

Thiago de Liz Arcari

**AS INTERAÇÕES ENTRE ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS E SUPERFICIAIS EM UMA
LAGUNA COSTEIRA: LAGOA DA
CONCEIÇÃO, FLORIANÓPOLIS/SC, BRASIL.**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Davide Franco

Florianópolis
2018

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

Arcari, Thiago de Liz

As interações entre águas subterrâneas e superficiais em uma laguna costeira: Lagoa da Conceição, Florianópolis/SC, Brasil. / Thiago de Liz Arcari ; orientador, Davide Franco , 2018.

94 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia Ambiental. 2. Descargas de águas subterrâneas (DAS). 3. Seepage Meters. 4. Piezomanômetros. I. , Davide Franco. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. III. Título.



**“AS INTERAÇÕES ENTRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E SUPERFICIAIS EM
UMA LAGUNA COSTEIRA: LAGOA DA CONCEIÇÃO, FLORIANÓPOLIS/SC,
BRASIL”**

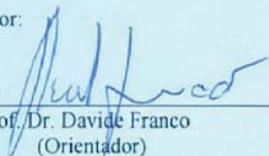
THIAGO DE LIZ ARCARI

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA AMBIENTAL

na Área de Engenharia Ambiental.

Aprovado por:



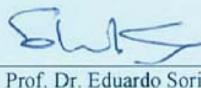
Prof. Dr. Davide Franco
(Orientador)



Prof. Dr. Konrad Miotlinski



Prof. Dr. Nilson Guiguer Junior



Prof. Dr. Eduardo Soriano-Sierra



Prof.ª Dr.ª Maria Eliza Nagel Hassemer
(Coordenadora)

FLORIANÓPOLIS, SC – BRASIL
SETEMBRO/2018

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao prof. Davide Franco pela orientação e confiança em buscar novas linhas de pesquisa dentro do nosso grande laboratório que é a Lagoa da Conceição.

Aos colegas do Laboratório de Hidráulica Marítima (LaