 1999 com os anos 2017 e 2018 .....	46
Tabela 7 - Nome e coordenadas das seções amostradas e caracterização da sub-bacia a montante à seção: área total, área urbanizada e população. ....	54
Tabela 8 - Propriedades Hidráulicas da Manta Geotêxtil RT 07 .....	62
Tabela 9 - Modelo de regressão linear para as duas calibrações do sensor de fluxo. 67	
Tabela 10 - Valores do número de amostras (n) para os três modelos construídos (Todos, SP1 e SP3 e, SP2), eficiência do tambor dada pela inclinação da reta (B), desvio padrão de B ( $\sigma$ ), <i>p-level</i> , limites de confiança de B, coeficiente de correlação (R), coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o Fator de Correção (FC) mais ou menos o intervalo de confiança. ....	70
Tabela 11 - Ensaio granulométricos e estimativas de condutividade hidráulica. ....	83
Tabela 12 - Data da realização das coletas, nível relativo da laguna e precipitação acumulada em diferentes períodos. ....	84
Tabela 13 - Relação das coletas realizadas em cada campanha, data, seções monitoradas e nível relativo da laguna. ....	85
Tabela 14 - Tempo médio de permanência dos medidores nos <i>seepages</i> em cada seção. ....	86
Tabela 15 - Resultados encontrados para descarga (q) obtida a partir do desnível dos piezomanômetro (dl) calculada a partir da granulometria (K) determinada por, Kozeny-Carman e Hazen, e uma comparação com a descarga obtida através da medida direta dos <i>seepage</i> . 108	

Tabela 16 - Relação das coletas realizadas em cada campanha, data, seções.....	112
Tabela 17 - Estatísticas descritivas das variáveis físicas, físico-químicas, compostos nitrogenados inorgânicos, fósforo inorgânico (PID), clorofila-a medidos <i>in situ</i> e em laboratório e das variáveis calculadas, NID (nitrogênio inorgânico dissolvido), razão N:P e TRIX. ....	113
Tabela 18 - Definição do índice trófico proposto; limites inferior e superior, e faixa dentro da qual o índice trófico é definido.....	126
A Tabela 19 apresenta a classificação trófica utilizando outros índices baseados em apenas dois parâmetros ou parâmetros singulares. Fica claro, portanto, que esses índices não foram suficientemente sensíveis para distinguir a diferença de trófia ao menos entre as diferentes regiões de lagunas e seus canais. ....	129
Tabela 20 - Classificação do estado trófico da Lagoa da Conceição segundo distintas metodologias.....	129

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Asub	Águas Subterrâneas
Asup	Águas Superficiais
CASAN	Companhia Catarinense de Águas e Saneamento
CDC	Costa da Cachoeira (seção)
CIRAM	Centro de Informações de Recursos Ambientais de Santa Catarina
CRV	Costa Rio Vermelho (seção)
DAS	Descargas de Águas Subterrâneas
DASm	Descargas de Águas Subterrâneas média
DN	Diâmetro Nominal
EPAGRI	Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural
GPS	Global Positioning System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPUF	Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis
LAHIMAR	Laboratório de Hidráulica Marítima (UFSC)
LEI	Lagoa de Evapoinfiltração
LIC	Lagoa Iate Clube (seção)
LOC	Laboratório de Oceanografia Costeira (UFSC)
NA	Nível d'Água
NaN	<i>Not Available Number</i>
OOR	Osni Ortiga (seção)
PDA	Ponta das Almas (seção)
PVC	Policloreto de Vinila
RDU	Rendeiras Dunas (seção)
REN	Rendeiras (seção)
RMA	Rendeiras Mar (seção)
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
URH	Unidade de Resposta Hidrológica
UTM	Universal Transversa de Mercator
SBH	Sub-bacia Hidrográfica
SGD	Submarine Groundwater Discharge
SP	<i>Seepage meter</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Phi_{SP}$	Fluxo <i>seepage</i>
$\Phi_R$	Fluxo real
$\Phi_P$	Fluxo precipitação
$K$	Condutividade Hidráulica
$K_H$	Condutividade Hidráulica estimada por Hazen
$K_K$	Condutividade Hidráulica estimada por Kozeny-Carman
$i$	Gradiente Hidráulico

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>21</b>
1.1	OBJETIVOS .....	23
1.1.1	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>23</b>
1.1.2	<b>Objetivos específicos .....</b>	<b>23</b>
1.2	ESTRUTURA GERAL DA PESQUISA.....	23
<b>2</b>	<b>DESCARGAS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM LAGUNAS COSTEIRAS.</b>	<b>25</b>
2.1	CICLO HIDROLÓGICO LOCAL .....	26
2.1.1	<b>Fluxo Subterrâneo .....</b>	<b>27</b>
2.1.2	<b>Interações das águas superficiais e subterrâneas em ambientes lacustres .....</b>	<b>29</b>
2.2	MÉTODOS DE QUANTIFICAÇÃO DE DAS.....	30
2.2.1	<i>Seepage meter</i> .....	31
2.2.2	<b>Piezomanômetro.....</b>	<b>33</b>
2.3	QUALIDADE DAS ÁGUAS .....	35
2.3.1	<b>Enquadramento dos corpos d'água.....</b>	<b>36</b>
2.3.2	<b>Variáveis indicadoras da qualidade da água.....</b>	<b>36</b>
•	<b>Parâmetros físicos .....</b>	<b>36</b>
•	<b>Parâmetros físico-químicos .....</b>	<b>36</b>
•	<b>Parâmetros biológicos.....</b>	<b>38</b>
2.3.3	<b>Metodologias de classificação dos graus de trofia .....</b>	<b>38</b>
•	<b>TRIX .....</b>	<b>41</b>
<b>3</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>45</b>
3.1	CLIMATOLOGIA REGIONAL .....	45
3.2	GEOLOGIA HIDROGEOLOGIA .....	47
3.3	PEDOLOGIA.....	49
3.4	TOPOBATIMETRIA .....	50
3.5	HIDROGRAFIA E UNIDADES DE RESPOSTA HIDROLÓGICA (URHs) .....	51

3.6	NÍVEL DA LAGUNA .....	53
3.7	OCUPAÇÃO URBANA .....	53
<b>4</b>	<b>EXPERIMENTO DE CALIBRAÇÃO DO <i>SEEPAGE METER</i>.....</b>	<b>57</b>
4.1	DESCRIÇÃO DO SISTEMA EXPERIMENTAL .....	58
4.1.1	<i>Seepage meter</i> .....	58
4.1.2	Tanque de fluxo controlado.....	60
4.1.3	Sistema hidráulico .....	64
4.2	RESULTADOS DO EXPERIMENTO DE CALIBRAÇÃO.....	66
4.2.1	Calibração do sensor de fluxo .....	66
4.2.2	Determinação do fator de correção .....	68
<b>5</b>	<b>AS INTERAÇÕES ENTRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E SUPERFICIAIS NA LAGOA DA CONCEIÇÃO .....</b>	<b>73</b>
5.1	LEVANTAMENTO DE DADOS EM CAMPO.....	74
5.1.1	Localização das seções amostrais.....	74
5.1.2	Estimativa de condutividade hidráulica.....	76
5.1.3	<i>Seepage meter</i> .....	77
5.1.4	Piezomanômetros.....	78
5.1.5	Monitoramento do nível na laguna.....	81
5.2	RESULTADOS DA INTERAÇÕES ENTRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E SUPERFICIAIS.....	82
5.2.1	Condutividade hidráulica .....	82
5.2.2	Regime pluviométrico e do nível da laguna durante as coletas.....	83
5.2.3	Regime de descarga das águas subterrâneas na Lagoa da Conceição.....	85
•	Laguna Central.....	90
•	PDA.....	93
•	CDC .....	94
•	CRV .....	96
•	REN.....	98

•	LIC .....	103
•	OOR .....	106
5.2.4	O uso do método <i>seepage meter</i> e piezomanômetro .....	106
•	Utilização do piezomanômetro .....	108
•	Utilização dos <i>seepage meters</i> .....	110
6	<b>ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E SUBTERRÂNEA DA LAGOA DA CONCEIÇÃO .....</b>	<b>111</b>
6.1	LEVANTAMENTO DE DADOS EM CAMPO E ANÁLISE EM LABORATÓRIO 111	
6.2	RESULTADOS ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E SUBTERRÂNEA.....	112
6.2.1	<b>Caracterização Física .....</b>	<b>113</b>
•	Temperatura .....	114
6.2.2	<b>Caracterização físico-química .....</b>	<b>116</b>
•	Salinidade.....	116
•	pH.....	117
•	Oxigênio dissolvido (OD).....	119
•	Nitrogênio inorgânico dissolvido (NID).....	121
•	Fósforo inorgânico dissolvido (PID) .....	123
6.2.3	<b>Caracterização Biológica.....</b>	<b>125</b>
6.2.4	<b>TRIX .....</b>	<b>125</b>
•	Comparativo com outros índices tróficos .....	129
6.3	ANÁLISE INTEGRADA DAS DESCARGAS SUBTERRÂNEAS E DA QUALIDADE DA ÁGUA DA LAGOA DA CONCEIÇÃO.....	130
7	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>133</b>
7.1.1	<b>Recomendações .....</b>	<b>135</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>136</b>
	<b>APÊNDICE A – CIRCUITO DAS BOMBAS.....</b>	<b>146</b>

**APÊNDICE B – PROJETO *DATALOGGER* ARDUINO MEDIDOR DE VAZÃO**  
..... 147



## 1 INTRODUÇÃO

A zona costeira ocupa apenas 13% da superfície da Terra, porém, sustenta 30% da produção primária e 80% da produção pesqueira global (CROSSLAND *et al.*, 2005; MALONE *et al.*, 2016). Na América do Sul, cerca de 12,2% da extensão da costa se apresenta sob forma lagunar, o que representa 10,3% da extensão mundial ocupada por lagoas costeiras (CROMWELL, 1971). Mais da metade da população mundial habita esta região, porém, grande parte da ocupação é feita de forma desordenada e sem planejamento, resultando em impactos ambientais e na perda dos bens e serviços ecossistêmicos (HINRICHSSEN, 1998; PATERSON *et al.*, 2011).

Laguna costeira é um sistema marinho raso, geralmente orientado paralelamente à costa, separado do oceano por uma barreira e interligada, pelo menos intermitentemente, ao oceano por um ou mais canais (KJERFVE, B 1994; MIRANDA *et al.*, 2002;).

A Lagoa da Conceição, classificada como uma laguna costeira, está localizada em uma ilha costeira, próxima a um mosaico de ecossistemas, como estuários, lagoas, manguezais e praias arenosas. É conhecida por ser uma das maiores atrações turísticas e de lazer da Ilha de Santa Catarina (recreação infanto-juvenil, esportes, cultura, turismo, comércio, gastronomia). Por estas razões, ela é considerada o ambiente de maior potencial natural, turístico e econômico da Ilha de Santa Catarina. Segundo a Prefeitura Municipal de Florianópolis (PMF, 2019), a laguna concentra mais de 50% de todas as estruturas náuticas presentes na cidade, como rampas de acesso, trapiches e plataformas de embarque/desembarque e pontos de acesso tradicionais em praias.

Possuir o conhecimento sobre o comportamento sazonal e espacial dos principais parâmetros hidrológicos e dos nutrientes da Lagoa da Conceição é fundamental para compreensão dos processos físicos e qualitativos, visando à proteção do sistema estuarino. A área possui diversos estudos realizados por distintos autores (ANDRADE, 2001; BIER, 2013; SILVA, 2002; ROCHA, 2007; GODOY, 2009; ODRESKI, 2012; SILVA, 2013; SILVA, 2017). Odebrecht e Caruso Gomes Jr. (1999) afirmam que, a presença de águas menos salgadas na parte profunda da laguna indica que pode ocorrer infiltração significativa pelo subsolo, não devendo ser desprezado na quantificação da taxa de renovação da Lagoa.

Estudos em lagunas costeiras mostram que aportes subterrâneos respondem por significativa parcela do abastecimento lacustre e costeiro e, também, em seus ciclos

biogeoquímicos (Burnett *et al.*, 2006; Leote; Ibánhez; Rocha, 2008; Liefer *et al.*, 2014; Martin *et al.*, 2007; Rocha, 2014). Na região sul do estado do Rio Grande do Sul (RS), na Lagoa Mangueira (Andrade, 2012; Attisano, 2008), Lagoa dos Patos (Niencheski, 2007) e Lagoa Mirim (Santos, 2008) estudos apontam que as divergências nos valores de balanço hidrológico de tais lagoas resultam de taxas positivas de descarga subterrânea.

O estudo das interações entre águas subterrâneas e superficiais (Asub-Asup) tem como objetivo quantificar balanços hídricos e avaliar possíveis efeitos das atividades humanas em rios, lagos, lagunas e oceanos. Um dos aspectos importantes dos estudos é o desenvolvimento de metodologias de baixo custo para identificação e quantificação dos fluxos de água entre estes compartimentos. Uma das metodologias para detecção da ocorrência das descargas de águas subterrâneas (DAS) é o uso do *seepage meter*, descrito por Lee (1977). Este método de avaliação das descargas foi empregado em diversos trabalhos (e.g. Asbury, 1990; Leote *et al.*, 2008; Murdoch & Kelly, 2003; Rocha, 2014; Rosenberry, 2008), por sua facilidade de aplicação, resposta rápida, precisão e baixos custos envolvidos. O piezomanômetro, outra metodologia, desenvolvida primeiramente por Winter *et al.* (1988), é utilizado para identificar o sentido de fluxos entre as águas subterrâneas e superficiais em corpos hídricos. Diferente dos *seepages*, os piezomanômetros não realizam medidas diretas da descarga subterrânea. Para tal, deve ser realizada a estimativa da condutividade hidráulica no local.

Estes fluxos de água subterrânea, oriundos do continente ou da água do mar recirculada, interagem com o solo e formações geológicas, reagindo com elementos presentes nos sedimentos, solubilizando-os e terminando por incorporá-los em sua composição. Essas reações podem aumentar substancialmente as concentrações de diversos elementos nas águas subterrâneas, tornando-as muito mais enriquecidas quando comparadas às águas superficiais (CABLE *ET AL.*, 1996; WINDOM *et al.*, 2006; KROEGER *ET AL.*, 2007; SANTOS *et al.*, 2008A,B; ANDRADE, 2010). Dessa maneira, as DAS, mesmo com um fluxo reduzido, quando comparado às importantes descargas superficiais, podem ser uma fonte significativa de constituintes, do ponto de vista biogeoquímico, para a zona costeira (VALIELA *et al.*, 1990; DULAIIOVA *et al.*, 2006).

Nas últimas décadas, estudos têm mostrado alterações das características hidroquímicas e biológicas na Lagoa da Conceição (FONSECA, 2006; SILVA, 2016). A fim de investigar a importância dos aportes subterrâneos e a influência antrópica nos teores de nutrientes nas águas superficiais da laguna, a metodologia ora descrita propõe um método alternativo para estimativas destes fluxos. Está inserida em um plano de trabalho que visa

apresentar modelos de fluxo e transporte da água subterrânea na Lagoa da Conceição, assim como a avaliação da concentração de nutrientes destes aportes e a qualidade da água da laguna. O que consiste em um trabalho inédito no local, dando continuidade à linha de pesquisa desenvolvida pelo Laboratório de Hidráulica Marítima (LaHiMar), que investiga os fenômenos físicos e biogeoquímicos da Lagoa da Conceição.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Estimar fluxos na interface sedimento-água em diferentes regiões da Lagoa da Conceição – Florianópolis/SC.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Desenvolver e calibrar equipamentos de baixo custo para a quantificação de fluxo de água subterrânea: *seepages* e piezomanômetros;
- Quantificar os aportes de água subterrânea no corpo lagunar através dos dois métodos;
- Determinar a qualidade da água subterrânea e superficial da Lagoa da Conceição através da análise dos parâmetros: temperatura, salinidade, pH, oxigênio dissolvido, fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), amônio ( $\text{NH}_4^+$ ), nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) e clorofila-*a* e do índice trófico, TRIX.

## 1.2 ESTRUTURA GERAL DA PESQUISA

A Figura 1 exhibe a estrutura geral desta pesquisa, o fluxograma do desenvolvimento deste estudo, apresenta os passos metodológicos realizados neste trabalho.

Primeiramente, foi realizada a revisão bibliográfica sobre descargas de águas subterrâneas (DAS) em lagunas costeiras. Aqui são apresentados conceitos e estudos referentes a ciclo hidrológico local, métodos de quantificação de DAS e qualidade da água.

A caracterização da área em estudo, inicia-se com uma descrição de sua localização, clima, geologia, pedologia, relevo e batimetria, nível da laguna, bem como aspectos referentes à hidrografia da área. Como, definição das sub-bacias hidrográficas, ocupação urbana e unidades de resposta.

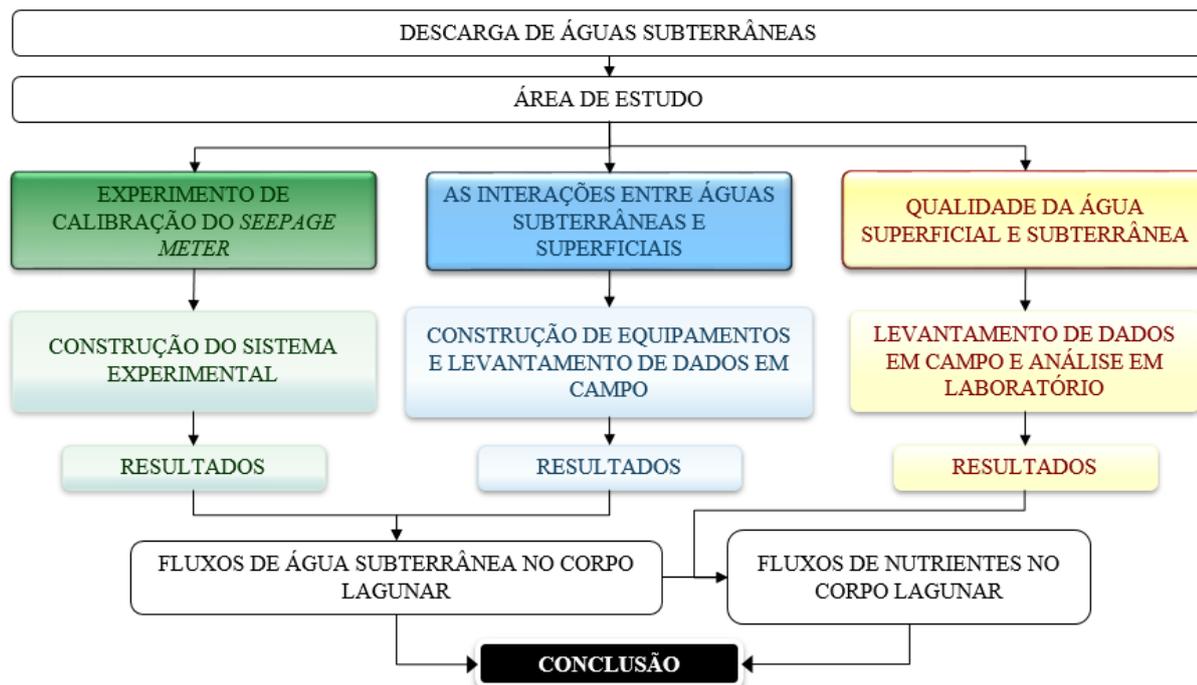
As interações entre águas subterrâneas e superficiais foram avaliadas através dos *seepage meters* e piezomanômetros, equipamentos de baixo custo construídos nesta pesquisa, utilizados para medir o fluxo de água através da interface sedimento-água.

O experimento de calibração foi executado, pois, o valor do fluxo medido pelo *seepage* ( $\phi_{SP}$ ) é menor que o fluxo real ( $\phi_R$ ), devido às perdas de carga através dos componentes do instrumento. Assim, as medições realizadas com os *seepage meter* em campo, foram multiplicadas por um fator de correção (FC), estimado através da construção do sistema experimental em laboratório.

Através dos dados levantados em campo, corrigidos pelo fator de correção, foi possível avaliar os fluxos de água subterrânea no corpo lagunar.

A determinação da qualidade da água superficial e subterrânea do corpo lagunar, foi realizada através de dados levantados em campo e análises em laboratório. Em posse dos resultados de caracterização físico, físico-química e biológica do meio, e, dos fluxos de água subterrânea, foi possível determinar os fluxos de nutrientes no corpo lagunar.

Figura 1 - Fluxograma de desenvolvimento da pesquisa



## 2 DESCARGAS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM LAGUNAS COSTEIRAS

A descarga de águas subterrâneas (DAS, em inglês *Submarine Groundwater Discharge* - SGD) foi, por muitos anos, negligenciada cientificamente pela dificuldade de avaliação e da percepção de que este processo não era importante (BURNETT *et al.* 2003). Valiela & D'Elia (1990) publicaram que naquele momento estaríamos numa fase exploratória deste campo, estágio que pode se estender até hoje, especialmente no que diz respeito à interação da DAS com lagoas costeiras, justificado pelos poucos estudos efetuados nestes corpos hídricos. Entretanto, o processo, contextualizado no balanço hidrológico conforme Figura 2, já vem sendo reconhecido, inclusive no sul do Brasil, podendo-se citar Niencheski *et al.* (2007) e Andrade (2010), que evidenciaram a significativa contribuição da DAS pelo fluxo de nutrientes associados a Lagoa dos Patos e a Lagoa Mangueira, respectivamente, sendo a DAS, um dos pilares de sustentação da produção primária da zona costeira marinha contigua a essas lagoas. (ROCHA, C. M. 2014)

- Estuários

Estuário é um corpo de água costeiro semifechado, com ligação livre com o oceano, no interior do qual a água do mar é diluída pela água doce oriunda da drenagem continental (CAMERON & PRITCHARD, 1963).

Os processos de mistura e a estratificação de salinidade no estuário dependem de sua geometria (limitando a dimensão desses corpos de água), da descarga de água doce, das variações do nível oceânico, da circulação e das massas d'água da região oceânica adjacente e do vento que atuam remota ou diretamente sobre a sua superfície livre (PRITCHARD, 1967).

O efeito da descarga fluvial, constantemente adicionada pelas descargas superficiais, além de gerar um componente da circulação estuarina, que, naturalmente se desloca para fora do estuário, estuário abaixo, ao diluir a água do mar, produz diferenças de densidade ao longo do estuário. Isto gera movimentos estuário acima, forçados pelo gradiente de pressão. Os movimentos com sentido do rio para o mar e com sentido oposto são denominados estuário abaixo (ou vazante) e estuário acima (ou enchente), respectivamente. A interação das várias propriedades e processos – descarga (ou vazão) do rio, correntes de maré, gradiente de pressão, advecção difusão turbulenta – produz, dentro da delimitação geomorfológica da bacia estuarina, a distribuição de salinidade que é característica de cada estuário (OFFICER, 1983).

- Lagunas costeiras

Miranda *et al.* (2002) propõem a seguinte definição: “Laguna costeira é um sistema marinho raso, geralmente orientado paralelamente à costa, separado do oceano por uma barreira e interligada, pelo menos intermitentemente, ao oceano por um ou mais canais”.

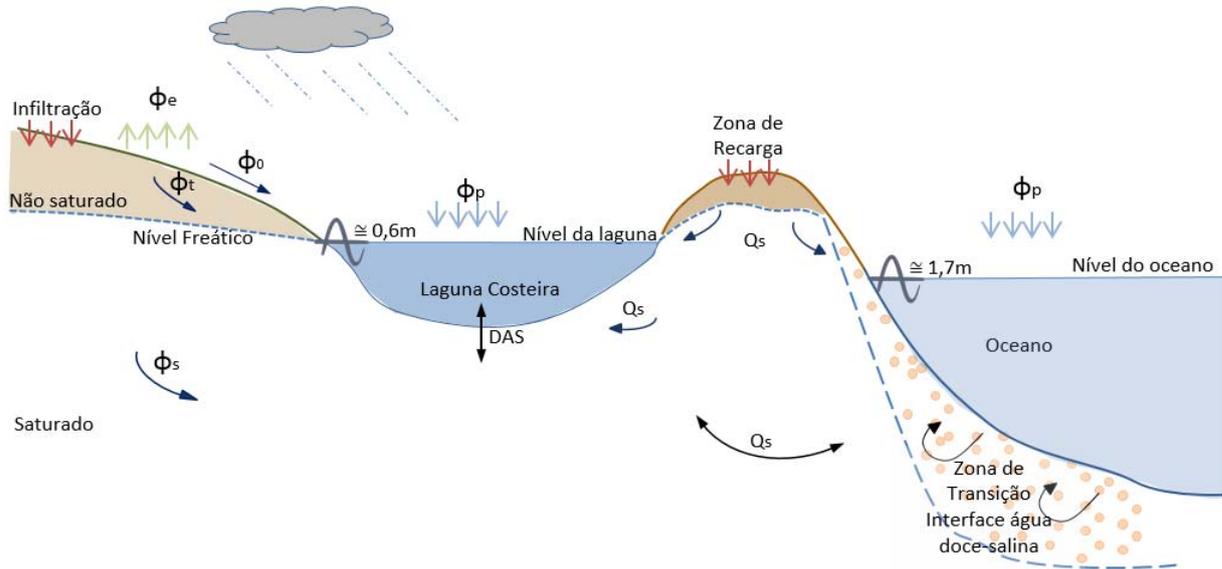
Ainda segundo Miranda *et al.* (2002), as lagunas costeiras podem ser classificadas de acordo com a quantidade de troca de água com o oceano e com a intensidade da ação do nível oceânico no seu interior, que estão dinamicamente relacionadas com as condições dos canais e aberturas para o oceano. A Lagoa da Conceição é uma laguna sufocada, pois caracteriza-se como um ambiente costeiro formado por células elípticas, conectado ao mar por somente um canal estreito que funciona como um filtro, atenuando as oscilações oceânicas dentro da laguna.

As lagunas costeiras podem ser, também, classificadas de acordo com a sua coloração. Segundo Esteves (1998), as lagunas costeiras podem ser agrupadas em: lagunas de águas claras e lagunas de águas escuras. As águas das lagunas costeiras de águas claras originam-se na maioria dos casos de rios e/ou oceanos. Em muitos casos, as águas claras tem origem de rios que percorrem terrenos que fornecem poucos componentes solúveis para as águas que os drenam (ESTEVES *et al.* 1984). A Lagoa da Conceição é uma laguna de água clara.

## 2.1 CICLO HIDROLÓGICO LOCAL

Os cursos de água (descargas fluviais) presentes na bacia da Lagoa da Conceição representam uma área de captação natural das águas provenientes da precipitação, que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, a laguna. Outra parcela de contribuição importante são os fluxos de águas subterrâneas, a Figura 2, apresenta o ciclo hidrológico na bacia da laguna, as áreas de recarga onde a precipitação infiltra e a jusante áreas em que parte deste volume retorna a superfície.

Figura 2 - Esquema representativo do escoamento na bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição.



O escoamento ocorre por áreas de saturação onde existem áreas de recarga, em que a precipitação infiltra e, a jusante, áreas em que parte deste volume retorna a superfície. Onde:  $\phi_0$  = Descarga fluvial,  $\phi_s$  = Fluxo Subterrâneo,  $\phi_p$  = Fluxo de precipitação,  $\phi_t$  = Fluxo da chuva que infiltra e não retorna a superfície e  $\phi_e$  = Fluxo de evapotranspiração. As amplitudes de níveis na lagoa e no oceano foram calculadas por Bier (2017).

A parte infiltrada no solo pode percolar profundamente e recarregar os lençóis subterrâneos, depois emergir em nascentes ou aflorando nos cursos d'água. A água infiltrada pode auxiliar a formação do escoamento subterrâneo, que compõe juntamente com os escoamentos superficiais e subsuperficiais, a vazão fluvial, que escorre em direção ao mar ou evapora de volta à atmosfera à medida que o ciclo continua (CHOW *et al.*, 1988). O fluxo de água subterrânea em aquíferos costeiros normalmente ocorre das áreas de recarga do interior, onde a carga hidráulica possui maior potencial para as áreas de descarga costeira, onde os níveis de água subterrânea são mais baixos e possuem menores potenciais hidráulicos (BARLOW, 2003).

### 2.1.1 Fluxo Subterrâneo

O movimento das águas subterrâneas se dá através da diferença de cargas hidráulicas, fluindo do ponto com maior carga hidráulica para o ponto com menor carga hidráulica.

A carga hidráulica representa o nível de energia que o fluxo subterrâneo apresenta, composta pelas componentes energia cinética, energia potencial gravitacional e energia de

pressão. No caso de água subterrâneas, as velocidades são muito pequenas, podendo-se desprezar o termo da energia cinética. Sendo assim, a carga hidráulica é a soma de duas parcelas: a carga de elevação (altitude ou cota do ponto) e a carga de pressão hidrostática. Em aquíferos não confinados, onde a pressão hidráulica da superfície é igual a pressão atmosférica, a carga hidráulica efetiva se equivale ao nível lençol freático. A medição da carga hidráulica em aquíferos livres se dá pela medição do nível da superfície piezométrica em poços ou piezômetros (HEATH, 1983). O gradiente hidráulico é a diferença de cargas hidráulicas entre dois pontos, dividido pela distância entre eles (HEATH, 1983).

O fluxo de água em um aquífero é governado por princípios hidráulicos estabelecidos. Em meios porosos saturados, a equação que governa o fluxo de um fluido é conhecida como Equação de Darcy (1856) (FETTER, 2000).

Segundo Fetter (2000), Darcy (1856) verificou que a vazão específica por unidade de área ( $q$ ), através de um meio poroso é proporcional à diferença de carga de água existente entre dois pontos ( $dh$ ) e inversamente proporcional à distância entre estes dois pontos ( $dl$ ). Darcy (1856) também determinou que essa quantidade de fluxo é proporcional a condutividade hidráulica ( $K$ ), de acordo com a Equação 1:

$$q \left[ \frac{m^3}{m^2s} \right] = -K \left[ \frac{m}{s} \right] \frac{dh [m]}{dl [m]} \quad (1)$$

A condutividade hidráulica ( $K$ ) é a capacidade do meio poroso em transmitir o fluido, ou seja, representa a facilidade com que a água se desloca ao longo do perfil do solo. A condutividade hidráulica é dependente das características do meio (porosidade, tamanho, distribuição, forma e arranjo das partículas) e das características do fluido (viscosidade e massa específica) (FETTER, 2000). Em campo, a condutividade hidráulica dos materiais possui uma distribuição complexa e irregular (FITTS, 2002)

A condutividade hidráulica pode ser determinada tanto em laboratório como em campo. Entre as principais técnicas de campo utilizadas estão o *slug test*, o ensaio de bombeamento, o ensaio com traçador e o ensaio de tubo aberto. Entre os métodos laboratoriais, destacam-se os permeômetros e as fórmulas empíricas de condutividade hidráulica a partir de ensaio granulométrico.

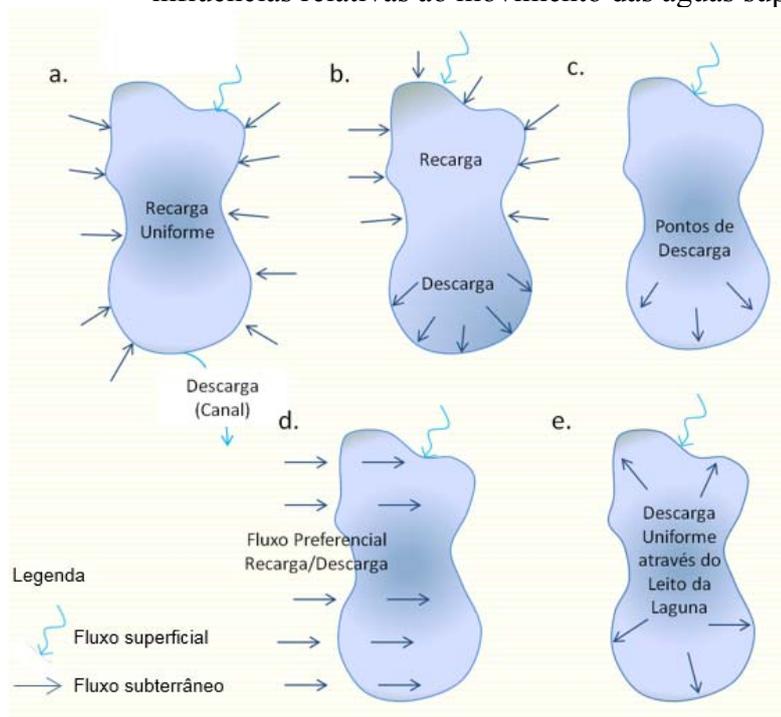
### 2.1.2 Interações das águas superficiais e subterrâneas em ambientes lacustres

As interações, sentido e intensidade das descargas de água subterrâneas (DAS), dependem primeiro da geologia e do tipo de solo da região, segundo dos gradientes hidráulicos formados entre a linha freática na bacia e o nível da laguna e entre o nível oceânico e o nível da laguna.

As formações geológicas saturadas formadas por rochas permeáveis, que contêm água em quantidade suficiente para servir como fontes de abastecimento são chamadas de aquíferos (BEDIENT *et al.*, 1999). O aquífero livre ou freático é aquele constituído por uma formação geológica permeável e superficial, totalmente aflorante em toda sua extensão, e limitado na base por uma camada impermeável. A superfície superior da zona saturada está em equilíbrio com a pressão atmosférica, com a qual se comunica livremente. Os aquíferos livres têm a chamada recarga direta. Em aquíferos livres o nível da água varia segundo a quantidade de chuva. São os aquíferos mais comuns e mais explorados pela população. São também os que mais apresentam problemas de contaminação (BORGHETTI, 2004).

Estudos detalhados classificam os corpos de água (BOYLE, 1992), no que diz respeito às características e contribuições relativas das entradas de água subterrânea e superficial. A Lagoa da Conceição pode apresentar distintas classificações de fluxo subterrâneo (Figura 3). Embora possam ser criados subtipos dentro desta classificação, a Figura 3 mostra a complexidade das relações que podem existir entre lagoas e os regimes de águas subterrâneas adjacentes. Em alguns casos, não é possível classificar o corpo de água como um tipo durante todo o ano; por exemplo, uma lagoa pode apresentar uma hidrologia muito semelhante ao tipo d (Figura 3) no final do verão, outono e inverno, mas na primavera as características do fluxo são representadas melhor pelo tipo b.

Figura 3 - Classificação de ambientes lacustres em seis classes principais baseadas em tipos e influências relativas ao movimento das águas superficiais e subterrâneas



Os termos recarga e descarga nesta figura são usados para descrever o movimento das águas superficiais e subterrâneas para dentro e para fora do corpo do lago. Fonte: adaptado de Boyle, 1992.

## 2.2 MÉTODOS DE QUANTIFICAÇÃO DE DAS

Existem diversos métodos para a quantificação das DAS, incluindo, *Seepage meter*, (Lee, 1977; Shaw e Prepas, 1990); Mini – Piezômetros (Lee, 1979); Geotraçadores como radônio  $^{222}\text{Rn}$ , estáveis e isótopos (Burnett e Kim, 2001; Lazar *et al.*, 2008; Ferreira *et al.*, 2017), condutividade e temperatura (Liu *et al.*, 2015, Sebok *et al.*, 2013), modelagem numérica (Smerdon *et al.*, 2007, Winter 1999, Zlotnik *et al.* 2010) e sensoriamento remoto (Anderson *et al.* 2013, Lewandowski *et al.* 2013, Wilson e Rocha 2016). Os *seepage meter* possuem a quantificação das DAS de maneira direta. Têm a vantagem de não exigir medições da permeabilidade dos sedimentos, tampouco análise química da concentração de traçadores, ou risco de contaminação do corpo hídrico. Além disso, o método produz uma amostra de água adequada para análise química da qualidade da água e o equipamento possui baixo custo. Alguns valores de DAS obtidos em estudos anteriores estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores de DAS em estudos anteriores

DAS (cm/d)	Método	Local	Referência	Ano
-52,0 a 27,6	Piezomanômetro	Lagoa da Conceição, Florianópolis, SC - BRA	Kern <i>et al.</i>	2019
-16 a 6	<i>Seepage</i>	Lagoa da Conceição, Florianópolis, SC - BRA	Arcari <i>et al.</i>	2019

<b>DAS (cm/d)</b>	<b>Método</b>	<b>Local</b>	<b>Referência</b>	<b>Ano</b>
-0,2 a 0,7	<i>Seepage</i>	Lagoas Costeiras, litoral norte RS - BRA	Rocha <i>et al.</i>	2015
2,4 a 17,6	Traçador radioativo	Lagoa de Laoye, Hainan - CHINA	Ji <i>et al.</i>	2013
4,6 a 15,4	<i>Seepage</i>	Baia de Sarasota - EUA	Mwashote <i>et al.</i>	2012
0,5 a 2,2	Traçador radioativo	Lagoa dos Patos, RS - BRA	King	2012
25	Traçador radioativo	Mangueira, RS - BRA	Santos <i>et al.</i>	2010
18 a 62	Traçador radioativo	Estuário do Rio Sebastian, Florida - EUA	Santos <i>et al.</i>	2010
3 a 8	Traçador radioativo	Laguna de Veneza - ITA	Rapaglia <i>et al.</i>	2010
-0,04 a 0,04	<i>Seepage</i>	Border Rivers, Bonshaw - AUS	R. S. Brodie <i>et al.</i>	2009
350	Traçador radioativo	Lagoa dos Patos–Mirim, RS - BRA	Niencheski <i>et al.</i>	2007
-2,0 a 12,0	<i>Seepage</i>	Laguna costeira Florida - EUA	Cable <i>et al.</i>	2006
6,2 a 18,1	<i>Seepage</i>	Lago Shingobee, Minissota - EUA	Rosenberry	2005
-19,8 a -1,4	<i>Seepage</i>	Mirror Lake, New Hampshire - EUA	Rosenberry	2005
-1,5 a 1,5	<i>Seepage</i>	Lower Sylvan Pond - EUA	Sebestyen & Schneider	2004
275	<i>Seepage</i>	Lago Belle Taine, EUA	Rosenberry	2000
-11,6 a 3,0	<i>Seepage</i>	Mirror Lake, New Hampshire - EUA	Asbury	1990

### 2.2.1 *Seepage meter*

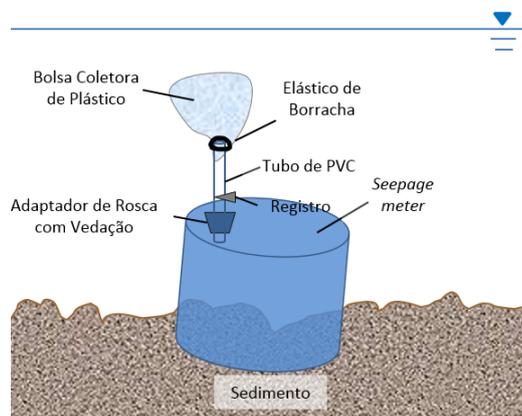
Os *seepage meter* (infiltrômetros) são instrumentos utilizados para medir a taxa fluxo através da interface sedimento-água. Esta taxa de infiltração é medida no fundo de lagos, estuários e rios. O *seepage meter* foi, inicialmente, desenvolvido para medir as perdas dos canais de irrigação (Israelsen e Reeve, 1944), e em meados da década de 1970, o projeto foi melhorado e o uso foi ampliado para medir a descarga de águas subterrâneas nos lagos (e.g. Lee, 1977; Lee e Cherry, 1978; John & Lock, 1977, Connor e Belanger, 1981, Erickson, 1981, Woessner e Sullivan, 1984, Isiorho e Matisoff, 1990; Shaw e Prepas, 1990b; Lesack, 1995; Rosenberry, 2000; Sebestyen e Schneider, 2001). (USGS 2007)

Como os *seepage meters* fornecem um método rápido e simples para coletar informações sobre a direção, a taxa e a variabilidade do fluxo de infiltração através da interface

sedimento-água, seu uso foi expandido para ambientes diferentes dos lagos. As taxas verticais de infiltração foram medidas em zonas úmidas (e.g. Choi e Harvey, 2000), estuários (e.g. Lee, 1977; Lock e John, 1978; Zimmerman *et al.*, 1985; Yelverton e Hackney, 1986; Boyle, 1994; Linderfelt e Turner, 2001) e margens oceânicas próximas (e.g. Cable *et al.*, 1997; Shinn *et al.*, 2002; Taniguchi, 2002; Chanton *et al.*, 2003). Os *seepage meters* também foram utilizados para determinar o balanço hídrico (Fellows e Brezonik, 1980) ou para obter amostras para análise química (Lee, 1977; Downing e Perterka, 1978; Brock *et al.*, 1982; Belanger e Mikutel, 1985; Shaw *et al.*, 1990. *apud* USGS 2007)

Os *seepage meters* podem ser construídos de forma econômica e podem ser customizados de acordo com as especificações da aplicação. O conceito básico do equipamento é isolar uma área da interface de água superficial- sedimento com um cilindro aberto na base e na parte superior acoplado a uma bolsa coletora de plástico (Figura 4). A alteração do volume de água na bolsa coletora ao longo de um intervalo de tempo é utilizada para determinar a direção e a taxa de infiltração entre as águas superficiais e subterrâneas. O aumento no volume da bolsa indica que o fluxo ocorre das águas subterrâneas para as superficiais, enquanto a perda de volume indica o contrário.

Figura 4 - Seção transversal da instalação típica do *seepage meter*.



Fonte: Adaptado de Lee e Cherry (1978) Rosenberry (2008).

Os *seepage meters* possuem a vantagem de medir a troca de águas subterrâneas e superficiais sem a necessidade de realizar as medidas de condutividade hidráulica do sedimento. São particularmente úteis quando é necessário realizar diversas medições, a fim de caracterizar diferentes segmentos de um corpo hídrico. Além disso, com a instalação de ao menos um

piezomanômetro os resultados podem ser utilizados para determinação da condutividade hidráulica (K), no local.

- **Fator de correção para *seepage meter***

Todos os *seepage meters* representam o fluxo natural de água através da interface sedimento-água. Os primeiros dispositivos utilizavam tubos de vidro de pequeno diâmetro para conectar a bolsa ao *seepage*. Diversos motivos podem causar resistência substancial ao fluxo, e geram ineficiência quando altas taxas de infiltração demandam que a água a flua rapidamente através desses tubos de pequeno diâmetro para a bolsa coletora. (FELLOWS e BREZONIK, 1980; ROSENBERRY e MORIN, 2004 *apud* ROSENBERRY 2006). Lee (1977) observou que a sedimentação, perturbada durante a instalação do medidor, também causa reduções na eficiência.

As medições realizadas com *seepage meter* devem ser corrigidas por um fator de correção para considerar as perdas por atrito através dos componentes do instrumento (Martinez, 2016). Os fatores de correção foram determinados para vários projetos de *seepage meters*, comparando as taxas de infiltração geradas em um tanque de calibração, com taxas de infiltração dos *seepage meters* instalados nos tanques. Os valores relatados variaram de 1,05 a 1,74 (Tabela 2). Essa ineficiência diminuiu ao longo do tempo com melhorias no design do medidor de infiltração (ROSENBERRY, D. O 2006).

Tabela 2: Fatores de correção reportados para ajustar as taxas de fluxo do *seepage meter* às taxas reais.

<b>Citação</b>	<b>Fator de Correção</b>
<b>Erickson, 1981</b>	1,43
<b>Erickson, 1981</b>	1,74
<b>Cherkauer and McBride, 1988</b>	1,60
<b>Dorrance, 1989</b>	1,61
<b>Asbury, 1990</b>	1,11
<b>Belanger and Montgomery, 1992</b>	1,30
<b>Murdoch and Kelly, 2003</b>	1,25
<b>Rosenberry, 2005</b>	1,05

Fonte: Rosenberry, 2006.

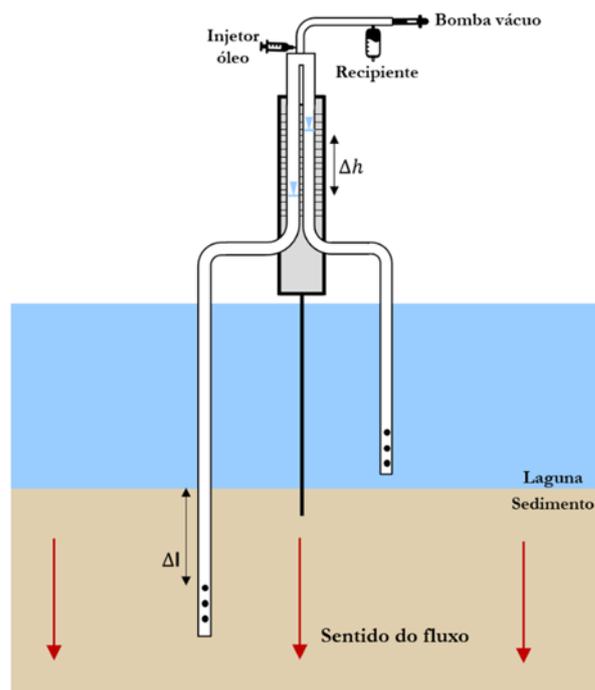
### 2.2.2 Piezomanômetro

Os mini piezômetros e piezomanômetros são instrumentos simples que proporcionam a medição da direção do fluxo d'água (MARTINEZ, 2013). Os mini piezômetros são uma

versão em menor escala dos piezômetros convencionais, sendo normalmente instalados temporariamente no corpo hídrico, proporcionando a comparação entre as cargas hidráulicas do compartimento superficial e do subterrâneo.

Para facilitar e possibilitar medidas mais precisas, Winter *et al.* (1988) desenvolveram o piezomanômetro, onde as medições de cargas hidráulicas são realizadas através de um tubo flexível ligado a um manômetro. Muitos trabalhos vêm utilizando o equipamento. Entre eles, pode-se citar os trabalhos de Kelly e Murdoch (2003); Kennedy *et al.* (2007); Labaugh e Rosenberry (2008); Martinez (2013); Ong e Zlotnik (2011). Os piezomanômetros (Figura 5) consistem no acoplamento de tubos flexíveis com seção filtrante, formando um manômetro em U, onde uma extremidade com seção filtrante está inserida em determinada profundidade no sedimento e, a outra extremidade mergulhada no corpo hídrico. Assim, os piezomanômetros permitem a medição da diferença entre a carga hidráulica no sedimento e do corpo superficial.

Figura 5 - Esquema do funcionamento de um piezomanômetro.



Fonte: Arcari, 2018. O desnível é verificado através de régua milimetrada acoplada ao manômetro, medindo os níveis (cargas) dos dois tubos no mesmo instante. Quando a carga no tubo do sedimento é maior do que a do tubo na água superficial, a direção do fluxo na interface sedimento-água deve ser no sentido do compartimento subterrâneo para o superficial. Logo, se a carga no tubo do sedimento é inferior à do tubo da água superficial, é indicado que naquele local ocorre fluxo sentido superficial-subterrâneo (infiltração).

Além de proporcionar a medição do desnível de cargas hidráulicas, os mini piezômetros são utilizados para obtenção de amostras para análise de qualidade de água (ROSENBERRY; LABAUGH; HUNT, 2008). A desvantagem do piezomanômetro em relação

ao *seepage*, é que, para quantificar a taxa de fluxo no local, é necessário estimar a condutividade hidráulica, enquanto o *seepage* proporciona uma medida direta.

A condutividade hidráulica pode ser estimada a partir dos ensaios de granulometria do sedimento por meio de fórmulas empíricas. Essas fórmulas são normalmente utilizadas para uma primeira estimativa da ordem de grandeza da condutividade hidráulica, com vistas a futuras análises e aplicações. Entre as fórmulas empíricas pode-se citar Hazen (1892), Schlichter (1905), Terzhagi (1925), Breyer (1964), Shepherd (1989), Kozeny (1927) e Carman (1938, 1956).

### 2.3 QUALIDADE DAS ÁGUAS

Muitas vezes, o termo qualidade da água está associado ao grau de pureza da água. No entanto, este também pode ser visto como o conjunto de características físico-químicas que permitem determinar para quais finalidades a água pode ser utilizada (MERTEN & MINELLA, 2002). Também, pode ser visto como o padrão mais próximo possível do estado natural da água, ou seja, sem qualquer interferência antrópica (BRANCO, 1991 *apud* CERETTA, 2004). Nem toda substância que adentra um corpo hídrico pode lhe causar uma deterioração, já que esta, é determinada pela concentração da substância e pelos tipos de usos que se fazem da água no qual está sendo lançada.

A distribuição temporal e espacial de sedimentos, nutrientes e microrganismos bem como o transporte e dispersão de poluentes são condicionados pela circulação do corpo hídrico, o que auxilia na indicação das áreas mais e menos propícias ao lançamento de efluentes e propícias à degradação (PAZ *et al.*, 2005).

Uma das maneiras de avaliar e acompanhar os possíveis impactos das atividades antrópicas em um corpo hídrico, é através do monitoramento das propriedades da água. Segundo preconizado na Política Nacional dos Recursos Hídricos (BRASIL, 1997), o monitoramento tem por finalidade fornecer subsídios para a gestão, elaboração e avaliação de planos de ação para corpos hídricos, a fim de lhes garantir condições adequadas para os seus usos pretendidos ao longo do tempo. Segundo a Agência Nacional das Águas (ANA, 2018), o monitoramento e a avaliação das águas não só superficiais como também subterrâneas, são fatores primordiais para uma adequada gestão dos Recursos Hídricos no Brasil.

### 2.3.1 Enquadramento dos corpos d'água

O enquadramento de um corpo hídrico é uma classificação baseada no tipo de suas águas (águas doces ou salobras ou salinas) e seus usos pretendidos. Nele, são estabelecidas metas que visam assegurar a qualidade da água em compatibilidade aos seus múltiplos usos, bem como, diminuir os custos de combate à sua poluição (SEILER, 2015).

A Resolução CONAMA 357/2005, criou para águas salobras, quatro classes. A resolução dispõe ainda, que não é necessário que todas as variáveis de qualidade da água sejam avaliadas para indicar a conformidade de um sistema com o seu enquadramento, ou seja, um conjunto delas pode subsidiar esta avaliação.

A Lagoa da Conceição é um corpo de água salobra. Se encaixa na classe 1, pois a água pode ser destinada à recreação de contato primário; à proteção das comunidades aquáticas e à aquicultura e à atividade de pesca.

### 2.3.2 Variáveis indicadoras da qualidade da água

Em estudos que envolvem análises ecológicas e mudanças globais por efeito antrópico os principais indicadores de qualidade da água podem ser: parâmetros físicos, físico-químicos ou biológicos. Dentre os indicadores destacam-se os elementos Nitrogênio, Fósforo, Oxigênio Dissolvido e Clorofila-*a* (BIANCHI, 2006).

- **Parâmetros físicos**

Todos os corpos d'água apresentam variações de temperatura ao longo do dia e das estações do ano. No entanto, o lançamento de efluentes com altas temperaturas pode causar impacto significativo nos corpos d'água (ANA, 2017). Isto porque o aumento da temperatura no sistema acelera os processos de decomposição de compostos orgânicos, bem como diminui a solubilidade de gases essenciais a manutenção da vida aquática, como o oxigênio dissolvido, que também é utilizado na decomposição aeróbica da matéria orgânica presente no sistema (VON SPERLING, 1996)

- **Parâmetros físico-químicos**

Em relação aos parâmetros físico-químicos, a salinidade, o oxigênio dissolvido (OD), o Potencial Hidrogeniônico (pH), as diferentes formas de nitrogênio e de fósforo são exemplos.

A salinidade é um dos fatores mais importantes na determinação da distribuição e no controle das populações de organismos que habitam as lagoas costeiras, pois tem papel

fundamental sobre a fisiologia dos seres vivos, e, conseqüentemente sobre a sua distribuição. (TELESH, 2010).

A quantidade de oxigênio presente na água em condições normais, depende da temperatura, da quantidade de sais e da pressão atmosférica. A descarga em excesso de material orgânico na água pode resultar no esgotamento de oxigênio do sistema. Assim, uma água não poluída por matéria orgânica, deve estar saturada de oxigênio. Pela legislação Conama nº 357/05, a concentração de OD, em qualquer amostra de água salobra classe 1, não pode ser inferior a 5 mg/L O<sub>2</sub>. Exposições prolongadas a concentrações abaixo de 5mg/L de OD podem não matar alguns organismos presentes, mas aumenta a susceptibilidade ao estresse. Exposições abaixo de 2 mg/L podem levar à morte a maioria dos organismos (EMBRAPA, 2018).

As maiores alterações do pH nos corpos hídricos são provocadas por despejos industriais, principalmente, os de mineração. O pH das águas é influenciado, em parte, pela natureza dos terrenos que a água atravessa e, também, está relacionado com a composição das rochas existentes na região, devido aos processos de solubilização, hidrólise e outros (BERRETA, 2007). Alterações nos valores de pH podem aumentar o efeito de substâncias químicas que são tóxicas para os organismos aquáticos, tais como, os metais pesados (ANA, 2017). Pela legislação Conama nº 357/05, o pH para as águas salobras no território nacional deve situar-se em uma faixa compreendida entre 6,5 a 8,5.

A ciclagem de Nitrogênio em ecossistemas de águas paradas pode variar, e ser perturbada por atividades humanas. A estimulação da produção primária, por meio de adição de nutrientes (geralmente fósforo em água doce, N em água salgada, mas também muitas vezes colimitando tanto por N como por fósforo) pode levar à proliferação de algas e alteração das propriedades dos ecossistemas. (WEATHERS & EWING, 2015)

Há um grande interesse no entendimento da dinâmica do nitrogênio em águas subterrâneas. Pois, o nitrato é transportado através do perfil do solo para as águas subterrâneas rapidamente. O nitrato é o poluente de água potável mais detectado em águas subterrâneas nos Estados Unidos, embora geralmente, esteja abaixo do limite regulamentar de 10 mg N/L. A contaminação de águas subterrâneas com nitratos é comum em paisagens agrícolas e em paisagens rurais/suburbanas, atendidas por sistemas sépticos. (VON SPERLING, 1996).

Na maioria dos corpos d'água, o fósforo pode ser um fator limitador da produtividade e, portanto, é apontado como o principal fator responsável pela eutrofização artificial dos

ambientes aquáticos. O fósforo encontra-se na água na forma de fosfato. Assim, utiliza-se essa denominação para as diferentes formas de fósforo. A dinâmica do fósforo está intimamente ligada aos sedimentos aquáticos. A retenção ou liberação, a partir do sedimento, está altamente correlacionadas às condições de oxirredução na interface água-sedimento. A quantidade e as características dos sedimentos carregados em suspensão pelo escoamento superficial são modificadas pela ação antrópica. Uma vez atingindo um ambiente aquático lântico, os sedimentos podem atuar, tanto como dreno, quanto como fonte de fósforo para a água, diminuindo ou potencializando os processos de eutrofização. (ANA,2018).

- **Parâmetros biológicos**

Um dos parâmetros biológicos caracterizadores da qualidade de água é a concentração de clorofila-a. São utilizadas para expressar a biomassa fitoplanctônica. A concentração de clorofila-a na água está diretamente associada à quantidade de algas presentes. A excessiva proliferação de algas indica eutrofização cultural ou antrópica, pois o enriquecimento de nutrientes, matéria orgânica e sedimentos carregados da bacia hidrográfica levam a um aumento da produtividade primária dos corpos de água, em especial, lagos e reservatórios (ANA,2018).

### **2.3.3 Metodologias de classificação dos graus de trofia**

A eutrofização de ambientes aquáticos costeiros é reconhecidamente um dos principais problemas ambientais globais (Cloern, 2001, Bricker *et al.*, 2003). É definida como o processo de enriquecimento de nutrientes e matéria orgânica em corpos aquáticos e o incremento da produção primária (Nixon, 1995). Para a avaliação desse processo faz-se necessários estudos envolvendo a avaliação do estado trófico dos ambientes marinhos e aplicação de novas abordagens como modelos, que servem como importantes ferramentas de investigação para a proteção, monitoramento, previsão da susceptibilidade natural dos sistemas e gerenciamento costeiro (Nixon, 1995).

Distintas metodologias são utilizadas para avaliar o grau de trofia em um corpo hídrico. Aqui, serão discutidos alguns modelos simplificados, bem como, suas especificidades quanto à aplicação, tanto em relação aos tipos de ambientes, lóticos ou lânticos, quanto ao clima. Também, serão abordados limites que definem se um ambiente está eutrofizado ou não. Tal avaliação possui implicação de ordem prática, uma vez que os resultados devem ser utilizados em ações de gerenciamento do corpo de água.

O trabalho clássico de Vollenweider (1968 *apud* Schäfer, 1985), estabelece valores limites de fósforo total e nitrogênio para a classificação de corpos d'água segundo os graus de trofia. Outros autores, como Wetzel (1993), além de valores limites para nutrientes, também consideram que ambientes com concentrações médias de clorofila-*a* superiores a 10 ug.L<sup>-1</sup> são considerados eutróficos.

A OECD (*Organization for Economic Cooperation and Development*), publicou em 1982 (OECD, 1982) os resultados de um amplo estudo sobre o monitoramento, avaliação e controle da eutrofização de ambientes aquáticos, no qual foram estabelecidos limites para classificação trófica, apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Limites para diferentes níveis de estado trófico, segundo o sistema de classificação proposto pela OECD (1982)

<b>Categorias Tróficas</b>	<b>PT (ug.L<sup>-1</sup>)</b>	<b>Média anual de Clorofila-<i>a</i>* (ug.L<sup>-1</sup>)</b>	<b>Máximo anual de Clorofila-<i>a</i>* (ug.L<sup>-1</sup>)</b>	<b>Média anual de disco de Secchi (m)</b>	<b>Mínima anual de disco de Secchi (m)</b>
<b>Ultraoligotrófico</b>	≤ 4,0	≤ 1,0	≤ 2,5	≥ 12,0	≥ 6,0
<b>Oligotrófico</b>	≤ 10,0	≤ 2,5	≤ 8,0	> 6,0	> 3,0
<b>Mesotrófico</b>	10 – 35	2,5 - 8	8 - 25	6 - 3	3 - 1,5
<b>Eutrófico</b>	35 - 100	8 – 25	25-75	3-1,5	1,5 - 0,7
<b>Hipereutrófico</b>	≥100	≥ 25	≥ 75	≤ 1,5	≤ 0,7

PT = média anual da concentração de fósforo total

\*clorofila-*a* da água suberficial – média geométrica

Como os limites da Tabela 3 foram estabelecidos para lagos de regiões temperadas, Salas e Martino (2001) publicaram um estudo realizado pelo Centro Pan Americano de Engenharia Sanitária e Ciências Ambientais (CEPIS), ligado à Organização Mundial de Saúde (OMS), no qual é proposto um modelo trófico simplificado para fósforo e clorofila-*a*, para lagos e reservatórios tropicais da América Latina e Caribe.

Tabela 4 - Limites para classes de estado trófico baseados em Salas e Martino (2001)

<b>Categorias Tróficas</b>	<b>PT (ug.L<sup>-1</sup>)</b>	<b>Clorofila-<i>a</i> (ug.L<sup>-1</sup>)</b>
<b>Oligotrófico</b>	≤ 28	≤4,8
<b>Mesotrófico</b>	28-72	4,8-12
<b>Eutrófico</b>	≥72	≥12

PT = média anual da concentração de fósforo total

\*clorofila-*a* da água suberficial – média geométrica

O estado trófico também pode ser definido pela relação entre fósforo e nitrogênio. O trabalho de Chiaudani e Vighi (1974), realizado em 26 lagos italianos demonstrou que o fósforo

era o fator que limitava o crescimento do fitoplâncton na maioria desses ambientes, e que concentrações de ortofosfato entre 0,010 e 0,012 mg.L<sup>-1</sup>, no inverno, estabeleciam o limite acima do qual começa o processo de eutrofização para os ambientes estudados. Neste trabalho, considerou-se que a relação entre as concentrações de nitrogênio inorgânico e ortofosfato, avaliadas em peso, no fitoplâncton, variam entre 4,5:1 e 9:1, e, portanto, valores maiores que estes sugerem que o fósforo está atuando como fator limitante, sendo o inverso verdadeiro para o nitrogênio. Todos os ensaios que tiveram resultados positivos com a adição de fósforo apresentaram valores de N:P superiores a 10. O resultados da relação N:P para os lagos considerados eutróficos, nesse estudo, variaram entre 4,1 e 19, o valor médio igual à 9 foi calculado através de 6 amostras. Já nos lagos considerados mesotróficos, essa relação variou entre 9,3 e 104, com valor médio de 35, para um número de amostras igual a 9.

O trabalho de Lee e Jones-Lee (1998), que discute a determinação do nutriente limitante para o crescimento do fitoplâncton em reservatórios, considera um ambiente limitado por fósforo, quando os resultados da razão da concentração de nitrogênio inorgânico (amônia e nitrato) e de ortofosfato, são superiores a 7,5:1. No entanto, esses autores enfatizam a importância de também se levar em conta a concentração efetiva desses nutrientes nos corpos d'água e consideram, que concentrações de ortofosfato e de nitrogênio abaixo de 0,002 mg P.L<sup>-1</sup> e 0,015 mg N.L<sup>-1</sup>, respectivamente, são consideradas limitantes.

Segundo IETC-UNEP (2001), a razão N:P é baixa em lagos eutrofizados e mais alta (entre 20 e 30) em lagos mesotróficos e oligotróficos. No entanto, a ocorrência de altas densidades de cianobactérias fixadoras de nitrogênio pode alterar, rapidamente, essa relação. Quando, em ambientes eutróficos, o crescimento do fitoplâncton passa a ser limitado pela disponibilidade, relativa do nitrogênio, há o favorecimento do aparecimento de espécies capazes de fixar o nitrogênio atmosférico.

Para o estabelecimento de planos de manejo em Bacias Hidrográficas, quando se pretende reduzir o grau de eutrofização de um corpo d'água, é crucial a definir qual o nutriente limitante para o crescimento de fitoplânctons. O resumo dos dados apresentados encontra-se na Tabela 5.

Tabela 5 - Índices tróficos calculados pela relação de nitrogênio e fósforo.

<b>Categoria/N:P</b>	<b>Chiaudani e Vighi (1974)</b>	<b>Lee e Jones-Lee (1998)</b>	<b>IETC-UNEP (2001)</b>
<b>Mesotrófico</b>	9,3 a 104		20 a 30
<b>Eutrófico</b>	4,1 a 19	7,5	Até 20

- **TRIX**

Na tentativa de caracterizar o estado trófico das águas interiores, foi proposto um índice trófico (TRIX), multiparamétrico, baseado na clorofila, saturação de oxigênio, nitrogênio e fósforo total e mineral e aplicável às águas costeiras marinhas. Numericamente, o índice é escalado de 0 a 10, cobrindo uma ampla gama de condições tróficas, da oligotrófica à eutrofica (VOLLENWEIDER,1997).

Para desenvolver o índice trófico os seguintes princípios foram observados: Parâmetros componentes do índice devem ser significativos em termos de dinâmica de produção e concentração, abranger os principais fatores causais, ser uma medida de rotina na maioria dos levantamentos marinhos.

O estudo determinou que o seguinte conjunto de parâmetros, listados sob três títulos, devem ser selecionados como componentes utilizáveis de um índice trófico:

a) Fatores que são expressões diretas de produtividade:

Clorofila-a: [Ch-a: mg/m<sup>3</sup>]

Oxigênio como desvio absoluto [%] da saturação: [abs |100-% OD| = aD% 0]

b) Fatores nutricionais:

- Totais

Nitrogênio Total: [NT: mg/m<sup>3</sup>]

Fósforo Total: [PT: mg/m<sup>3</sup>]

- Disponíveis

Nitrogênio inorgânico dissolvido N-(NO<sub>3</sub> + NO<sub>2</sub> + NH<sub>3</sub>): [NID = mN: mg/m<sup>3</sup>] P-

Fósforo inorgânico dissolvido PO<sub>4</sub>: [PID = PO<sub>4</sub>: mg/m<sup>3</sup>]

c) Fator suplementar de qualidade da água: Transparência: [Disco de Secchi: m]

Os componentes selecionados para o índice proposto são os listados em (a) e (b) acima, sendo que, os fatores nutricionais, nitrogênio e fósforo, são selecionados de acordo com a disponibilidade dos dados. As combinações desejáveis são: NT e PT (1), NID e PT (2), **NID e PID (3)**, nesta ordem; o NT e PID, por sua vez, é de pouco interesse. Transparência é usada como um índice suplementar.

Para a definição dos limites superior e inferior dos parâmetros, pode-se usar Média ± 2,5α, ou estatísticas robustas, se a distribuição de dados for incerta. Em qualquer caso, é

desejável excluir valores extremos que ocorrem raramente; caso contrário, existe o risco de que os intervalos de confiança estatísticos se tornem grandes demais para permitir a discriminação entre diferentes TRIX. Segundo Vollenweider (1997), o cálculo do índice é dado pela Equação 2, onde k e m, são coeficientes de escala. Para o Mar Adriático, onde foi realizado o estudo (VOLLENWEIDER, 1997), equivalem a k=1,5 e m=12/10. Os coeficientes são introduzidos para fixar o valor limite mais baixo do índice, para extensão da escala trófica relacionada, de 0 a 10 unidades TRIX.

$$TRIX = \frac{[\log(\text{Clorofila. } a * OD\% * mN * PO4)] + [k]}{m} \quad (2)$$

De acordo com Cotovicz Junior (2012), a classificação para águas estuarinas usando o TRIX (Quadro 1) foi feita através de valores limiares propostos por Penna *et al.* (2004), aplicados por Nasrollahzadeh *et al.* (2008) e adotados pela Legislação Ambiental da Itália (CARUSO *et al.*, 2010).

Quadro 1 - Valores do TRIX e classificação do nível trófico.

TRIX	Condições	Estado trófico
<2	Produtividade primária e concentração de nutrientes muito baixas	Excelente (ultra-oligotrófico)
2-4	Produtividade primária e concentração de nutrientes baixas	Alto (oligotrófico)
4-5	Produtividade primária e concentração de nutrientes moderadas	Bom (mesotrófico)
5-6	Produtividade primária e concentração de nutrientes altas	Moderado (mesotrófico a eutrófico)
6-10	Produtividade primária e concentração de nutrientes muito altas	Pobre (eutrófico)

Fonte: Adaptado de Penna *et al.* (2004), Nasrollahzadeh *et al.* (2008) e Vollenweider, 1997

O Índice TRIX já foi aplicado em diversos ambientes de vários países e no Brasil, como: Costa do Mar Negro/Bulgária (MONCHEVA *et al.*, 2002); Rio Pó/Itália (ARTIOLI *et al.*, 2005); Lagoa de Venice/Itália (BENDORICCHIO *et al.*, 2005); Lagoa formosa/Portugal (LOUREIRO *et al.*, 2006); Algarve/Portugal (COELHO *et al.*, 2007); Costa do Mar Cáspio/Irã (NASROLLAHZADEH *et al.*, 2008); Yucatan/México (HERRERA-SILVEIRA *et al.*, 2009); Costa da Sicília/Itália (CARUSO *et al.*, 2010); Estuário de Thames/Grã-Bretanha (DEVLIN *et*

*al.*, 2011); Baía de Izamir/Turquia (YUCEL-GIER *et al.*, 2011). No Brasil: Estuário dos Rio Ipojuca na Região Metropolitana do Recife/Pernambuco (NORIEGA, 2010); Complexo estuarino Mundaú-Manguaba/Alagoas (COTOVICZ-JUNIOR, 2012); Estuário do rio Massangana/Pernambuco (ALVES *et al.*, 2013); Estuários da Ilha de Santa Catarina/Santa Catarina (SILVA *et al.*, 2013); Estuário do rio Potengi/Rio Grande do Norte (TAVARES *et al.*, 2014); Estuários dos rios Ipojuca e Merepe/Pernambuco (BATISTA, *et al.*, 2014); Estuários dos rios Piraquê-açu e Piraquê-mirim/Espirito Santo (BERTOLDI, 2014); Rio Paraíba do Sul/Rio de Janeiro (BORGES, 2014); Baía de Guanabara/Rio de Janeiro (SANTOS, 2015); Mundaú-Manguaba/Alagoas (JUNIOR, 2016) entre outros corpos hídricos.



### 3 ÁREA DE ESTUDO

A Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição está localizada na porção centro-leste da Ilha de Santa Catarina (6946807 N; 751632 L; 22 J), representada. A área total da bacia hidrográfica é de 75,5 km<sup>2</sup>, onde desta, a laguna ocupa uma área de 21 km<sup>2</sup> e um volume de 64.334.762 m<sup>3</sup>, estendendo-se por 13,5 km sentido norte-sul, orientado paralelamente à costa. Nesta seção serão apresentadas as características área de estudo, através de gráficos, tabelas e mapas. Nos mapas, sempre que possível serão identificadas as sub-bacias onde foram realizados os monitoramentos, a fim de familiarizar o leitor com a área de estudo.

#### 3.1 CLIMATOLOGIA REGIONAL

A região sul constitui uma das regiões do mundo mais regadas por chuvas. O caráter subtropical do clima do sul do Brasil confere a esta região uma importante oscilação térmica, com os litorais catarinense e paranaense apresentando temperaturas amenas no inverno. Segundo Nimer (1989) os sistemas circulatórios estão sujeitos a grandes flutuações anuais, gerando como consequência notáveis desvios pluviométricos anuais.

O clima de Florianópolis é classificado como subtropical úmido, segundo a classificação de Köppen, ou Cfa. As normais climatológicas registradas, fornecidas pela EPAGRI, dos dados registrados na estação 83897 (São José) de 1961 a 1999 indicam que a temperatura média de Florianópolis é de 20,4°C, sendo fevereiro o mês mais quente e julho, o mais frio. No inverno, a temperatura média oscila entre 17° e 15°C, e no verão entre 25° e 23°C.

A Tabela 6 apresenta um comparativo entre o número de dias no mês ou no ano com precipitação maior ou igual a 1 mm (dias); o máximo absoluto da precipitação acumulada em 24 horas (mm) para o período de 1961 a 1999, com os anos de 2017 e 2018 (período estudado).

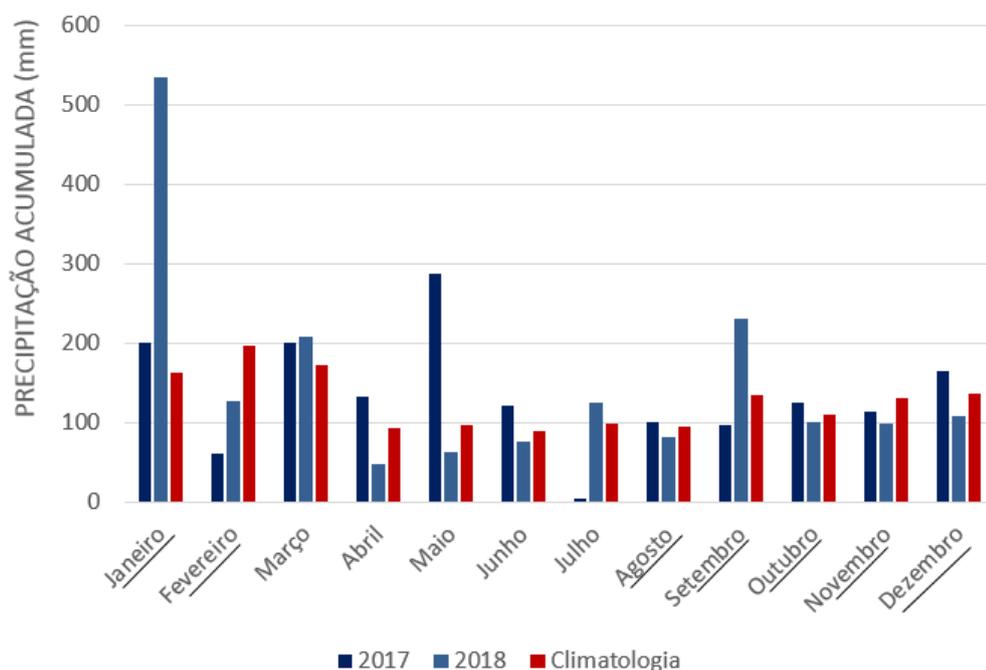
Na Tabela 6 é possível observar que o mês de janeiro de 2018 superou o total de precipitação acumulada da climatologia. Até então, o janeiro mais chuvoso havia registrado em 1963 um total acumulado de 122 mm. Em 2018 esse valor foi de 179mm.

Tabela 6 - Climatologia de Florianópolis - Comparação entre o período de 1961 a 1999 com os anos 2017 e 2018

Mês	Número de dias ppt > 1 mm			Máximo absoluto da precipitação acumulada em 24 horas (mm)			
	Climatologia	2017	2018	Ano	Climatologia	2017	2018
<b>Janeiro</b>	12	12	16	1963	122,0	100	<b>179</b>
<b>Fevereiro</b>	13	8	13	1977	100,4	22	42
<b>Março</b>	12	19	13	1978	187,1	30	40
<b>Abril</b>	8	16	8	1971	72,0	22	27
<b>Maio</b>	7	16	10	1981	133,8	54	18
<b>Junho</b>	8	7	8	1983	63,9	43	40
<b>Julho</b>	8	2	5	1980	89,4	2	72
<b>Agosto</b>	8	9	8	1977	103,9	38	19
<b>Setembro</b>	11	5	12	1977	123,0	51	90
<b>Outubro</b>	11	9	14	1964	81,6	30	25
<b>Novembro</b>	11	7	12	1983	89,6	38	17
<b>Dezembro</b>	11	15	8	1983	144,0	27	37
<b>Total anual</b>	120	125	127	1978	187,1	101	179

O gráfico apresentado na Figura 6 apresenta a diferença entre a precipitação acumulada mensal da climatologia e dos anos estudados. Neste gráfico, destaca-se o mês de julho de 2017, onde o total acumulado foi de 2mm. Os meses sublinhados representam os meses onde houveram coletas.

Figura 6 - Diferença entre a precipitação acumulada mensal da climatologia e dos anos estudados.



### 3.2 GEOLOGIA HIDROGEOLOGIA

Na Figura 7 é apresentado o Mapa Hidrogeológico da Ilha de Santa Catarina. Na margem oeste da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição, onde têm-se o domínio dos maciços rochosos, há a unidade Aquífero Ilha. As rochas que compõem este aquífero mostram-se intensamente fraturadas, o que facilita a ocorrência de boas vazões, tratando-se de rochas ígneas. O aquífero é classificado como fraturado, livre, anisotrópico e heterogêneo.

O Aquífero Campeche localizado na porção sudeste da bacia hidrográfica é composto por depósitos eólicos (dunas ativas). São depósitos sedimentares, compostos quase que exclusivamente por grãos de quartzo, tamanho areia fina, que formam acumulações espessas, podendo atingir até 50 metros de altura e grandes profundidades (GUEDES JUNIOR, 1999). As Dunas da Ilha de Santa Catarina são excelentes para o desenvolvimento de água subterrânea pela sua alta taxa de recarga, boa permeabilidade, condutividade hidráulica e qualidade das águas para consumo (GUEDES JUNIOR, 1999). É um aquífero livre, isotrópico e homogêneo, com espessura máxima de 69m, entretanto com espessuras médias na ordem de 30 m (ZANATTA, 2005). O fluxo de água subterrânea se direciona para as zonas de descargas Lagoa da Conceição e Praia da Joaquina, onde estima-se uma velocidade de fluxo de águas subterrâneas de 50 cm/dia (ZANATTA; RAMAGE, 2011).

O aquífero Campeche recebe recarga por infiltração através de uma lagoa de evapoinfiltração (LEI) da Estação de Tratamento de Esgotos da Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN), que, a partir do ano de 2007, possui a capacidade de tratar o efluente de aproximadamente 30.000 habitantes. A LEI possui uma área de, aproximadamente, 30.000 m<sup>2</sup> e dista cerca de 350 m do corpo hídrico da Lagoa da Conceição. O nível d'água na LEI encontra-se aproximadamente 9,0 acima do nível da laguna (SANTOS, 2018).

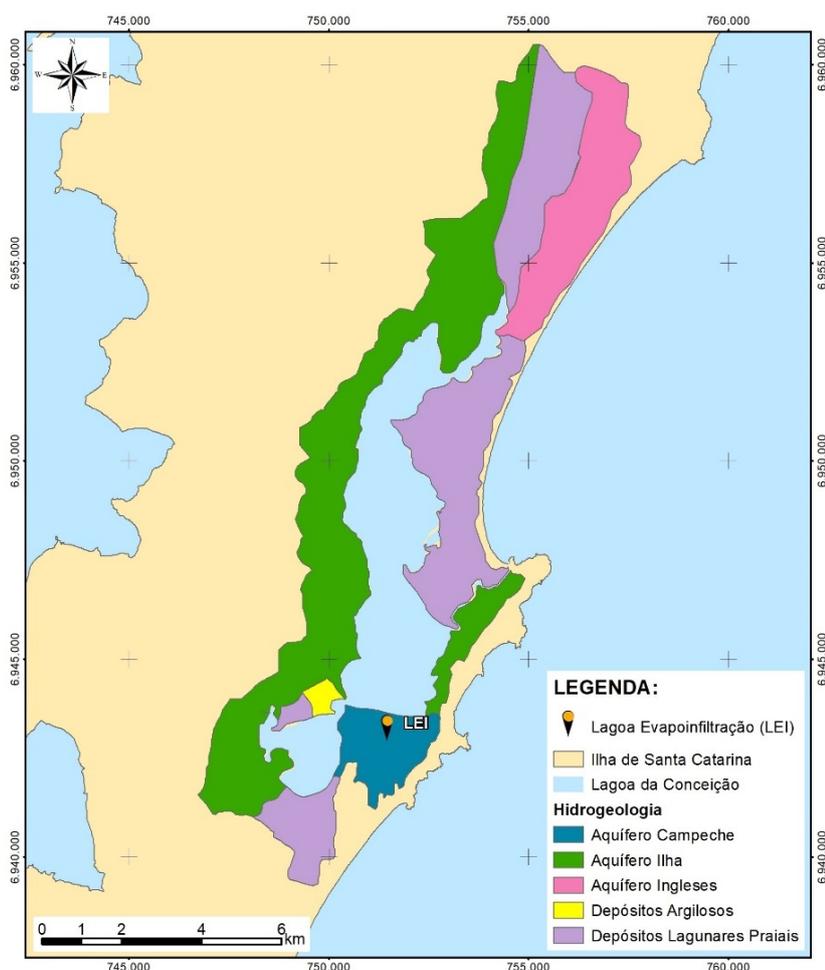
Depósitos de areia ocorrem como aquífero livre na região da Praia dos Ingleses e Barra da Lagoa/Moçambique e como aquífero confinado (profundidades superiores a 40 metros) em

praticamente todas as áreas planas da Ilha. Estes depósitos são designados com o nome de Aquífero Ingleses.

Já os depósitos argilosos devidos as altas taxas de argila ou matéria orgânica, não são considerados aquíferos, tanto pela baixa permeabilidade, como pela possível presença de água salinizada por contato com mar (mangues).

Segundo Muehe, (1989), os depósitos lagunares estão representados pela lagoas do Peri e Conceição, com predominância de sedimentos arenosos nas margens e finos nas partes centrais, mais profundas. Nos topos dos morros, a camada de solo é pequena, assim como as declividades, permitindo uma maior infiltração das águas de precipitação (áreas de recarga). Já nas encostas, a maior declividade e uma maior espessura de solo, permite um maior escoamento superficial das águas que precipitam.

Figura 7 – Mapa das unidades hidrogeológicas da área de estudo.

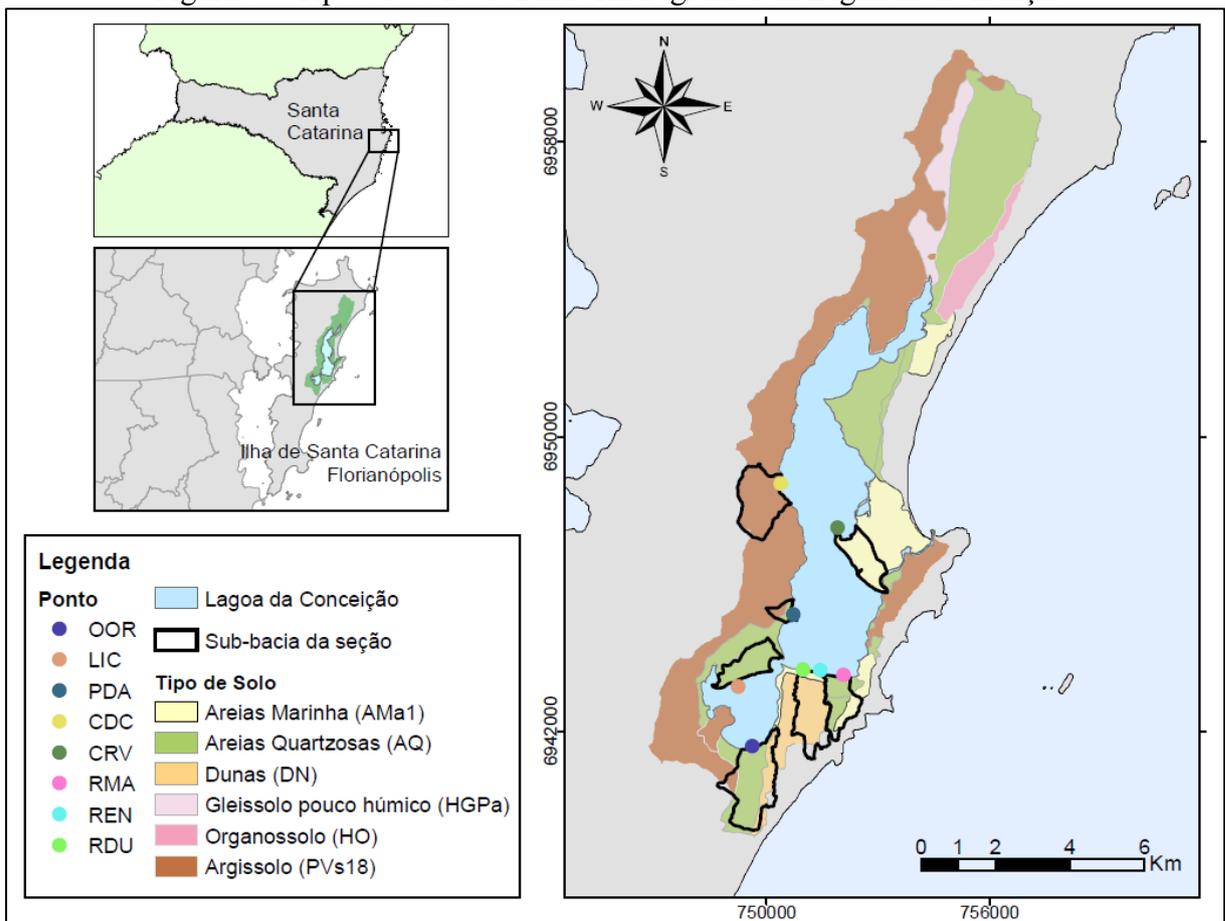


Fonte: Adaptado de Guedes Junior (1999) apud Arcari (2018)

### 3.3 PEDOLOGIA

Os tipos de solo das sub-bacias das estações são apresentados na Figura 8. As areias quartzosas (AQ) em geral apresentam textura areia ou areia franca ao longo de pelo menos 2 m de profundidade acarretando em elevada taxa de infiltração. As dunas (DN) são os depósitos arenosos de dunas móveis, onde vento age significativamente, não permitindo a formação do solo, devido a isso apresentam taxa de infiltração superior à das areias quartzosas. O argissolo (PVs), tem profundidade de aproximadamente 1,5 m, apresenta textura areno-argilosa e possui relevos ondulados, pois está presente nas encostas de morros e colinas. Portanto, proporciona uma baixa infiltração da água, e conseqüentemente, um elevado escoamento superficial. As areias marinhas possuem alta infiltração, onde, supostamente, toda precipitação nesta região infiltra no solo, inclusive nas condições de umidade do solo elevada (MPB, 2009).

Figura 8 – Tipos de solo da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição



Fonte: Adaptado de MPB, 2009.

### 3.4 TOPOBATIMETRIA

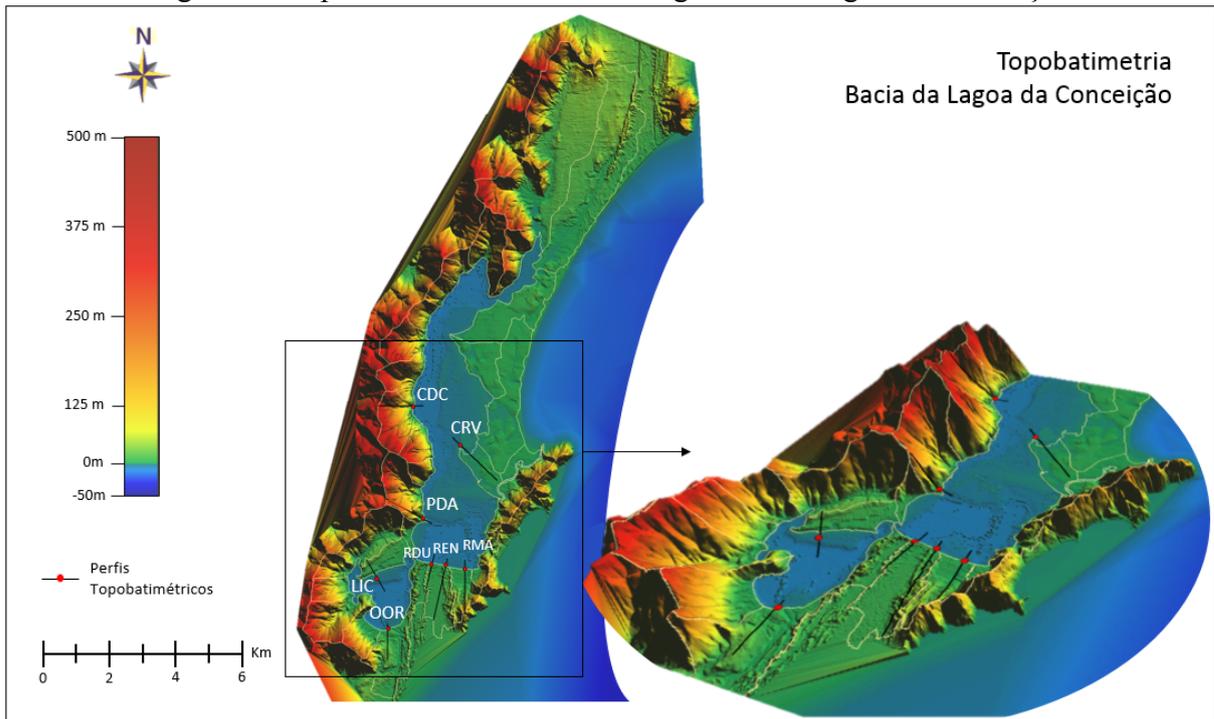
O levantamento topobatimétrico permite aprofundar o conhecimento físico da bacia, compreende o posicionamento planimétrico, realizado por meio de levantamento GPS, ou por técnicas topográficas convencionais, e a altimétrico, empregando nivelamento geométrico ou trigonométrico na parte seca e ecobatímetros para determinação de profundidades na parte molhada.

O primeiro levantamento batimétrico da Lagoa da Conceição foi realizado na década de 1980 por Muehe e Caruso Jr. (1989), com vistas de corrigir falhas e melhorar a resolução em certas áreas da carta batimétrica, em 2006 a equipe do LaHiMar, realizou uma campanha de batimetria na laguna e no Canal da Barra da Lagoa (GODOY, 2009). A topografia foi obtida a partir do modelo digital de elevação, fornecido pela Secretaria de Desenvolvimento Sustentável de Santa Catarina, (resolução de 10m).

A Figura 9 apresenta a topobatimetria em planta e o modelo 3D com a localização dos perfis topobatimétricos dos transectos nas estações de monitoramento. Os perfis foram gerados a partir do acoplamento das duas bases de dados no software Global Mapper 17.

O relevo da margem oeste da laguna é constituído pelas altas e íngremes encostas do complexo cristalino (Figura 9). A margem leste, possui uma extensão de terrenos planos ou muito pouco dissecados, chamados planícies costeiras, onde os processos de geração de relevo estão intrinsecamente relacionadas às variações do nível marinho ocorrido durante o Quaternário.

Figura 9 - Topobatimetria da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição



### 3.5 HIDROGRAFIA E UNIDADES DE RESPOSTA HIDROLÓGICA (URHs)

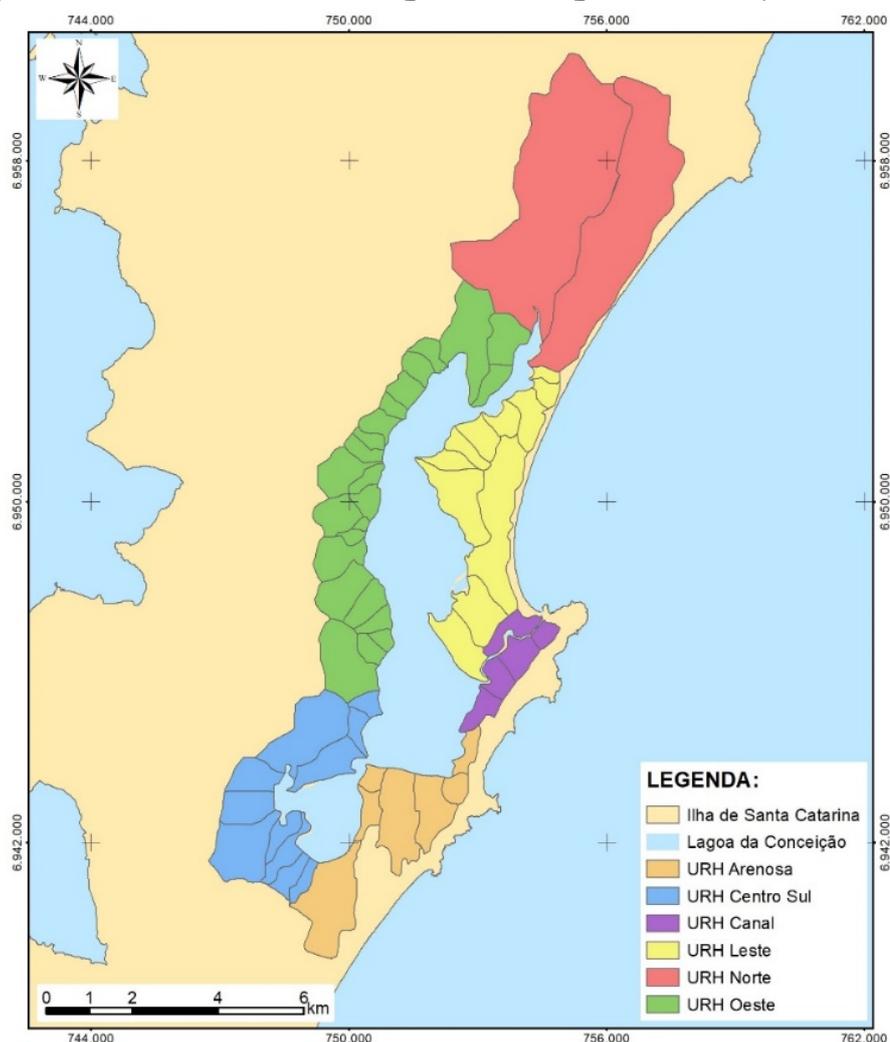
Segundo Sierra de Ledo e Soriano-Sierra (1994), os aportes hidrológicos na laguna provém precipitação pluvial direta, dos córregos que nascem no Embasamento Cristalino na margem oeste e sul, e do Rio João Gualberto que é o principal curso d'água, e que deságua no extremo norte da laguna e da. Odebrecht e Caruso Jr. (1987) levantam a hipótese de possíveis aportes de águas subterrâneas na região sul da laguna.

A Figura 10 apresenta a divisão da bacia em Unidades de Resposta Hidrológica (URH), que representam zonas de mesmas características morfométricas e hidrológicas, segundo Bier (2013). Há seis URHs, englobando sub-bacias de características e comportamentos semelhantes. Sendo elas:

- **Norte:** compreende as duas maiores sub-bacias (João Gualberto e Rio Vermelho). Não possuem altos valores de declividade e urbanização. Entretanto, a área superficial das duas sub-bacias corresponde a aproximadamente, 35% da área total da bacia hidrográfica, o que faz com que a contribuição hidrológica deste setor tenha grande relevância;
- **Leste:** sub-bacias com alta taxa de infiltração, devido ao tipo de solo presente (areias quartzóicas e marinhas) e baixa ocupação urbana. Esta URH representa uma planície litorânea, apresentando declividade da bacia muito baixa neste setor. Devido à essas características, toda precipitação nesta unidade infiltra no solo, não havendo presença de córregos;

- **Canal:** setor com elevada urbanização, implicando em uma elevada impermeabilização. O solo local seja composto por areias marinhas. Grande parte do escoamento superficial neste setor é descarregado no Canal da Barra da Lagoa, que liga a Lagoa da Conceição com o Oceano Atlântico;
- **Arenosa:** URH que apresenta características de solo bastante permeáveis, com predomínio de dunas, areias marinhas e areias quartzólicas. Esta URH apresenta urbanização considerável, o que faz com que tenha uma impermeabilização acentuada;
- **Centro-sul:** setor que engloba a região mais urbanizada da bacia hidrográfica. Possui elevada impermeabilização e considerável declividade média da bacia. Possui relevante contribuição hidrológica.
- **Oeste:** setor com grande número de pequenas sub-bacias. Compreende as características geológicas do Granito Ilha, com vegetação bem preservada, baixa urbanização e alta declividade. Possui vegetação densa, o que proporciona grandes interceptações da chuva. A declividade e o tipo de solo proporcionam baixas infiltrações e, conseqüentemente um elevado escoamento superficial, apresentando diversos córregos e cachoeiras de pequeno porte. Este setor é responsável por grande parte da contribuição superficial que é descarregada no corpo hídrico da Lagoa da Conceição, distribuída por uma longa faixa.

Figura 10 - Divisão da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição em URHs



Fonte: Adaptado de Bier (2013)

### 3.6 NÍVEL DA LAGUNA

Devido ao seu comprimento e meandros, o Canal da Barra da Lagoa atua reduzindo o efeito das marés no interior da laguna, funcionando como um filtro de alta frequência para as oscilações do nível d'água do oceano até a Lagoa da Conceição e atenua principalmente as componentes com período menor de 36h (maré astronômica) (ROCHA, 2007). Desta forma, o nível da laguna é afetado diretamente pela direção e magnitude dos ventos na região. Sistemas frontais do quadrante sul causam o empilhamento das águas do oceano, promovendo o fluxo do canal para dentro da laguna, levando ao aumento do nível d'água. Já a ocorrência de ventos do quadrante norte/nordeste proporciona a saída de água da laguna e a consequente diminuição do nível d'água (BIER, 2018; OLIVEIRA, 2016; ODRSKI, 2012; PEREIRA, 2004).

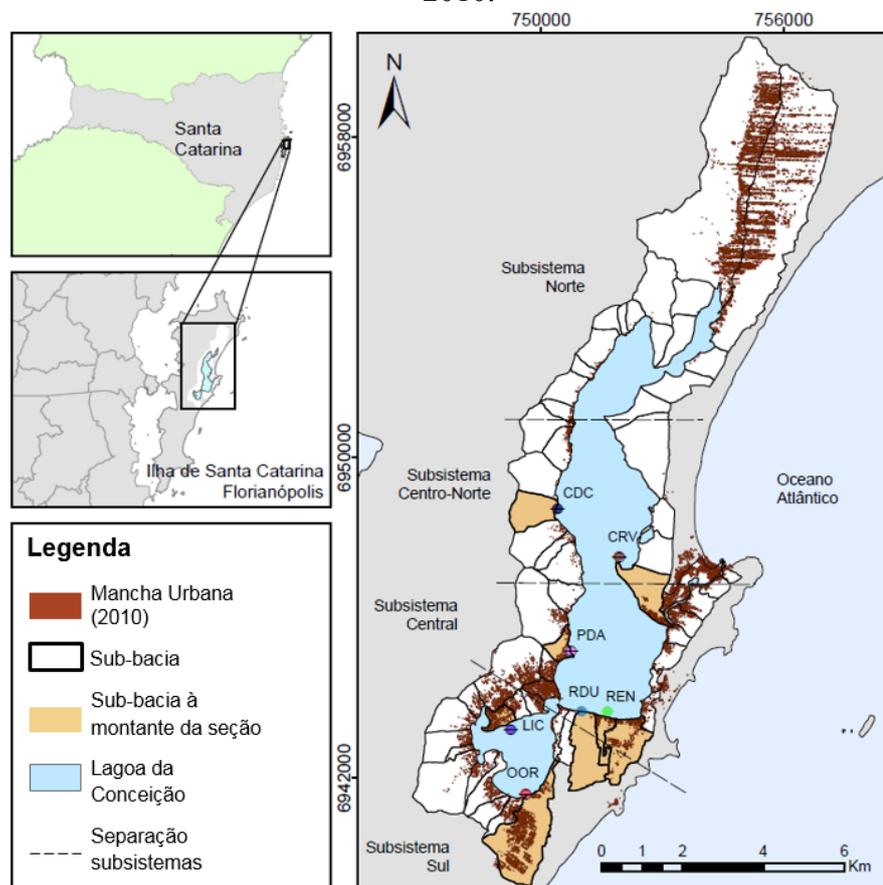
As elevações máximas no interior da Lagoa ocorrem com um atraso de aproximadamente 4 horas em relação ao nível de preamar do oceano na entrada do canal (ANDRADE, 2001). A variação do nível d'água no interior da laguna ocorre sem defasagem significativa, ou seja, durante a entrada e saída de água a laguna enche-se e esvazia-se uniformemente (ROCHA, 2007; GODOY, 2009). Segundo Rocha (2007), a estreita passagem entre a Lagoa de Cima e a Lagoa de Baixo não é capaz de influenciar em mudanças de amplitude de variação do nível entre os dois subsistemas. Porém, Oliveira (2016), a partir de simulações com o modelo TELEMAC-3D, verificou significativas diferenças de nível entre os subsistemas da laguna, constatando que o vento possui uma forte função na circulação da laguna. Além de causar variação de nível entre a laguna e o oceano, o vento também é responsável por um forte desnível lagunar, causando variação no nível ao longo dos três setores em situações de maré meteorológica.

### 3.7 OCUPAÇÃO URBANA

O uso e a ocupação dos solos exercem influência marcante no escoamento superficial, aporte de sedimentos, matéria orgânica e nutrientes no leito dos mananciais, podendo alterar a qualidade e a disponibilidade da água. A Figura 11 apresenta a mancha urbana da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição no ano 2010 conforme Machado (2018). É possível destacar 4 zonas de concentração urbana. A primeira, de urbanização moderada, no norte da bacia, compreendendo a região do Rio Vermelho. Outra, localizada em torno do canal da Barra da Lagoa, no centro-leste. A terceira, zona no sul, englobando a região do Porto da Lagoa e

Canto da Lagoa, e a última com maior nível de urbanização, está situada no centro-oeste da bacia e que representa o Centrinho da Lagoa.

Figura 11 - Mancha urbana para bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição para o ano de 2010.



Fonte: Adaptado de Machado (2018)

A Tabela 7 apresenta o nome e as coordenadas das seções de monitoramento estudadas, assim como a área total, área urbanizada e população total das SBHs a montante das seções.

Tabela 7 - Nome e coordenadas das seções amostradas e caracterização da sub-bacia a montante à seção: área total, área urbanizada e população.

Ponto	Coordenadas WGS84 - UTM	Sub-bacia hidrográfica (SBH) à montante				
		Nome	Sigla	X (m)	Y (m)	Área (m <sup>2</sup> )
Costa Rio Vermelho	CRV	751925	6947527	99.973,5	52.806,4	626
Rendeiras Mar	RMA	752081	6943529	116.429,3	72.270,8	752
Rendeiras Meio	REN	751456	6943661	34.681,1	20.540,1	214
Rendeiras Dunas	RDU	750999	6943681	127.399,8	1.521,5	16
Osni Ortiga	OOR	749.620	6941606	244.183,0	158.235,0	1.647
Lagoa Iate Clube	LIC	749245	6943217	30.080,5	60.098,9	626
Ponta das Almas	PDA	750734	6945174	31.142,2	25.865,3	269
Costa da Cachoeira	CDC	750398	6948726	86.702,7	760,7	8

\*População em 2010 por sub-bacia.

As SBHs com maiores áreas urbanizadas são OOR e RMA estas apresentam para o ano 2010, 1.647 e 752 habitantes, respectivamente. Por outro lado, a SBH do ponto CDC não possui área urbana significativa. Os pontos do subsistema central REN e PDA apresentam valores médios para população total de 214 e 269 habitantes respectivamente (MACHADO, 2018). Como áreas residenciais e distritos comerciais são as principais fontes de efluentes domésticos, espera-se que os pontos amostrados à jusante de SBHs menos populosas apresentem melhor qualidade da água.



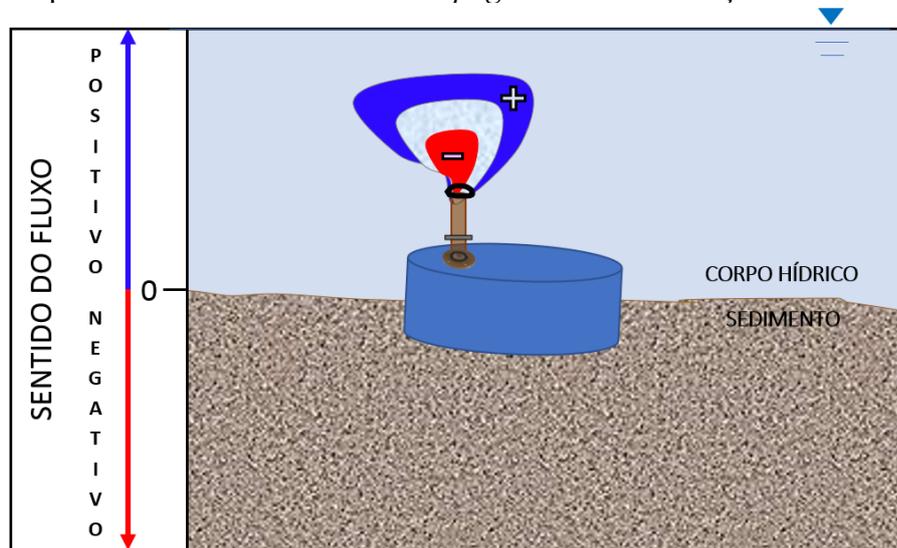
#### 4 EXPERIMENTO DE CALIBRAÇÃO DO *SEEPAGE METER*

Os *seepage meters* são equipamentos utilizados para medir diretamente o fluxo de água através da interface sedimento-água. O valor do fluxo medido pelo *seepage* ( $\phi_{SP}$ ) é menor que o fluxo real ( $\phi_R$ ), devido às perdas de carga através dos componentes do instrumento. Diversos motivos podem causar resistência substancial ao fluxo no aparelho, portanto, as medições realizadas com os *seepage meter* devem ser multiplicadas por um fator de correção (FC), resultante do inverso da razão  $\phi_{SP}/\phi_R$ , definida como a eficiência do equipamento.

Esta seção apresenta o desenvolvimento e resultados da construção de um tanque de fluxo controlado, de baixo custo, para determinar o FC que visa à compensar a perda de carga do equipamento. Para tal, é requerido um sistema que possua capacidade de gerar, durante um intervalo de tempo, fluxos de infiltração conhecidos através da interface sedimento-água, que permita a construção e testes comparativos entre distintos modelos de *seepage meters*.

O sentido do fluxo na interface sedimento-água, vem definido, neste trabalho, como positivo quando em direção ao corpo hídrico e negativo quando em direção ao manancial subterrâneo (Figura 12). O sistema de controle de fluxo no tanque de calibração, deve ser preciso e representar, tanto o fluxo positivo, quanto o negativo.

Figura 12 - Esquema de funcionamento do *seepage meter* e convenção dos sentidos do fluxo.



O sentido do fluxo, positivo ou negativo está representado pelas setas azul e vermelha respectivamente. Quando o fluxo é positivo o volume final da bolsa coletora é maior que o inicial (bolsa azul). Se o fluxo é negativo, o volume final é menor que o inicial (bolsa vermelha).

O tanque de fluxo, deve ser circular e grande o suficiente para permitir a instalação de pelo menos três *seepages*. Possibilitando a determinação dos efeitos das variações em cada um dos *seepages* e na operação dos mesmos. Exemplos de testes que podem ser realizados incluem, variações nos tipos de medidores, como tamanhos e tipos de bolsa, distintas formas de acoplar a bolsa ao medidor e variações das taxas de infiltração.

Os fatores de correção verificados para outros projetos de *seepage meter*, por Erickson (1981), Cherkauer and McBride (1988), Dorrance (1989), Asbury (1990), Belanger and Montgomery (1992), Murdoch and Kelly (2003) e Rosenberry (2005), variaram de 1,05 (Rosenberry, 2005) a 1,74 (Erickson, 1981). Essa ineficiência diminuiu ao longo do tempo, com melhorias no *design* do medidor de infiltração (Rosenberry, D. O 2006). Rosenberry (2005), obteve a eficiência dos tambores através da razão média entre os 26 testes realizados para o intervalo de fluxos de 5 a 37 cm/dia. A média apontou uma eficiência de 0,95. Isto indica que o fator de correção é de 1,05. Enquanto, Belanger e Montgomery (1992) encontraram eficiências de 0,77 a 0,64 para as taxas de 9,6 a 69,1 cm/d e consideraram a média dos valores de eficiência para taxas menores 48 cm/d determinando um fator de correção igual 1,3.

#### 4.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA EXPERIMENTAL

Nesta seção será realizada a descrição do sistema experimental, montado em laboratório, que inclui a confecção dos *seepage meter*, do tanque de fluxo e do sistema hidráulico.

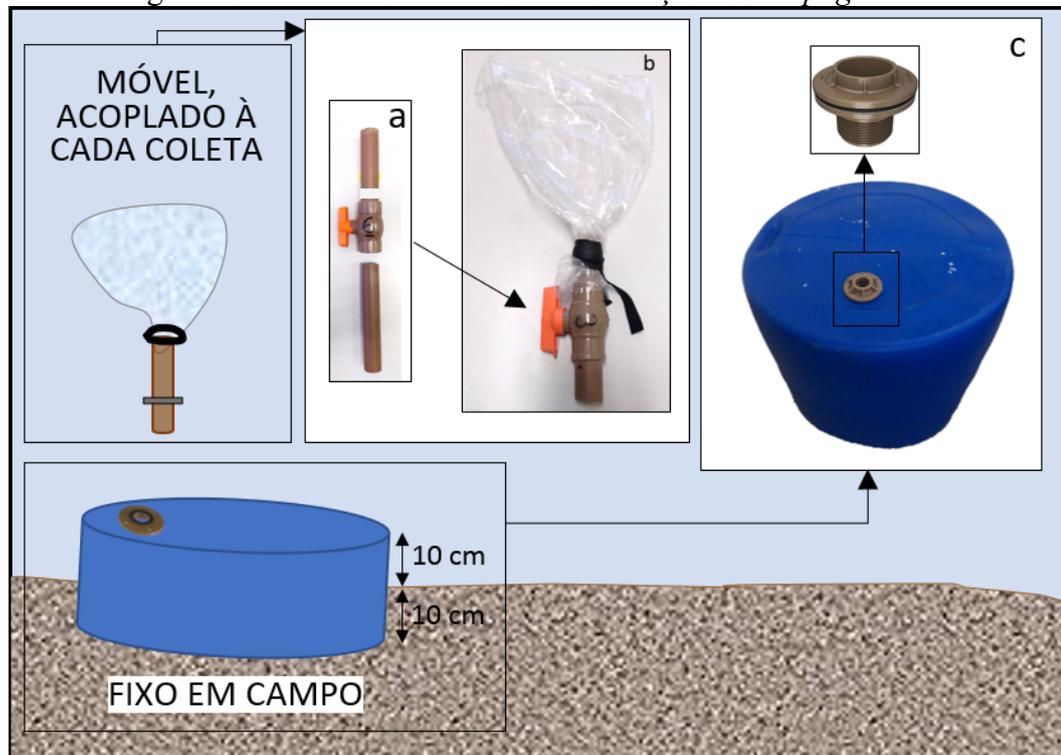
##### 4.1.1 *Seepage meter*

Para o levantamento de dados da interação dos fluxos subterrâneos, foram confeccionados *seepage meters*, com base nas metodologias descritas por Lee (1977), adaptado por Rosenberry (2008). Os componentes utilizados na construção do *seepage meter* foram:

- Tubo de PVC DN25, limpo que encaixe perfeitamente ao conjunto flange, impossibilitando vazamentos (Figura 13a);
- Registro de esfera (PVC DN25) para unir o tambor ao tubo coletor permitindo que o sistema seja desmontado sem operações destrutivas (Figura 13a)
- Venda de borracha para acoplar a bolsa coletora ao tubo (Figura 13b);
- Bolsa coletora de plástico (Figura 13b). O tamanho da sacola depende da taxa de infiltração e do período de tempo adotado para as coletas.
- Metade de um tambor cilíndrico de Polietileno de alta densidade, de aproximadamente 200 litros, com 58,2 cm de diâmetro interno (DE60) e 85 cm de altura (Figura 13c);

- Conjunto flange (PVC) com o-ring para vedação, (Figura 13c).

Figura 13 - Materiais utilizados na confecção dos *seepage meter*.



Componentes do equipamento *seepage meter*: a: tubos e registro que compõe o medidor; b: medidor com a bolsa coletora vedada com a venda de borracha; c: tambor com flange instalada para o acoplamento do medidor (b).

A bolsa coletora acoplada ao tambor é a peça mais importante do equipamento, e também, a maior fonte de erros de medição. O material da bolsa deve ser impermeável e resistente, porém não ao ponto de oferecer resistência para o fluxo. A bolsa coletora escolhida foi um saco de polietileno com espessura de 0,6 mm e dimensões 25 cm por 35 cm. A bolsa deve ser amarrada ao tubo do medidor com a venda de borracha de maneira que a bolsa fique distribuída uniformemente no perímetro do tubo, caso contrário as taxas de infiltração medidas sofrerão alterações.

O orifício onde foi acoplado o tubo e a bolsa plástica foi feito no topo ou na borda do galão. Quando instalado, o lado do *seepage meter* com o orifício deve estar ligeiramente elevado, permitindo que qualquer gás escape livremente. A bolsa deve permanecer totalmente submersa para que o *seepage meter* e as águas superficiais circundantes mantenham a mesma carga hidráulica.

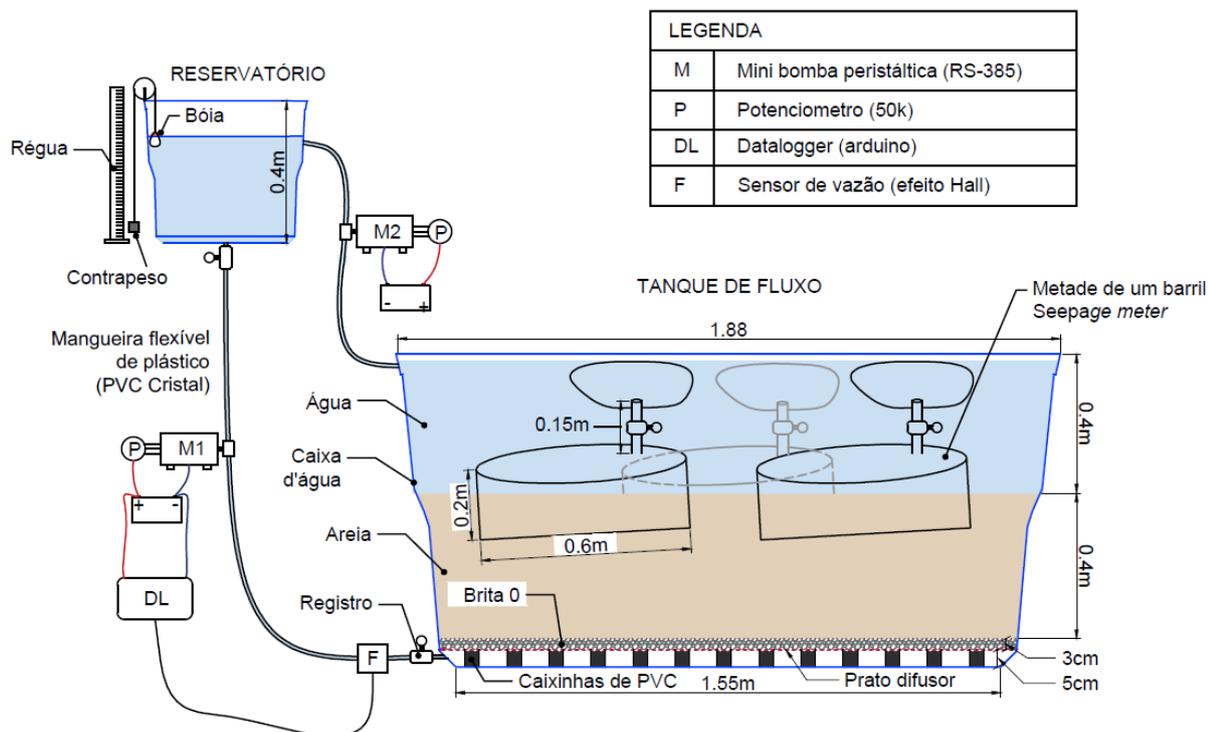
A instalação em campo deve ser realizada em um local livre de vegetação, detritos e pedras grandes. Além disso, o acúmulo de matéria orgânica gera a produção de gases que devem

ser evitados. Quanto mais fofo o solo onde *seepage meter* será instalado maior deve ser a profundidade que o mesmo deve ser enterrado até que seja obtida a vedação adequada. Em solos relativamente compactos, como o da Lagoa da Conceição uma profundidade de 8 a 10 cm é considerada adequada.

#### 4.1.2 Tanque de fluxo controlado

O tanque de fluxo controlado, onde as descargas através da interface sedimento-água é foi simulada, consiste em uma caixa d'água de polietileno de 2.000 litros de capacidade, é abastecido por um reservatório menor de 35 litros (Figura 14). O esquema do projeto do tanque de fluxo é apresentado na Figura 14, e as fotos do projeto executado na Figura 19.

Figura 14 - Componentes do sistema de calibração para *seepage meter*.

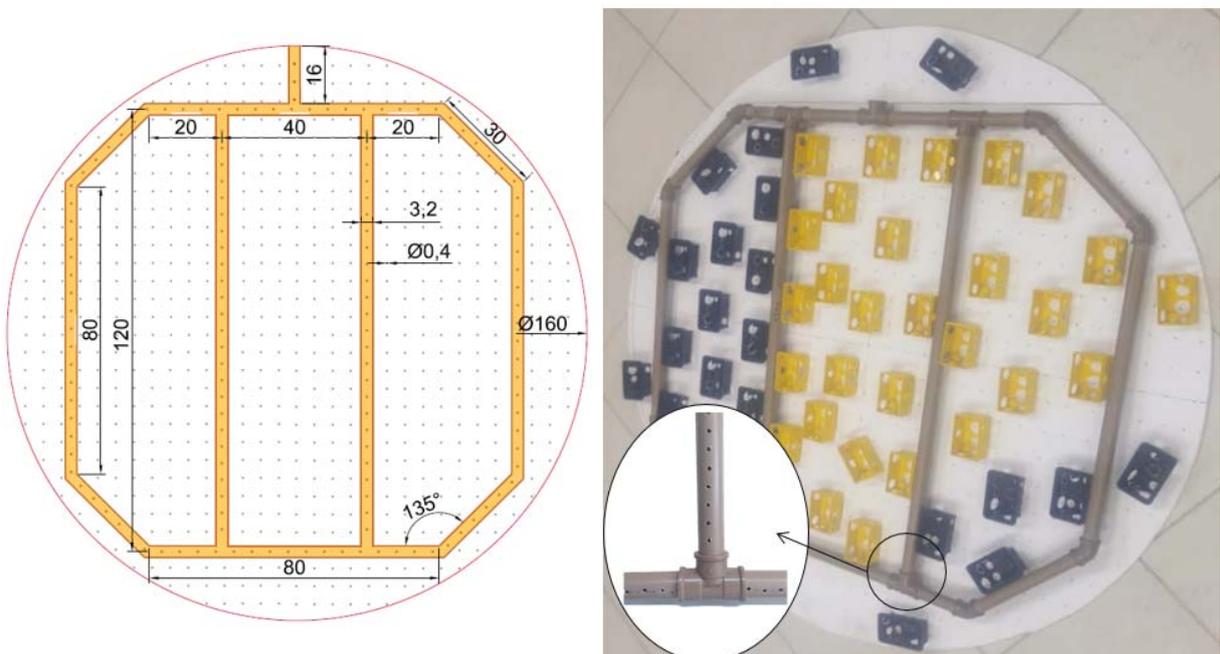


O sistema opera com duas bombas para controlar e recircular o fluxo. As bombas operam permitindo elevação e aspiração. Quando queremos simular o fluxo positivo (setas azuis), a bomba 01 que abastece o tanque de fluxo opera no modo elevação, e a bomba 02, que abastece o reservatório opera no modo aspiração. Enquanto para simular o fluxo negativo (setas vermelhas pontilhadas) as bombas operam de maneira inversa. Para controlar o fluxo da bomba, é instalado um potenciômetro para cada bomba, o nível do reservatório é controlado através de um sistema de boia-contrapeso. O fluxo de entrada e saída do tanque de calibração deve ser o mesmo, este processo mantém a diferença hidráulica entre o reservatório e o tanque de fluxo constante. Antes da entrada do tanque é instalado um registro, um hidrômetro e um sensor de vazão. O sensor de vazão envia informações de fluxo em tempo real para o datalogger arduino.

A base do tanque de fluxo foi construída com uma placa de difusora de PVC, de 1,60 m de diâmetro que possui uma grade de furos de 4 mm de diâmetro, espaçados em uma malha de

6mmx5mm, para permitir a distribuição uniforme do fluxo de água através da placa (Figura 15, à esquerda). A base foi sustentada por acoplamentos de PVC (“caixinhas de luz”) utilizados para suportar a placa e o peso da areia e água que repousavam sobre a placa. As caixinhas foram fixadas com cola para PVC e posicionadas de modo que nenhum orifício da placa difusora fosse bloqueado (Figura 15, à direita). A água foi distribuída por um sistema composto por tubos de 32 mm perfurados, instalados abaixo da placa difusora. Os furos possuíam 5mm de diâmetro, e estão distribuídos uniformemente a cada 2 cm (Figura 15, à direita).

Figura 15 - Dimensões da base difusora do tanque de fluxo, acoplamentos de PVC para sustentação e o sistema de distribuição de água.



À esquerda projeto com as dimensões da base difusora do tanque de fluxo e à direita base difusora pronta com os acoplamentos de PVC para sustentação e o sistema de distribuição de água.

A placa difusora foi cuidadosamente encaixada no fundo do tanque de fluxo e, em seguida foi utilizada massa para calafetação e fita “*silvertape*” para selar a borda da placa a parede do tanque, afim de evitar qualquer fluxo preferencial em torno da borda da placa difusora (Figura 16).

Figura 16 - Base difusora encaixada no fundo do tanque de fluxo, com massa para calafetação e fita “silvertape” para selar a borda



Afim de garantir a integridade dos furos da placa difusora, foi colocado sobre a placa uma Manta Geotêxtil Bidim RT 07, um não tecido agulhado de filamentos contínuos 100% de poliéster, utilizado como manta para drenagem, proteção e reforço do solo. Graças a sua alta permeabilidade, proporciona a livre passagem da água de infiltrações para o meio drenante, garantindo que os furos da placa difusora não entupissem com sedimentos de grão fino. A Tabela 8 apresenta as propriedades hidráulicas da manta.

Tabela 8 - Propriedades Hidráulicas da Manta Geotêxtil RT 07

<b>Propriedades Hidráulicas</b>	<b>Permissividade</b>	<b>Fluxo de água</b>	<b>Permeabilidade normal</b>	<b>Abertura aparente</b>
<b>Valor</b>	2,5	7.450	0,4	0,212 (70)
<b>Unidade</b>	s <sup>-1</sup>	(l/min)/m <sup>2</sup>	cm/s	mm

Fonte: Ficha técnica Manta Geotêxtil RT 07

A partir de ensaios granulométricos realizados em diferentes pontos da laguna onde os *seepage meters* seriam instalados, verificou-se que o diâmetro efetivo ( $d_{10}$ ) variava de 0,05 mm a 0,17 mm, enquanto que o  $d_{50}$  variava de 0,21 mm a 0,26 mm. A camada de areia utilizada no tanque de fluxo apresenta  $d_{10}$  igual a 0,10 mm e  $d_{50}$  igual 0,19 mm. O tanque de fluxo possui uma camada de 40 cm de areia e 40 cm de água. As espessuras de areia e água foram selecionadas para maximizar a espessura da areia garantindo a profundidade de água adequada para submergir completamente uma variedade de tipos e tamanhos de *seepage meters*. Na Figura 17, é possível observar as dimensões do tanque de fluxo controlado, assim como, dos *seepages* e medidores instalados no tanque. A Figura 18, à esquerda, exhibe o posicionamento dos *seepages* em planta na base difusora, enquanto à direita observa-se a foto dos *seepages* já instalados no tanque de calibração.

Figura 17 - Dimensões itens componentes do sistema de calibração.

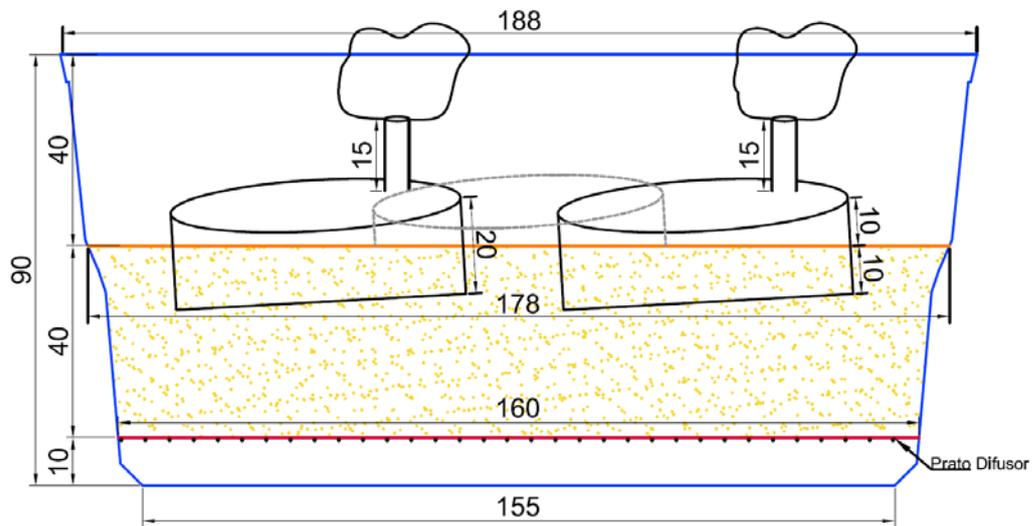
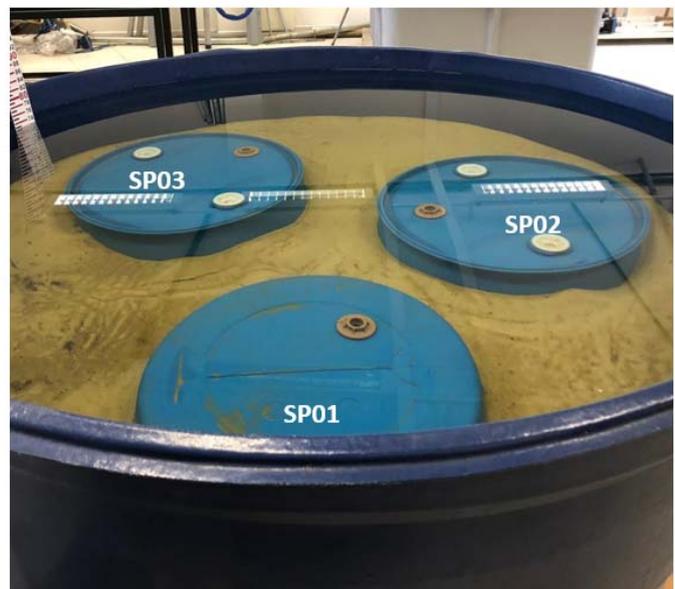
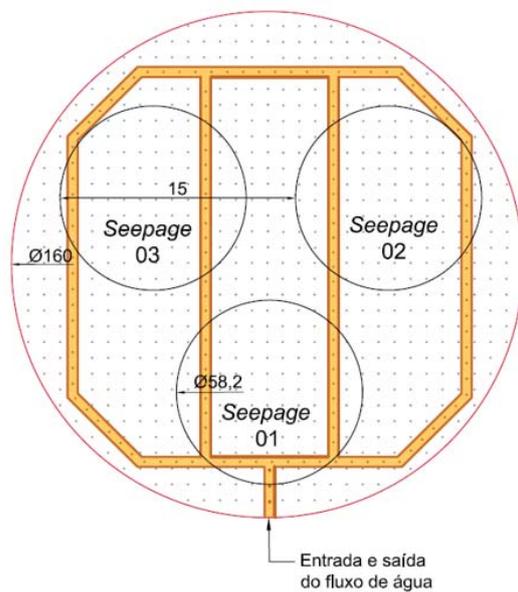
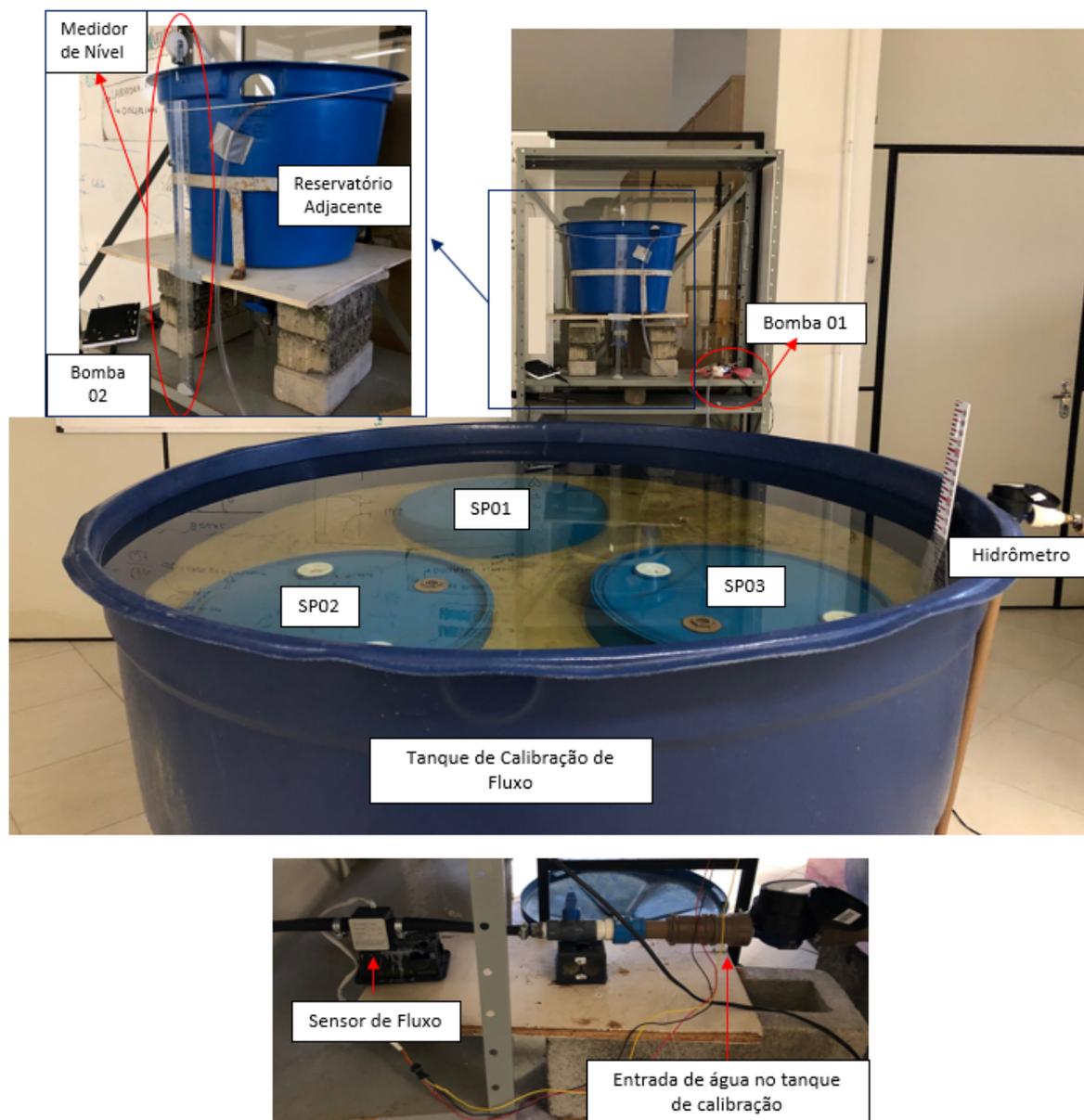


Figura 18 - Posicionamento dos *seepage meters* no tanque de calibração. À esquerda planta do posicionamento dos tambores em relação ao sistema de distribuição de água e à direita tambores já instalados no tanque.



A Figura 19 apresenta as fotografias com a descrição dos componentes do projeto do tanque de calibração após sua execução.

Figura 19 - Fotos do projeto tanque de calibração executado.



#### 4.1.3 Sistema hidráulico

O sistema hidráulico do tanque de fluxo opera de duas maneiras. Quando o fluxo é positivo, a água é encaminhada por gravidade ou através de uma mini bomba conectada tubos flexíveis de plástico (PVC Cristal), com diâmetro interno de 8mm, do reservatório adjacente, até a base do tanque de fluxo. A mini bomba de água RS-385 é capaz de impulsionar entre 1500ml a 2000ml por minuto, opera com tensão de 12V, permitindo elevação máxima de até 3 metros e altura de aspiração de até 2 metros. A água retorna do tanque de fluxo controlado

para o reservatório através de uma segunda bomba com as mesmas características. As bombas são conectadas à uma fonte de energia através de um interruptor. Para controlar o fluxo da bomba, foi instalado um potenciômetro para cada bomba. O circuito completo das bombas é apresentado no APÊNDICE A – CIRCUITO DAS BOMBAS. Os fluxos simulados devem ser constantes. Para tal, os níveis de água em ambos os tanques devem ser mantidos virtualmente constantes (o nível no reservatório de menor diâmetro foi alterado em apenas 1,5 mm). O fluxo de retorno médio deve ser igual ao fluxo acionado por gravidade de um tanque para o outro.

Tanto para o fluxo positivo, quanto para o fluxo negativo, a taxa de fluxo entre o reservatório e o tanque de calibração foi monitorada com um sensor de efeito Hall, Sensor de Fluxo OF05ZAT. O rotor, que gira a uma taxa proporcional à velocidade da água que flui através do orifício do medidor, envia um pulso elétrico para o registrador de dados para cada revolução. O *datalogger* soma os pulsos em cada incremento de tempo de 60 segundos, e um multiplicador e *offset* são usados para converter pulsos por 60 segundos para a velocidade de fluxo, as informações podem ser monitoradas ao vivo através de um leitor LCD e também são armazenadas em um cartão de memória SD. O medidor de vazão foi capaz de medir vazões variando de 330 a 900 mililitros por minuto (ml/min). Isso se traduz em fluxos de infiltração no tanque de fluxo variando de 23 a 64 centímetros por dia (cm/d) (obtidos pela conversão de pulsos para fluir, em mililitros por minuto, e, então, multiplicando por 1.440 minutos por dia e dividindo pela área de superfície do tanque de calibração (20.096 cm<sup>2</sup>).

A medição do volume nos coletores foi feita antes e após o período de amostragem, utilizando uma balança de precisão ou proveta de 1000 mL graduada. As DAS foram calculadas pela Equação 3:

$$DAS = \frac{V_{final} - V_{inicial}}{\Delta T \times A} \times 1.440 \quad (3)$$

onde:

DAS: descargas de águas subterrâneas [cm/dia];

V: Volume inicial e final amostrado [mL];

$\Delta T$ : Período de amostragem [min];

A\*: Área do *seepage meter* ou do tanque de calibração [cm<sup>2</sup>].

O sistema de aquisição de dados do medidor de vazão foi desenvolvido para receber o sinal de saída do sensor eletromagnético e convertê-lo em vazão e foi provido de rotinas para medidas instantâneas da vazão. O sistema de aquisição de dados baseado no Arduino foi acoplado a uma tela LCD onde os valores medidos serão mostrados ao usuário. O APÊNDICE B – PROJETO *DATALOGGER* ARDUINO MEDIDOR DE VAZÃO, apresenta todos os detalhes construtivos e operacionais do sistema Arduino desenvolvido para o sensor de vazão.

## 4.2 RESULTADOS DO EXPERIMENTO DE CALIBRAÇÃO

### 4.2.1 Calibração do sensor de fluxo

Antes de medir o fluxo que entra no tanque é necessário calibrar o sensor e determinar o coeficiente de vazão  $K$ . Este é necessário para a conversão do sinal captado em vazão pode ser uma reta particular para cada medidor e dependente da viscosidade do fluido. Para converter impulsos do medidor de vazão em um fluxo volumétrico (por exemplo, fluxo em litros por minuto), com a requerida acurácia, o sensor deve ser calibrado através de uma taxa de fluxo conhecida.

Primeiramente, para determinar qual a faixa de operação do sensor de fluxo, foi realizada uma análise das descargas medidas em campo afim de determinar a taxa das descargas simuladas no tanque. Para o fluxo positivo, estas taxas variam de 0 a 28 cm/d. Verificado isto, foi realizado um estudo para verificar quais medidores de fluxo eram compatíveis com o sistema Arduino e que contemplavam a faixa de vazão desejada. Infelizmente não foram encontrados sensores para vazões abaixo de  $\sim 0,033$  l/min, o que equivale, para a área tanque de fluxo controlado, à uma descarga de 24 cm/dia. Após homologação teórica do sensor com o melhor custo benefício, este foi adquirido e calibrado para a faixa requerida.

A reta de calibração foi estimada através da relação entre a vazão volumétrica real determinada a partir do tempo (4 minutos) necessário para o escoamento de um volume conhecido de água ( $\sim 20^\circ$ ) e os pulsos medidos através dos sinais elétricos captados pelo sensor de efeito hall pelo algoritmo programado no Arduino.

Foram realizadas duas calibrações para o sensor. A segunda calibração foi realizada pois, após alguns dias de funcionamento o sensor perdeu a sensibilidade para pequenos fluxos. Afim de garantir a eficiência do sensor, este foi aberto para verificar se não havia nenhum resíduo nas engrenagens. A Tabela 9 apresenta os resultados do modelo de regressão linear para as duas calibrações. O nível de significância adotado foi de  $5\% = 0,05$ , que é equivalente a um intervalo

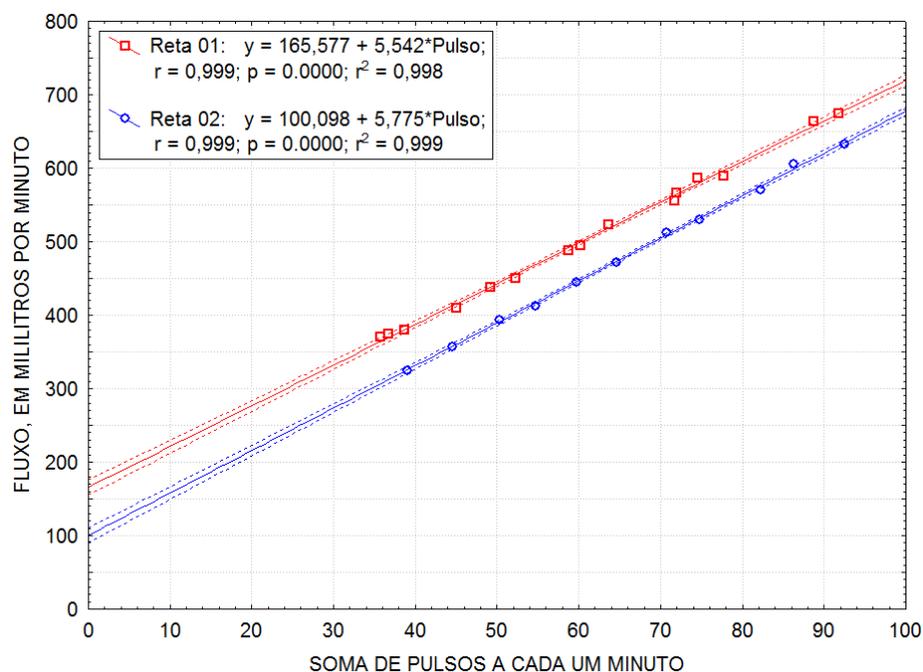
de confiança de 95%. O p valor obtido foi de 0,0000, que é inferior ao nível de significância de 5%, ou seja, existe diferença significativa entre as médias de pelo menos um dos grupos e a regressão é válida.

Tabela 9 - Modelo de regressão linear para as duas calibrações do sensor de fluxo.

Variável	Reta	n	B	Desvio Padrão ( $\sigma$ )	p-level	Lim. de Conf.		R	R <sup>2</sup> Ajustado
						-95%	+95%		
Intercepto	01	15	<b>165,58</b>	4,93	0,000	154,92	176,23	0,999	0,998
Pulsos			<b>5,54</b>	0,08	0,000	5,37	5,71		
Intercepto	02	11	<b>100,10</b>	4,47	0,000	89,99	110,21	0,999	0,999
Pulsos			<b>5,78</b>	0,07	0,000	5,63	5,93		

A Figura 20 apresenta a regressão linear para a faixa de pulsos e a vazão proporcional aos mesmos para as duas calibrações Reta 01 (antes de abrir o sensor) e Reta 02 (após abertura do sensor). As medidas devem ser feitas em ordem aleatória, testes randômicos garantem a confiabilidade dos dados.

Figura 20 - Regressão linear entre a soma dos pulsos emitidos pelo sensor de fluxo e o volume medido em um minuto.



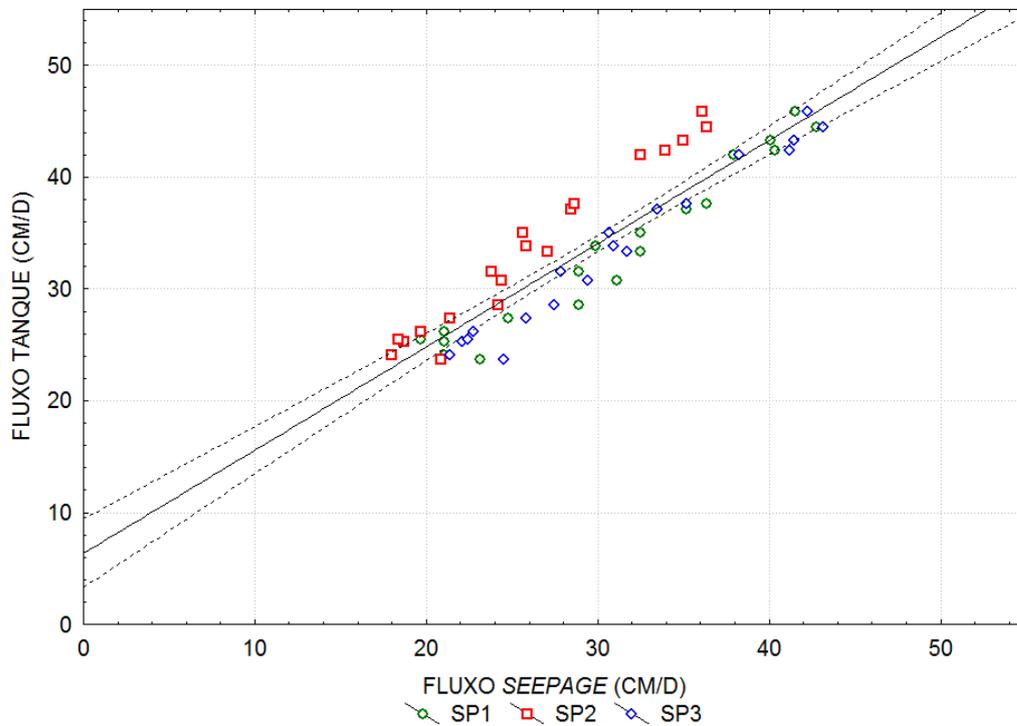
O modelo em estudo apresenta duas retas, Reta 01 (vermelho) e Reta 02 (azul) para o fluido água, com intervalo de confiança de 95% das retas está representado pelas linhas pontilhadas. Como p valor é igual a zero a hipótese nula é rejeitada, sendo assim o declive não é nulo para qualquer nível de significância. O R<sup>2</sup> para ambas as retas é superior a 0,99, ou seja 99% da variação do fluxo é explicada pela reta de regressão.

#### 4.2.2 Determinação do fator de correção

Tendo como base as metodologias de estudos anteriores utilizadas para calcular o fator de correção, neste estudo, optou-se por calcular o fator através da regressão linear dos dados obtidos no teste de calibração, afim de conhecer não só a eficiência dos *seepage meters*, dado pela inclinação da reta, mas, também a estimativa do intervalo de confiança dos valores observados. Este representa uma medida da qualidade global da linha de regressão, e possibilita considerar uma faixa de valores, afim de representar as incertezas sobre os dados obtidos em campo. Visto que os estudos anteriores consideraram uma razão entre valores, a regressão deve ser realizada sem a intercepta.

A fim de que se pudesse testar a eficiência dos *seepage meter* para toda a faixa de descargas encontrada em campo, foram realizados 19 testes, que contemplaram uma gama de vazões de 23 cm/d (mínimo medido pelo sensor) à 46 cm/d (valor superior a DAS máxima encontrado em campo). Visto que o Arduino foi programado para somar os pulsos do sensor a cada 60 segundos, as medições foram realizadas durante um intervalo de tempo de 15 minutos. No gráfico do tipo *scatterplot* da Figura 21 são apresentadas as variáveis fluxo dos *seepages* e fluxo do tanque. A forte correlação positiva ( $R^2 = 0,895$ ) comprova que ambas estão relacionadas. A Figura 21 apresenta a equação da reta do gráfico de dispersão considerando a intercepta. Para realizar a regressão linear os modelos serão executados com intercepta igual a zero. O  $R^2$  encontrado é igual a 0,859. No gráfico de dispersão, é possível observar ainda que o *seepage* 02 (SP2) apresenta valores afastados da reta, os volumes medidos no *seepage* 02 para todos os testes foram inferiores aos volumes medidos no *seepage* 01 e 03 (SP1 e SP3). O que aponta que, na região do tanque de fluxo controlado onde está localizado o SP2 o fluxo é menor devido a alguma irregularidade no aspecto construtivo. As possíveis causas para a redução do fluxo no local são a obstrução de alguns furos na placa difusora devido ao mal posicionamento de uma “caixinha de luz”, a inclinação da tubulação de distribuição de água, ou o conjunto das duas hipóteses.

Figura 21 - Gráfico *scatterplot* do fluxo conhecido no tanque (cm/dia) em relação ao fluxo medido nos *seepage meters* (cm/dia).



Onde SP1 está representado em vermelho, SP2 em verde e SP3 em azul. A reta do gráfico de dispersão está representado pela linha preta enquanto a linha pontilhada apresenta intervalo de confiança de 95% da reta.

A partir das descargas medidas nos três *seepages* instalados no tanque de calibração e do fluxo de entrada conhecido do tanque, foi realizada uma regressão linear simples para estabelecer uma equação matemática linear que descreve o relacionamento entre duas variáveis, uma dependente (fluxo do tanque) e outra independente (fluxo do *seepage*), com a finalidade de estimar a eficiência dos *seepage*, e, a partir do inverso da eficiência, estimar um fator de correção para as medidas realizadas pelos *seepages*. Assim, foi possível estimar a descarga real dos *seepage* instalados em campo. O resultado do modelo de regressão sem intercepto encontra-se na Tabela 10. A Tabela 10 apresenta três modelos de regressão, o primeiro, considerando os dados de todos os *seepages* instalados no tanque de calibração. O segundo, considerando apenas os SP1 e SP3. O último, apresenta o modelo de regressão considerando apenas o SP2. Os distintos modelos foram testados a fim de observar qual a diferença entre eles, apesar do modelo gerado a partir das amostras dos tambores SP1 e SP3 ( $n=38$ ), possuir um melhor ajuste ( $R^2 = 0,96$ ) e a eficiência dos dois tambores ser de 0,93. Para este estudo foi adotado o modelo realizado com todos os *seepages*, totalizando  $n$  igual a 57 amostras. Mesmo com o SP2

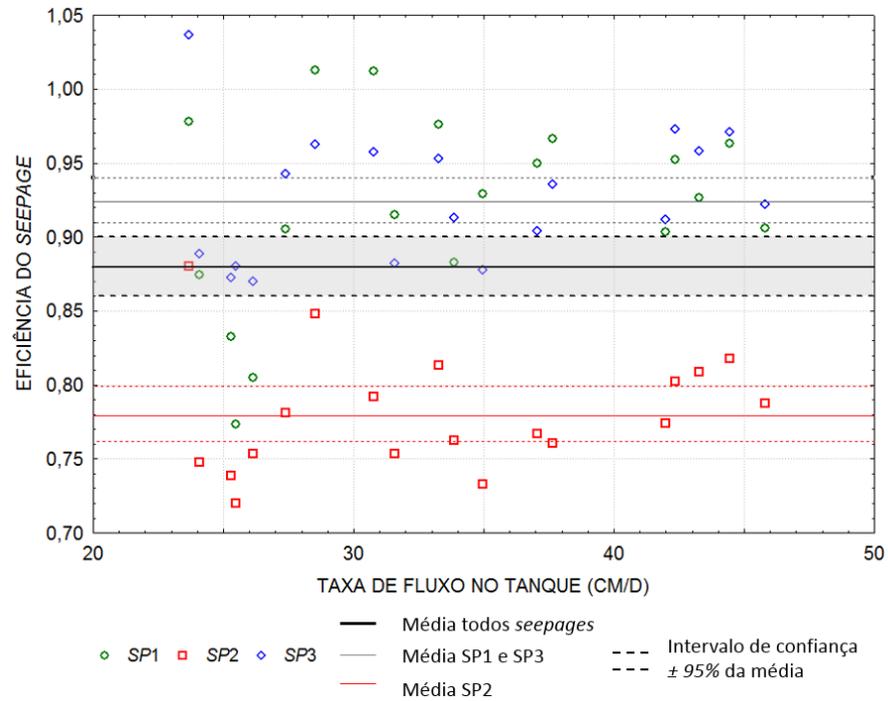
apresentando fluxos inferiores aos outros dois tambores, a opção de manter as medidas dos três tambores para as análises se deu afim de representar as variações também existentes na natureza, devido a fluxos preferencias das águas, diferença de granulometria, entre outros motivos. O coeficiente angular, B, da regressão, é igual a 0,88 e o desvio padrão 0,011. Assim, o intervalo de confiança dentro do qual o valor verdadeiro da eficiência cairá, considerando o nível de confiança de 95%, vai de 0,86 a 0,90. Sendo assim, o fator de correção é igual a 1,14 sendo os limites de confiança de 1,11 a 1,16.

Tabela 10 - Valores do número de amostras (n) para os três modelos construídos (Todos, SP1 e SP3 e, SP2), eficiência do tambor dada pela inclinação da reta (B), desvio padrão de B ( $\sigma$ ), *p-level*, limites de confiança de B, coeficiente de correlação (R), coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o Fator de Correção (FC) mais ou menos o intervalo de confiança.

<i>Seepage</i>	n	B	p-level	Lim. de Conf.		R	$R^2$ Ajust.	Fator de Correção 1/B		
				$B \pm (t^* \sigma)$				-95%	FC	+95%
				-95%	95%					
<b>Todos</b>	57	<b>0,88</b>	0,000	0,90	0,86	0,927	0,859	<b>1,11</b>	<b>1,14</b>	<b>1,16</b>
<b>SP1 e SP3</b>	38	0,93	0,000	0,94	0,91	0,979	0,957	1,06	1,08	1,09
<b>SP2</b>	19	0,78	0,000	0,80	0,77	0,982	0,965	1,25	1,28	1,30

As taxas de descarga medidas nos *seepages* foram muito semelhantes ao fluxo controlado gerado para o tanque. As proporções de fluxos medidos para fluxos conhecidos com base nas 57 comparações, variaram de 0,72 a 1,04 (Figura 22). O valor de B (Tabela 10) e seus respectivos limites de confiança para todos os tambores, para SP1 e SP3 e para, somente, o tambor SP2, encontram-se destacados na Figura 22, através de linhas. Na Figura 22, fica evidente a discrepância do tambor SP2 em relação aos os outros tambores. A eficiência do tambor SP2, linha vermelha, encontra-se no intervalo de 77% a 80%. A eficiência, considerando os três tambores, linha preta, encontra-se no intervalo de 86% a 90%. Considerando os tambores SP1 e SP3, a eficiência, linha cinza, encontra-se no intervalo de 91% a 94%. Esta variação, como já descrito, deve-se a irregularidades no aspecto construtivo.

Figura 22 – Eficiência: razão entre as taxas de descargas medidas nos *seepages* e o fluxo conhecido no tanque controlado.



A linha preta representa a eficiência média para todos os tambores, a cinza dos tambores SP1 e SP3 e vermelha apenas do SP1. As linhas tracejadas apresentam o intervalo de confiança para as médias em um nível de 95%.



## 5 AS INTERAÇÕES ENTRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E SUPERFICIAIS NA LAGOA DA CONCEIÇÃO

O estudo das interações entre águas subterrâneas e superficiais (Asub-Asup) tem como objetivo quantificar balanços hídricos e avaliar os possíveis efeitos das atividades humanas em rios, lagos, lagunas e oceanos. Um dos aspectos importantes desses estudos é o desenvolvimento de metodologias de baixo custo para identificação e quantificação dos fluxos de água entre estes compartimentos.

Para quantificar os fluxos de águas subterrâneas na Lagoa da Conceição, serão monitorados os aportes ao longo de 6 seções em diferentes pontos da laguna mediante a utilização de *seepages meters* e piezomanômetros.

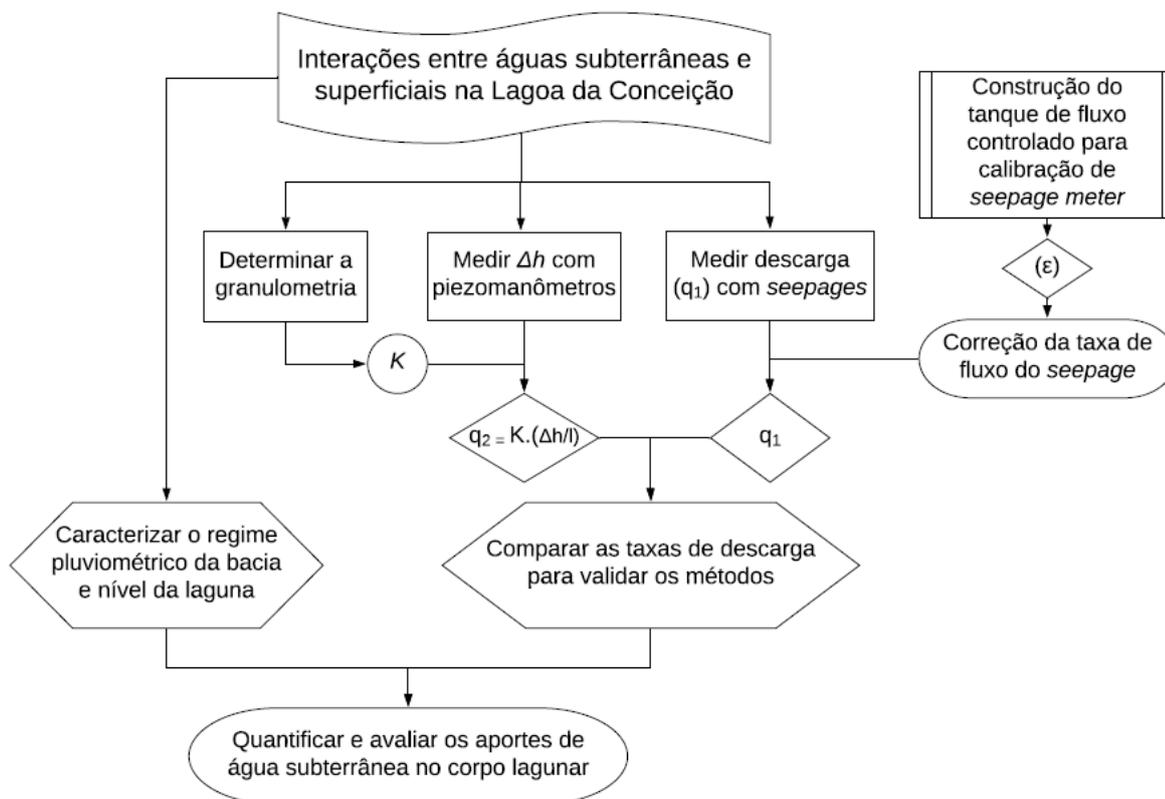
Ambos, representam métodos alternativos para a estimativa de fluxos de água e, por isso, foram utilizados como métodos complementares. Foi medido, em cada seção, a diferença de carga hidráulica ( $\Delta h$ ) com os piezomanômetros e, concomitantemente, a descarga ( $q_1$ ) através dos *seepages*. A partir da estimativa da condutividade hidráulica ( $K$ ) para cada seção, determinada através da análise granulométrica realizada para cada seção, foi possível estimar a descarga pelo piezomanômetro ( $q_2$ ) e assim validar os métodos.

As medições realizadas pelos *seepages* devem ser multiplicadas pelo fator de correção, determinado no item 4, para considerar as perdas por atrito através dos componentes do instrumento e ajustar as taxas de fluxo do *seepage meter* as taxas reais.

Para avaliar as descargas de águas subterrâneas no corpo lagunar é necessário analisar o regime pluviométrico e monitorar o nível interno e externo da laguna. Desta maneira, é possível verificar se há relação entre o nível interno da laguna e a chuva, ou se o mesmo depende apenas do nível externo. Conhecendo o comportamento dos níveis é possível verificar qual a influência dos mesmos sobre as DAS.

A Figura 23 apresenta o fluxograma metodológico aplicado para quantificar e avaliar os aportes de água subterrânea no corpo lagunar.

Figura 23 - Fluxograma da quantificação e avaliação dos aportes de águas subterrâneas na Lagoa da Conceição



## 5.1 LEVANTAMENTO DE DADOS EM CAMPO

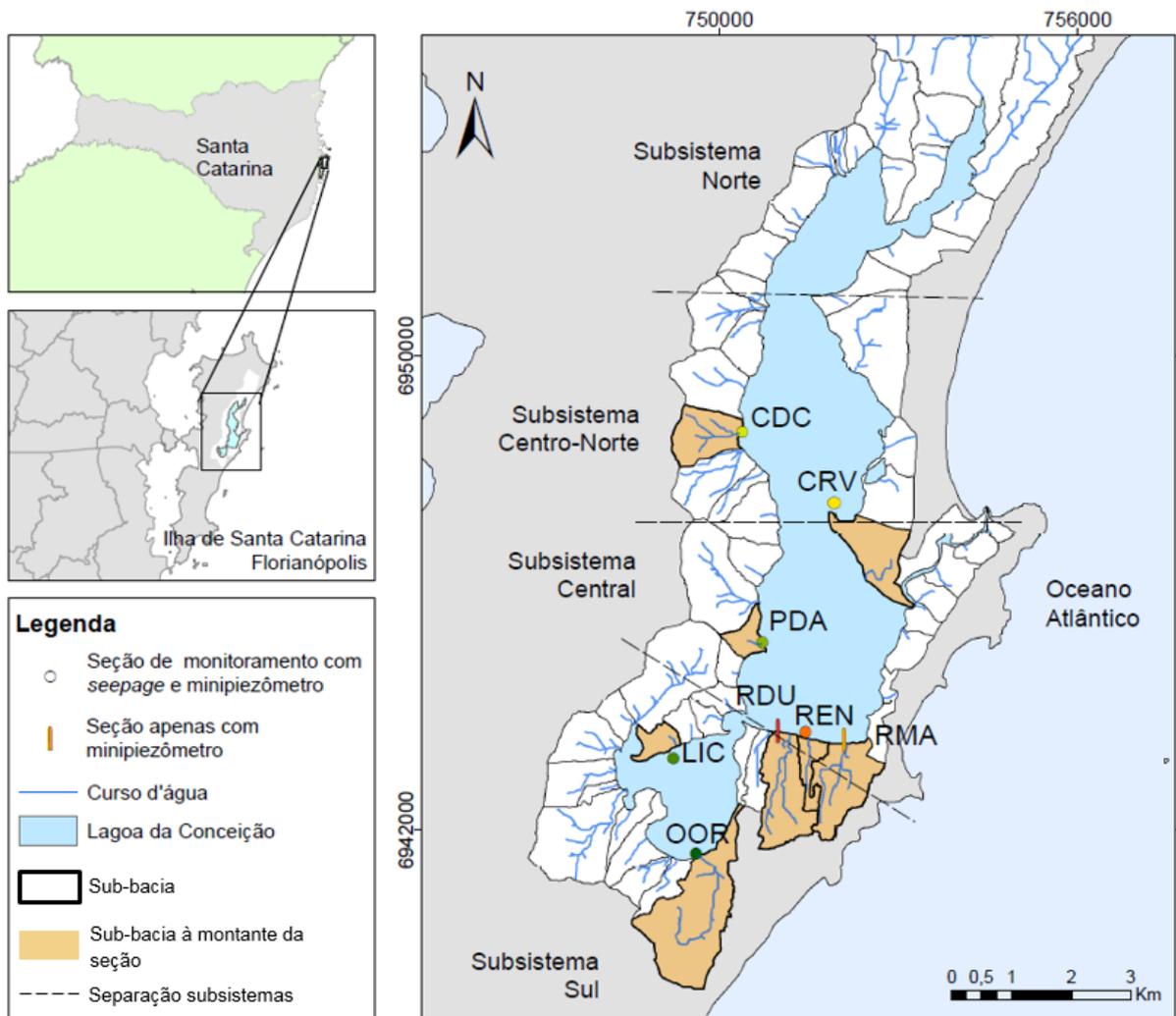
### 5.1.1 Localização das seções amostrais

A distribuição das estações amostrais selecionadas visou abranger as diferentes regiões da bacia hidrográfica a fim de investigar a variação espacial das interações Asub-Asup. A Figura 24, apresenta a localização das oito estações amostrais: Osni Ortiga (OOR), Lagoa Iate Clube (LIC), Ponta das Almas (PDA), Costa da Lagoa Cachoeira (CDC), Costa Rio Vermelho (CRV), Rendeiras Mar (RMA), Rendeiras (REN), Rendeiras Dunas (RDU). A sub-bacia de cada seção está destacada em preto.

A seções foram locadas a fim de estudar distintos setores da laguna. Assim cada seção apresenta características específicas. No subsistema sul, a OOR está locada próxima a uma região de recarga, devido aos solos bastante permeáveis (dunas) a sua montante. O LIC engloba a região mais urbanizada da bacia hidrográfica, possui elevada impermeabilização porem a seção encontra-se em uma região com baixa declividade, enquanto a seção PDA que encontra-se na mesma URH porem no subsistema central possui uma maior declividade. A seção CDC, encontra-se a jusante de uma sub-bacia com densa vegetação e baixa urbanização, o escoamento

superficial é o mais elevado da bacia, devido ao tipo de solo Argiloso e a alta declividade. A seção CRV representa uma zona de transição, pois é onde a resposta ao gradiente hidráulico formado pelo mar e a laguna deve ser mais rápido, além disso, representa uma planície litorânea, apresentando declividade da bacia muito baixa e solo arenoso, sendo assim toda a precipitação infiltra, caracterizando o setor como zona de recarga. A seção RMA, REN e RDU, também representam zonas de recarga, porém com a interferência da LEI.

Figura 24 - Localização da área de estudo, tipo de solo e estações de monitoramento.



Não foi instalado nenhum *seepage* na região extremo norte, pois, as águas são rasas, o que dificulta o acesso. Em cada seção foram instalados um mini piezômetro e três *seepages* para a obtenção da triplicata dos dados afim de garantir maior precisão e confiabilidade aos dados. Nas seções RDU e RMA, foram instalados apenas o mini piezômetro para as medições

com o piezomanômetro, pois, entre as duas seções, havia a seção REN com *seepages* piezomanômetros. Desta maneira era possível confrontar os resultados das três seções.

### 5.1.2 Estimativa de condutividade hidráulica

A estimativa de condutividade hidráulica se deu a partir da análise granulométrica do sedimento, onde foram realizadas duas etapas de amostragem (julho e novembro de 2018). Os sedimentos, na primeira etapa, foram coletados utilizando um *core sampler* de PVC. A primeira etapa (LIC, PDA, CDC, CRV e REN) foi realizada a uma profundidade de 0,70m. A segunda (OOR, RDU e RMA), devido a falta do *core sampler*, à uma profundidade de 0,20m (Figura 25). As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos, devidamente etiquetados e enviadas para o Laboratório de Oceanografia Costeira da UFSC. As análises foram realizadas no analisador de distribuição de tamanho de partículas por difração a *laser* Horiba LA-950.

Figura 25 - *Core sampler* e amostras de sedimento coletadas



Neste estudo foi utilizada a fórmula de Hazen (1892), para estimativa de condutividade hidráulica em areias saturadas, que leva em conta somente o diâmetro efetivo do material ( $D_{10}$ ) e o fator empírico de Hazen ( $C_h$ ). A fórmula de Hazen é dada por (Equação 4):

$$K_H = C_h d_{10}^2 \quad (4)$$

onde:

$K$  = condutividade hidráulica (cm/s);

$C_h$  = fator empírico de Hazen e

$d_{10}$  = diâmetro efetivo (tamanho da partícula em que 10% é menor) (cm).

Segundo Odong, (2007) a fórmula de Hazen tende a subestimar o valor da condutividade e deve ser limitado ao uso de areias e areias grossas, com diâmetro efetivo entre 0,1 e 3 mm. Desta maneira, a condutividade também foi estimada pela equação de Kozeny-Carman, considerada adequada para solos com diâmetro efetivo menor que 3mm e não argilosos. A equação de Kozeny-Carman é dada por (Equação 5):

$$K_K = \left( \frac{\rho g}{\mu} \right) \left[ \frac{n^3}{(1-n)^2} \right] \left( \frac{d_{10}^2}{180} \right) \quad (5)$$

onde:

$\rho$  = densidade da água [kg/m<sup>3</sup>];  $g$  = aceleração da gravidade [m/s<sup>2</sup>];  $\mu$  = viscosidade dinâmica da água [kg/(m.s)];  $n$  = porosidade [%] e  $d_{10}$  = diâmetro efetivo (10% das partículas são mais finas que o diâmetro efetivo) (cm).

Para o cálculo de porosidade ( $n$ ), segundo Kozeny, a seguinte fórmula deve ser utilizada (Equação 6):

$$n = 0,255(1 + 0,83^U) \quad (6)$$

onde  $U$  é o coeficiente de uniformidade dos grãos, calculado pela fórmula (Equação 7):

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (7)$$

onde  $d_{60}$  e  $d_{10}$  representam o diâmetro em (mm) em que 60% e 10% da amostra é menor, respectivamente.

### 5.1.3 Seepage meter

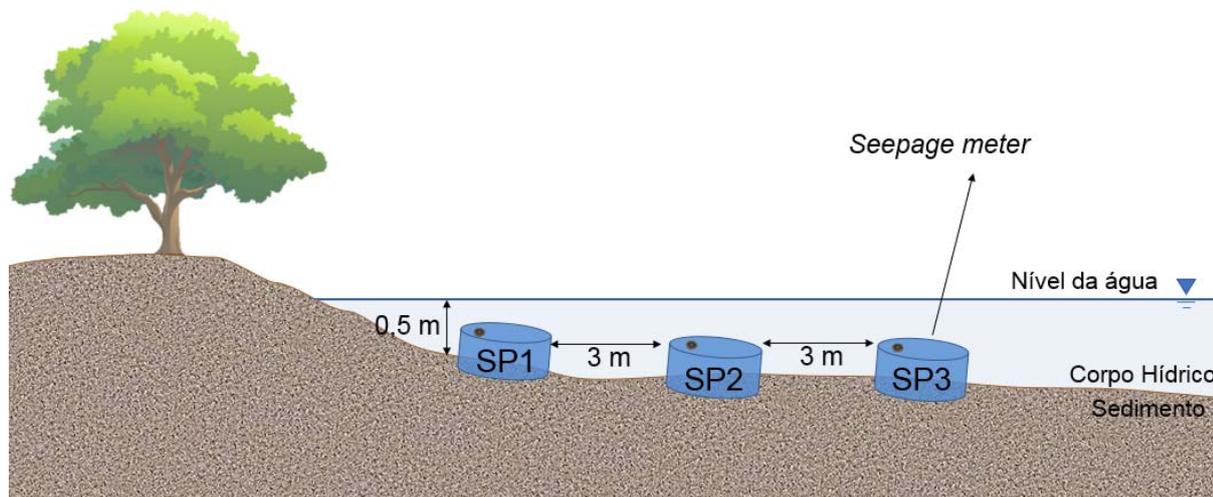
A medição direta dos fluxos A<sub>sub</sub>-A<sub>sup</sub> a partir de *seepage meters*, foi realizada conforme descrito por Arcari (2019) e Kern (2018). O fator de correção, determinado no Item 4 (pg. 57), é de 1,14 sendo os intervalos de confiança de 95% de 1,11 a 1,16, conforme a Tabela 10.

A instalação dos *seepage meters* no leito da laguna foi realizada em local livre de vegetação e pedras. Os equipamentos foram inseridos no sedimento, de modo a atingir vedação adequada de aproximadamente 10 cm, no caso de areias finas e médias. Foi cuidado para que parte superior do tambor não ficasse muito saliente em relação ao sedimento, em decorrência de possível advecção intersticial de água (efeito Bernoulli), causado pelo movimento de correntes, marés e ondas, conforme verificado por (CABLE; MARTIN; JAEGER, 2006)

Os equipamentos foram instalados com leve inclinação, permitindo que bolhas internas de ar escapassem livremente pelo orifício. Quando instalados, antes da primeira medição foi aguardado um intervalo de tempo de 24h para permitir o equilíbrio entre o equipamento e o sedimento. Foram traçados transectos perpendiculares à linha de costa com 3 metros de espaçamento (Figura 26), com o objetivo de identificar como as DAS se comportam

espacialmente em cada estação. Assim, verificou-se se a proximidade da encosta exerce influência significativa nas medições dos *seepage* e também obteve-se uma triplicata dos dados.

Figura 26 - Esquema da disposição dos *seepage* em cada seção.

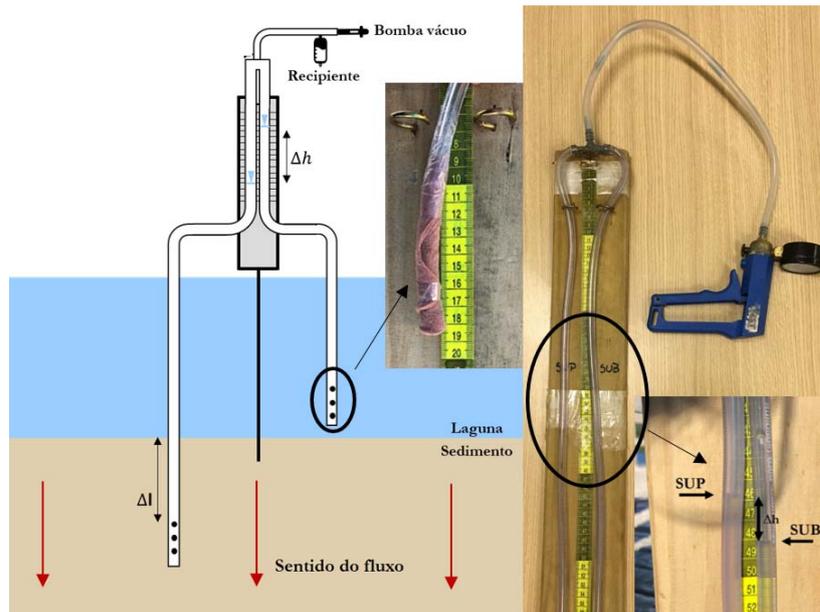


Desenho fora de escala. Em cada seção foram traçados transectos perpendiculares à linha de costa através da instalação de três equipamentos com o espaçamento de 3 m entre eles, com a profundidade inicial de meio metro, mínimo necessário para submergir o *seepage* e o medidor por completo.

#### 5.1.4 Piezomanômetros

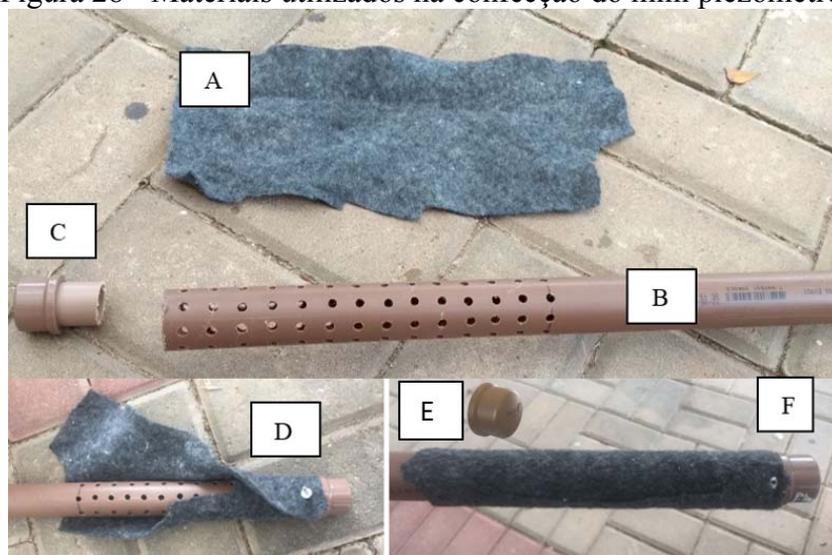
Os piezomanômetros (Figura 27) consistem no acoplamento de tubos flexíveis com seção filtrante, formando um manômetro em U, onde uma extremidade com seção filtrante está inserida em determinada profundidade no sedimento e a outra extremidade mergulhada no corpo hídrico. Assim, os piezomanômetros permitem a medição da diferença entre a carga hidráulica no sedimento e do corpo superficial. Neste estudo, foram utilizadas mangueiras com diâmetro de 9,5 mm (3/8"), com seção filtrante de 5 cm nas extremidades, envolvidas com malha de nylon para impedir a entrada de sedimento no interior da mangueira. Para conduzir a água superficial e subterrânea para o manômetro, foi utilizada uma bomba de vácuo manual, modelo Kitest KA-056. Para diminuir a criação de bolhas, a aplicação de vácuo foi feita lenta e gradualmente. A eliminação das bolhas se fez pela agitação dos tubos até a dissolução dessas. Para melhorar a estanqueidade, a extremidade do tubo flexível foi mergulhada em água quente antes da inserção nas conexões que devem ser de metal.

Figura 27 - Esquema do funcionamento do piezomanômetro



Para realizar a inserção da mangueira no sedimento foi utilizado um invólucro (mini piezômetro) de PVC (DN 32) previamente instalado, com seção filtrante de 20 cm de extensão, aberturas de 5mm espaçadas uniformemente e manta geotêxtil a fim de evitar entupimento. Os materiais necessários para a construção do mini piezômetro são apresentados na Figura 28.

Figura 28 - Materiais utilizados na confecção do mini piezômetro.



A figura apresenta os materiais necessários para a construção do mini piezômetro: A) Tela filtro: Tela para proteger a ponta do piezômetro da entrada de sedimentos (nylon ou bidim); B) Tubo de PVC (DN32) com a extremidade perfurada; C) CAP (DN 25), para proteger o fundo do mini piezômetro; D) Rebite, para fixar o filtro no tubo; E) Tampa, CAP (DN32), para evitar a entrada de detritos ou água no mini piezômetro; F) mini piezômetro pronto.

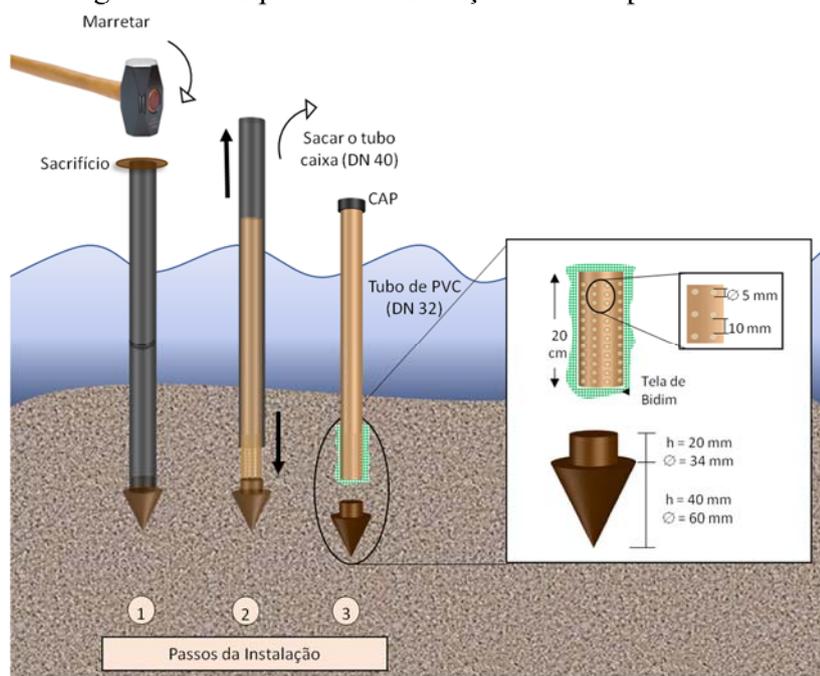
O tipo de sedimento dita o melhor qual o melhor material para utilizar como invólucro exterior do mini piezômetro. Em sedimentos grossos e arenosos é possível utilizar PVC, para sedimentos compactados o tubo de aço é mais adequado. A ponta do “tubo-caixa” (Figura 29, item 1) deve ser confeccionada em forma cônica, para facilitar a penetração do tubo.

Para preparar o mini piezômetro para a instalação, primeiro vedou-se a extremidade do tubo-caixa que foi inserida no leito. A ponta (tarugo) ou ponto de condução foi feita de material biodegradável já que a mesma fica depositada no leito, após a instalação.

Para instalar o mini piezômetro foi inserido o tubo-caixa (revestimento externo), com a ponta biodegradável, no sedimento até a profundidade desejada (Figura 29). Normalmente, quanto maior a profundidade, mais confiáveis são os resultados. Uma marreta deve ser utilizada para facilitar a penetração do tubo caixa no sedimento. Após a inserção, foi retirada a rolha com o uso de um outro tubo de ferro de menor diâmetro, que percorre o tubo maior e empurra a rolha.

Inseriu-se, então, por dentro do tubo caixa, o tubo piezômetro de menor diâmetro. As ferramentas necessárias para realizar a instalação do piezômetro no sedimento consistem em uma superfície de borracha ou madeira que serviu de sacrifício na hora de marretar o tubo caixa no sedimento, marreta e fita métrica para conferir a profundidade enterrada do piezômetro.

Figura 29 - Esquema de instalação do mini piezômetro



1) Penetração do "tubo-caixa" (revestimento externo), 2) Inserção do tubo piezômetro, extremidade da tela de bidim primeiro e 3) remoção do tubo-caixa, deixando apenas o mini piezômetro no lugar.

O desnível foi verificado através de régua milimetrada acoplada ao manômetro, medindo os níveis (cargas) dos dois tubos no mesmo instante. Essa diferença de cargas consiste no parâmetro ( $\Delta h$ ) da equação de Darcy. O gradiente hidráulico vertical é obtido ao realizar a divisão de  $\Delta h$  (Figura 27) pela profundidade de inserção do tubo no sedimento ( $\Delta l$ ) (Figura 27). A descarga é dada conforme equação 1, onde ainda se faz necessário o parâmetro condutividade hidráulica ( $K$ ), conforme a equação 1:

$$q = -K \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (1)$$

Quando a carga no tubo do sedimento é maior do que a do tubo na água superficial, a direção do fluxo na interface sedimento-água deve ser no sentido do compartimento subterrâneo para o superficial. Logo, se a carga no tubo do sedimento é inferior à do tubo da água superficial, é indicado que naquele local ocorre fluxo sentido superficial-subterrâneo (infiltração), conforme Figura 27:

O erro de medição, devido à utilização de régua milimetrada, foi estimada segundo a equação 8:

$$\varepsilon \left[ \frac{cm}{dia} \right] = K \left[ \frac{cm}{seg} \right] \frac{0,1 [cm]}{dl [cm]} * 86400 \left[ \frac{seg}{dia} \right] \quad (8)$$

### 5.1.5 Monitoramento do nível na laguna

Para a aferir o nível da laguna nos dias de campanhas de monitoramento, foi instalada, em fevereiro de 2017, uma régua linimétrica na estação PDA. Para tal, foi fixada uma estrutura de madeira de 2,0 metros no sedimento da laguna, escorada na estrutura de um extinto trapiche. Foi instalado um batente, de modo que a régua metálica pudesse ser alocada no momento da medição e retirada em seguida.

O nível apresentado tem como “zero” absoluto a média de todos os níveis medidos pontualmente em cada campanha.

## 5.2 RESULTADOS DA INTERAÇÕES ENTRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E SUPERFICIAIS

### 5.2.1 Condutividade hidráulica

A partir de ensaios granulométricos realizados nas estações amostrais, foi estimada a condutividade hidráulica do sedimento a partir das fórmulas empíricas de Hazen ( $K_H$ ) e Kozeny-Carman ( $K_K$ ). A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos nos ensaios granulométricos realizados nas duas etapas (Julho e Novembro de 2018) e as estimativas de condutividade hidráulica calculadas.

Verificou-se que o diâmetro efetivo ( $d_{10}$ ) variou entre 0,05 mm na estação PDA e 0,18 mm na estação RMA. Foi observado que o Coeficiente de Uniformidade ( $C_u$ ) em todas as estações foi menor que 5, indicando sedimentos uniformes. Da mesma maneira, o Coeficiente de Curvatura ( $C_c$ ), com exceção das três estações localizadas nas Rendeiras, todas as estações apresentaram valores entre 1 e 3, indicando sedimentos bem graduados. O índice de vazios ( $n$ ) foi calculado a partir do Coeficiente de Uniformidade onde todas as amostras compreenderam valores próximos de 40%, típico de areias.

Na estação CDC, ocorre a presença de partículas com maior diâmetro e baixa maturidade, como seixos finos e areias médias e grossas, devido à sua localização, que recebe sedimentos provenientes dos morros a partir de pequenos córregos. O mesmo não ocorre na estação PDA. Mesmo estando localizada na margem oeste, a estação localiza-se na base de uma pequena planície, diminuindo o aporte de sedimentos mais grosseiros.

Em relação à condutividade hidráulica, as fórmulas empíricas apresentaram valores na ordem de  $10^{-2}$  cm/s e  $10^{-3}$  cm/s, sendo valores típicos de sedimentos arenosos. Observou-se que para todas as estações, as duas metodologias apresentaram valores na mesma ordem de grandeza. Sendo assim, ambas foram utilizadas neste estudo como referência.

A estações localizadas na Av. das Rendeiras (REN, RDU e RMA) apresentaram os maiores valores de condutividade hidráulica estimadas por Kozeny (Equação 4) ( $3,9 \times 10^{-2}$  cm/s e  $4,7 \times 10^{-2}$  cm/s) dentre as estações, valor superior ao utilizado por Zanatta (2005) ( $5,0 \times 10^{-3}$  cm/s). A estação CDC apresentou o segundo maior valor de condutividade hidráulica ( $1,8 \times 10^{-2}$  cm/s) e, as demais estações, obtiveram resultados bastante próximos, variando de  $5,6 \times 10^{-3}$  cm/s a  $8,2 \times 10^{-3}$  cm/s.

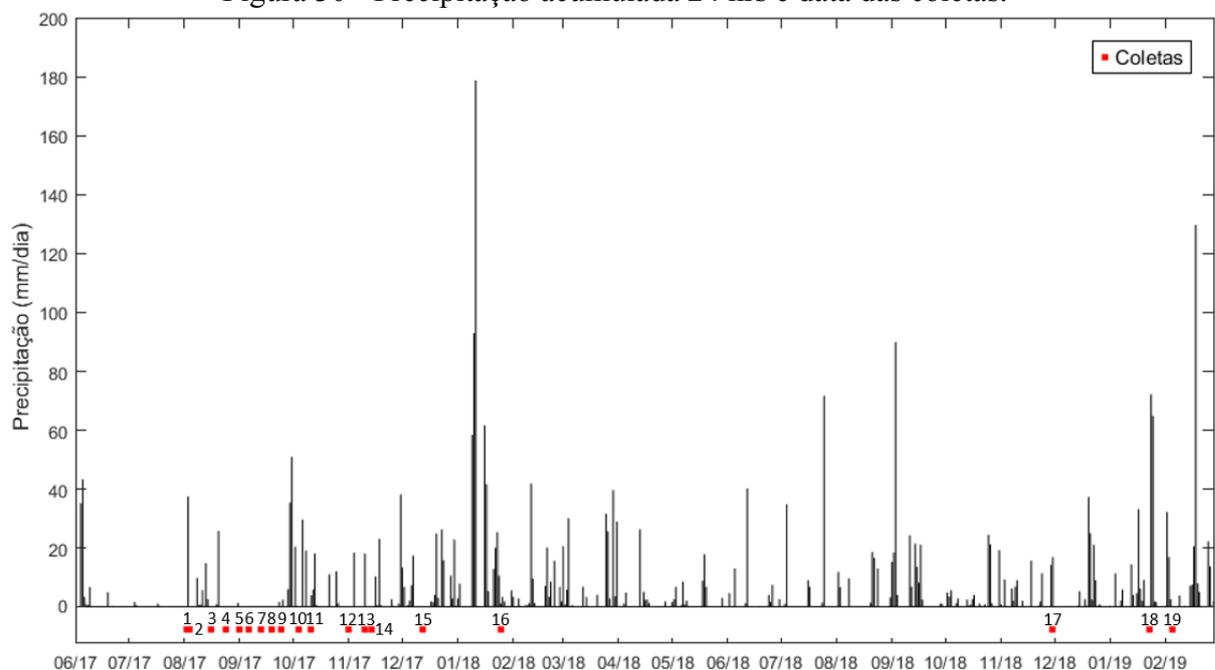
Tabela 11 - Ensaios granulométricos e estimativas de condutividade hidráulica.

Estação/ Resultado	OOR	LIC	PDA	CDC	CRV	RMA	REN	RDU
d10 (mm)	0,09	0,08	0,08	0,16	0,08	0,18	0,16	0,17
d60 (mm)	0,27	0,23	0,25	0,60	0,23	0,28	0,26	0,27
d50 (mm)	0,25	0,21	0,22	0,50	0,21	0,26	0,24	0,25
Cu	3,30	2,94	3,44	3,68	2,92	1,61	1,64	1,55
Cc	1,73	1,58	1,60	1,03	1,50	0,99	1,02	0,99
Hazen (cm/s)	8,3E-3	6,7E-3	6,1E-3	2,5E-2	6,2E-3	3,1E-2	2,6E-2	3,0E-2
Kozeny (cm/s)	8,2E-3	7,0E-3	5,6E-3	1,8E-2	6,2E-3	4,7E-2	3,9E-2	4,7E-2

### 5.2.2 Regime pluviométrico e do nível da laguna durante as coletas

O gráfico da Figura 30, apresenta a precipitação diária acumulada para o período das coletas. A precipitação reflete diretamente nos fluxos de descargas fluviais sendo um parâmetro fundamental para analisar os resultados das análises realizadas. Os dados de 2017 e 2018 são da estação da 1006-EPAGRI localizada no Itacorubi (lat: 27,59; long: 48,51), já os dados de 2019 são da estação automática de São José, pois a série fornecida pela Epagri era referente apenas aos anos de 2017 e 2018.

Figura 30 - Precipitação acumulada 24 hrs e data das coletas.



A Tabela 12, apresenta as datas de coleta, o nível relativo da laguna medido na laguna central no dia da coleta, o nível relativo do mar, e, a precipitação acumulada nos períodos

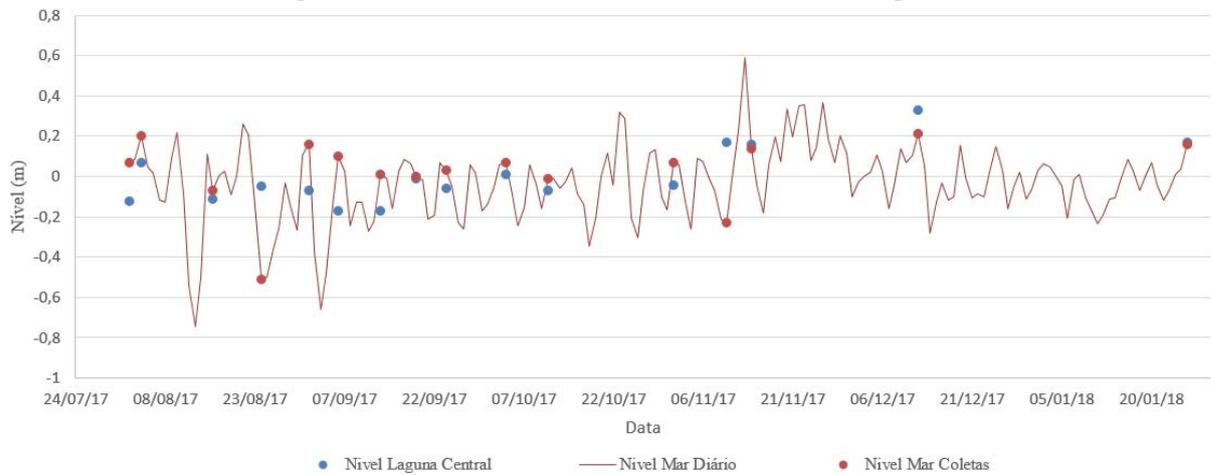
anteriores às coletas. É importante ressaltar que, apesar de os níveis da coleta número 14 e 16 apresentarem valores semelhantes, a coleta 16 foi realizada após um período chuvoso que acumulou 184 mm em 15 dias. Este evento pode ter afetado os valores encontrados nas coletas, como será visto adiante.

Tabela 12 - Data da realização das coletas, nível relativo da laguna e precipitação acumulada em diferentes períodos.

Coleta	Data	Nível da laguna	Nível do mar	Chuva acumulada dias anteriores a coleta (mm)			
				1	3	5	15
1	02/08/2017	-0,12	0,07	0	0	0	0
2	04/08/2017	0,07	0,20	0	38	38	38
3	16/08/2017	-0,11	-0,07	0	3	18	73
4	24/08/2017	-0,05	-0,51	0	0	26	52
5	01/09/2017	-0,07	0,16	0	2	2	28
6	06/09/2017	-0,17	0,10	0	0	0	2
7	13/09/2017	-0,17	0,01	0	0	0	0
8	19/09/2017	-0,01	0,00	0	0	0	0
9	24/09/2017	-0,06	0,03	0	2	2	2
10	04/10/2017	0,01	0,07	0	21	72	118
11	11/10/2017	-0,07	-0,01	4	4	24	167
12	01/11/2017	-0,04	0,07	0	0	0	25
13	10/11/2017	0,17	-0,23	18	18	18	37
14	14/11/2017	0,16	0,14	0	0	18	37
15	12/12/2017	0,33	0,21	0	1	1	89
16	26/01/2018	0,17	0,16	4	16	61	184
17	30/11/2018	N.A.	0,07	17	31	32	62
18	23/01/2019	N.A.		0	0	12	75
19	05/02/2019	N.A.		0	20	53	194

A partir dos dados da Tabela 12, e da série contínua de nível do mar, fornecida pela EPAGRI, foi plotado o gráfico da Figura 31. Os dados referentes ao nível interno da laguna, para o período analisado, possuem amplitude de 0,5m. O nível externo, possui amplitude de 1,33m. Analisando a Figura 31 e Figura 30 é possível observar que a oscilação dos níveis da laguna central respondem ao nível do mar. No período de seca, até a coleta 9, pode-se observar que o nível da laguna encontrava-se sempre abaixo de zero. No entanto, precipitação tem pouca influência sobre a oscilação do nível do subsistema central, com relação ao nível do mar, pois, o nível da laguna encontrava-se maior na coleta 15 do que na 16, onde ocorreu a maior precipitação acumulada da série.

Figura 31 - Nivel relativo interno e externo da laguna



### 5.2.3 Regime de descarga das águas subterrâneas na Lagoa da Conceição

No período de 02/08/17 à 05/02/2019, foram realizadas 19 campanhas de monitoramento das descargas de águas subterrâneas, com os *seepage meters* em cinco seções da Lagoa da Conceição. Na décima sétima campanha, foi instalada uma nova seção, OOR, totalizando assim seis seções. Na campanha 17 também foram instalados os mini piezômetros. A partir daí passaram a ocorrer também medidas com o piezomanômetro. A Tabela 13 apresenta a relação das coletas realizadas em cada campanha, data, seções monitoradas e nível relativo da laguna.

O objetivo era que, em cada campanha, fossem monitoradas todas as seções, de forma que todos os equipamentos estivessem expostos às mesmas condições climáticas e de gradientes hidráulicos. Em algumas campanhas não foi possível monitorar todas as seções, devido a problemas de locomoção, devido a problemas com a embarcação. Quando houve elevada turbidez na laguna, em decorrência de fortes chuvas, não foi possível encontrar os *seepages*.

Tabela 13 - Relação das coletas realizadas em cada campanha, data, seções monitoradas e nível relativo da laguna.

Campanha	Data	Seções Monitoradas								NÍVEL LAGUNA* <sup>1</sup>
		OOR	LIC	PDA	CDC	CRV	RMA	REN	RDU	
1	02/08/2017			x					x	-0,12
2	04/08/2017			x					x	0,07
3	16/08/2017		x	x	x	x			x	-0,11
4	24/08/2017		x	x	x	x			x	-0,05

Campanha	Data	Seções Monitoradas							NÍVEL LAGUNA* <sup>1</sup>	
		OOR	LIC	PDA	CDC	CRV	RMA	REN		RDU
5	01/09/2017		x	x	x	x		x		-0,07
6* <sup>2</sup>	06/09/2017		x	x	x	x		x		-0,17
7* <sup>2</sup>	13/09/2017		x	x	x	x		x		-0,17
8* <sup>2</sup>	19/09/2017		x	x	x	x		x		-0,01
9	24/09/2017		x	x	x	x		x		-0,06
10	04/10/2017		x	x	x	x		x		0,01
11* <sup>2</sup>	11/10/2017		x	x	x	x		x		-0,07
12	01/11/2017		x	x	x	x		x		-0,04
13	10/11/2017		x							0,17
14* <sup>2</sup>	14/11/2017		x	x	x	x		x		0,16
15	12/12/2017		x	x	x	x		x		0,33
16* <sup>2</sup>	26/01/2018			x						0,17
17* <sup>2</sup>	30/11/2018	x	x	x	x	x	x	x	x	N.A.
18* <sup>2</sup>	23/01/2019	x	x	x			x	x	x	N.A.
19* <sup>2</sup>	05/02/2019	x	x	x	x	x	x	x	x	N.A.

\* NÍVEL – NÍVEL MÉDIO (zero absoluto é a média de todos os níveis medidos)

\*<sup>2</sup> Campanhas onde houveram coletas de qualidade da água.

A Tabela 14 apresenta o tempo médio de permanência dos medidores em cada seção.

Tabela 14 - Tempo médio de permanência dos medidores nos *seepages* em cada seção.

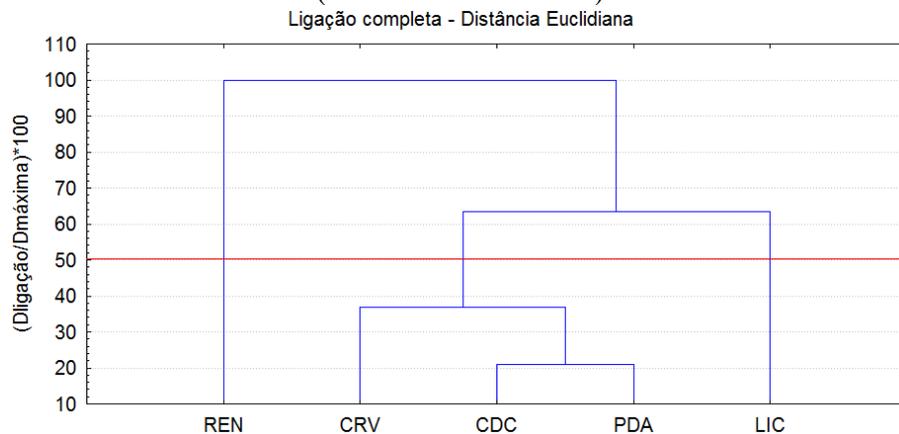
Seção	LIC	REN	PDA	CRV	CDC	OOR
<b>Tempo médio (min.)</b>	142	121	107	79	59	40

Como não se conhecia, a priori, a faixa de valores que as descargas pudessem assumir em cada seção da laguna, as primeiras campanhas serviram para estimar a ordem de grandeza e o sentido da descarga em cada seção.

No LIC, onde o tempo de permanência é maior devido ao percurso de coleta, a bolsa coletora apresentou-se na maioria das vezes completamente vazia. Este fato também ocorreu algumas vezes na PDA. Por outro lado, nas REN a bolsa apresentou-se algumas vezes completamente cheia. Para solucionar o problema, a primeira tentativa foi reduzir o intervalo de tempo de permanência dos medidores, o que não foi o suficiente. Assim, na décima segunda coleta, as bolsas medidoras foram substituídas por bolsas com volume maior, de aproximadamente 20 litros (40x60 cm.) As primeiras bolsas possuíam volume aproximado de 7 litros (25x35) cm.

Após a compilação dos dados de descarga das águas subterrâneas (DAS) levantados em campo, foi realizada uma análise de agrupamento (Cluster Analysis), para classificar os valores da matriz de dados de DAS em grupos discretos de acordo com as seções monitoradas. A técnica de agrupamento hierárquico, *Tree Clustering*, interliga as amostras por suas associações, produzindo um dendrograma onde as DAS semelhantes, segundo as seções monitoradas, são agrupadas entre si. A suposição básica de sua interpretação é esta: quanto menor a distância entre os pontos, maior a semelhança entre as descargas. A seção OOR não foi incluída na análise devido à falta de dados. Ela foi considerada um grupo independente. A Figura 32 apresenta o dendrograma das seções monitoradas gerado pelo método de ligação completa através da métrica de cálculo distância euclidiana, a fim de não exaltar os *outliers*. Na Figura 32 se considerarmos o valor de corte de 50% é possível distinguir a presença de três grupos, onde as seções REN e LIC encontram-se sozinhas, enquanto as seções CRV, CDC e PDA encontram-se agrupadas, sendo assim, este grupo com as três seções será chamado de laguna central.

Figura 32 – Dendrograma de agrupamento das seções monitoradas: Método Ligação completa (Distância Euclidiana)



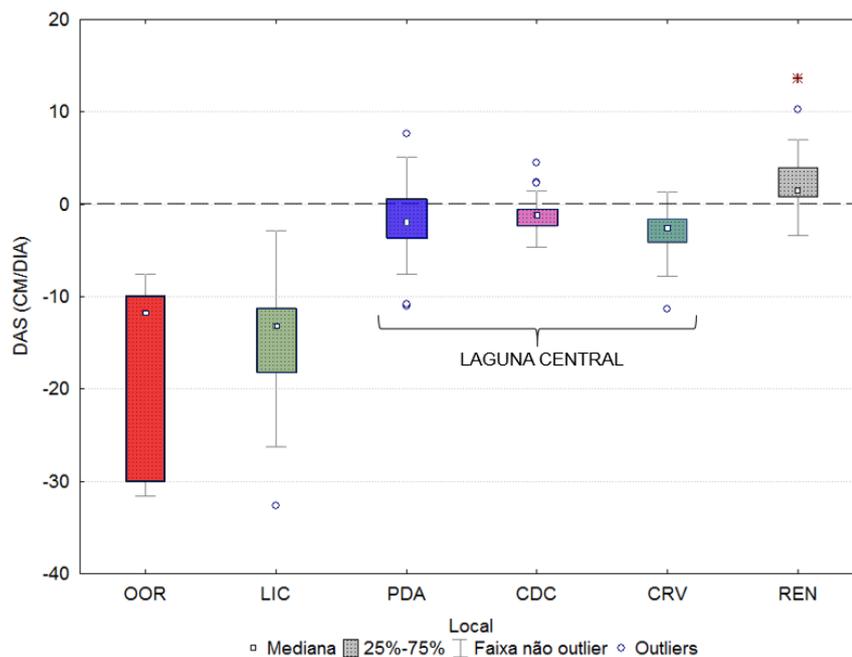
Dendrograma das seções monitoradas gerado pelo método de ligação completa através da métrica de cálculo distância euclidiana, o valor de corte de 50% representado pela linha vermelha, agrupa as seções em três grupos, as seções REN e LIC encontram-se sozinhas, enquanto as seções CRV, CDC e PDA formam um único grupo que será chamado de laguna central.

A Figura 33 apresenta o gráfico *Box Plot* das descargas (cm/d) agrupadas por seção. O gráfico apresenta a mediana e o valor mínimo e máximo medido em cada seção. Observa-se que as descargas apresentam uma distribuição multimodal, o conjunto de dados possui medianas diferentes. Os pontos em circunferência representam os *outliers* sendo estes os pontos que estão a mais de três faixas interquartis da extremidade da caixa, definidos através de 1,5

IQR (Intervalo Interquartil). Por se tratar de uma abordagem inicial, os dados não possuem distinção temporal, ou seja, são independentes do tempo o qual foram realizadas as medidas.

Para o cálculo dos *box plot*, foram excluídos todos as medidas realizadas no LIC antes da troca da bolsa coletora (Coleta 13), pois como antes da troca as bolsas esvaziaram por completo, estas medidas não apresentam valores de descargas reais.

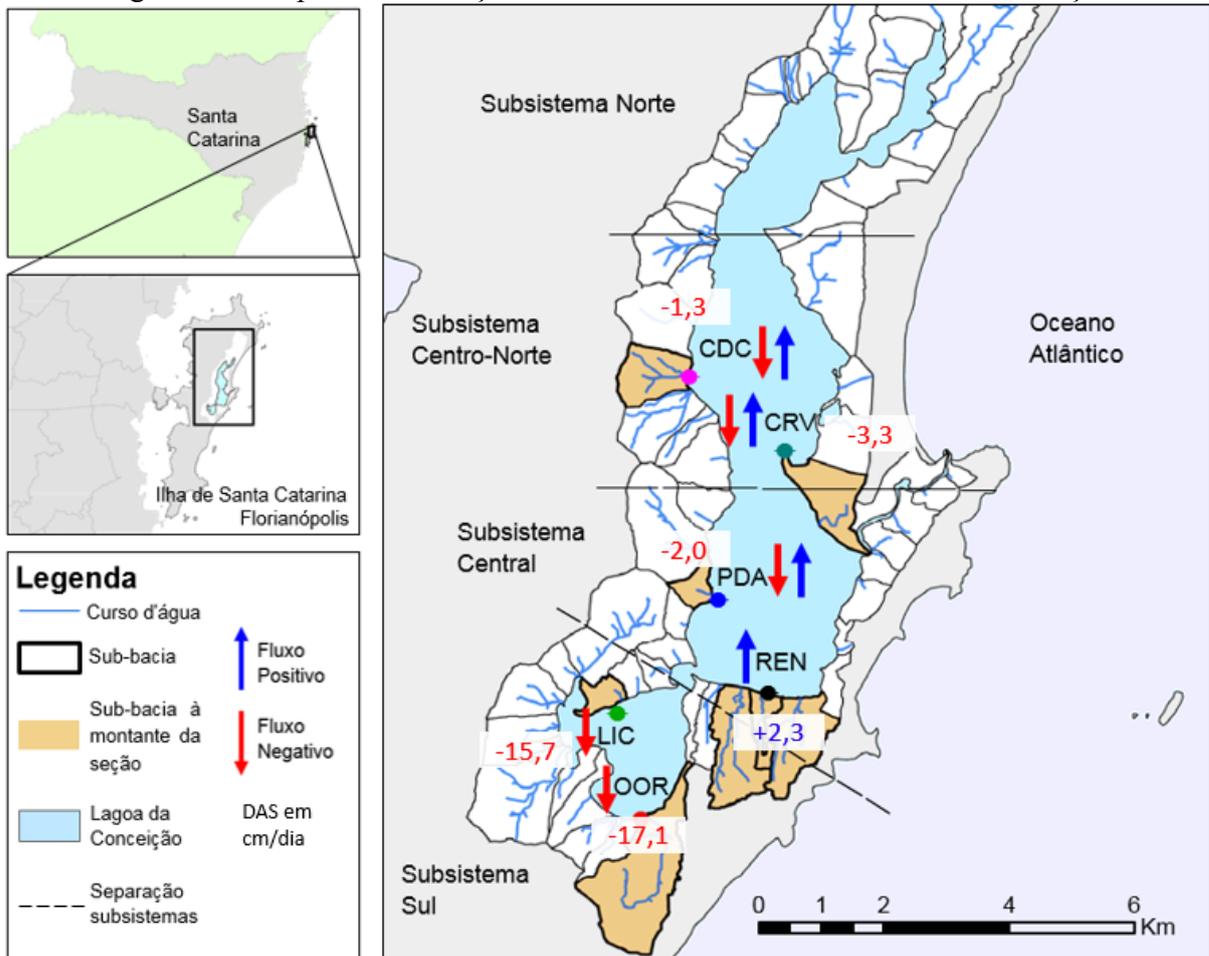
Figura 33 - *Box-plot* das DAS agrupadas por seção.



O gráfico apresenta a mediana e o valor mínimo e máximo medido em cada seção.

A Figura 34 apresenta o mapa com a localização de cada seção, com setas que indicam o comportamento padrão do fluxo. Os dados demonstram que as seções da região central da laguna apresentam o mesmo comportamento, com o fluxo variando da laguna para o aquífero e vice-versa, com a exceção da seção da Rendeiras, onde os aportes são sempre positivos do aquífero para a laguna. Este fato pode ser explicado pela presença da Lagoa de Evapo-Infiltração (LEI) localizada a poucos metros do local da seção. Já o subsistema sul apresenta um comportamento distinto do resto da laguna, com as descargas sempre negativas. Este fato é explicado pelas alterações antrópicas devido a presença de poços de abastecimento na região.

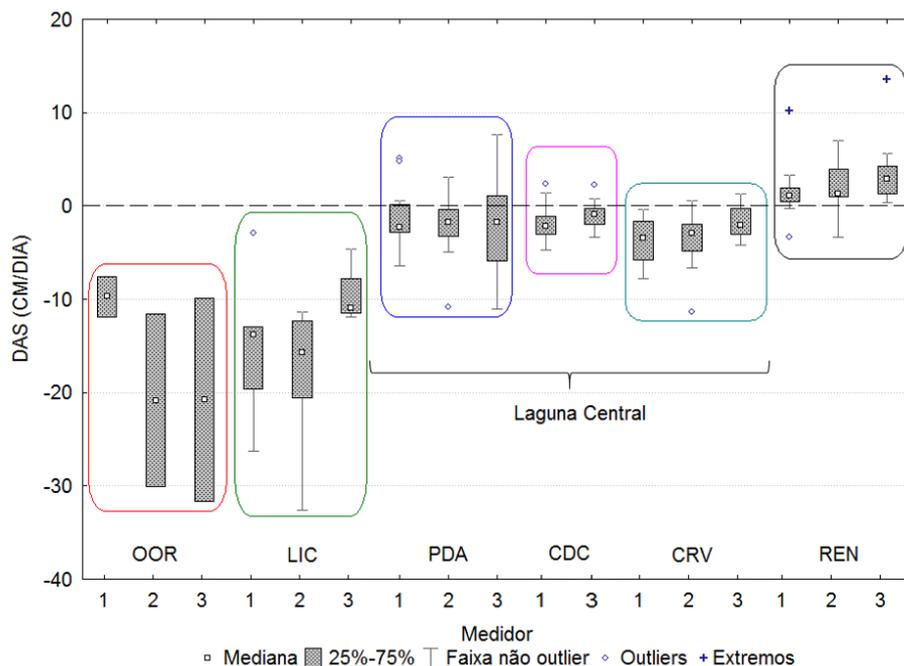
Figura 34 - Mapa de localização e sentido do fluxo das DAS em de cada seção



Mapa de localização das seções de monitoramento das DAS da Lagoa da Conceição. As setas indicam o sentido do fluxo, vermelho para baixo representa fluxo negativo, azul para cima fluxo positivo e ambas juntas representam que o fluxo na seção é alternado. Os valores apresentam a média das descargas (cm/d) medidas em cada seção.

A Figura 35 mostra os valores encontrados para as descargas (cm/d) nos diferentes medidores. A partir do gráfico, é possível distinguir, principalmente pela caixa, que as descargas encontradas nos medidores mais afastados da margem apresentam taxas de fluxo menores, com a exceção da REN onde o comportamento é inverso. No entanto para confirmar essa tendência seria necessário instalar no mínimo mais um tambor, aumentando a linha do transecto. A Figura 35 confirma que as seções da laguna central: PDA, CDC e CRV comportam-se de maneira semelhante, com descargas oscilando entre positivo e negativo com a maioria dos valores medidos apresentando fluxo negativo.

Figura 35 - Valores DAS (cm/d) discriminados por medidores



As descargas apresentam uma distribuição multimodal, visto que o conjunto de dados possui medianas diferentes, PDA, CDC e CRV, seções que compõe o grupo laguna central, confirmam um comportamento semelhante para todos os medidores, enquanto o LIC apresenta descargas com valores e negativos e as Rendeiras, valores altos positivos.

### • Laguna Central

A análise da variabilidade temporal dos dados levantados nas estações (PDA, CDC e CRV), localizadas no corpo central da laguna, sugerem um padrão espacial do fluxo e relação com o nível da laguna e do oceano.

No sentido de filtrar parte do ruído e facilitar a análise da relação do nível externo com o nível interno da laguna procedeu-se alisamento da série de dados de nível do mar, através do método das médias móveis. O método adota, para cada dia, a média dos  $n$  dias adjacentes. Este procedimento só é relevante quando existem registros suficientemente longos e contínuos. A série foi re-amostrada em intervalos de sete dias, para melhor identificar os processos que ocorrem no período semanal, visto que o nível interno da laguna foi medido com essa frequência devido à falta de equipamento automático que realizasse a medição.

A Figura 36 apresenta a precipitação acumulada no período de 24hrs (gráfico superior), a média das medições realizadas nas estações do corpo central, o nível relativo da laguna e a média móvel para sete dias do nível do mar. Na Figura 36 tanto o nível medido na laguna, e as Descargas das Águas Subterrâneas médias (DASm), são apresentados pontualmente, pois foram monitorados em eventos isolados, assim, não é possível estimar quais são os valores entre uma medida e a outra.

Godoy (2009) e Santos (2016) verificaram que contribuição da maré astronômica é mais expressiva em região de praia e baía enquanto que, dentro do corpo lagunar, as variações de nível seguem o comportamento bastante semelhante ao da maré meteorológica. Essa baixa influência da maré astronômica nas oscilações de nível na laguna pode ser explicada por sua atenuação pelo canal da Barra da Lagoa, ambos afirmam que é necessário maior investigação dos fatores meteorológicos e hidrodinâmicos para identificar com maior acurácia os períodos de oscilação da componente meteorológica.

Na Figura 36 é possível verificar que o nível interno medido nos dias de coleta e a média móvel para 7 dias do nível externo tem um comportamento similar, no período de ocorrência de seca de agosto a setembro de 2017, é quando ambos os níveis encontram-se mais baixos. No entanto, no período de chuvas intensas, de novembro a dezembro de 2017, apenas o nível da laguna apresenta-se elevado, enquanto o nível oceânico encontra-se próximo a zero. A hipótese é que o nível da laguna sofre tanto influência do nível oceânico quanto da precipitação. A precipitação altera o nível da laguna gradualmente nos períodos de cheias e de seca. Já a oscilação do nível oceânico reflete nas oscilações internas do nível da laguna,

Em relação as DASm do corpo central ao longo do período monitorado, estas apresentam relação com a variação do nível interno da laguna e nível oceânico, indicando que a dinâmica nesta região está possivelmente associada a escala temporal de eventos meteorológicos que afetam diretamente as relações entre os níveis. A presença de um gradiente espacial entre as três estações, que será discutida a diante, implica em fluxos subterrâneos da vertente rochosa para o lado oceânico da laguna. De uma maneira geral, os fluxos da laguna central são predominantemente negativos (descarga média de -2,15 cm/dia). Para obter melhores resultados sobre o tempo de respostas das DASm em relação aos níveis internos e externos da laguna é necessário um monitoramento regular, com frequência no mínimo diária, dos níveis.

Figura 36 - DAS nas seções do corpo central da laguna

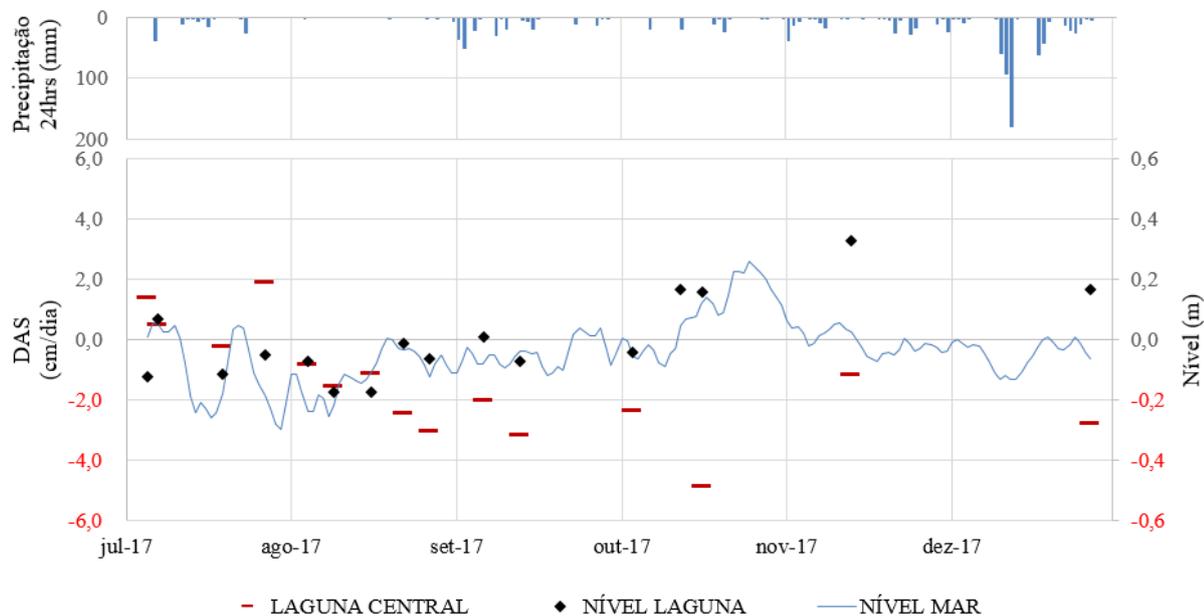
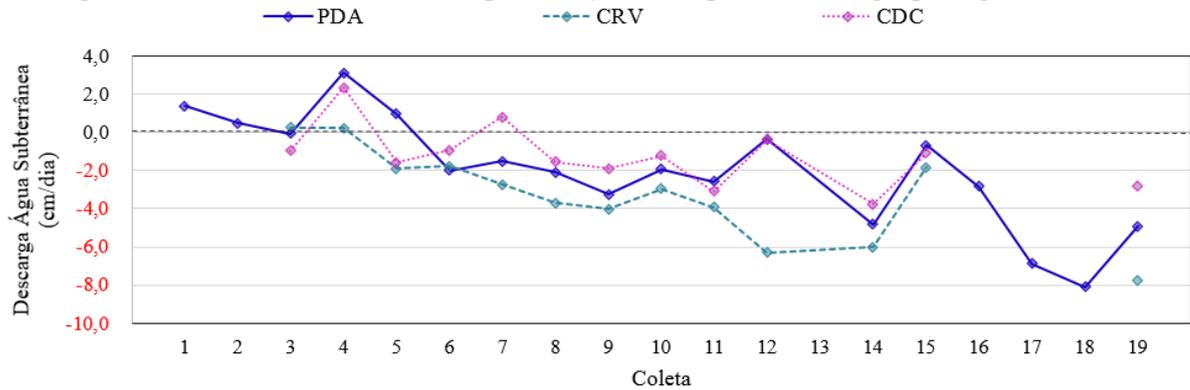


Gráfico superior: Precipitação acumulada 24hrs. Gráfico inferior: DASm (LAGUNA CENTRAL) das três estações, representadas pelos traços vermelhos. Os pontos pretos indicam o nível relativo da laguna (NÍVEL LAGUNA). A linha contínua azul representa o nível do mar mediado para 7 dias (NÍVEL MAR).

A Figura 37 apresenta as DASm de cada uma das seções componentes da região denominada Laguna central. As DASm, deste gráfico, foram obtidas através das medias dos três *seepages* de cada seção ao longo do tempo. No entanto, como entre as coletas 16 e 17 se passaram 10 meses, optou-se por exibir os próximos gráficos utilizando como eixo x o número da coleta e não a data das mesmas. A Figura 37 deixa evidente a presença de um gradiente espacial entre as três estações. A variação de fluxo ocorre de maneira regular na laguna central. Porém, a seção CRV, mais próxima ao oceano, apresenta uma faixa de descarga de fluxo tanto negativo quanto positivo sempre um cm/dia a mais que as outras seções. Isto é, quando o fluxo é positivo, a laguna apresenta um gradiente que implica em fluxos subterrâneos da vertente rochosa para o lado oceânico da laguna. Enquanto se o fluxo é negativo, o gradiente se inverte e o fluxo é maior no lado oceânico.

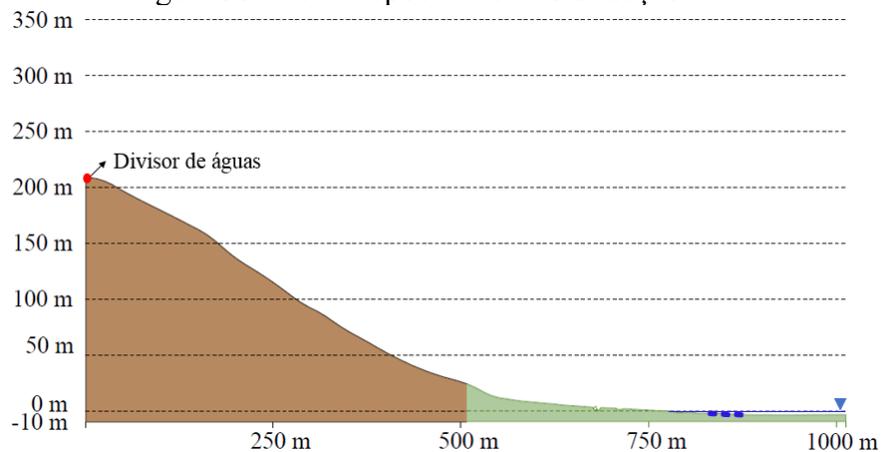
Figura 37 - DASm discriminadas pelas seções componentes do grupo laguna central



- **PDA**

A estação Ponta das Almas (PDA), localiza-se na margem oeste da laguna, na base dos morros do complexo cristalino. A margem oeste da laguna é basicamente composta por argissolo. Porém, nesta sub-bacia ocorre maior presença de areias quartzólicas em relação às outras sub-bacias da margem oeste e menor declividade da bacia em relação à outra seção localizada na margem oeste (CDC), possibilitando uma maior infiltração para o aquífero.

Figura 38 - Perfil topobatimétrico da seção PDA.



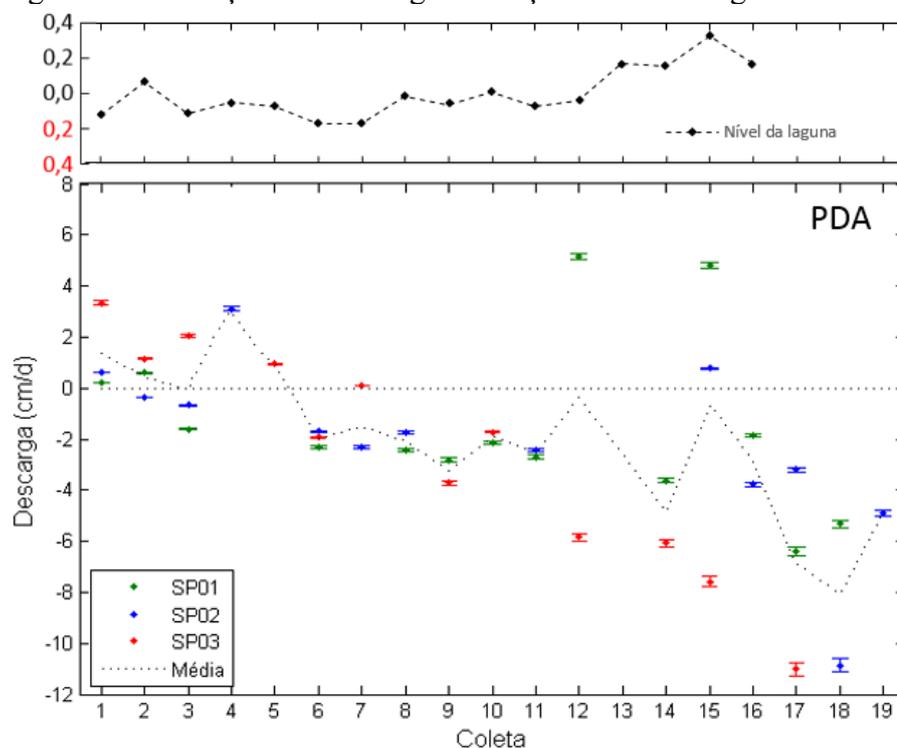
As cores apresentadas nos perfis representam o tipo de solo do terreno. A cor marrom, representa argissolo enquanto a cor verde representa as areias quartzólicas.

A Figura 39 apresenta os dados medidos na estação e o intervalo de confiança de cada medida, os dados apresentaram alta variabilidade temporal e espacial. Observou-se descargas anômalas e distintas entre os equipamentos do transecto. Por isso, para algumas das coletas são exibidas apenas duas medidas, pois muitas vezes ocorreram erros inerentes à metodologia. As descargas anômalas podem estar relacionadas ao efeito de advecção intersticial (efeito Bernoulli) causado pelo movimento das ondas, bolhas de gases presos no interior do

equipamento e principalmente, micro furos nas bolsas coletoras e acoplamento não uniforme da bolsa coletora ao medidor. Erros como os dois últimos citados são de fácil identificação, pois as bolsas furadas ou com a vedação não uniforme, apresentam um volume muito maior ou menor (respectivamente) que os outros equipamentos.

Mesmo com a exclusão dos dados considerados *outliers* é possível verificar a alta variabilidade dos fluxos no local, associada ao aquífero cristalino fraturado e do predomínio do escoamento superficial na localidade. Sendo que o *seepage* 03 (SP03), mais afastado da costa, apresentou fluxos mais intensos tanto positivos quanto negativos.

Figura 39 - Variação das descargas na seção PDA ao longo das coletas.



O gráfico superior apresenta a variação do nível na laguna ao longo das coletas. No gráfico inferior, a linha pontilhada ilustra a DASm dos três *seepages* em cada coleta. Os pontos representam os valores de DAS corrigidas pelo fator de correção, já os bigodes representam o intervalo de confiança dos dados medidos. O SP01 encontra-se mais próximo a margem e SP03 mais afastado.

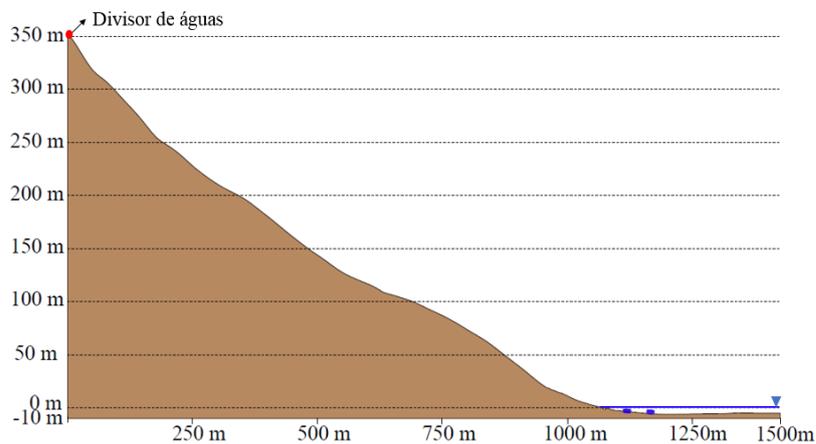
- **CDC**

A estação Costa Cachoeira (CDC) localiza-se na porção oeste da laguna, onde é delimitada por altas encostas de morros do complexo cristalino. A Figura 40 apresenta o perfil topobatimétrico da localidade, bem como a configuração do transecto de *seepage meters*, com suas respectivas identificações. Nesta estação foram utilizados somente dois *seepage meters*

(SP1 e SP3), pois o equipamento intermediário da triplicata foi despreendido do sedimento logo no início do monitoramento.

Na localidade a montante há o predomínio do escoamento superficial, devido à alta declividade da sub-bacia adjacente, cuja a altitude da crista é de 350m, como mostra o perfil topobatimétrico da Figura 40. Assim, as infiltrações no aquífero se limitam aos topos de morros. Em razão disso, não se observam fluxos positivos de águas subterrâneas proeminentes na estação (Figura 41).

Figura 40 - Perfil topobatimétrico da seção CDC.

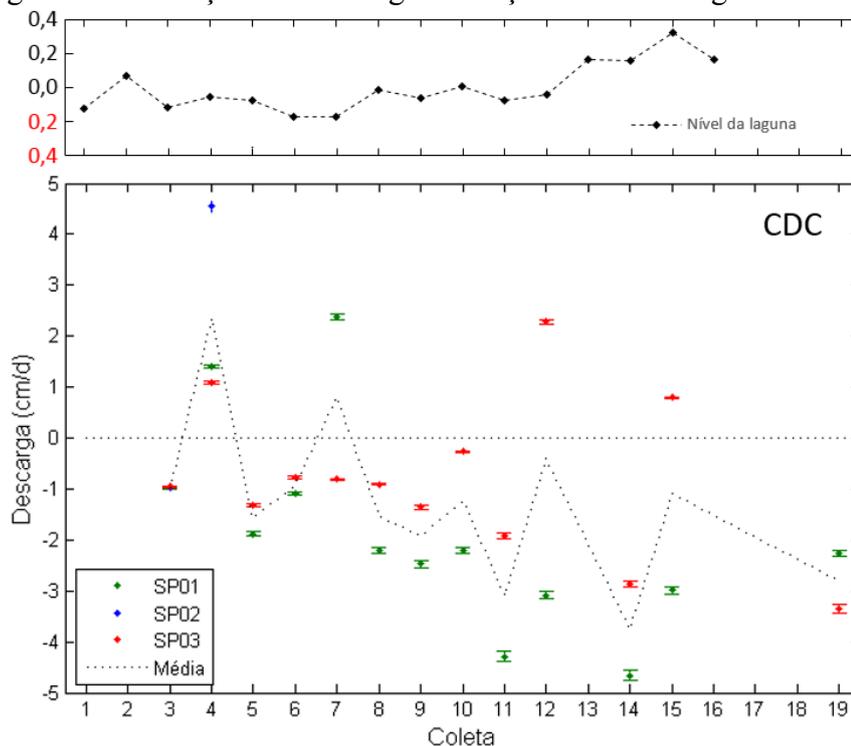


O perfil topobatimétrico da seção CDC é o que apresenta a maior declividade dentre as localidades estudadas. A altitude na crista da bacia chega a 350m. O tipo de solo, argissolo, representado na cor marrom, somado a alta declividade favorece o escoamento superficial.

A composição hidrogeológica da localidade consiste em rochas do complexo cristalino fraturado, onde as águas subterrâneas percorrem caminhos específicos na rocha, não se distribuindo homogeneamente no meio, o que pode justificar a alta variabilidade dos fluxos entre os tambores SP1 e SP2, que na mesma coleta apresentam valores positivos e negativos.

O equipamento mais próximo da costa, SP1, apresentou fluxos predominantemente negativos, enquanto o SP3 alternou entre positivo e negativo. As duas séries apresentaram tendências semelhantes, porém, em faixas de amplitudes distintas.

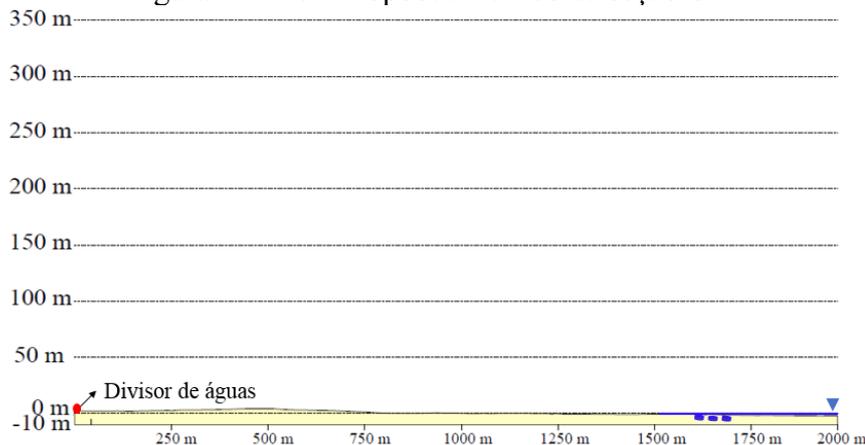
Figura 41 - Variação das descargas na seção CDC ao longo das coletas.



- **CRV**

A estação CRV, também localizada na laguna central, encontra-se no cordão lagunar-praial que faz a divisão entre a laguna e o oceano. O solo na região é composto por areias marinhas e a sub-bacia possui declividade praticamente nula, o que faz com que praticamente todo o fluxo gerado pela precipitação infiltre no solo. A Figura 42 traz o perfil topobatimétrico da localidade e a configuração do transecto dos *seepage meters* instalados na seção.

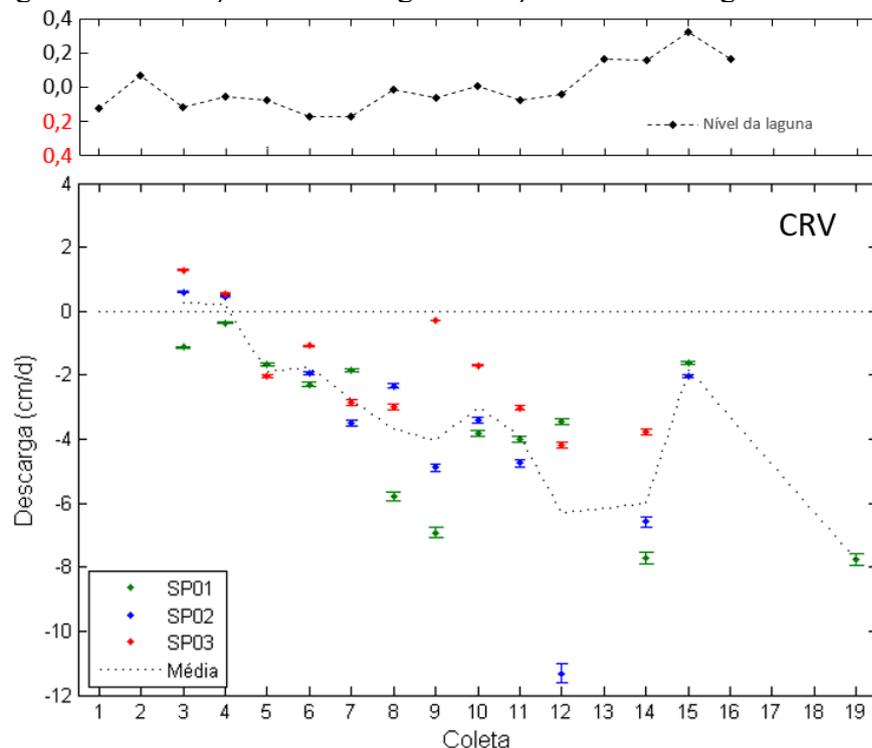
Figura 42 - Perfil topobatimétrico da seção CRV



O perfil topobatimétrico da seção CRV é o que apresenta a menor declividade dentre as localidades estudadas. A altitude na crista da bacia é menor que 5 metros. O tipo de solo, areias marinhas, representado pela cor amarelo, somado a baixa declividade favorece o infiltração da água no subsolo.

A Figura 43 apresenta os resultados obtidos na seção, onde observa-se boa adesão entre os resultados dos três medidores, com valores bastante semelhantes nos equipamentos SP1 e SP2 e descargas com menor magnitude no *seepage meter* SP3, que se encontra mais afastado da linha de costa da laguna. A proximidade com o oceano, e a geomorfologia do cordão lagunar-praial leva a crer que nesta localidade ocorra uma conexão hídrica subterrânea entre a laguna e o oceano, onde a principal forçante das descargas seria o gradiente hidráulico formado entre o nível da laguna e o oceano. A teoria é corroborada pelo fato de que as descargas na localidade foram predominantemente negativas durante o período monitorado, porém, com maior magnitude que nas seções na margem oposta da laguna, CDC e PDA como apresentado na Figura 37. Rocha (2014) verificou que nas lagoas costeiras do Litoral Norte do Rio Grande do Sul, existe um comportamento diferente entre as margens dentro de uma mesma laguna quando aplicada a técnica do *seepage meter*. Os pontos próximos da encosta da Serra Geral demonstram um potencial de fluxos positivo maior, enquanto os pontos das margens mais próximas da linha de praia caracterizam-se como infiltrantes (fluxo negativo).

Figura 43 - Variação das descargas na seção CRV ao longo das coletas.



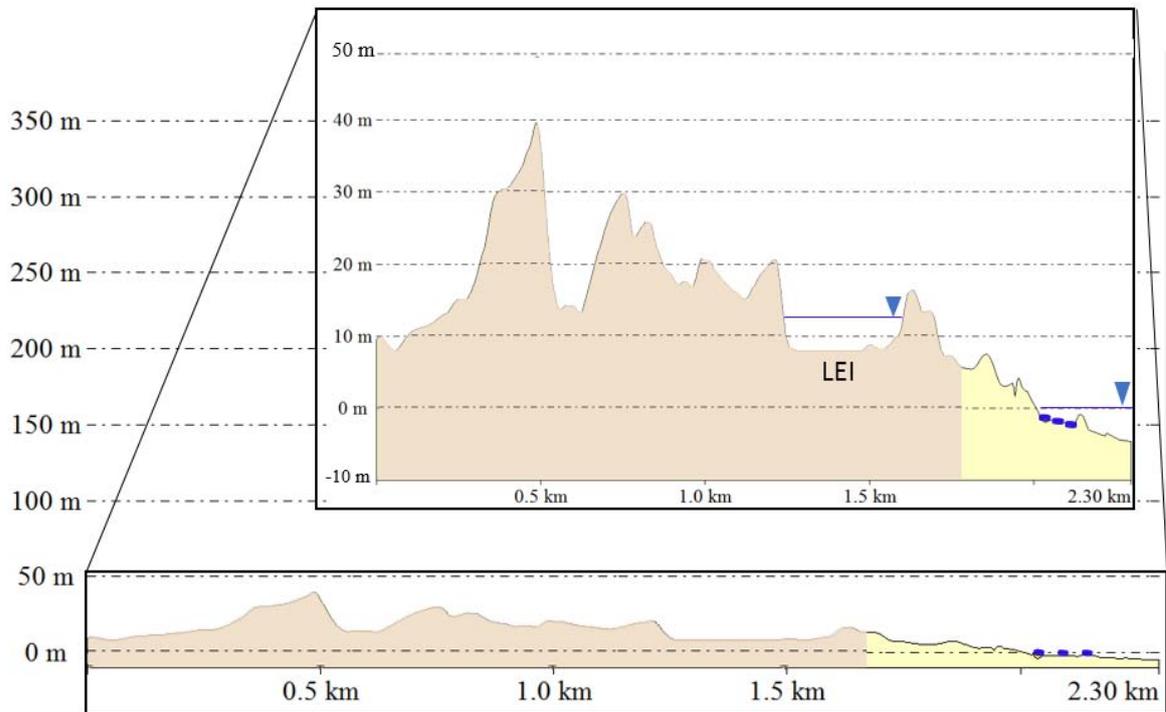
- **REN**

Diferente das outras estações da laguna central, a seção REN está na base de um campo de dunas, que compreende um aquífero livre e arenoso. A cerca de 500 metros da laguna ocorre a recarga artificial no aquífero decorrente da infiltração dos efluentes tratados de uma estação de tratamento de esgoto (ETE). A disposição final do efluente ocorre em uma Lagoa de Evapoinfiltração (LEI) que possui área de aproximadamente 20.000 m<sup>2</sup> (2 hectares) e 3 metros de profundidade. A Figura 44 traz o perfil topobatimétrico da localidade e a configuração do transecto de *seepage meters*.

A área de estudo é composta basicamente pelos depósitos eólicos que são sedimentos arenosos finos, de coloração esbranquiçada, sob forma de dunas móveis ou fixas que sofreram o retrabalhamento pela ação eólica (Horn et.al, 2013). Toda a área de estudo é considerada área de recarga do aquífero que é composta basicamente, pela região de dunas compostas quase que unicamente por partículas tamanho areia fina, com textura uniforme, com grãos arredondados e valores de condutividade hidráulica moderada entre 10E-03 a 10E-06 m/s (CLEARY, 1989 *apud* GUEDES, 1999).

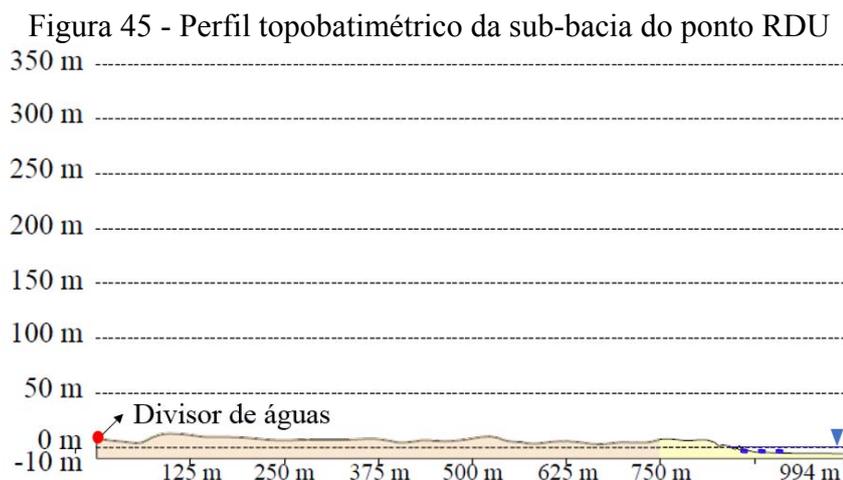
De acordo com a ficha técnica de um poço do SIAGAS perfurado na área de estudo, na lat. 27°36'29"S/ long. 48°27'22"O, a descrição litológica foi de 0-29m como areia fina e de 29-44 m como argila esverdeada, apresentando o nível freático na profundidade de 2,10m (SANTOS, 2018).

Figura 44 - Perfil topobatimétrico da seção REN. Localização da LEI e configuração do transecto dos *seepage meters*.



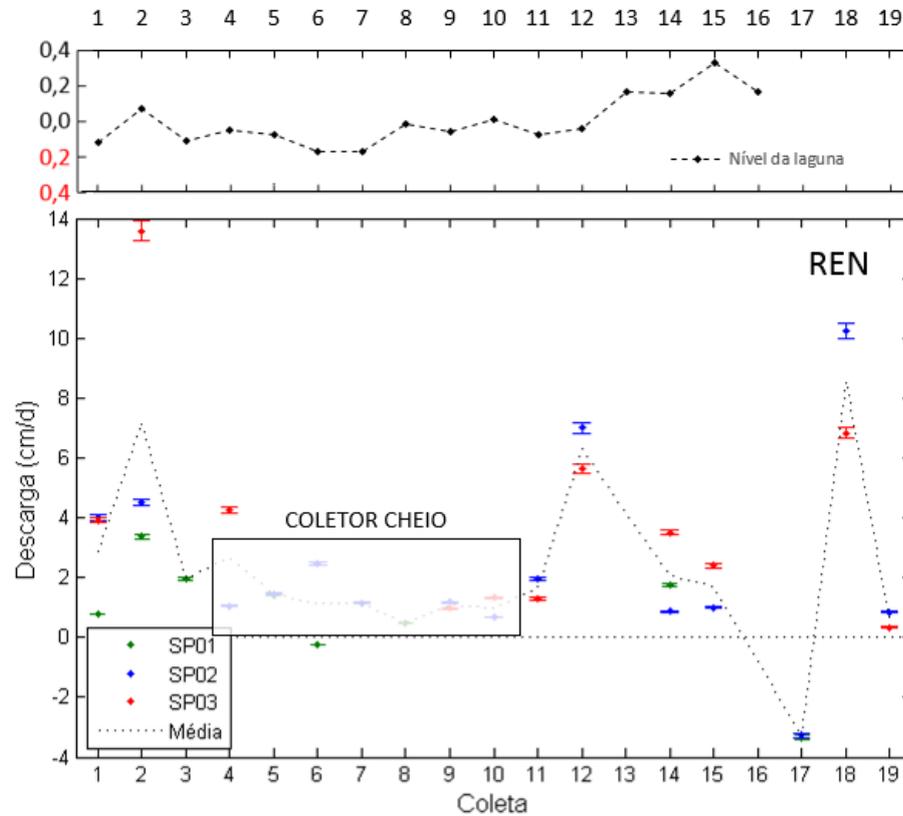
O perfil topobatimétrico da seção REN apresenta baixa declividade, a altitude no ponto mais alto do perfil é de 40m. O solo é composto, basicamente, por dunas (marrom claro), sendo uma pequena parcela próxima à margem composta por areias marinhas, representado pela cor amarelo, somado à baixa declividade favorece a infiltração da água no subsolo. Além do perfil apresentar as características de uma zona de recarga devido à inclinação e tipo de solo é possível identificar na figura a LEI presente na sub-bacia.

A fim de monitorar o raio de influência da LEI foram instalados na laguna, paralelos a margem, dois piezômetros, um a 500m à esquerda (RMA) e o outro a 500m à direita (RDU) da seção REN. No entanto não foi possível realizar medidas com piezomanômetro no ponto RMA pois todas as vezes que ele foi instalado ele foi extraviado durante o período de estabilização. A Figura 45 apresenta o perfil topobatimétrico da sub-bacia do ponto RDU. É possível verificar na figura que a seção apresenta as mesmas características que a seção REN, com a exceção da ausência da LEI.



A Figura 46 apresenta os resultados obtidos na estação REN, os valores observados mostram uma possível contribuição das recargas artificiais nas descargas de águas subterrâneas na laguna, onde o leito da LEI encontra-se a aproximadamente 8,0 m acima do nível médio da laguna. Os valores de descargas de águas subterrâneas foram sempre positivos, indicando fluxos no sentido aquífero-laguna. De modo geral, as descargas variaram entre 0 a 10 cm/d, com descarga média de 2,2 cm/d, com a exceção da coleta 17 onde a descarga média foi de -3 cm/d. As observações na estação se mostraram estáveis ao longo do monitoramento, devido à falta de dados referente ao nível da laguna nos dias anteriores a coleta ainda não foi possível estabelecer uma relação com as variações do nível no corpo lagunar.

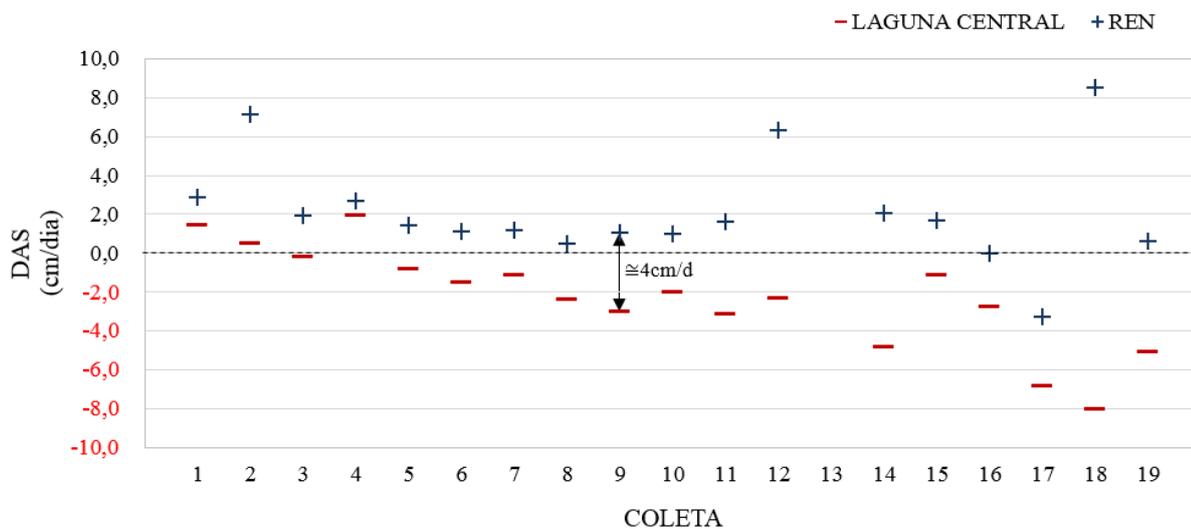
Figura 46 - Variação das descargas na seção REN ao longo das coletas.



A Figura 47 apresenta a variação das descargas na localidade REN em relação às DASm da Laguna Central ao longo das coletas. Analisando o gráfico, é possível verificar que a variação de fluxo ocorre de maneira regular para toda a laguna. Isto é, quando ocorre a redução do fluxo positivo nas rendeiras, ocorre o aumento do fluxo negativo nas outras seções do subsistema central e centro norte. A diferença está na faixa de amplitude das descargas em cada seção, a seção REN possui alteração de fluxo devido à recarga artificial exercida pela LEI, na ordem de no mínimo 4 cm/d. Aqui, ocorreu um erro referente à demanda do volume de água inserido nos coletores dos equipamentos, pois não era esperado que a magnitude de recarga fosse tão alta no local. Em algumas campanhas, nas primeiras 11 coletas, os coletores plásticos que continham água encontraram-se completamente cheios após o fim do intervalo de medição, podendo-se presumir que os valores os medidos foram subestimados. A partir da décima segunda coleta os coletores foram substituídos por coletores de maior volume, possibilitando medições corretas, onde, em algumas coletas, pode-se observar um aumento do fluxo no gráfico.

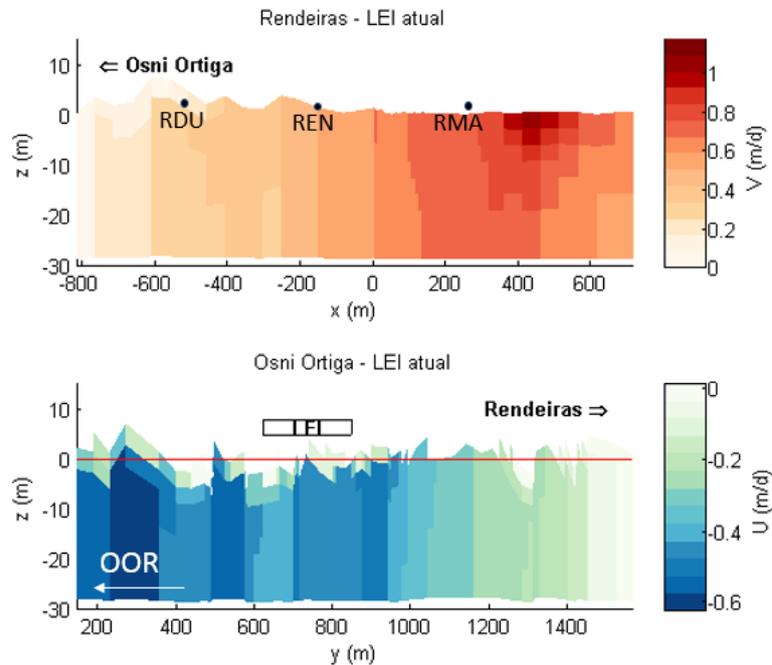
Outro problema, foi que em certas campanhas de campo não foi possível a medição em determinados medidores, visto que esses se desprenderam do sedimento. Nesta estação, houve o maior número de perdas de equipamentos, que pode estar relacionado à maior incidência de ondas no local, que movimentam o equipamento e o leito arenoso. Os *seepage meters* foram substituídos nas campanhas seguintes.

Figura 47 - Variação das descargas na localidade REN em relação as DASm da Laguna Central ao longo das coletas.



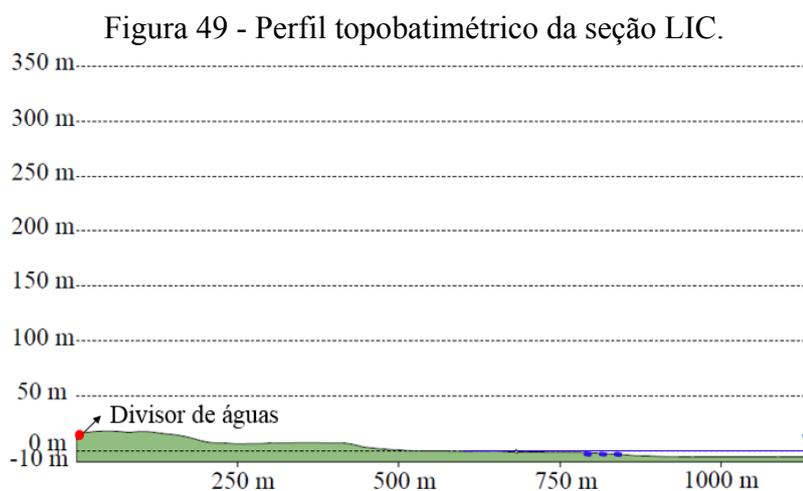
A Figura 48 apresenta o resultado do modelo simulado por Santos (2018) com a localização dos pontos amostrados nesse estudo. Na Figura 48, as velocidades observadas no ponto da seção REN varia de 20 a 40 cm/d no cenário LEI atual. Enquanto as medidas realizadas com os *seepage* variaram de 0 a 10 cm/d, assim os resultados se confirmam e estão na mesma ordem de grandeza.

Figura 48 - Velocidades medidas no modelo de Santos (2018) através de um ponto de inspeção na Av. Rendeiras.



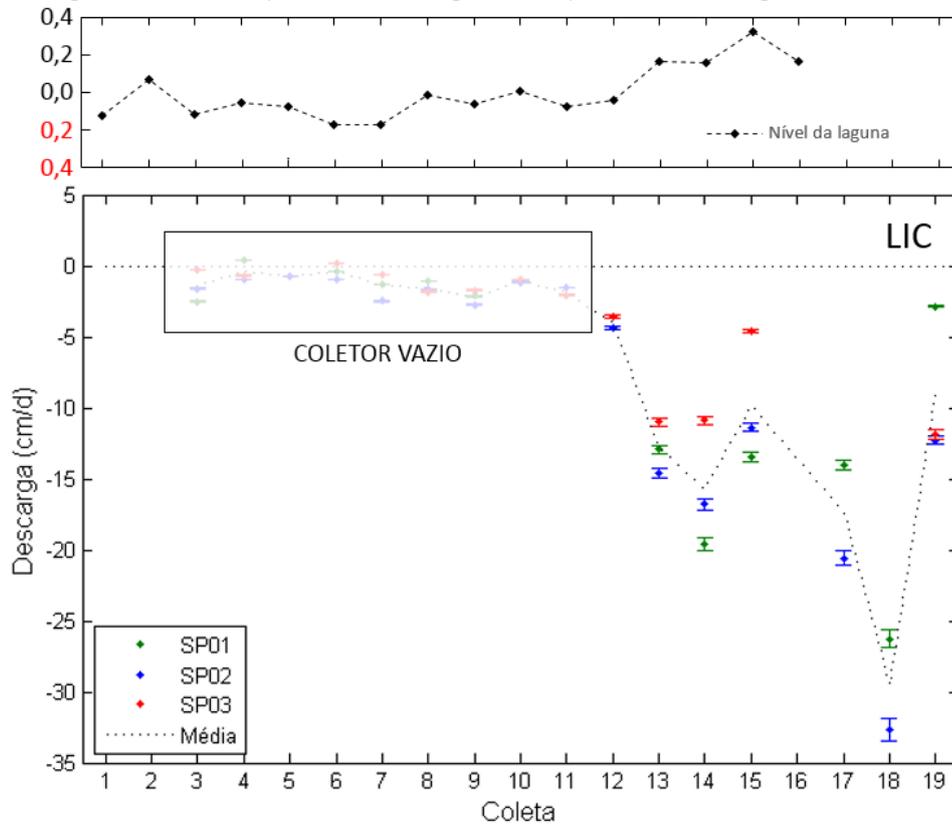
- LIC

A Figura 49 apresenta o perfil topográfico da seção. A sub-bacia, assim como as localizadas na av. das rendeiras apresenta declividade praticamente nula. O ponto mais alto da sub-bacia possui cota igual a 17m. Quanto ao tipo de solo, a sub-bacia é composta em sua totalidade por areias quartzosas, a região faz parte de um dos terraços marinhos antigos, que são formas de degraus modelados em sedimentos arenosos depositados pelo mar. Encontra-se encostado na base de uma elevação e compõe o Aquífero Ingleses, no qual os depósitos arenosos têm como única fonte de recarga a precipitação atmosférica. (PMISB, 2009).



A Figura 50 apresenta os resultados obtidos nesta seção, que apresentou significativos valores de fluxo negativo (sentido laguna-aquífero) em todas as coletas, apontando uma ordem de grandeza de até 7 vezes superior ao restante do sistema (descargas de -15 cm/d). Nas coletas iniciais, assim como para a seção REN, ocorreu um erro referente à capacidade do volume de água inserido nos coletores dos equipamentos. Como não era esperado que a magnitude do fluxo negativo fosse tão alta no local, nas primeiras 11 campanhas, os coletores plásticos que continham água encontraram-se completamente vazios após o fim do intervalo de medição, podendo-se presumir que os valores os medidos foram subestimados. Após a substituição dos coletores, pode-se observar um expressivo aumento das infiltrações no gráfico.

Figura 50 - Variação das descargas na seção LIC ao longo das coletas.



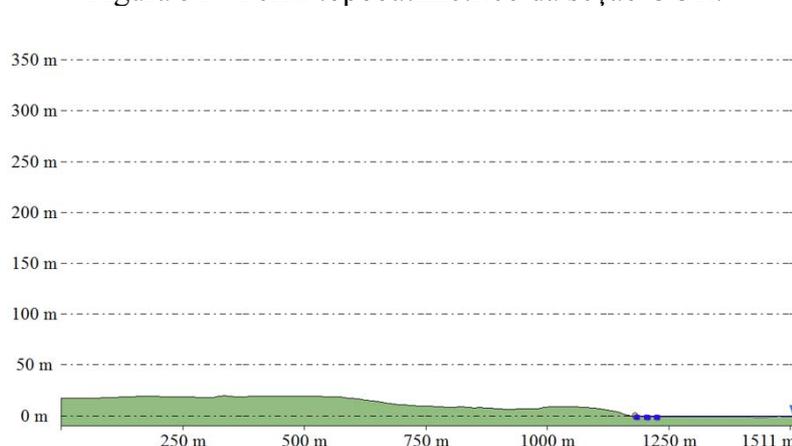
Levando-se em conta a hidrogeologia local, não era esperado a ocorrência de fluxos no sentido laguna-aquífero na localidade. Os canais de drenagem representam para o Aquífero Ingleses o extravasamento de suas águas em períodos de elevação do freático. Por outro lado, no norte da ilha, mostra o quanto o sistema aquífero em estudo, também já foi modificado pela ação humana de tal maneira que ele fica seco por longos períodos. Salienta-se que é ao longo do rio dos Ingleses que muitos dos poços da CASAN estão localizados (PMISB, 2009).

Tendo em vista, informações hidrogeológicas da região, levantou-se a hipótese de que esses resultados estariam ligados a captação de águas subterrâneas em poços de abastecimento e ponteiros próximos à estação. Foram identificados 2 poços de captação para abastecimento público da companhia de saneamento localizados a cerca de 500 m da estação. Porém, não se teve acesso a informações de vazão de captação e nível dinâmico. Ainda, foi identificado um poço de captação particular do clube esportivo localizado a 300 metros da estação e têm-se a informação de que em muitas residências da região há a cultura de captação de águas subterrâneas através de ponteiros. Devido às incertezas metodológicas, não se pode afirmar que as captações tenham tamanha influência no comportamento hidrogeológico.

- **OOR**

A seção apresenta tipo de solo e declividade similar a sub-bacia LIC (Figura 51). No entanto o aquífero desta localidade é o Aquífero Rio Vermelho (GUEDES JR, 1999).

Figura 51 - Perfil topobatimétrico da seção OOR.



Esse aquífero é muito utilizado pela população local através do sistema de ponteiras. A CASAN também possui poços nesse aquífero com canos de 6 polegadas de diâmetro atingindo profundidade de até 70 metros com vazões médias de 35.000 l/h (PMISB, 2013).

Por outro lado, Santos (2018), através de seu estudo sobre a influência da LEI no fluxo regional, verificou que as águas subterrâneas fluem para a Lagoa da Conceição, nas direções da Av. Osni Ortiga e da Av. das Rendeiras, sendo que nesta última, a intensidade do fluxo é maior. As maiores velocidades observadas através de um observador na Av. Osni Ortiga foram de aproximadamente 0,5; 0,53 e 0,65 m/d nos cenários sem LEI, início LEI e LEI atual, respectivamente, sendo encontradas na parte sul da Av. Osni Ortiga, na direção das dunas.

A seção de monitoramento instalada encontra-se na parte norte da Av. Osni Ortiga e apresentou as maiores descargas negativas medidas de todas as seções. A seção foi instalada na coleta 17 e devido à falta de visibilidade não foram realizadas medidas na coleta 18. Assim, só houveram duas coletas na seção. A média na localidade é de -17 cm/d.

#### 5.2.4 O uso do método *seepage meter* e piezomanômetro

Ao total, foram realizadas 4 etapas para o monitoramento das cargas hidráulicas na Lagoa da Conceição. Com o objetivo de confirmar e validar o sentido e as taxas dos fluxos Asub-Asup, as medições com piezomanômetros foram realizadas concomitantemente com medições diretas de descargas de águas subterrânea através de *seepage meters*.

Tabela 15 traz os resultados encontrados para descarga ( $q$ ) obtida a partir do desnível dos piezomanômetros e calculada a partir das metodologias, Kozeny-Carman e Hazen, e uma comparação com a descarga obtida através das medidas diretas dos *seepage meters*.

De modo geral, o sentido do fluxo entre águas subterrâneas e superficiais medidos com o piezomanômetro se confirmou com o sentido do fluxo dos *seepage meters* em todas as medições. Isto confere validação da metodologia para aferição do sentido dos fluxos Asub-Asup.

Na estação OOR, as medições de desnível na segunda etapa, confirmaram as medidas realizadas com os *seepages* na seção, não somente o sentido do fluxo se confirmou, como a taxa de  $-23,3 \pm 0,5$  cm/d medida pelo *seepage* é próxima à faixa medida com o piezomanômetro, onde neste ponto varia entre  $-19,7$  cm/dia a  $-21,6$  cm/d, considerando as descargas calculadas a partir da granulometria estimada por Hazen e Kozeny. Para a primeira etapa apenas o sentido do fluxo se confirmou.

Na estação LIC, todas as medições de desnível confirmaram o padrão de infiltração nesta localidade e, das 4 etapas realizadas, 2 confirmaram a taxa de fluxo e, as outras duas apresentaram valores próximos à faixa medida com o piezomanômetro.

Na estação PDA, houve apenas uma medida, que confirmou o sentido do fluxo naquele momento. No entanto a taxa de fluxo que deveria estar compreendida pelas medições do piezomanômetro entre  $-9,6 \pm 0,6$  e  $-10,5 \pm 0,5$  cm/d segundo *seepage* foi de  $-4,7 \pm 0,1$  cm/d.

Nas estações CDC e CRV não foi possível confirmar a relação entre o fluxo medido com os piezomanômetros e os *seepages meters* pois na Etapa 2 não foi possível realizar a medição com *seepage meter* devido problemas operacionais.

Nas estações RDU, REN e RMA se confirmou o sentido do fluxo Asub-Asup, onde o nível do tubo subterrâneo foi superior ao nível do tubo superficial, com a exceção da Etapa 2, onde o fluxo ocorreu no sentido Asup-Asub para ambas as metodologias. Este valor deve ser investigado pois a seção nunca apresenta fluxos negativos. Como as duas metodologias confirmaram o sentido do fluxo, esse evento foi caracterizado como um evento isolado e não como um erro inerente as metodologias.

Tabela 15 - Resultados encontrados para descarga ( $q$ ) obtida a partir do desnível dos piezomanômetro ( $dl$ ) calculada a partir da granulometria ( $K$ ) determinada por, Kozeny-Carman e Hazen, e uma comparação com a descarga obtida através da medida direta dos *seepage*.

Local	Data	Etapa	$\Delta h$ (cm)	dl (cm)	dh/dl	$q$ (cm/d) = $(dh/dl) \times K$				$q$ medido <i>Seepage</i> $\times FC$
						Kozeny $\epsilon (\pm)$	Hazen $\epsilon (\pm)$			
OOR	30/11/18	2	-6,7	93	-0,07	-52,0	0,8	-50,9	0,8	-9,1 $\pm$ 0,2
OOR	05/02/19	4	-2,8	95	-0,03	-20,9	0,7	-20,5	0,8	-23,3 $\pm$ 0,5
LIC	12/07/18	1	-0,7	63	-0,01	-6,9	1,0	-7,1	1,9	<b>-8,1<math>\pm</math>0,2</b>
LIC	30/11/18	2	-1,8	94	-0,02	-11,4	0,6	-11,7	1,3	<b>-10,3<math>\pm</math>0,2</b>
LIC	23/01/19	3	-3,5	97	-0,04	-21,7	0,6	-22,4	1,2	-27,7 $\pm$ 0,6
LIC	05/02/19	4	-0,9	100	-0,01	-5,0	0,6	-5,1	1,2	-8,5 $\pm$ 0,2
PDA	05/02/19	4	-2,0	91	-0,02	-10,5	0,5	-9,6	0,6	-4,7 $\pm$ 0,1
CRV	30/11/18	2	-2,0	91	-0,02	-11,9	0,6	-11,9	0,9	-
REN	12/07/18	1	0,6	100	0,01	13,4	0,7	20,3	2,6	2,0 $\pm$ 0,0
REN	30/11/18	2	-1,0	93	-0,01	-24,0	3,6	-36,5	2,8	-3,2 $\pm$ 0,1
REN	05/02/19	4	1,1	91	0,01	27,6	3,7	41,9	2,9	0,6 $\pm$ 0,0
RDU	30/11/18	2	0,8	93	0,01	20,8	4,4	32,6	2,8	-

- **Utilização do piezomanômetro**

A utilização do piezomanômetro se mostrou bastante útil, sobretudo para a investigação e confirmação dos sentidos dos fluxos na interface sedimento-água. A complementação com as medições feitas com *seepage meters* acarretam na confirmação dos padrões de interação Asub-Asup verificados e dão uma estimativa da taxa de fluxo entre os compartimentos superficiais e subterrâneos.

Acredita-se que a diferença entre as descargas calculadas através da Equação de Darcy e da medida direta com *seepage meters* deve-se ao fato de ambas metodologias serem suscetíveis a erros de medição, conforme abordado por Arcari (2019). No entanto, os testes realizados em laboratório com os *seepages* (Item 4) apontam que o equipamento possui uma eficiência de 88%, dando assim, credibilidade aos resultados encontrados com o método. Quanto ao piezomanômetro pode se considerar que o método apresenta resultados satisfatórios para investigação e diagnóstico inicial, principalmente em relação ao sentido do fluxo. As maiores fontes de erro na metodologia aplicada com os piezomanômetros foram:

- A profundidade (*dl*) do mini piezômetro deve ser medida em todas as etapas, pois, devido a ações do vento e ondulação ocorre a movimentação do sedimento de fundo, podendo alterar o *dl*.

- Deve ser instalado mais de um piezômetro por seção, no mínimo três piezômetros em transecto. Assim, seria possível verificar a existência de um gradiente hidráulico em relação à margem e, também, a triplicata dos dados.

- A coleta de amostra de solo para a determinação da condutividade hidráulica deve ser exatamente a mesma da seção filtrante do piezomanômetro. Uma das possíveis fontes de erro nos piezomanômetros se deve ao posicionamento da pequena seção filtrante de 5 cm, inserida em uma profundidade de aproximadamente 1,00 m. Já a estimativa de condutividade hidráulica foi feita através de ensaio granulométrico a partir da homogeneização de camada de 70 cm do sedimento e em alguns pontos a 20 cm.

- A inserção do mini piezômetro no sedimento foi demorada e dificultosa em função do uso de uma ponteira não adequada. Sugere-se, para próximos estudos, a fabricação de uma peça rígida com ponteira estreita, que facilite a instalação dos mini piezômetros. Foi verificado que não há distinção entre o mini piezômetro inserido com o trado e o inserido apenas com a marreta. Assim, recomenda-se a inserção de mini piezômetros com trado.

- Após a inserção dos tubos, a medição foi realizada sem maiores dificuldades. Deve-se atentar à formação de bolhas de ar no interior da tubulação e pequenos vazamentos entre as conexões da tubulação. É necessário também atentar-se às condições meteorológicas, visto que o vento e ondulações dificultam as medições de maneira precisa. Recomenda-se a utilização de um tubo para atenuar o efeito das ondas. O método apresenta a vantagem de apontar o sentido do fluxo em tempo real, facilitando as medidas com o *seepage*, uma vez que conhecendo o sentido do fluxo é possível determinar qual será o volume utilizado na bolsa do medidor com maior precisão.

Recomenda-se realizar estudos para medição da condutividade hidráulica *in loco*, conforme propõem Cardenas e Zlotnik (2003), que desenvolveram o método de injeção de carga constante para o cálculo da condutividade hidráulica em rios, lagos e lagunas com sedimento arenoso. O método consiste na injeção de água com carga e vazão constante em um mini piezômetro instalado no sedimento. A partir da estabilização do fluxo, os dados de vazão, carga hidráulica e geometria do piezômetro, são utilizadas as equações de Bouwer-Rice (1976) para

determinação da condutividade hidráulica. Outro método, proposto por Baxter *et al.* (2003), é semelhante ao anterior, porém leva em consideração o tempo necessário para o nível no piezômetro estabilizar após a injeção singular de um volume d'água.

- **Utilização dos *seepage meters***

Embora a metodologia tenha aparência simples e eficiência de 88% comprovada em laboratório, na prática há diversas dificuldades na aplicação. Significantes erros de medição foram identificados e que podem ocorrer devido ao design e operação dos equipamentos. Os erros que se mostraram recorrentes foram:

- Conexão indevida entre o coletor plástico e o tubo conector. É a maior fonte de erro e de perda de amostras. A conexão deve ser feita de maneira a vedar a entrada/saída de água para o ambiente e não impossibilitar a passagem de água da bolsa coletora para o tambor. Para tal, a bolsa deve ser acoplada ao medidor de maneira totalmente uniforme, pois o acúmulo de plástico em um lado de medidor impede o fluxo de água no local. Diversos métodos de vedação foram testados, como fita de auto fusão, abraçadeiras plásticas e tubo de látex. O método com melhor aproveitamento foi o de tiras de câmara de pneu automotiva;

- Dimensionamento inadequado dos coletores: em algumas medições nas estações LIC, REN e PDA o volume inicial de água dos coletores foi insuficiente para a descarga local, ficando totalmente vazios (fluxo negativo) ou cheios (fluxo positivo), conforme descrito anteriormente.

- Perda de equipamentos: Ao todo foram perdidos 06 tambores, possivelmente devido ao constante movimento do leito arenoso, fazendo com que os *seepage meters* se soltassem. Futuramente, os tambores serão ancorados. Não se descarta a ação de roubo e vandalismo;

- Micro furos nas bolsas coletoras: houve certa dificuldade em garantir a integridade dos coletores plásticos, pois estes devem ser finos o suficiente para não interferirem no fluxo natural das águas. Porém, no manuseio e transporte, alguns coletores se danificavam e furavam, interferindo nos resultados. Também há a possibilidade de que a deterioração dos coletores tenha sido causada pela carcinofauna e ictiofauna associada;

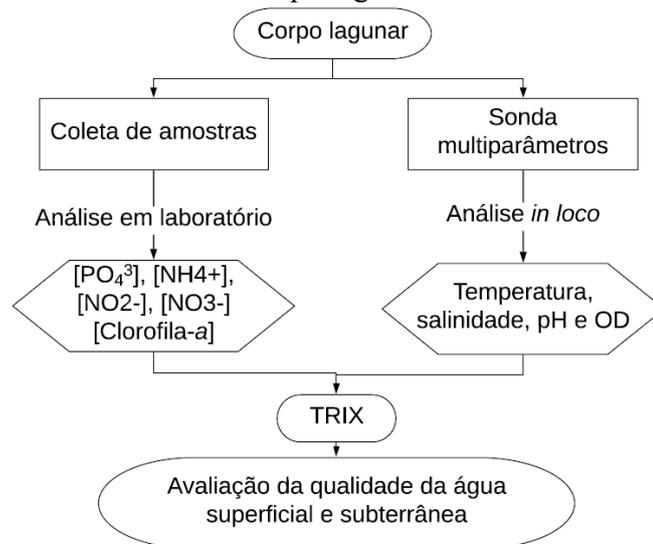
- Número de medidas insuficientes. Como em cada seção foram instalados apenas três tambores, muitas vezes, devido aos problemas supracitados, ao final da coleta apenas os dados de dois tambores puderam ser considerados válidos. Com apenas duas medidas não é possível calcular erro ou desvio. Recomenda-se a instalação de quatro ou mais tambores por seção, de forma que, mesmo com a exclusão de um dado, ainda seja possível obter uma triplicata das DAS e formar um transecto.

## 6 ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E SUBTERRÂNEA DA LAGOA DA CONCEIÇÃO

Para determinar a qualidade da água subterrânea e superficial da Lagoa da Conceição foram analisados os parâmetros físicos: temperatura e salinidade, químicos: pH, oxigênio dissolvido,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$  e  $\text{NO}_3^-$  e biológicos: clorofila-*a*.

Os parâmetros analisados em laboratório por meio das amostras de águas superficiais e subterrâneas coletadas no corpo hídrico e nos piezômetros respectivamente, serão os nutrientes dissolvidos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$  e  $\text{NO}_3^-$ ) e clorofila-*a*. As campanhas de monitoramento dos parâmetros de qualidade da água realizados *in loco*, com a sonda multi parâmetro, ocorram simultaneamente com as campanhas de medições de descargas de águas subterrâneas. A Figura 52 mostra o fluxograma metodológico aplicado a esta seção.

Figura 52 - Fluxograma metodológico aplicado para a determinação da qualidade de água no corpo lagunar.



### 6.1 LEVANTAMENTO DE DADOS EM CAMPO E ANÁLISE EM LABORATÓRIO

A distribuição dos pontos amostrais selecionados é a mesma da amostragem das DAS. Foram realizadas no total, nove campanhas de monitoramento com a sonda multi parâmetros, das quais em três, foram também coletadas amostras de água para análise em laboratório. Os pontos amostrados foram: LIC, OOR, REN, RDU, PDA, CDC e CRV. A Tabela 16 apresenta a relação das regiões monitorados em cada campanha e o tipo de coleta de dados realizada.

Tabela 16 - Relação das coletas realizadas em cada campanha, data, seções

Campanha	Data	Seções Monitoradas	Meio Amostrado	Coleta
6, 7, 8, 11, 14 e 16		*Tabela 13	Superficial	Sonda
17	30/11/2018	OOR, LIC, PDA, CDC, CRV, RMA, REN e RDU		
18	23/01/2019	LIC, PDA, RMA e REN	Superficial, subterrâneo	Sonda, coleta de amostra
19	05/02/2019	OOR, LIC, PDA, CDC, CRV, REN e RDU		

Os parâmetros temperatura, salinidade, condutividade, pH, oxigênio dissolvido foram medidos *in situ* com o Medidor Multiparâmetro AK88 da marca AKSO. Nas primeiras 6 campanhas, os piezômetros ainda não estavam instalados. Portanto, medidas foram realizadas apenas na água superficial, sempre ao lado dos *seepage*, a aproximadamente 30 cm da superfície. Após a instalação dos piezômetros (Campanha 17) as medidas *in situ* passaram a ser realizadas também no meio subterrâneo, através da inserção da sonda dentro do piezômetro. Este equipamento possibilitou também a coleta de amostra de água subterrânea.

Em laboratório, as amostras de água foram filtradas em microfiltros de fibra de vidro de 47mm (Whatman GF/F). Os filtros e as amostras de água foram estocados e congelados a  $-8^{\circ}\text{C}$  até o momento da análise. O filtrado foi utilizado para a análise dos nutrientes inorgânicos dissolvido (nitrato + nitrito, N-amoniacal e ortofosfato), pelos métodos descritos em Grasshoff *et al.* (1999), com a exceção do N-amoniacal, no qual foi aplicado o método indofenol descrito em Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (2012). Os filtros foram usados para a determinação da concentração de clorofila-*a* de acordo com Strickland & Parsons (1972). As absorbâncias das amostras foram lidas em espectrofotômetro, usando o modelo Hitachi U-2900, com sistema *sipper*. O Nitrogênio Inorgânico Dissolvido (NID) foi calculado pela soma das concentrações de Nitrato + Nitrito e N amoniacal. Foi assumido que a concentração total de ortofosfato é igual a concentração do Fosfato Inorgânico Dissolvido (PID).

## 6.2 RESULTADOS ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E SUBTERRÂNEA

Nesta seção é apresentada a dinâmica espaço-temporal da laguna. Os valores médios, desvio padrão, mínimo e máximo de temperatura, salinidade, pH, oxigênio dissolvido, oxigênio saturação, nitrato, nitrito, amônio, fosfato e clorofila-*a* são apresentados na parte superior da

Tabela 17. Na parte inferior são apresentadas as variáveis calculadas a partir dos dados medidos, são elas, NID, relação N:P e TRIX.

Tabela 17 - Estatísticas descritivas das variáveis físicas, físico-químicas, compostos nitrogenados inorgânicos, fósforo inorgânico (PID), clorofila-a medidos *in situ* e em laboratório e das variáveis calculadas, NID (nitrogênio inorgânico dissolvido), razão N:P e TRIX.

Meio	Superficial todas as coletas				Superficial nov/18 a jan/19				Subterrâneo nov/18 a jan/19				
	Variável	N	Méd	Mín	Máx	N	Méd	Mín	Máx	N	Méd	Mín	Máx
<i>In situ</i>	Temperatura (°C)	51	24,7±0,4	19,8	33,3	26	27,1±0,5	23,8	33,3	17	26,2±0,5	23,8	30,2
	pH	51	8,2±0,1	7,6	8,5	26	8,2±0,1	7,8	8,5	17	7,6±0,1	6,2	8,6
	OD (mg/l)	51	7,8±0,2	4,3	10,0	26	7,7±0,2	4,3	9,4	17	2,2±0,5	0,4	8,1
	OD (%)	51	95,2±2,3	57,6	130,3	26	99,3±2,9	72,4	130,3	17	28,4±7,0	5,6	105,0
	Condutividade (mS/cm)	51	39,1±0,9	19,3	46,3	26	37,6±1,4	19,3	46,3	17	37,7±1,8	14,1	43,1
	Salinidade (psu)	51	25,9±0,6	11,9	31,0	26	24,7±1,0	11,9	31,0	17	23,4±1,9	0,2	28,6
Laboratório	Clorofila-a (ug/l)	21	2,5±0,4	0,6	7,1	21	2,5±0,4	0,6	7,1				
	PID (ug/l)	21	4,8±0,5	2,7	12,8	21	4,8±0,5	2,7	12,8	16	36,3±13,5	2,8	184,4
	N-NH3 (ug/l)	21	5,5±1,3	0,0	20,0	21	5,5±1,3	0,0	20,0	16	74,4±14,4	20,0	185,0
	N-NOx (ug/l)	21	24,7±2,8	8,2	64,0	21	24,7±2,8	8,2	64,0	14	26,2±4,9	9,1	81,0
Calculado	NID (ug/l)	21	30,2±3,5	8,2	74,0	21	30,2±3,5	8,2	74,0	13	106,6±16,9	42,3	213,6
	Razão NP	21	6,8±0,9	0,6	7,1	21	6,8±0,9	0,6	7,1	13	6,7±1,8	0,4	23,5
	TRIX	21	4,8±0,2	3,0	5,7	21	4,8±0,2	3,0	5,7				

### 6.2.1 Caracterização Física

A caracterização das variáveis do meio físico será apresentada da mesma maneira. A primeira figura exhibe o comportamento da variável por localidade discriminada por coletas apenas no meio superficial, pois o meio subterrâneo só foi analisado nas três últimas coletas (17, 18 e 19). Em seguida, serão apresentados dois gráficos box-plot, onde os pontos em circunferência representam os *outliers* e os pontos em cruz representam os *outliers extremos*, sendo estes os pontos que estão a mais de três faixas interquartis da extremidade da caixa, definidos através de 1,5 IQR (Intervalo Interquartil). Os gráficos apresentam os conjuntos de valores referentes a coleta 17, 18 e 19 onde os dois meios (superficial e subterrâneo) foram amostrados. O primeiro gráfico box-plot apresenta a variação do parâmetro por localidade, discriminando o meio superficial e subterrâneo, e o segundo gráfico apresenta a comparação

dos valores antes e depois da alta temporada, aqui definido como o período de dezembro ao final de janeiro.

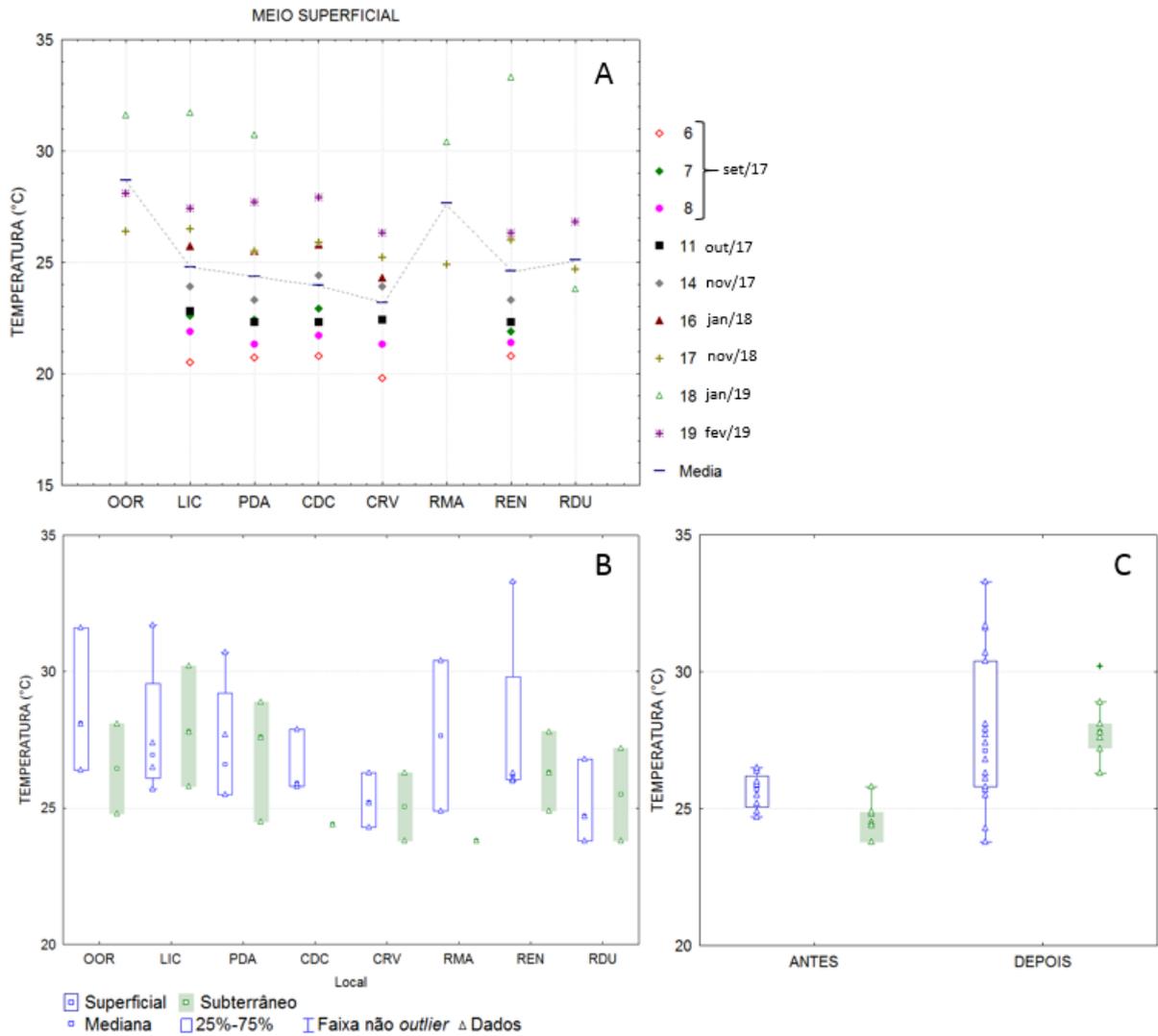
- Temperatura

Na Figura 53 A estão representadas as variações da temperatura nas águas superficiais por localidade nas oito seções, durante as campanhas de 2017 a 2019. O gráfico scatter plot apresenta os dados discriminados por coleta. A Figura 53B apresenta os dados referentes às coletas de novembro de 2018 a fevereiro de 2019, comparando o meio superficial e o subterrâneo. A Figura 53C, por sua vez, não apresenta distinção espacial, mas sim, temporal, entre o período antes e depois da alta temporada.

Durante todas as campanhas (set/17 a fev/2019) os valores mínimos e máximos registrados nas águas superficiais da laguna foram 19,8 e 33,3°C, respectivamente. A temperatura mínima foi medida na região CRV, que se encontra no subsistema centro-norte da laguna, e a máxima na REN (centro). Já no meio subterrâneo (nov/2018 a fev/2019), a temperatura mais elevada (30,2 °C), foi medida no LIC (subsistema sul) e a mais baixa (23,8°) no setor RMA (centro).

A temperatura na laguna apresenta aumento quase constante ao longo das coletas, fato justificado pela temperatura externa.

Figura 53 - Variação da temperatura (°C) nas águas superficiais e subterrâneas na laguna.



Scatter plot da variação espacial da temperatura (°C) em águas superficiais discriminada por coleta durante todo o período amostrado (A). Box-plot da variação espacial da temperatura no meio superficial (azul) e subterrâneo (verde) (B). Box-plot da variabilidade temperatura (°C) antes e depois da alta temporada (C). Os gráficos B e C apresentam apenas os dados das campanhas de novembro de 2018 janeiro e fevereiro de 2019, pois somente nestas houveram análises no meio superficial e subterrâneo simultaneamente.

### 6.2.2 Caracterização físico-química

- Salinidade

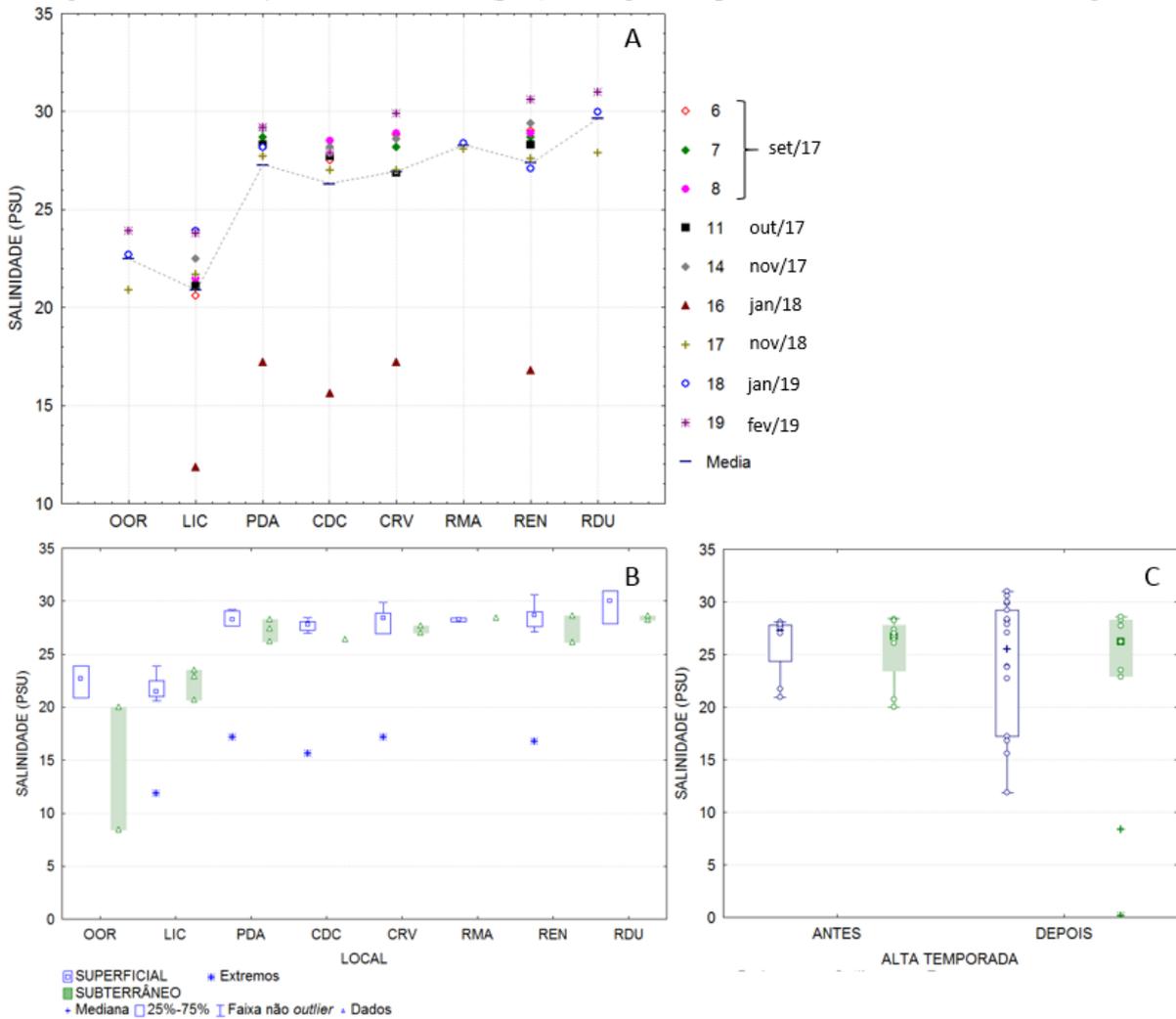
Na Figura 54A está representada a variação espacial da salinidade nas águas superficiais nas oito seções, durante as campanhas de 2017 a 2019. O gráfico *scatter plot* apresenta dos dados discriminados por coleta. A Figura 54B, apresenta os dados referentes coletas de novembro de 2018 a fevereiro de 2019, comparando o meio superficial e o subterrâneo. A Figura 54 C, não apresenta distinção espacial, mas sim, temporal entre o período antes e depois da alta temporada.

Durante todas as campanhas (set/17 a fev/2019) Figura 54C, os valores mínimos e máximos de salinidade (psu) registrados nas águas superficiais da laguna foram 11,9 e 31,0 psu, respectivamente, o que enquadra a Lagoa da Conceição como corpo de água salobra, segundo a CONAMA 357/05. A salinidade mínima foi medida na região LIC, que se encontra no subsistema Sul, e a máxima na RDU (centro). Já no meio subterrâneo (Figura 54B), a salinidade mais elevada (28,6 psu), foi medida nas REN (centro) e a mais baixa (0,2 psu) no setor RMA (centro), seguida pela salinidade de 8,4 psu na OOR (sul).

A região menos salina da laguna é o sub-sistema sul, representado pelas medições realizadas no LIC e OOR, cuja conexão com a região central ocorre através de um canal estreito, o que favorece a influência hidrológica nos padrões de qualidade da água. A queda brusca nos valores de salinidade em toda a laguna na campanha 16 é justificada pelo evento de chuva intensa ocorrido na semana anterior a medição.

A menor salinidade encontrada (0,2 psu) no meio subterrâneo foi medida em um piezômetro da CASAN, PZ02, que está a 0,25m corpo lagunar que possui 1,95m de profundidade (Santos,2018). Esta medida foi realizada pois nesta coleta (campanha 18) o piezômetro instalado na seção REN foi extraviado. Para não ficar com uma lacuna de dados optou-se por utilizar o piezômetro da CASAN, por isso a salinidade tão baixa.

Figura 54 – Variação da salinidade (psu) nas águas superficiais e subterrâneas da laguna.



Scatter plot da variação espacial da salinidade (psu) em águas superficiais discriminada por coleta durante todo o período amostrado (A). Box-plot da variação espacial da salinidade no meio superficial (azul) e subterrâneo (verde) (B). Box-plot da variabilidade salinidade antes e depois da alta temporada (C). Os gráficos A e B apresentam apenas os dados das campanhas de novembro de 2018 janeiro e fevereiro de 2019, pois somente nestas houveram análises no meio superficial e subterrâneo simultaneamente.

- pH

Na Figura 55A está representada a variação espacial do pH nas águas superficiais nas oito seções, durante as campanhas de 2017 a 2019. O gráfico *scatter plot* apresenta os dados discriminados por coleta. A Figura 55B, apresenta os dados referentes coletas de novembro de 2018 a fevereiro de 2019, comparando o meio superficial e o subterrâneo. A Figura 55C, não apresenta distinção espacial mas sim temporal entre o período antes e depois da alta temporada.

Nas águas superficiais (Figura 55A) os valores mínimos e máximos de pH registrados foram 7,6 e 8,5, respectivamente. De modo geral, as regiões do meio superficial da laguna não apresentaram variação significativa no pH, mantiveram-se básicas. O pH mínimo foi medida na seção LIC (sul), e o máximo na seção REN (centro). Já no meio subterrâneo (Figura 55B), o pH mais elevado (8,6), foi medido na PDA e o mais baixo (6,2) no seção REN ambas na laguna central.

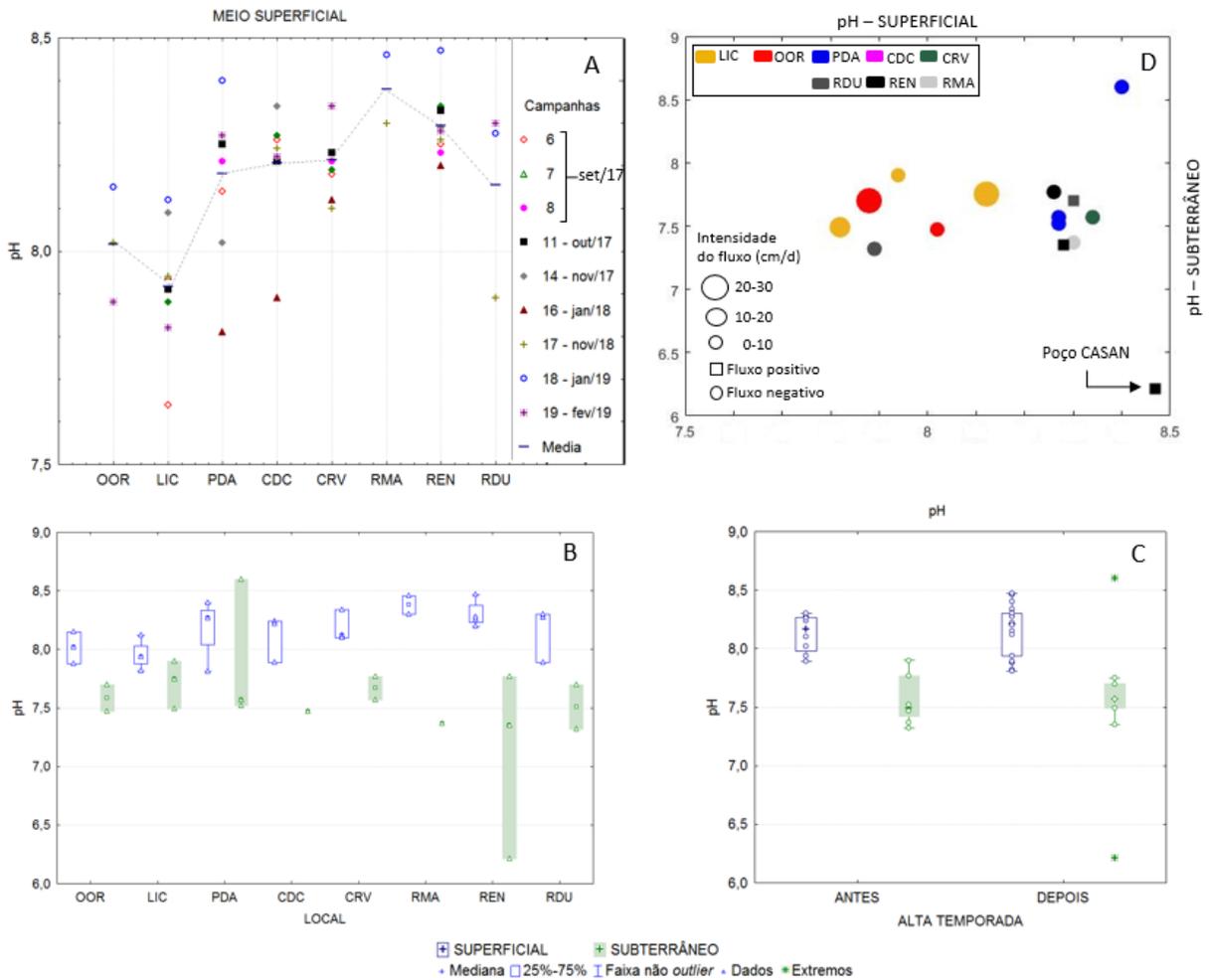
Variações de pH em lagunas costeiras podem propiciar alterações específicas na dinâmica e funcionamento desses ecossistemas. A faixa de pH das águas nesse estudo mostrou uma baixa amplitude de variação (7,6 a 8,5). Isto é, conferindo a este ambiente um caráter tamponado, que pode ser atribuído à influência marinha na área. Os maiores valores desta variável foram encontrados nos pontos onde a salinidade foi maior. Já os menores valores de pH foram encontrados no subsistema sul, a diante será discutida a investigação acerca da proliferação de algas, porém este fator pode ser responsável pela diminuição do pH e OD da água no subsistema sul em relação ao restante da laguna. Além disso, o subsistema sul, por sua configuração é o que possui a maior resposta a eventos hidrológicos. É possível atribuir a diminuição da alcalinidade da água no subsistema devido ao escoamento superficial, pois além de reduzir a salinidade do corpo hídrico, carrega substâncias húmicas para a lagoa, contribuindo para a acidez no corpo lagunar.

Em relação ao meio subterrâneo, o pH esteve entre básico à próximo da neutralidade. O menor pH (6,2) foi medido no piezômetro da CASAN localizado nas REN. Santos (2018) verificou que, o pH nos efluentes tratados e na LEI no período de 2008 a 2018 apresentaram resultados médios de 7,3 e 6,9. Nas águas do lençol freático, os valores variaram entre 5,7 a 7,3, tendo sido observado um aumento nas águas próximas da LEI e uma redução nas águas do lençol fora da LEI.

As outras medidas realizadas nos piezômetros instalados dentro da laguna na região REN apresentaram média de 7,5 (Figura 55B) enquanto o corpo de água superficial 8,3. As águas subterrâneas da região da Av. das Rendeiras (RMA, REN e RDU), apresentam em geral caráter mais básico que o restante da laguna, ao contrário do que ocorre no meio subterrâneo.

Não houveram variações significativas no pH em relação as coletas antes e depois da alta temporada (Figura 55C).

Figura 55 – Variação do pH nas águas superficiais e subterrâneas da laguna.



Scatter plot da variação espacial do pH em águas superficiais discriminada por coleta durante todo o período amostrado (A). Box-plot da variação espacial da pH no meio superficial (azul) e subterrâneo (verde) (B). Box-plot da variabilidade do pH antes e depois da alta temporada (C). O scatter-plot (D) apresenta relação da variação do pH do meio subterrâneo pelo superficial. Os gráficos B, C e D apresentam apenas os dados das campanhas de novembro de 2018 janeiro e fevereiro de 2019, pois somente nestas houveram análises no meio superficial e subterrâneo simultaneamente.

- Oxigênio dissolvido (OD)

Na Figura 56 A está representada a variação espacial do oxigênio dissolvido nas águas superficiais nas oito seções, durante as campanhas de 2017 a 2019. O gráfico *scatter plot* apresenta dos dados discriminados por coleta. A Figura 56B apresenta os dados referentes coletas de novembro de 2018 a fevereiro de 2019, comparando o meio superficial e o subterrâneo. A Figura 56C, por sua vez, não apresenta distinção espacial mas sim temporal entre o período antes e depois da alta temporada. Nas águas superficiais (Figura 56A) os valores mínimos e máximos de OD registrados foram 4,3 e 10,0 mg/l respectivamente, o valor mínimo foi

medido no LIC e o máximo no PDA. Já no meio subterrâneo (Figura 56B), o valor mais elevado de OD foi medido na seção PDA (8,1) e o mínimo na OOR (0,4).

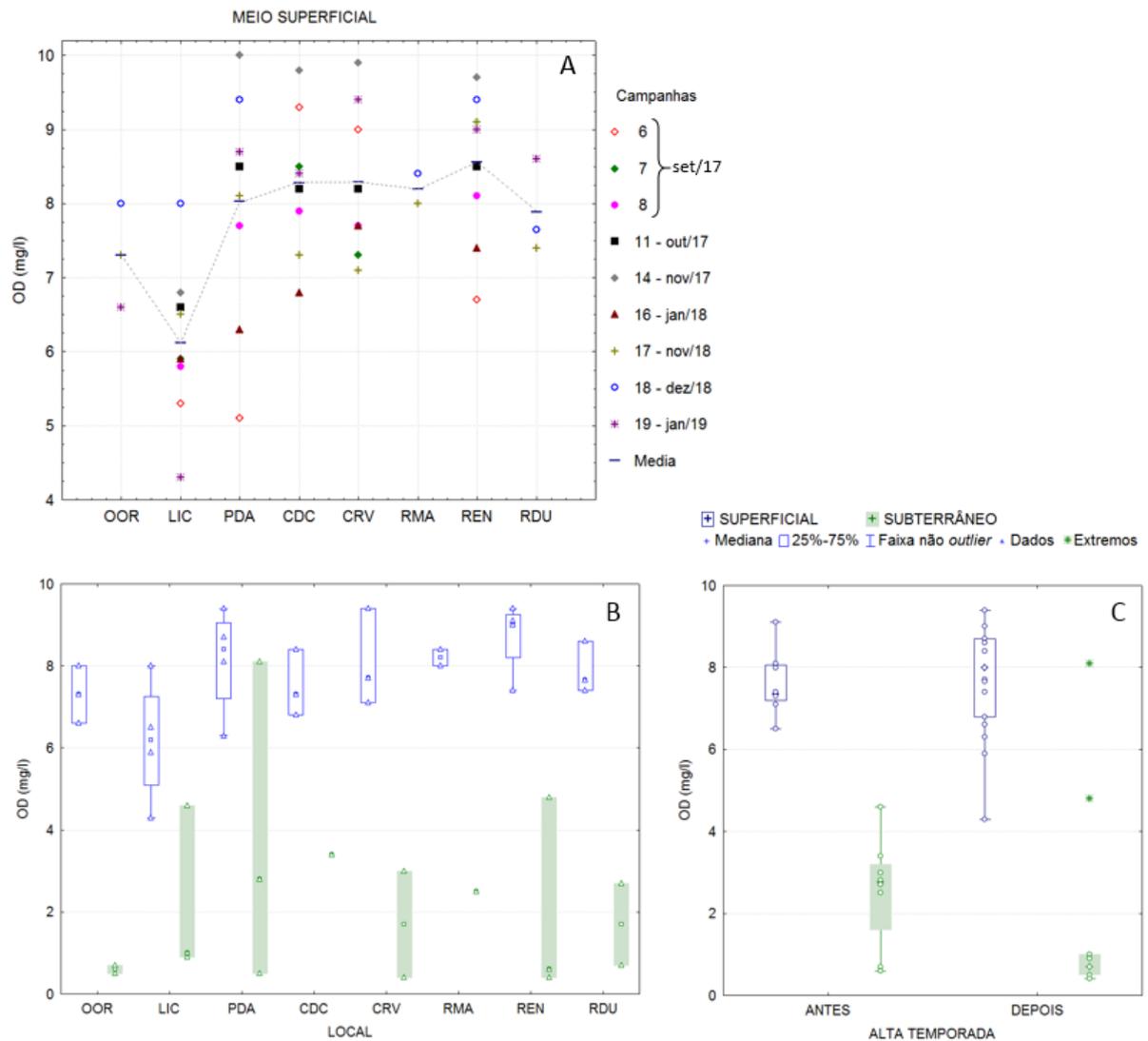
Em relação ao período anterior e posterior a alta temporada C, é possível observar, principalmente pela caixa, um pequeno aumento na concentração de OD após a alta temporada.

A quantidade de oxigênio dissolvido (OD) em condições normais, depende da temperatura, da quantidade de sais presentes e da pressão atmosférica. Portanto, águas menos salinas deveriam conter mais OD. No entanto, o fato não ocorreu no subsistema sul. Águas mais frias retêm maior quantidade de oxigênio, o que justifica a queda na concentração de OD no corpo lagunar apresentado

Os menores teores de oxigênio dissolvido, tanto no meio superficial quanto no subterrâneo, foram encontrados no subsistema sul, o fato indica que há, nesta região, uma intensa atividade bacteriana decompondo a matéria orgânica lançada na água. Portanto, as reduções nas concentrações de oxigênio no subsistema podem ter sido provocadas por despejos de origem orgânica, visto que o subsistema sul é uma das regiões mais ocupadas da bacia. Somado a isto, o fato da circulação de água ser reduzida no subsistema, devido a estreita passagem entre o subsistema sul e central, com lançamento de esgoto nas águas dos rios ocorre o aumento da proliferação de algas, que são formadoras de grande quantidade de biomassa. Quando entram em decomposição, contribuem para a diminuição do teor de oxigênio dissolvido e formação de gás sulfídrico. A concentração média de OD no local PDA é menor do que no restante da laguna central (Figura 56A), o local apresenta grande dispersão nos valores em torno da média, variando de 5,1 mg/l a 10 mg/l, o que indica uma variabilidade elevada possivelmente resultante da influência da mancha urbana próxima a sub-bacia do ponto de coleta, pois apesar de não ser a SBH mais populosa dentre os locais amostrados na lagoa central é o que sofre com a maior urbanização em seu entorno, sendo assim as concentrações variam possivelmente devido a influência antrópica.

Pela legislação Conama nº 357/05, o OD para as águas salobras, Classe 1, no território nacional deve ser maior que 5,0 mg/l, os dados medidos na laguna apresentaram apenas um valor inferior a legislação. Quanto as águas subterrâneas, a concentração de OD pode estar em pequena quantidade, já que maior parte do ar dissolvido é consumido na oxidação da matéria orgânica durante a percolação da água na zona de aeração, assim, a análise de OD em águas subterrâneas tem uso mais limitado como indicador de poluição.

Figura 56 - Variação do oxigênio dissolvido nas águas superficiais e subterrâneas da laguna.



- Nitrogênio inorgânico dissolvido (NID)

Todos os gráficos da Figura 57 estão representados para o mesmo período, de novembro de 2018 a fevereiro de 2019 por foi quando houveram as campanhas de coletas de nutrientes.

O NID representa o somatório das concentrações de nitrato, nitrito e amônio ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$  e  $\text{NH}_4^+$ ) na coluna de água. Portanto, a sua concentração estará diretamente vinculada à forma nitrogenada preponderante em cada setor e em cada coleta.

Na Figura 57A é possível verificar uma redução na concentração de NID ao longo das três coletas. Os valores máximos de NID nas águas superficiais da laguna foram de 74  $\mu\text{g/l}$  e 54,3  $\mu\text{g/l}$  nas seções OOR e RMA respectivamente. O valor mínimo, 8,2  $\mu\text{g/l}$  foi detectado na

seção PDA. Na Figura 57B, é possível verificar que a diferença entre os meios superficial e subterrâneo é expressiva, o valor máximo detectado foi medido na seção OOR e REN.

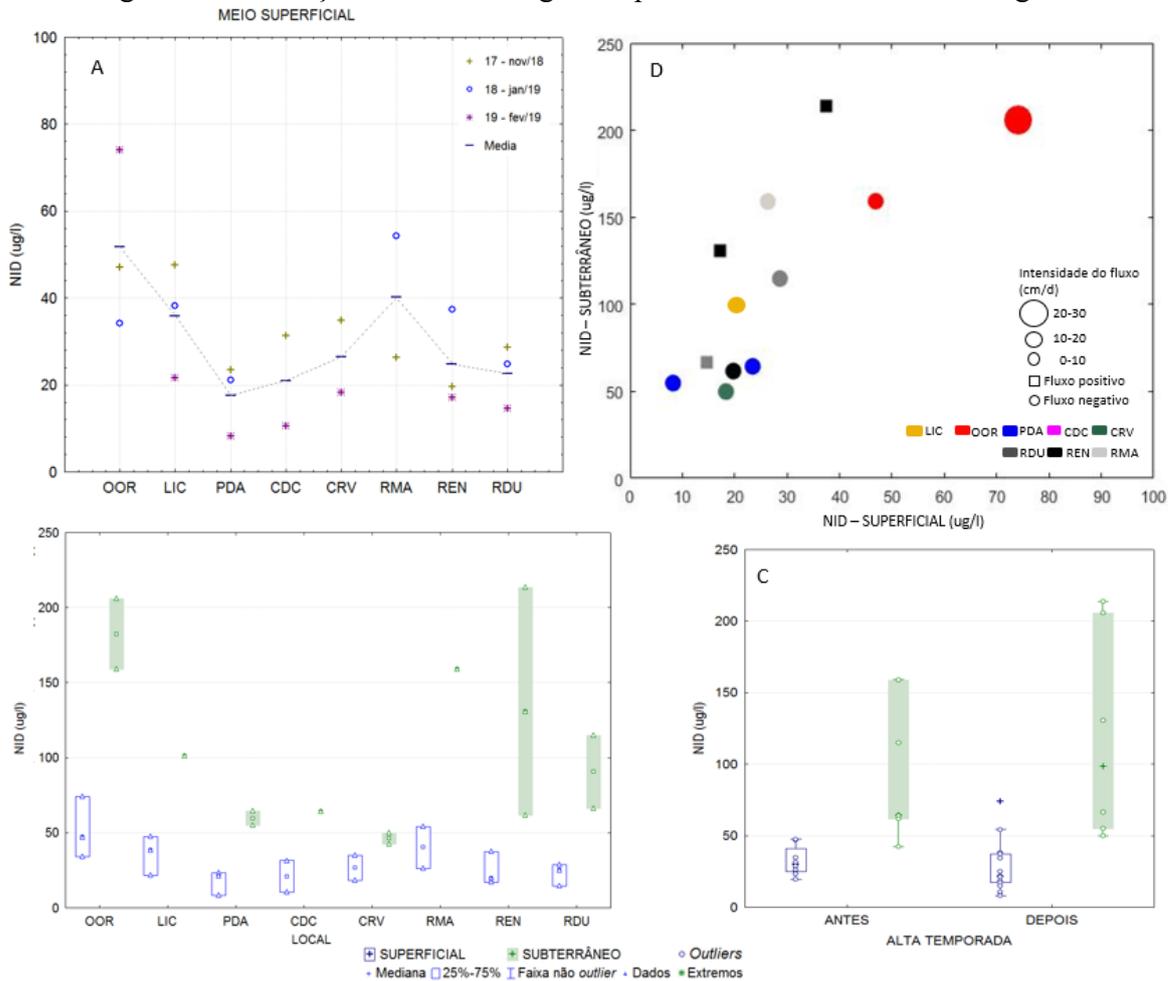
Em relação ao período antes e depois da alta temporada, verifica-se na Figura 57C que a concentração de NID na superfície diminuiu enquanto no meio subterrâneo aumentou.

O *scatter plot* apresentado na Figura 57D apresenta a correlação entre o NID superficial e subterrâneo. A seção OOR e a região da Av. das Rendeiras (RDU, REN e RMA) apresentam as maiores concentrações tanto no meio superficial como no meio subterrâneo. No gráfico é possível distinguir o sentido do fluxo em cada coleta, sendo que os quadrados representam o fluxo positivo e os círculos o fluxo negativo. Analisando o gráfico, verifica-se que as maiores concentrações medidas de NID (OOR) estão abastecendo o aquífero, enquanto na seção REN, o meio subterrâneo apresenta maior concentração de NID que o superficial, e nesta região prevalece o fluxo positivo.

Santos (2018) verificou que para o período de 2008 a 2017 os valores médios de  $\text{NH}_3$  no efluente tratado (T) e na LEI foram de 34 e 6,5 mg/l no T e na LEI, respectivamente, enquanto que nas águas do lençol freático na área da LEI, estes valores variaram de 0,4 a 14,6 mg/l e de 0,5 a 7 mg/l na área fora da LEI. Pode-se confirmar que o destino do nitrogênio é incompleto, pois o nitrogênio amoniacal atinge as águas do lençol freático antes de se nitrificar, graças ao solo já saturado, sob condições anaeróbicas, que inibe a ocorrência do processo de nitrificação. Com relação à toxicidade do nitrogênio amoniacal nas águas do lençol freático o maior valor encontrado no período foi de 41,5mg/l obtidos a uma distância de 380m da Lagoa da Conceição e no mês de dezembro de 2017.

As altas concentração de NID nos pontos OOR e REN E RMA em relação ao restante da laguna estão de acordo com o verificado por Santos (2018). No entanto, as medidas realizadas com os *seepage meter* apontam um fluxo negativo de forte intensidade na seção OOR, como foram realizadas apenas 3 medidas na seção estas podem representar um evento isolado, tendo em vista que em uma das coletas o fluxo na seção REN que sempre é positivo também apresentou valores negativos. Portanto recomenda-se outras coletas no local. Outro fato que indica que a fonte de nitrogênio na OOR é a LEI, é o valor de NID medido no meio subterrâneo no LIC, 101 ug/l.

Figura 57 - Variação do NID nas águas superficiais e subterrâneas da laguna.



O gráfico *scatter plot* (A) representa a variação espacial do NID nas águas superficiais nas oito seções discriminadas por coleta, enquanto o gráfico *box-plot* (B) compara os meios superficial (azul) e o subterrâneo (verde). O gráfico C, por sua vez, não apresenta distinção espacial, mas sim temporal entre o período antes e depois da alta temporada. O gráfico D apresenta o *scatter plot* da concentração de NID no meio superficial pela concentração de NID no meio subterrâneo, onde o quadrado representa o fluxo positivo, o círculo o fluxo negativo, o tamanho dos símbolos representa a intensidade do fluxo e a cor a localidade. Todos os gráficos foram plotados com dados das campanhas de novembro de 2018 janeiro e fevereiro de 2019.

- Fósforo inorgânico dissolvido (PID)

Todos os gráficos da Figura 58 estão representados para o mesmo período, de novembro de 2018 a fevereiro de 2019 por foi quando houveram as campanhas de coletas de nutrientes.

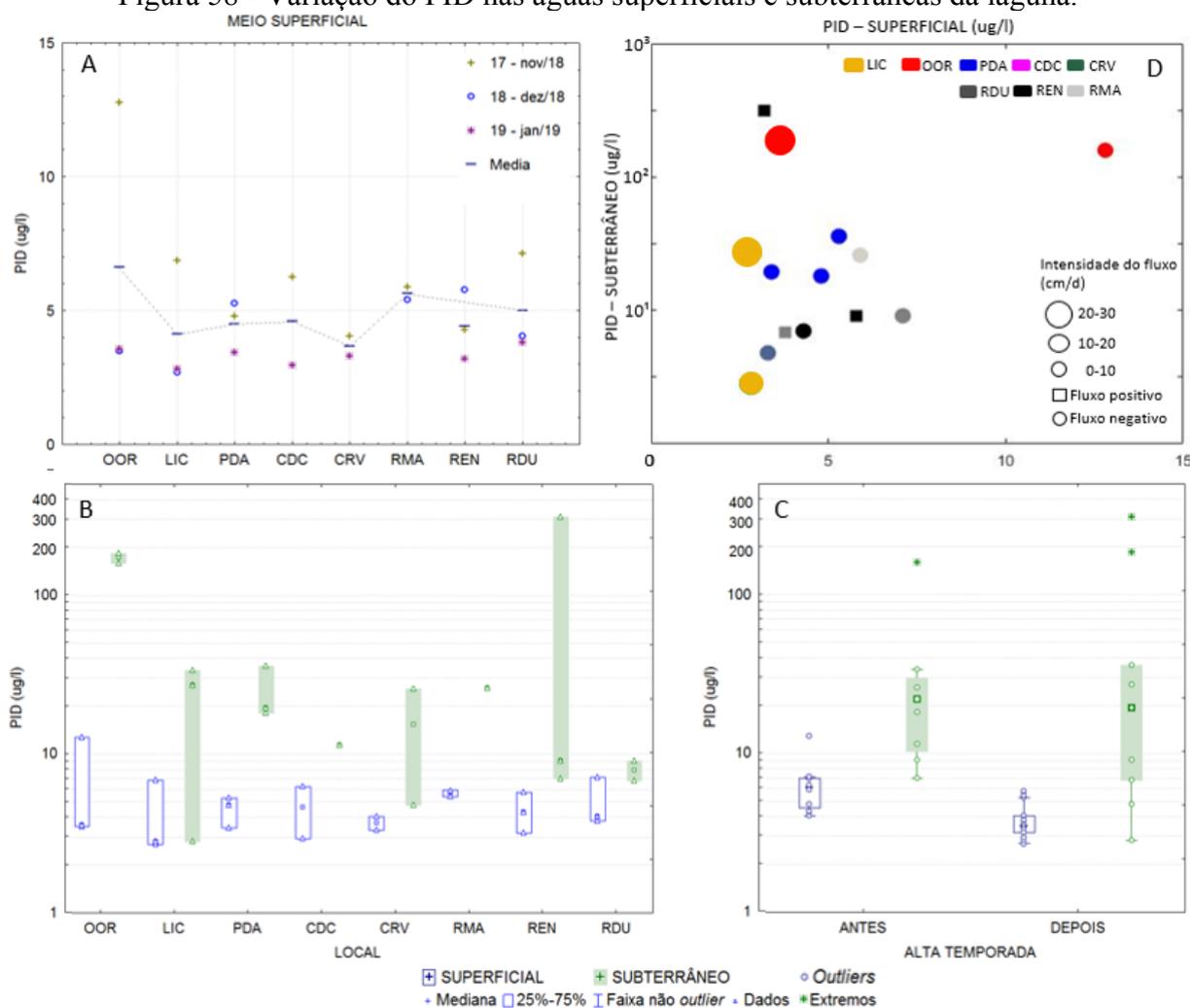
Assim como para o NID, na Figura 58A é possível verificar uma redução na concentração de NID ao longo das três coletas. O maior valor encontrado de PID nas águas superficiais da laguna foi de 12,8 ug/l na seção OOR. O valor mínimo, 2,7 ug/l foi detectado na seção LIC. De uma maneira geral, com a exceção da seção OOR a laguna não apresenta

variações significativas na concentração de PID nas águas superficiais. Na Figura 58B, é possível verificar que a diferença entre os meios superficial e subterrâneo é expressiva, apresentando diferentes ordem de grandeza entre os valores medidos nos dois meios. O valor máximo detectado foi medido na seção OOR e REN, assim como para o NID.

Em relação ao período antes e depois da alta temporada, verifica-se na Figura 58C que a concentração de NID na superfície diminuiu enquanto no meio subterrâneo aumentou.

O *scatter plot* apresentado na Figura 58D, apresenta a correlação entre a concentração de PID no meio superficial e subterrâneo, aponta a maior concentração nos dois meios na OOR, onde o fluxo no dia da coleta era negativo.

Figura 58 - Variação do PID nas águas superficiais e subterrâneas da laguna.

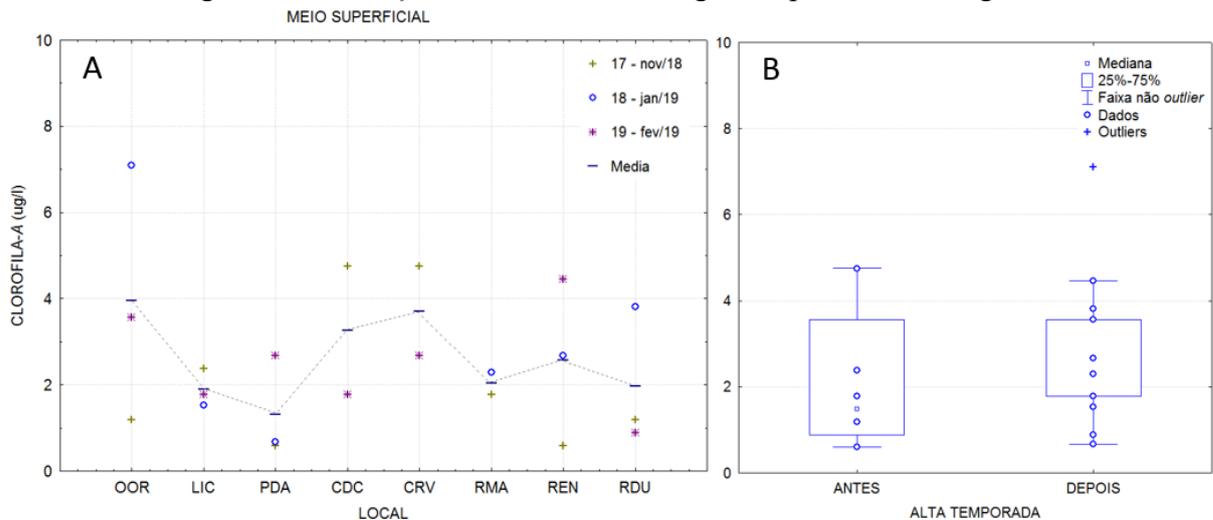


O gráfico *scatter plot* (A) representa a variação espacial do PID nas águas superficiais nas oito seções discriminadas por coleta, enquanto o gráfico *box-plot* (B) compara os meios superficial (azul) e o subterrâneo (verde). O gráfico C, por sua vez, não apresenta distinção espacial, mas sim temporal entre o período antes e depois da alta temporada. O gráfico D apresenta o *scatter plot* da concentração de PID no meio superficial pela concentração de PID no meio subterrâneo, onde o quadrado representa o fluxo positivo, o círculo o fluxo negativo, o tamanho dos símbolos representa a intensidade do fluxo e a cor a localidade. Todos os gráficos foram plotados com dados das campanhas de novembro de 2018 janeiro e fevereiro de 2019.

### 6.2.3 Caracterização Biológica

A Figura 59 A apresenta a variação da concentração de clorofila-*a* no corpo lagunar. Os valores máximos e mínimos amostrados foram iguais a 7,1 e 0,6  $\mu\text{g/l}$  nas seções OOR e PDA respectivamente. Em relação ao período anterior e posterior a alta temporada Figura 59B é possível distinguir, principalmente pela caixa, que houve um aumento na concentração de clorofila-*a* entre os dois períodos.

Figura 59 - Variação da clorofila-*a* nas águas superficiais da laguna



O gráfico *scatter plot* (A) representa a variação espacial do PID nas águas superficiais nas oito seções discriminadas por coleta. O gráfico *box-plot* (B) não apresenta distinção espacial, mas sim temporal entre o período antes e depois da alta temporada. Todos os gráficos foram plotados com dados das campanhas de novembro de 2018, janeiro e fevereiro de 2019.

### 6.2.4 TRIX

A elaboração do índice de estado trófico TRIX para o sistema lagunar Lagoa da Conceição resultou em uma equação específica, utilizando uma série de dados analisados e compilados por Silva (2016) de outros autores, que compõe o banco de dados do Laboratório de Hidráulica Marítima, incluindo os dados coletados para a laguna no ano de 2018 e 2019 (n total = 181).

Foram utilizados os dados disponíveis das variáveis clorofila-*a*, fósforo inorgânico dissolvido e nitrogênio inorgânico dissolvido, com concentrações em  $\mu\text{g/L}$ , e o oxigênio dissolvido como desvio absoluto [%] da saturação, e depois transformadas em logaritmos de base 10.

O trabalho de Vollenweider *et al.* (1998), apresenta a metodologia estatística para definição das constantes utilizada para a correção do modelo. Para a exclusão valores discrepantes, e determinação dos limites superiores e inferiores dos parâmetros, calculou-se a média do  $\log \pm 2,5$  de desvio padrão. A determinação da constante ‘k’ foi realizada através da soma dos valores dos limites inferiores dos parâmetros utilizados no índice TRIX. Para a determinação da constante ‘m’ foi realizado somatório da diferença entre os valores dos limites inferiores e superiores de cada variável e posteriormente dividido por 10, o que representa o passo (unidades TRIX). A definição do índice trófico proposto; limites inferior e superior, e faixa dentro da qual o índice trófico é definido estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Definição do índice trófico proposto; limites inferior e superior, e faixa dentro da qual o índice trófico é definido.

	<b>Min unid. log (linear)</b>	<b>Máx unid. log (linear)</b>	<b>Faixa</b>	<b>Passo</b>
<b>NID (ug/l)</b>	0,5 (3,4)	2,5 (759)	2	0,2
<b>PID (ug/l)</b>	-0,5 (0,4)	2,5 (214)	3	0,3
<b>Clorofila</b>	-1,0 (0,1)	1,5 (40)	2,5	0,25
<b>OD (%)</b>	-1,0 (0,1)	1,5 (96)	2,5	0,25
<b>Total</b>	-1,5	8,5	10	<b>1,0</b>

Utilizando a série temporal dos dados disponíveis (2001 a 2019), a determinação do índice TRIX para a Lagoa da Conceição é calculado através da equação 9:

$$TRIX_{LConceição} = \frac{[(\log(Cl.a * abs(100 - OD\%) * NID * PID))] + [1,5]}{1,0} \quad (9)$$

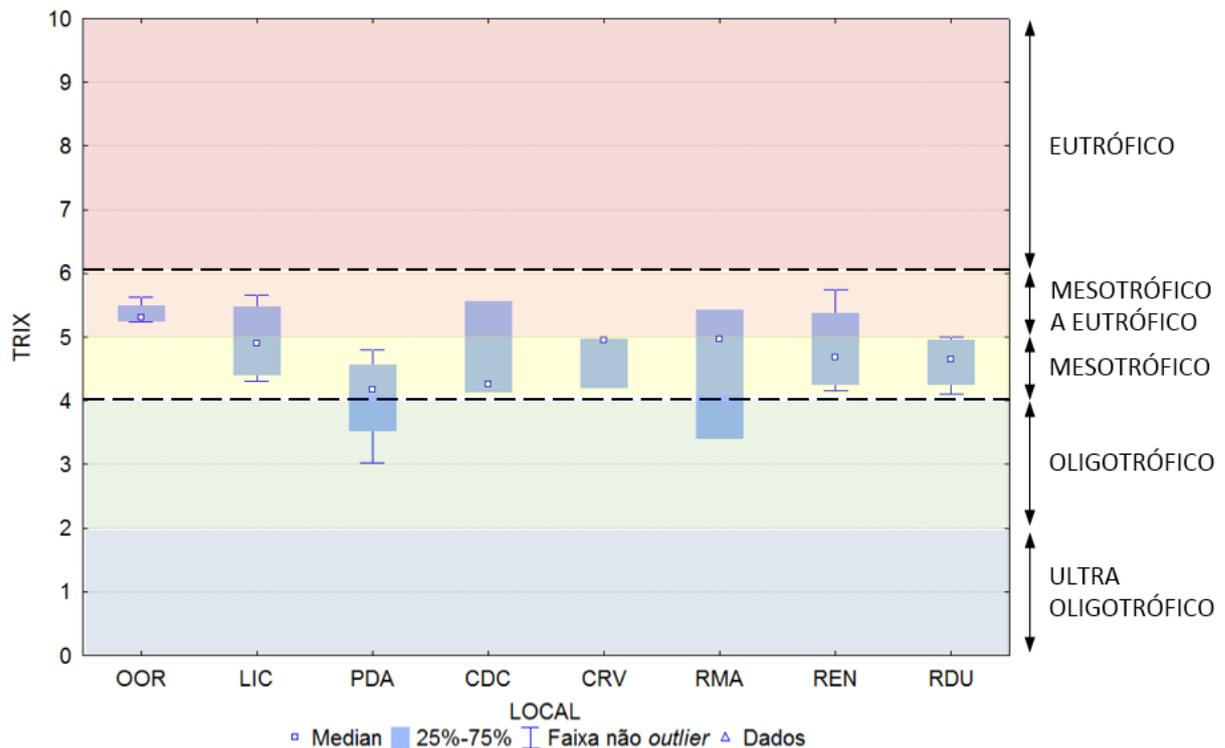
Onde: Cl.a: Clorofila-a [ug/l]; abs(100-OD%) é o modulo de 100-OD%; NID: Nitrogênio Inorgânico Dissolvido [ug/l]; PID: Fósforo Inorgânico Dissolvido [ug/l].

Primeiramente, o índice TRIX foi calculado para as campanhas realizadas neste estudo. A partir do cálculo realizado para todas as amostras (n=21) foi elaborado o gráfico *box-plot* por localidade. Os pontos em circunferência representam os *outliers* sendo estes os pontos que estão a mais de três faixas interquartis da extremidade da caixa, definidos através de 1,5 IQR (Intervalo Interquartil). Por se tratar de uma abordagem inicial, os dados não possuem distinção temporal, ou seja, são independentes do tempo o qual foram realizadas as medidas.

A laguna apresenta pouca variabilidade espacial em relação ao índice de estado trófico TRIX, os valores encontrados para a Lagoa da Conceição variaram entre 3,0 a 5,7, com classificação do estado trófico variando do alto (oligotrófico) até o moderado (mesotrófico a eutrófico), indicando ambientes com a produtividade primária e concentração de nutrientes baixas até ambientes altamente produtivos e estado trófico alto, respectivamente (Figura 60). A seção OOR é a que apresenta o maior índice trófico, variando entre 5,3 e 5,6, o que caracteriza a região como mesotrófica a eutrófica, enquanto a seção PDA, apresentou os menores índices, variando de 3,0 a 4,8, enquadrando a região como oligo a mesotrófica. O valor de TRIX da seção CDC é semelhante ao de outras sub-bacias com maior densidade demográfica. Este fato se justifica, pois, a seção CDC sofre influência do morro do alto complexo cristalino, a precipitação na sub-bacia causa significativa entrada de nutrientes minerais para o corpo lagunar.

Em relação às medidas realizadas nas seções localizadas na Av. das Rendeiras, é possível observar que o índice trófico é maior nas seções RMA e RDU, que é para onde vai o fluxo da LEI, verificado por Santos (2018).

Figura 60 - Variação espacial do índice de estado trófico por localidade na Lagoa da Conceição.



Após a análise da variação espacial do TRIX no período amostrado, foi realizada uma análise temporal do estado trófico da laguna ao longo das últimas duas décadas. O *box-plot* apresentado na Figura 61 mostra a evolução temporal de valores encontrados para o índice de estado trófico de 2001 à 2019.

Na análise da variação do estado trófico a longo prazo (Figura 61), foi verificado um salto no período de 2005 a 2007. Este, pode ser associado ao período de estiagem ocorrido em 2006 (Figura 62). Já o em 2015, houve uma redução em relação a 2007. Esta, pode ter ocorrido tanto pelo aumento da precipitação, quanto pela implantação da rede coletora de esgotos na região do Canto da Lagoa, pois em 2014 a prefeitura realizou uma campanha de fiscalização no bairro. Não foram encontrados dados do período de 2007 a 2015, no entanto, é possível verificar pelo gráfico que a partir das análises realizadas desde 2007 está ocorrendo a redução gradual do índice trófico na laguna.

Figura 61 - Evolução temporal dos valores de TRIX para a Lagoa da Conceição no período de 2001 a 2019.

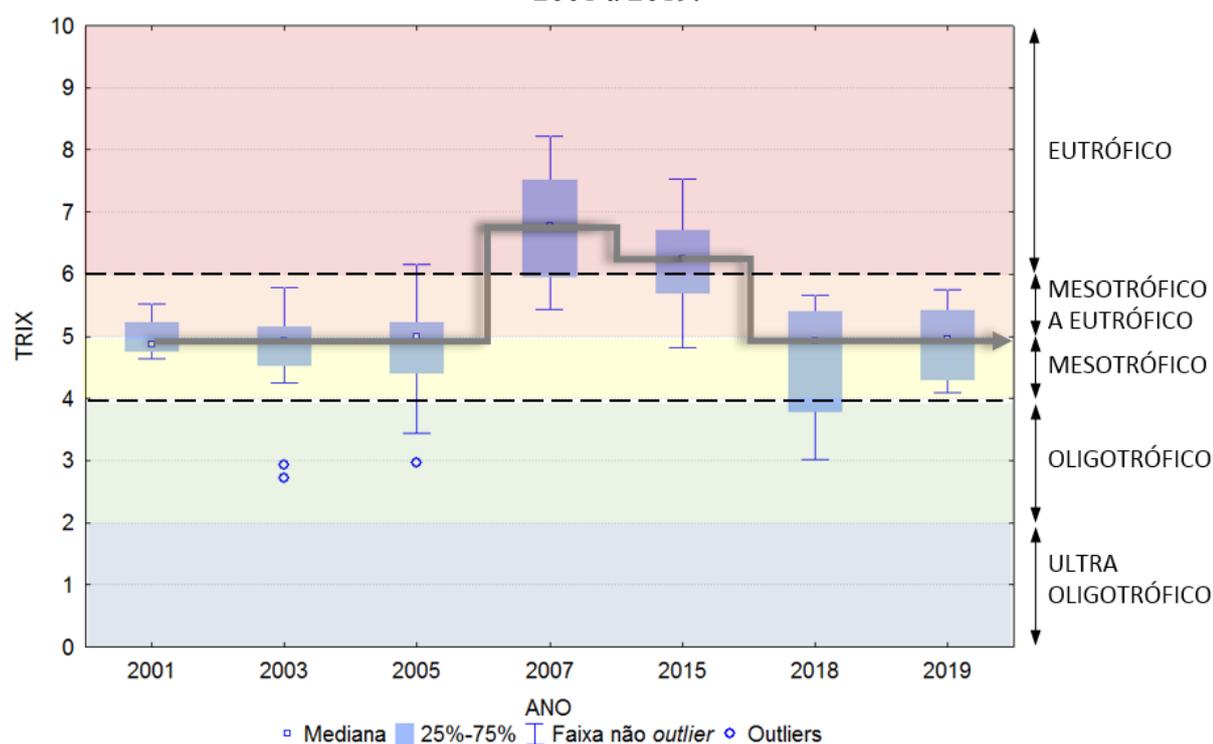
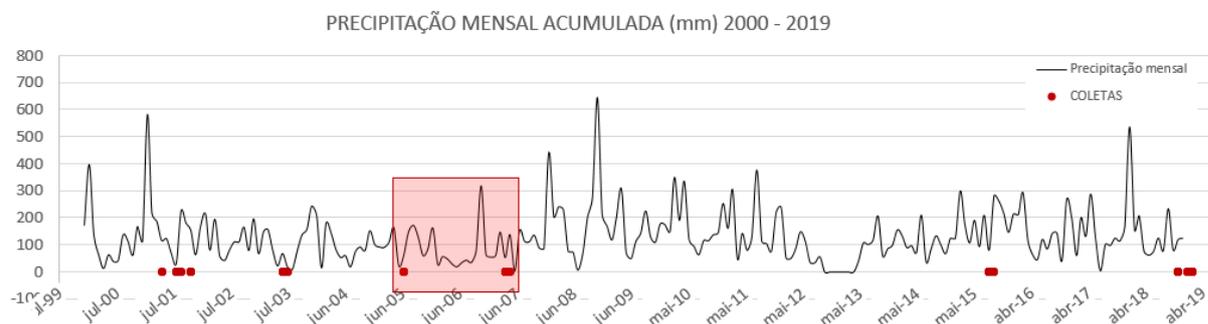


Figura 62 - Precipitação mensal acumulada para o período de 2000 a 2019.



- Comparativo com outros índices tróficos

Os índices da OECD (1982) e de Salas e Martinho (2001) também foram aplicados na presente pesquisa, e são baseados em parâmetros físico-químicos e biológicos. São consideradas abordagens mais simples, uma vez que fatores singulares podem ser utilizados para a classificação do estado trófico, diferente do TRIX que é multiparamétrico. Os índices de Chiaudani e Vighi, (1974) e IETC-UNEP (2001) por sua vez consideram a relação entre duas variáveis porém a classificação foi eutrófica para toda a laguna, não havendo distinção entre os compartimentos.

A Tabela 19 apresenta a classificação trófica utilizando outros índices baseados em apenas dois parâmetros ou parâmetros singulares. Fica claro, portanto, que esses índices não foram suficientemente sensíveis para distinguir a diferença de trofia ao menos entre as diferentes regiões de lagunas e seus canais.

Tabela 20 - Classificação do estado trófico da Lagoa da Conceição segundo distintas metodologias.

Índice	Parâmetro avaliado	Classificação da Lagoa da Conceição
OECD, 1982	Média anual de Clorofila-a	Mesotrófico
	Máximo anual de Clorofila-a	Oligotrófico
Salas e Martino, 2001	Média anual de Clorofila-a	Oligotrófico
Chiaudani e Vighi, 1974	Razão N:P	Eutrófico
IETC-UNEP, 2001	Razão N:P	Eutrófico

### 6.3 ANÁLISE INTEGRADA DAS DESCARGAS SUBTERRÂNEAS E DA QUALIDADE DA ÁGUA DA LAGOA DA CONCEIÇÃO

A temperatura e a salinidade são particularmente importantes no processo de mistura da coluna de água em ambientes marinhos costeiros. A média da temperatura variou de 25,6°C para 29°C entre o período antes e depois da alta temporada. Esta variação de temperatura influencia diretamente na concentração de clorofila-*a* pois causa o aumento da velocidade das reações bioquímicas, aeróbias e anaeróbias, de degradação da matéria orgânica e consequente aumento da taxa de crescimento dos organismos aquáticos.

A salinidade, uma variável considerada conservativa no ambiente, é importante para avaliar a circulação de um estuário, bem como, para identificar fontes de contribuição de águas doces e assim, as interferências antrópicas por esgotos. De modo geral, os valores médios de salinidade das águas de superfície na Lagoa foram mais elevados significativamente nas coletas 6, 7, 8 (setembro) do que no restante (dezembro-fevereiro-março), concordando com os trabalhos realizados anteriormente na Lagoa por Odebrecht & Caruso Jr. (1987), e Fontes (2004). Tanto a salinidade quanto a temperatura apresentaram valores menores no meio subterrâneo, como esperado.

A atividade fotossintética ocorre na superfície com a elevação do pH enquanto que em profundidade, o processo de degradação da matéria orgânica conduz à sua diminuição. Os valores encontrados no meio superficial e subterrâneo confirmam este comportamento. Houve um aumento no pH no meio superficial no período antes e depois da alta temporada e diminuição no meio subterrâneo.

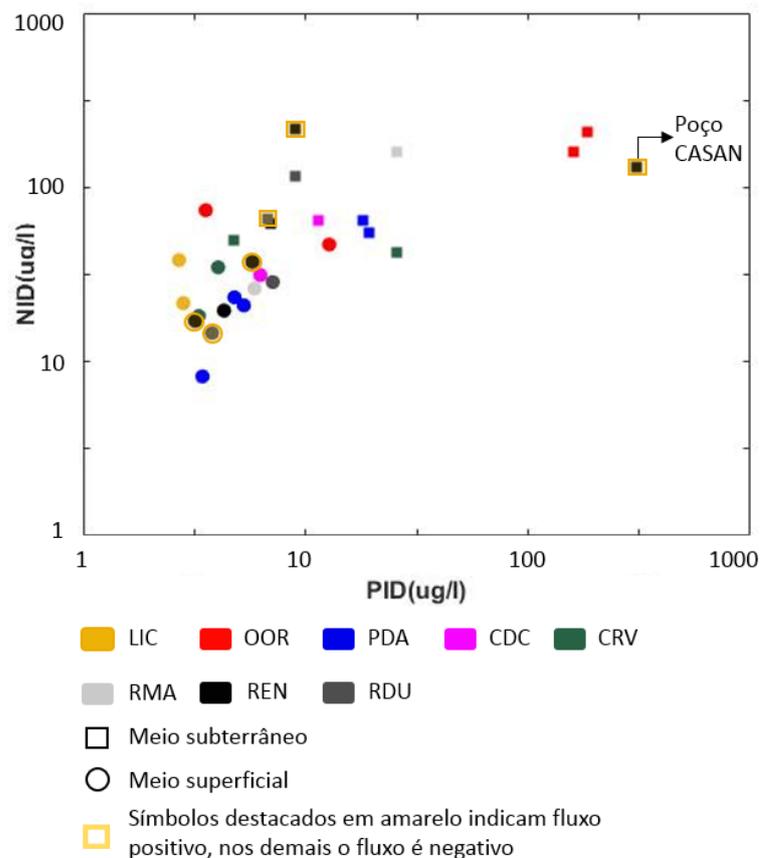
De modo geral, o oxigênio dissolvido nas águas superficiais tanto no período de baixas temperaturas quanto de altas, apresentaram valores altos. O que indica que a atividade fotossintética está sendo capaz de equilibrar a respiração bacteriana durante o verão, possibilitando a sobrevivência dos organismos aeróbio. Fontes (2004) verificou que os níveis de oxigênios encontravam-se críticos, principalmente nos setores Sul, Centro-Norte e Norte. Houve uma melhoria em relação a este parâmetro onde os níveis no inverno chegaram a 3,0 mg/L no inverno e 3,5mg/l no verão.

As altas concentração de NID e PID nos pontos OOR e REN E RMA em relação ao restante da laguna estão de acordo com o verificado por Santos (2018). No entanto, as medidas realizadas com os *seepage meter* apontam um fluxo negativo de forte intensidade na seção OOR Figura 63, como foram realizadas apenas 3 medidas na seção estas podem representar um evento isolado, tendo em vista que em uma das coletas o fluxo na seção REN que sempre é

positivo também apresentou valores negativos. Portanto recomenda-se outras coletas no local. Outro fato que indica que a fonte de nitrogênio na OOR é a LEI, é o valor de NID medido no meio subterrâneo no LIC, 101 ug/l.

É possível distinguir através do *scatter-plot* da Figura 63 que as maiores concentrações de NID e de PID estão no meio subterrâneo (quadrado). Isto, é de se esperar visto que a água subterrânea transporta nutrientes que são oriundos do processo de infiltração do solo.

Figura 63 - PIDxNID no meio superficial e subterrâneo.



Sabendo o sentido dos fluxos preferenciais em cada uma das seções é possível correlacionar os fluxos de entrada e saída do manancial subterrâneo com a qualidade da água nas seções. Com a exceção das seções localizadas na Av. das Rendeiras, todos os fluxos apresentaram sentido negativos nos dias de coleta de amostras para análise de nutrientes.

O fluxo de nutrientes para as regiões costeiras condiciona o potencial de enriquecimento dessas águas e as taxas de produção primária, nas seções das rendeiras e na OOR ocorre a maior concentração de nutrientes no meio subterrâneo devido a presença da LEI, o que indica que na região o índice trófico é maior devido a estes fluxos.

As concentrações máximas de clorofila-a, durante a campanha de verão nas águas superficiais da Lagoa foram medidas nos setores nas seções OOR, e CRV (Sul e Centro-Norte respectivamente). A concentração de clorofila na seção CRV pode ser justificada pela proximidade ao subsistema norte, que embora possua baixa urbanização em seu entorno, é nele que deságua o rio João Gualberto. Naturalmente os rios carregam para sua foz matéria orgânica dissolvida ou em suspensão, que posteriormente sofre mineralização disponibilizando para o sedimento e água os nutrientes requeridos para a produção primária. Além desse papel natural, o Rio João Gualberto também percorre várias comunidades de uma região denominada Rio Vermelho, que é a maior sub-bacia da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição, recolhe efluentes civis e isso também pode estar contribuindo no suprimento de nutrientes.

## 7 CONCLUSÃO

O presente estudo realizou a estimativa de fluxos na interface sedimento-água em diferentes regiões da laguna a partir do desenvolvimento de equipamentos de baixo custo para quantificação direta (*seepage meter*) e indireta (piezomanômetro) do fluxo de água subterrânea. Os equipamentos permitiram, também, a coleta de amostra de água subterrânea para a determinação da qualidade da água na laguna nos dois meios.

A construção do tanque de fluxo controlado, de baixo custo, para determinar o FC que visa compensar a perda de carga dos *seepage meters*, permitiu a construção e testes comparativos entre distintos modelos de equipamentos. A eficiência, razão entre as taxas de descargas medidas nos *seepages* e o fluxo conhecido no tanque controlado, dos equipamentos é de 88%. Assim o FC é de 1,14 sendo o intervalo de confiança de 95%, com FC variando de de 1,11 a 1,16.

A análise granulométrica do sedimento permitiu estimar a condutividade hidráulica do solo nas seções de monitoramento. A comparação das medidas realizadas com os piezomanômetros com as medições feitas com os *seepage meters* acarretaram na confirmação dos padrões de interação das águas subterrâneas e superficiais verificados e dão uma estimativa instantânea da taxa de fluxo entre os compartimentos. Ao comparar dois métodos complementares para a quantificação dos aportes de águas subterrâneas, piezomanômetros e *seepages meter* é possível validar ambas metodologias, sendo assim, o método se mostrou eficiente. Porém, é necessário atentar-se a formação de bolhas de ar no interior da tubulação e pequenos vazamentos entre as conexões da tubulação e às condições meteorológicas, visto que o vento e ondulações dificultam as medições de maneira precisa.

Foi observado também que o regime de DAS está relacionado ao gradiente hidráulico promovido em função das eventuais diferenças de nível entre a laguna e o oceano, porém este comportamento não pode ser confirmado apenas com a metodologia utilizada neste trabalho é necessário o monitoramento contínuo do nível externo e interno para verificar tais padrões de fluxo.

O subsistema sul apresentou fluxo intenso negativo. Este fluxo possui duas causas. A principal, é o gradiente hidráulico formado entre o subsistema sul e o central. De maneira geral, o fluxo da do subsistema sul encontra-se acima do sub-sistema central que, por sua vez está acima do nível do mal. Somado a isso, devido a configuração da sub-bacia, quando ocorrem

precipitações durante um período prolongado, o nível do subsistema sul se eleva de maneira expressiva em relação ao sub-sistema central, pois a conexão entre os subsistemas é realizada apenas pelo estreito canal da ponte da lagoa, aumentando o gradiente hidráulico e consequentemente a intensidade do fluxo em direção ao subsistema central.

Além do gradiente, existe na região a cultura de captação de águas subterrâneas através de ponteiros, foram identificados 2 poços de captação para abastecimento público da companhia de saneamento localizados a cerca de 500 m da estação, porém não se teve acesso a informações de vazão de captação e nível dinâmico.

Diante dos resultados observados, com exceção das seções onde os fluxos são governados por alterações antrópicas (OOR, LIC e REN), os fluxos na interface sedimento-água da Lagoa da Conceição fluem no sentido laguna-aquífero, com descargas médias entre -1,9 a -8,1 cm/d. Esses resultados são associados à geomorfologia local, que devido à alta declividade das sub-bacias e predominância de maciços rochosos, promovem o escoamento superficial da água que precipita na bacia, ocasionando pouca recarga para o aquífero cristalino fraturado que desaguaria na laguna. A heterogeneidade espacial e temporal das descargas de águas subterrâneas no sistema também está relacionada à heterogeneidade do aquífero local.

A elaboração do índice de estado trófico TRIX para o sistema lagunar Lagoa da Conceição verificou que a laguna apresenta pouca variabilidade espacial em relação ao índice de estado trófico TRIX, os valores encontrados para a Lagoa da Conceição variaram entre 3,0 a 5,7, com classificação do estado trófico variando do alto (oligotrófico) até o moderado (mesotrófico a eutrófico), indicando ambientes com a produtividade primária e concentração de nutrientes baixas até ambientes altamente produtivos e estado trófico alto, respectivamente. Existe uma lacuna de dados medidos na laguna de 2007 a 2015, porém em relação dados analisados em anos anteriores pode-se afirmar que a qualidade da água no corpo lagunar está melhorando.

O fluxo de nutrientes para as regiões gerado pela LEI em direção as seções OOR e RMA E REN, reflete no potencial de enriquecimento dessas águas e as taxas de produção primária, nas seções das rendeiras e na OOR ocorre a maior concentração de nutrientes no meio subterrâneo.

### 7.1.1 Recomendações

- Testar piezomanômetros no experimento de calibração.
- Utilizar as descargas medidas pelos *seepage* ( $q$ ), e, a diferença de carga hidráulica ( $\Delta h$ ), medida em campo, para calcular a condutividade hidráulica ( $K$ ) e comparar com o  $K$  estimado pela granulometria.
- Realizar análise das diferenças de nível d'água entre o oceano e a laguna, através de uma série de dados medidos concomitantemente à quantificação das DAS.
- Analisar os parâmetros de qualidade da água superficial e das descargas de águas subterrâneas mensalmente a fim de verificar alterações sazonais. Monitorar as seções RMA, REN, RDU e OOR para analisar a influência da LEI nos aportes de nutrientes e ciclos biogeoquímicos.
- Analisar o efeito da LEI no fluxo subterrâneo de maneira mais aprofundada.
- Com base nos dados levantados neste trabalho e nos demais trabalhos realizados na área de estudo, desenvolver uma modelagem numérica integrada para a determinação da dinâmica de fluxo e da interação das águas subterrâneas e superficiais na Lagoa da Conceição.

## REFERÊNCIAS

ALVES, G.; *et al.* **Eutrophication and water quality in a tropical Brazilian estuary**. Journal of Coastal Research, Special Issue, n. 65, 2013

ANA. Agência Nacional das Águas. [PORTAL DA QUALIDADE DAS ÁGUAS]. Disponível em < <http://portalpnqa.ana.gov.br/indicadores-indice-aguas.aspx>>. Acesso em 20 mar 2018.

ANA. Agência Nacional das Águas. **Variáveis e parâmetros de qualidade de água em rios e reservatórios**. Disponível em: < [https://capacitacao.ead.unesp.br/dspace/bitstream/ana/76/6/Unidade\\_3.pdf](https://capacitacao.ead.unesp.br/dspace/bitstream/ana/76/6/Unidade_3.pdf)>. Acesso em 20 mar 2018.

ANDRADE, R. C. **Estudo da Circulação Hidrodinâmica da Lagoa da Conceição-SC**. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001.

ANDRADE, C. F. F. **Conexões e interações entre a água superficial e subterrânea na região costeira do extrema Sul do Brasil**. Insituto de Oceanografia. Rio Grande, Universidade Federal do Rio Grande, 2010. Tese de Doutorado: 177 p.

ANDRADE, C. F. F. *et al.* **Fluxos de nutrientes associados às descargas de água subterrânea para a Lagoa Mangueira (Rio Grande do Sul, Brasil)**. Química Nova, v. 35, n. 1, p. 5–10, 2012.

ARCARI, T., KERN, P., VERONA, L. S., & FRANCO, D. **As interações entre águas subterrâneas e superficiais em uma laguna costeira: Lagoa da Conceição, Florianópolis/SC, Brasil**. Águas Subterrâneas, 33(1), 34-44. 2019.

ARTIOLI, Y.; BENDORICCHIO, G.; PALMERI, L. **Defining and modeling the coastal zone affected by the Po River (Italy)**. Ecological Modelling, v. 184, p. 55-68, 2005.

ASBURY, C.E. **The role of groundwater seepage in sediment chemistry and nutrient budgets in Mirror Lake, New Hampshire**: Ithaca, Cornell University, Ph.D. dissertation, 275 p. 1990.

ATTISANO, Karina K. *et al.* **Evidences of continental groundwater inputs to the shelf zone in Albardão, RS, Brazil**. Brazilian Journal of Oceanography, v. 56, n. 3, p. 189-200, 2008.

BARLOW, Paul M. **Ground Water in fresh water-salt water environments of the Atlantic**. Geological Survey (USGS), 2003.

BATISTA, T. N. F.; FLORES MONTES; M. de J. **Estado trófico dos estuários dos rios Ipojuca e Merepe-PE**. Tropical Oceanography, Recife, v.42, n. especial, p. 22-30, 2014.

BEDIENT, P.B.; RIFAI, H.S.; NEWELL, C.J. **Ground Water Contamination. Transport and Remediation**. 2a ED. New Jersey: Prentice Hall PTR. Saddle River, 1999. 604p

BELANGER, Thomas V.; MIKUTEL, Donald F. **On the use of seepage meters to estimate groundwater nutrient loading to lakes 1**. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, v. 21, n. 2, p. 265-272, 1985.

BENDORICCHIO, G. B.; DE BONI, G. **A water-quality model for the Lagoon of Venice, Italy**. Ecological Modelling, v. 184, p. 69-81, 2005.

BERRETA, M. S. R. **A qualidade das águas da Lagoa do Imaruá e dos efluentes da carcinicultura – Laguna, SC**. Porto Alegre : UFRGS/PPGEA, 2007

BERTOLDI, L. **Avaliação do estado trófico de um estuário tropical**. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Ambiental) Centro de Ciências Humanas e Naturais, Universidade Federal do Espírito Santo, Aracruz, 2014. 90 f."

BIANCHI, Thomas S. **Biogeochemistry of estuaries**. Oxford University Press, 2006.

BIER, F. B. **Caracterização morfológica e hidrológica da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição, Florianópolis – SC**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

BORGES, P. de S. P. **Índices e modelos biogeoquímicos para definição do estado trófico, suscetibilidade à eutrofização e metabolismo do estuário do rio Paraíba do Sul, RJ**. Dissertação (Mestrado em Geoquímica Ambiental) Instituto de Química, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2014. 143 f.

BORGHETTI, N.R.B; BORGHETTI, J.R.; ROSA FILHO, E.F. **Aqüífero Guarani: a verdadeira integração dos países do Mercosul**. Curitiba, 2004. 214p

BOYLE, D. R. **Design of a seepage meter for measuring groundwater fluxes in the nonlittoral zones of lakes-Evaluation in a boreal forest lake**. *Limnology and Oceanography*, v. 39, n. 3, p. 670-681, 1994.

BOYLE, D. R. **Design of a seepage meter for measuring groundwater fluxes in the nonlittoral zones of lakes-Evaluation in a boreal forest lake**. *Limnology and Oceanography*, v. 39, n. 3, 1994. p. 670-681

BRANCO, C. W. C. **Composição e aspectos ecológicos das comunidades zooplancônicas nas lagoas Imboassica, Cabiúnas e Comprida**. In: Esteves, F.A. (ed.). *Ecologia das lagoas costeiras do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba e do Município de Macaé (RJ)*. NUPEM, Macaé, 1998. 247-272 p

BRASIL, CONAMA **Resolução 237**. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução Conama, v. 237, p. 97, 1997.

BRASIL, CONAMA, **Resolução. 357**, de 17 de março de 2005. Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA, v. 357, 2005.

BURNETT, W. C., BOKUNIEWICZ, H., HUETTEL, M., MOORE, W. S., & TANIGUCHI, M. **Groundwater and pore water inputs to the coastal zone**. *Biogeochemistry*, 66(1-2), 2003. 3-33p.

BURNETT, W.C., *et al.* **Quantifying Submarine Groundwater Discharge in the Coastal Zone via Multiple Methods**. *Science of the Total Environment* 367(2-3): 498-543. 2006

J.E. CABLE, W.C. BURNETT, J.P. CHANTON, G.L. **Weatherly Estimating groundwater discharge into the northeastern Gulf of Mexico using radon-222** *Earth Planet. Sci. Lett.*, 144, pp. 591-604. 1996

CABLE, J. E.; MARTIN, J. B.; JAEGER, J. **Exonerating Bernoulli? On evaluating the physical and biological processes affecting marine seepage meter measurements**. *Limnology and Oceanography: Methods*, v. 4, p. 172–183, 2006.

CABLE, J., BURNETT, W., CHANTON, J., WEATHERLY, G. **Estimating groundwater discharge into the northeastern Gulf of Mexico using  $^{222}\text{Rn}$** . Earth and Planetary Science Letters 144, 591–604. 1996.

CAMERON, W. N. & PRITCHARD, D. W. **Estuaries**. In: Goldberg, E. D.; McCave, I. N.; O'Brien, & Steele, I.H. eds. The Sea. New York, John Wiley & Sons. 1963. p. 306-324.

CARMAN, P. C. **Fluid flow through granular beds**. Trans. Inst. Chem. Eng., v. 15, p. 150–166, 1937.

CARRIKER, M. R. **Ecology of estuarine benthic invertebrates: A perspective**. In G. Lauff (ed.), Estuaries. AAAS, Washington, D. C., 1967. p. 442-487

CARUSO, G.; *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, v. 60, p. 1682-1690, 2010.

CHANTON, Jeffrey P. *et al.* **Seepage rate variability in Florida Bay driven by Atlantic tidal height**. Biogeochemistry, v. 66, n. 1-2, p. 187-202, 2003.

CHIAUDANI, G.; VIGHI, M., **The N:P ratio and tests with Selenastrum to predict eutrophication in lakes**. Water Research Vol. 8 p1063-1069. 1974.

CHOI, Jungyill; HARVEY, Judson W.; CONKLIN, Martha H. **Characterizing multiple timescales of stream and storage zone interaction that affect solute fate and transport in streams**. Water Resources Research, v. 36, n. 6, p. 1511-1518, 2000.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied hydrology**. Editions McGraw-Hill, New York, 1988. 572 pp.

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, v. 71, p. 218-231, 2007.

CONNOR, Jody N.; BELANGER, Thomas V. **GROUND WATER SEEPAGE IN LAKE WASHINGTON AND THE UPPER ST. JOHNS RIVER BASIN, FLORIDA 1**. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, v. 17, n. 5, p. 799-805, 1981.

COTOVICZ JUNIOR, L. C.; *et al.* **Comparação de Modelos e Índices para Avaliação do Estado Trófico do Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguaba, (AL)**. Geochimica Brasiliensis. Ouro Preto, v. 26, n. 1, p. 7-18, 2012.

COTOVICZ JUNIOR, L. C. **Aplicações de modelos (ASSETS e TRIX) para avaliação do estado trófico e cenário futuro da eutrofização do Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguaba, (AL)**. Dissertação (Mestrado em Geoquímica Ambiental) Instituto de Química, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2012. 123 f.

CROMWELL, J. E. **Barrier coast distribution: a world survey**. In: National Coastal and Shallow Water Research Conference, 2, 1971, Baton Rouge. Baton Rouge, 1971. p. 50

DAY JR, J.W.; C.A.S. HALL; W.M. KEMP & A. YÁÑEZ-ARANCIBIA. **Estuarine Ecology**. New York, Wiley, 1989. 558p.

DEVLIN, M.; BRICKER, S.; PAINTING, S. **Comparison of five methods for assessing impacts of nutrient enrichment using estuarine case studies**. Biogeochemistry, v. 106, n. 2, p. 177-205, 2011.

DULAIOVA, H.; BURNETT, W.C.; WATTAYAKORN, G.; SOJISUPORN, P. **Are groundwater inputs into river-dominated areas important?** The Chao Phraya River–Gulf of Thailand, *Limnol. Oceanogr. Methods*, 51 (5):2232–2247. 2006

EMBRAPA. Agência de Informação Embrapa. [ECOÁGUA]. Disponível em <<http://www.cnpma.embrapa.br/projetos/ecoagua/eco/oxigdiss.html>>. Acesso em: 20 mar 2018

ERICKSON, D.R., **A study of littoral groundwater seepage at Williams Lake, Minnesota using seepage meters and wells.** Minneapolis, University of Minnesota, M.S. thesis, 1981. 135 p.

ESTEVES, F.A.; ISHII, I.H. & CAMARGO, A.F.M. **Pesquisas limnológicas em 14 lagoas do Estado do Rio de Janeiro.** In: LACERDA, L. D.; ARAUJO, D.S.D.; CERQUEIRA, R. & TURCO, B. (orgs.). *Restingas: origem, estrutura, processos.* CEUFF, Niterói, 1984. p.441-452.

ESTEVES, F. A. **Ecologia das Lagoas Costeiras do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba e do Município de Macaé (RJ).** Núcleo de Pesquisas Ecológicas de Macaé (NUPEM) – UFRJ. 1998

FELLOWS, Charles R.; BREZONIK, Patrick L. **Seepage flow into florida lakes 1.** *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, v. 16, n. 4, p. 635-641, 1980.

FERREIRA, Lara Bernardes da Silva *et al.* **Temperature and seed moisture content affect electrical conductivity test in pea seeds.** *Journal of Seed Science*, v. 39, n. 4, p. 410-416, 2017.

FETTER, C. W. **Applied Hydrogeology.** 4. ed. United States: Prentice Hall, 2000.

FITTS, C.R. **Groundwater Science.** San Diego: Academic Press, 2002. 450 p.

FONSECA, A. **Efeito da drenagem urbana nas características físico-químicas e biológicas da água superficial na Lagoa da Conceição (Florianópolis, SC, Brasil).** *Revista Biotemas*, v. 19, n. 2, p. 7–16, 2006.

FONTES, Maria Luiza Schmitz *et al.* **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.** 2004.

GODOY, F. B. **Modelagem hidrológico-hidrocinâmica da Lagoa da Conceição - SC.** [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

HAZEN, Allen. **Some physical properties of sands and gravels.** Mass. State Board of Health. 24th Annual Report, p. 539-556, 1892.

HEATH, R. C. **Basic Ground-Water Hydrology.** 1. ed. Denver: [s.n.]. 1983

HERRERA-SILVEIRA, J. A.; MORALES-OJEDA, S. M. **Evaluation of the health status of a coastal ecosystem in southeast Mexico: assessment of water quality, phytoplankton and submerged aquatic vegetation.** *Marine Pollution Bulletin*, v. 59, p. 72-86, 2009.

HORN FILHO, N. O. & LIVI, N. S. **Mapa geoevolutivo da planície costeira da ilha de Santa Catarina, SC, Brasil.** In: HORN FILHO, N.

IETC – UNEP, **Planejamento e gerenciamento de lagos e reservatórios: uma abordagem integrada ao problema da eutrofização**. Série de publicações técnicas [11p]. Osaka/Shiga. 383p, 2001.

ISIORHO, S. A.; MATISOFF, G.; WEHN, K. S. **Seepage relationships between Lake Chad and the Chad aquifers**. *Groundwater*, v. 34, n. 5, p. 819-826, 1996.

UTAH AGRICULTURAL EXPERIMENT STATION; REEVE, Ronald C.; ISRAELSEN, Orson Winso. *Canal Lining Experiments in the Delta Area, Utah*. 1944.

JI, T. *et al.* **Nutrient inputs to a Lagoon through submarine groundwater discharge: The case of Laoye Lagoon, Hainan, China**. *Journal of Marine Systems*, v. 111–112, p. 253–262, 2013.

JOHN, Peter H.; LOCK, Maurice A. **The spacial distribution of groundwater discharge into the littoral zone of a New Zealand lake**. *Journal of Hydrology*, v. 33, n. 3-4, p. 391-395, 1977.

JÚNIOR, Santos *et al.* **Avaliação do estado trófico aplicando o Índice TRIX no Sistema Lagunar Manguaba (Alagoas/Brasil) acoplado ao uso de geoprocessamento**. 2016.

KELLY, S. E.; MURDOCH, L. C. **Measuring the Hydraulic Conductivity of Shallow Submerged Sediments**. *Ground Water*, v. 41, n. 4, p. 431–439, jul. 2003.

KENNEDY, C. D. *et al.* **Design of a light-oil piezomanometer for measurement of hydraulic head differences and collection of groundwater samples**. *Water Resources Research*, v. 43, n. 9, p. 1–9, 2007.

KERN, P. **Estimativa de fluxos na interface sedimento-água em diferentes regiões de uma laguna subtropical**, [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.

KERN, Priscilla; ARCARI, Thiago; FRANCO, Davide. **Estudo do uso de seepage meters para a quantificação dos aportes subterrâneos de uma laguna subtropical: Lagoa da Conceição, Florianópolis/SC – Brasil**. XXVI JJI – Jornadas de Jóvenes Investigadores AUGM. Mendoza – Argentina, Outubro de 2018

KERN, P. *et al.* **Análise preliminar dos parâmetros físico-químicos de uma laguna subtropical: Lagoa da Conceição - Ilha de Santa Catarina**. XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Foz do Iguaçu, Novembro de 2019.

KERN, P. *et al.* **Confecção e teste de piezomanômetros de baixo custo para a quantificação de fluxo de água subterrânea**. XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Foz do Iguaçu, Novembro de 2019.

KING, Caroline; SALEM, Boshra. **A socio-ecological investigation of options to manage groundwater degradation in the western desert, Egypt**. *Ambio*, v. 41, n. 5, p. 490-503, 2012.2012

KJERFVE, Björn. **Coastal lagoons**. In: Elsevier oceanography series. Elsevier, 1994. p. 1-8.

KNOPPERS, B. **Aquatic primary production in coastal lagoons**. In: KJERFVE, B. (Ed.). *Costal Lagoon Processes*. Amsterdam: Elsevier Science, 1994. p. 1-8.

KOZENY, J. **Uber kapillare leitung der wasser in boden**. Royal Academy of Science, v. 136, p. 271–306, 1927.

KROEGER, K.D.; SWARZENSKI, P.W.; GREENWOOD, J.; REICH, C. **Submarine groundwater discharge to Tampa Bay: Nutrient fluxes and biogeochemistry of the coastal aquifer**. *Marine Chemistry* (104):85-97. 2007.

LABAUGH, J. W.; ROSENBERRY, D. O. **Field Techniques for Estimating Water Fluxes Between Surface Water and Ground Water**. Chapter 1 - Introduction and Characteristics of Flow. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, v. 4-D2, 2008.

LEE, D. R. **A device for measuring seepage flux in lakes and estuaries**. *Limnology and Oceanography*, 22(1), 140-147. 1977

JONES-LEE, Anne; LEE, G. Fred. **Stormwater Managers Beware of Snake-Oil BMPs for Water Quality Management**. Report of G. Fred Lee and Associates, El Macero, CA, 1998.

LEOTE, C.; IBÁÑHEZ, J. S.; ROCHA, C. **Submarine groundwater discharge as a nitrogen source to the Ria Formosa studied with seepage meters**. *Biogeochemistry*, v. 88, n. 2, p. 185–194, 2008.

LESACK, Lance FW; MELACK, John M. **Flooding hydrology and mixture dynamics of lake water derived from multiple sources in an Amazon floodplain lake**. *Water Resources Research*, v. 31, n. 2, p. 329-345, 1995.

LIEFER, J. D. *et al.* **Seasonal Alternation Between Groundwater Discharge and Benthic Coupling as Nutrient Sources in a Shallow Coastal Lagoon**. *Estuaries and Coasts*, v. 37, n. 4, p. 925–940, 2014.

LINDERFELT, William R.; TURNER, Jeffrey V. **Interaction between shallow groundwater, saline surface water and nutrient discharge in a seasonal estuary: the Swan–Canning system**. *Hydrological Processes*, v. 15, n. 13, p. 2631-2653, 2001.

LOUREIRO, S.; NEWTON, A.; ICELY, J. **Boundary conditions for the european water framework directive in the Ria Formosa Lagoon, Portugal** (physico-chemical and phytoplankton quality elements). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 67, p. 382-398, 2006.

MARTIN, J. B. *et al.* **Magnitudes of submarine groundwater discharge from marine and terrestrial sources: Indian River Lagoon, Florida**. *Water Resources Research*, v. 43, n. 5, p. 1–15, 2007.

MARTINEZ, C. J. **Mini-piezometers for measuring groundwater to surface water exchange**. Agricultural and Biological Engineering Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, 2013

MARTINEZ, C. J. **Seepage meters for Measuring Groundwater–Surface Water Exchange**. Agricultural and Biological Engineering Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. 2016

MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P . **Qualidade da água em bacias hidrográficas rurais: um desafio atual para sobrevivência futura**. *Agroecologia e Desenvolvimento Rural Sustentável*, v.3, n.4, p.33-38., 2002.

MONCHEVA, S.; *et al.* **Application of eutrophication indices for assessment of the Bulgarian Black Sea coastal ecosystem ecological quality.** Water Science and Technology, v. 46, n. 8, p. 19-28, 2002.

MURDOCH, L.C., & KELLY, S.E. **Factors affecting the performance of conventional seepage meters:** Water Resources Research, v. 39, no. 6, p. doi:10.1029/2002WR001347. 2003.

MWASHOTE, B. M. *et al.* **Calibration and use of continuous heat-type automated seepage meters for submarine groundwater discharge measurements.** Estuarine, Coastal and Shelf Science, v. 87, n. 1, p. 1–10, 2012.

NASROLLAHZADEH H. S., *et al.* **Trophic status of the Iranian Caspian Sea based on water quality parameters and phytoplankton diversity.** Continental Shelf Research, v. 28, p. 1153- 1165, 2008.

NASROLLAHZADEH H. S., *et al.* **Trophic status of the Iranian Caspian Sea based on water quality parameters and phytoplankton diversity.** Continental Shelf Research, v. 28, p. 1153- 1165, 2008.

NIENCHESKI, L. F. H., WINDOM, H. L., MOORE, W. S., & JAHNKE, R. A. **Submarine groundwater discharge of nutrients to the ocean along a coastal lagoon barrier, Southern Brazil.** Marine Chemistry, 106(3-4), 546–561. 2007

NORIEGA, C. E. D. **Estado trófico e balanço biogeoquímico dos nutrientes não conservativos (N e P), na Região Metropolitana do Recife – Brasil.** Tese (Doutorado em Ciências na área de Oceanografia Abiótica) Departamento de Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010. 104 f."

ODEBRECHT, C.; CARUSO GOMES JR., F. **Hidrografia e matéria particulada em suspensão na Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina, SC, Brasil.** Florianópolis NEMAR - CCB - UFSC, 1987.

ODONG, J. **Evaluation of empirical formulae for determination of hydraulic conductivity based on grain-size analysis.** Journal of American Science, v. 3, n. 3, p. 54-60, 2007.

ODRESKI, L. F. R. **Influência hidrológica nos processos hidrodinâmicos da Lagoa da Conceição - Florianópolis - SC.** [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.

OECD (Organization for Economic Cooperation and Development). **Eutrophication of water: monitoring, assessment and control.** Paris: OECD, 154p. 1982.

OFFICER, C.B. **Physics of Estuarine Circulation.** 1983

ONG, J. B.; ZLOTNIK, V. A. **Assessing Lakebed Hydraulic Conductivity and Seepage Flux by Potentiomanometer.** Ground Water, v. 49, n. 2, p. 270–274, 2011.

PAZ, A. R.; REIS, L. G. M.; LIMA, H. V. C. **Uso de modelagem hidrodinâmica visando a segmentação de corpos d'água rasos para Enquadramento: o caso do Lago Guaíba (RS).** XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. João Pessoa, PB. 20 p., 2005.

PENNA, S. 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, v. 48, p. 321-326, 2004.

PETERKA, John J. **Relationship of rainfall and lake groundwater seepage.** Limnology and Oceanography, v. 23, n. 4, p. 821-825, 1978.

PMISB – PMF. Plano municipal integrado de saneamento básico. **Diagnóstico da caracterização física das unidades territoriais de análise e planejamento.** pg 90. 2009

PRANDLE, D. **Estuaries: dynamics, mixing, sedimentation, and morphology.** Cambridge. 2009.

PRITCHARD, D.W. **What Is an Estuary: Physical Viewpoint.** In Estuaries. AAAS, Washington DC. 1967.

R. S. BRODIE , S. BASKARAN , T. RANSLEY & J. SPRING (2009) **Seepage meter: progressing a simple method of directly measuring water flow between surface water and groundwater systems,** Australian Journal of Earth Sciences, 56:1, 3-11, 2009

RAPAGLIA, J. *et al.* **A GIS typology to locate sites of submarine groundwater discharge.** Journal of Environmental Radioactivity, v. 145, p. 10–18, 2015.

ROCHA, C. M. **Advecção de água subterrânea para as lagoas Costeiras do litoral Norte do RS, Brasil. Universidade Federal do Rio Grande.** Dissertação apresentada à Comissão de Curso de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica da Universidade Federal do Rio Grande. 2015.

ROCHA, C. B. M. DA. **Implementação e uso do modelo Mike 21 ná análise de cenários hidrodinâmicos na Lagoa da Conceição - SC.** [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2007

ROSENBERRY, D.O. **Integrating seepage heterogeneity with the use of ganged seepage meters:** Limnology and Oceanography: Methods, v. 3, p. 131-142. 2005

ROSENBERRY, D. O.; MENHEER, M. A. **A system for calibrating seepage meters used to measure flow between ground water and surface water.** US Geological Survey, 2006.

ROSENBERRY, Donald O.; STRIEGL, Robert G.; HUDSON, Dallas C. **Plants as indicators of focused ground water discharge to a northern Minnesota lake.** Groundwater, v. 38, n. 2, p. 296-303, 2000.

ROSENBERRY, D. O. **A seepage meter designed for use in flowing water.** Journal of Hydrology, v. 359, n. 1-2, p. 118-130, 2008.

ROSENBERRY, DON. (2000). **Unsaturated-zone wedge beneath a large, natural lake.** Water Resources Research - WATER RESOUR RES. 36. 10.1029/2000WR900213. 2000.

ROSENBERRY, D. O.; LABAUGH, J. W.; HUNT, R. J. **Field Techniques for Estimating Water Fluxes Between Surface Water and Ground Water.** Chapter 2 - Use of Monitoring Wells , Portable Piezometers , and *Seepage meters* to Quantify Flow Between Surface Water and Ground Water. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, p. 128, 2008.

SALAS, H.; MARTINO, P. **Metodologias Simplicadas para la Evaluación de Eutroficación en Lagos Cálidos Tropicales.** LIMA: Programa Regional CEPIS/HPE/IOPS, 52 p. 2001.

SANTOS, I. R.; NIENCHESKI, F.; BURNETT, W. ; PETERSON, R. ; CHANTON, J.; ANDRADE, C. F.F.; MILANI, I. ; SCHMIDT, A.; KNOELLER, K. **Tracing anthropogenically driven groundwater discharge into a coastal lagoon from southern Brazil.** *Journal of Hydrology* 353(2008):275– 293. 2008a.

SANTOS, S. J. da C. **Determinação do estado trófico a partir da aplicação dos Índices O'Boyle e TRIX nos compartimentos da baía de Guanabara, RJ.** Dissertação (Mestrado em Geoquímica Ambiental) Instituto de Química, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2015. 100f.

SANTOS, V. **Disposição dos efluentes tratados em uma lagoa de evapoinfiltração.** Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina. Dissertação de mestrado: 144p. 2018.

SEBESTYEN, Stephen D.; SCHNEIDER, Rebecca L. **Seepage patterns, pore water, and aquatic plants: hydrological and biogeochemical relationships in lakes.** *Biogeochemistry*, v. 68, n. 3, p. 383-409, 2004.

SEBESTYEN, Stephen D.; SCHNEIDER, Rebecca L. **Dynamic temporal patterns of nearshore seepage flux in a headwater Adirondack lake.** *Journal of Hydrology*, v. 247, n. 3-4, p. 137-150, 2001.

SEILER, Lilian MN *et al.* **Evaluation of hydrologic influence on water quality variation in a coastal lagoon through numerical modeling.** *Ecological modelling*, v. 314, p. 44-61, 2015.

SHAW, R. D.; PREPAS, E. E. **Anomalous, short-term influx of water into seepage meters.** *Limnology and Oceanography*, v. 34, n. 7, p. 1343–1351, 1990.

SHAW, R. D.; PREPAS, E. E. **Groundwater-lake interactions: I. Accuracy of seepage meter estimates of lake seepage.** *Journal of Hydrology*, v. 119, n. 1-4, p. 105-120, 1990.

SHEPHERD, Russell G. **Correlations of permeability and grain size.** *Groundwater*, v. 27, n. 5, p. 633-638, 1989.

SHINN, E.; REICH, C.; HICKEY, T. **Seepage meters and Bernoulli's revenge.** *Estuaries and Coasts*, v. 25, n. 1, p. 126–132, 2002.

SILVA, A. R. da; **Aplicação do modelo TRIX para avaliação da qualidade da água dos rios que drenam para Estação Ecológica de Carijós, Florianópolis, SC, Brasil.** In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, XX. Bento Gonçalves, (RS). Anais... . Bento Gonçalves: ABRH, 2013

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.** [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2013

SILVA, V. E. C. **Análise espaço temporal do estado trófico de uma laguna costeira subtropical: Lagoa da Conceição, Florianópolis, Santa Catarina.** [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

SILVEIRA, A. L. L. **Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica.** In TUCCI, CEM (Org). *Hidrologia. Ciência e Aplicação.* Porto Alegre: Ed. Da Universidade: ABRH: EDUSP, 1993. p 35-51

TANIGUCHI, M.; STIEGLITZ, T.; ISHITOBI, T. **Temporal variability of water quality of submarine groundwater discharge in Ubatuba, Brazil.** Estuarine, Coastal and Shelf Science, v. 76, n. 3, p. 484–492, 2008.

TAVARES, J. L.; CALADO, A. L.A.; FONTES, R. F. C. **Estudos iniciais para o uso do índice TRIX para análise do nível de eutrofização no estuário do Rio Potengi – Natal-RN** Brasil.Revista AIDIS, v. 7, n. 3, p. 297-308, 2014.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B. **Soil mechanics in engineering practice.** 2. ed. New York: Wiley, 1967.

USGS (2007). **Scientific Investigations Report 2007–5216.** Acessado em março de 2018. Disponível em < <https://pubs.usgs.gov/sir/2007/5216/section3.html> >

VALIELA, I. & D’ELIA, C.. **Groundwater Inputs to Coastal Waters: Special Issue,** Biogeochemistry 10, 1990. p 328.

SCHÄFER, Alois. **Fundamentos de ecología y biogeografía das águas continentais.** Dt. Ges. für Techn. Zsarb., 1985.

VOLLENWEIDER, R. A. *et al.* **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: The official journal of the International Environmetrics Society, v. 9, n. 3, p. 329-357, 1998.

VON SPERLING, M. 1996. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 2ª edição. Belo Horizonte:DESA/UFMG. 243p.

WEATHERS, K. DRAYER, D. LIKENS, G. **Fundamentos de ciência dos ecossistemas.** Tradução Edson Furmankiewics. 1ª Ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

WETZEL, Robert G. **Microcommunities and microgradients: linking nutrient regeneration, microbial mutualism, and high sustained aquatic primary production.** Netherland Journal of Aquatic Ecology, v. 27, n. 1, p. 3-9, 1993.

WINDOM, H. L.; MOORE, W. S.; NIENCHESKI, L. F. H. & JAHNKE, R. A. **Submarine groundwater discharge: A large, previously unrecognized source of dissolved iron to the South Atlantic Ocean.** Marine Chemistry. 102 (3-4):252-266. . 2006.

WINTER, T.C. *et al.* **Ground water and surface water, a single resource.** United States Geological Survey, Circular, v. 1139, 1998.

WOESSNER, William W.; SULLIVAN, Kevin E. **Results of seepage meter and mini-piezometer study,** Lake Mead, Nevada. Groundwater, v. 22, n. 5, p. 561-568, 1984.

YELVERTON, G. Frank; HACKNEY, Courtney T. **Flux of dissolved organic carbon and pore water through the substrate of a *Spartina alterniflora* marsh in North Carolina.** Estuarine, Coastal and Shelf Science, v. 22, n. 2, p. 255-267, 1986.

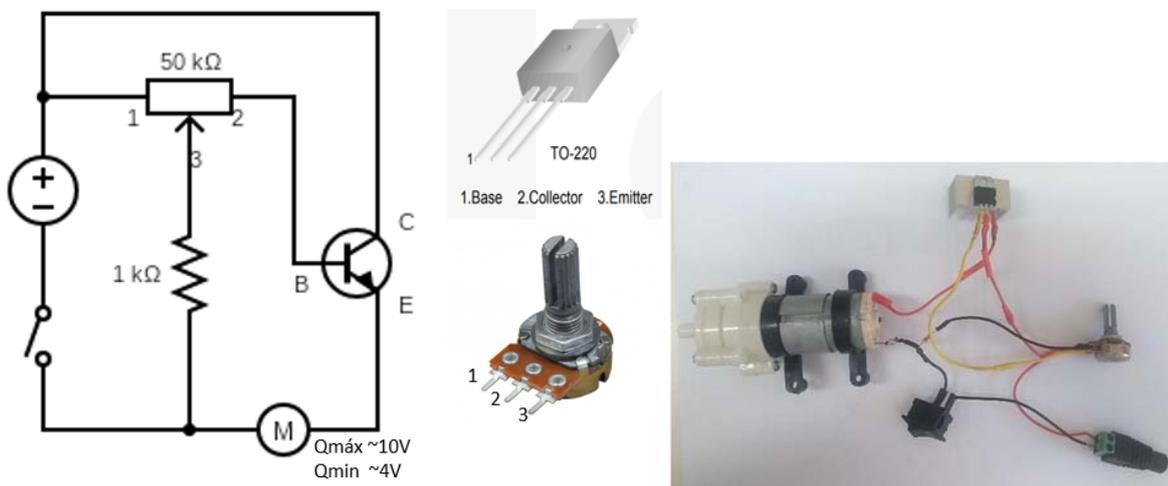
ZANATTA, L C *et al.* **Riscos de poluição em lençol freático com infiltração de efluente tratado.** 2005.

## APÊNDICE A – CIRCUITO DAS BOMBAS

Para controlar o fluxo da bomba RSP385 é instalado um potenciômetro 50K para cada bomba, que opera como uma resistência de valor variável que consecutivamente proporciona o controle da intensidade de corrente que passa por um circuito em paralelo ou a voltagem se conectado em série. Para o potenciômetro não queimar, é instalado um transistor TIP122, que atua como amplificador, ou seja, permite tornar um sinal elétrico de baixa intensidade em um sinal elétrico de intensidade superior. Enquanto um dos terminais do transistor TIP122 recebe a tensão elétrica (base), o outro envia o sinal amplificado (coletor ou emissor) que acabará de percorrer sobre o transistor, havendo entrada e saída de tensão somente quando aplicada tensão elétrica ao terminal do meio. Para evitar o superaquecimento do transistor foi acoplado a ele um dissipador de calor autoadesivo. As bombas são conectadas a uma fonte de energia através de um interruptor.

O esquema geral do circuito é apresentado na Figura 64 à esquerda, os componentes TIP122 (superior) e o potenciômetro (inferior) são apresentados na Figura 64 à direita e a esquerda apresenta a foto da bomba utilizada no experimento.

Figura 64 -Esquema geral do circuito da bomba à esquerda. Componentes do sistema à direita. Transistor, TIP 122 (direita superior) e potenciômetro (direita inferior) ambos com a identificação dos terminais para a conexão externa. Esquerda: Foto da bomba RSP385 e o circuito utilizado no experimento



## APÊNDICE B – PROJETO *DATALOGGER* ARDUINO MEDIDOR DE VAZÃO

O Arduino é uma plataforma de computação física de fonte aberta para a criação de objetos interativos independentes ou em colaboração com softwares do computador. O hardware e o software do Arduino são de fonte aberta, o software conhecido como *Integrated Development Environment* (IDE), é gratuito e é utilizado para na criação de um sketch (esboço, um pequeno programa de computador) cujo *upload* deve ser feito para a placa Arduino. O ambiente de desenvolvimento é baseado na linguagem C, deixa a programação intuitiva para iniciantes.

Os objetos construídos com o Arduino, seguem um padrão chamado de dispositivo interativo, que consiste em um circuito eletrônico capaz de perceber o ambiente. Nesta configuração, o microcontrolador Arduino armazena os dados de fluxo de água, obtidos através do sensor de efeito hall, em um cartão micro-SD, e também exibe a vazão em tempo real em um leitor LCD.

Neste projeto é utilizado o Arduino UNO R3 é que possui um microcontrolador ATmega328 de 8 bits ou 32 bits com um relógio velocidade de 16 MHz. O Arduino tem uma interface USB, 14 portas digitais I/O (6 podem ser usados como saídas PWM), 6 portas analógicas, um 16 MHz ressonador de cerâmica, uma tomada de energia, um cabeçalho ICSP e um botão de reset. Isto contém tudo o que é necessário para suportar o microcontrolador. O microcontrolador pode ser alimentado por um laptop com um cabo USB ou por um Adaptador CC ou bateria de 7V a 12V e opera com tensão de 5V. A corrente nos pinos I/O é de 40mA e nos pinos 3,3V é de 50mA. Possui memória flash 32KB (0,5KB usado no *bootloader*), SRAM de 2KB e EEPROM de 1KB. Expansão de sensor personalizado compatível com Arduino placas, conhecidas como escudos, podem ser desenvolvidas para conectar diretamente nos cabeçalhos de pinos padronizados da placa Arduino.

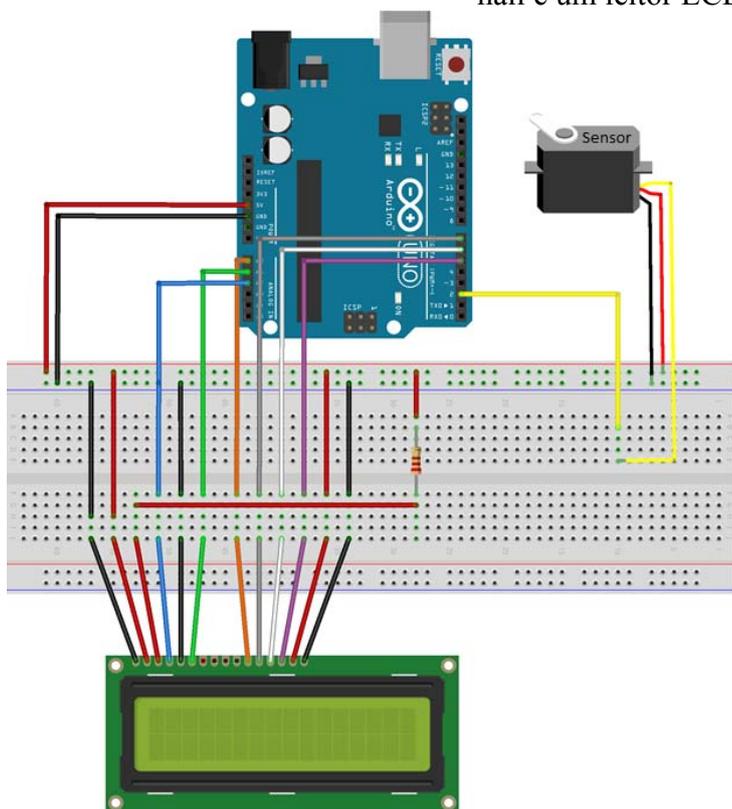
Os materiais necessários para executar o projeto são:

1. Arduino UNO R3
2. Sensor de Fluxo de Água (saída pulsada proporcional à vazão)
3. Display LCD 16x2
4. Protoboard 830 Pontos
5. Kit Jumpers Macho-Macho/fios diversos
6. Conector Adaptador Plug P4 Fêmea com Borne

7. Bateria CR1220 3V
8. Cartão micro-SD

O diagrama do projeto do Arduino em conjunto com um sensor de fluxo de efeito hall e um leitor LCD é apresentado na Figura 65.

Figura 65 - Diagrama do projeto do Arduino em conjunto com um sensor de fluxo de efeito hall e um leitor LCD.



Uma vez configurada a IDE do Arduino, conhecido como ligar os componentes de hardware/esquema elétrico e sabendo como o projeto funciona, é chegada a hora de inserção do código. O código-fonte comentado, desenvolvido para este projeto, utilizado para medir a vazão encontra-se abaixo.

```
#include <LiquidCrystal.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include "RTClib.h"

const int CHIPSELECT = 10 ;
int  TSAMPLE  = 60 ; // tempo de amostragem da vazão 1 min
int  TLOOP    = 1000 ; // tempo de loop

int  tpulso_ms  = 0 ;
```

```

int tlast_vazao_ms = 0 ;
int tlast_loop_ms = 0 ;
float tpulso_mean_ms = 0 ;

float vazao      ; // Variável para armazenar o valor em L/min
float media      = 0 ; // Variável para fazer a média
int  contaPulso  = 0 ; // Variável para a quantidade de pulsos
int  i           = 0 ; // Variável para segundos
int  Min         = 0 ; // Variável para minutos
int  Sec         = 0 ; // Variável para segundos
float Litros     = 0 ; // Variável para Quantidade de agua
float MiliLitros = 0 ; // Variavel para Conversão

RTC_Millis rtc;

LiquidCrystal lcd(16, 15, 14, 7, 6, 5);

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  rtc.begin(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));

  lcd.begin(16, 2);
  lcd.setCursor( 0, 0);
  lcd.print("Sensoriamento de");
  lcd.setCursor( 0, 1);
  lcd.print(" fluxo de Agua ");
  delay(3000);
  lcd.clear();

  pinMode(2, INPUT);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), incpulso, RISING); //Configura o pino 2(Interrupção 0) interrupção

  tpulso_ms = millis();
  tlast_loop_ms = tpulso_ms;

  sei(); //Habilita interrupção

  if (!SD.begin(CHIPSELECT)) {
    Serial.println("Card failed, or not present");
    // don't do anything more:
    return;
  }
}

```

```

}

/*String data_str = "Ano;Mês;Dia;Hora;Min;Seg;Vazão(L/min);Volume(L)";
File dataFile = SD.open("datalog.csv", FILE_WRITE);
dataFile.println(data_str);
dataFile.close(); */
}

void loop ()
{
  int t_now = millis();

  if(t_now - tlast_loop_ms >= TLOOP)
  {
    Serial.print("tempo loop1: ");
    Serial.println(t_now - tlast_loop_ms);

    tlast_loop_ms = millis();

    DateTime now = rtc.now();

    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print(vazao); //Escreve no display o valor da vazão
    lcd.print(" L/m "); //Escreve L/min
    lcd.print(" ");
    lcd.print(Litros);
    lcd.print("L ");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(now.hour());
    lcd.print(":"); //Escreve :
    lcd.print(now.minute()); //Escreve a contagem i (segundos)
    lcd.print(":"); //Escreve :
    lcd.print(now.second()); //Escreve a contagem i (segundos)
    lcd.print(" ");
    lcd.print(Min);
    lcd.print(":");
    lcd.print(++Sec);
    lcd.print(" ");

    Serial.print("tempo loop2: ");
    t_now = millis()/1000;
    Serial.println(t_now - tlast_vazao_ms);
    if ((t_now - tlast_vazao_ms) >= TSAMPLE)
    {

```

```

tlast_vazao_ms = t_now;

cli();
int pulsos = contaPulso;
contaPulso = 0;
sei();

if(pulsos <= 0) vazao = 0;
else vazao = (pulsos*6.07 + 150.39)/1000;
Litros = Litros + vazao;
tpulso_mean_ms = tpulso_mean_ms/pulsos;
Serial.print("pulsos = ");
Serial.print(pulsos);
Serial.print(" | tpulso_mean_ms = ");
Serial.println(tpulso_mean_ms);

Sec = 0;
if (++Min >= 59) Min = 0;

String data_str;
data_str = String(now.year()) + ",";
data_str += String(now.month()) + ",";
data_str += String(now.day()) + ",";
data_str += String(now.hour()) + ",";
data_str += String(now.minute()) + ",";
data_str += String(now.second()) + ",";
data_str += String(vazao) + ",";
data_str += String(Litros) + ",";
data_str += String(pulsos);

File dataFile_csv = SD.open("datalog.csv", FILE_WRITE);
dataFile_csv.println(data_str);
dataFile_csv.close();
}

}

}

void incpulso ()
{
contaPulso++; //Incrementa a variável de pulsos
int timenow = millis();

```

```
Serial.print("tempo transcorrido: ");  
Serial.println(timenow-tpulso_ms);  
tpulso_mean_ms += (timenow-tpulso_ms);  
tpulso_ms = timenow;  
}
```

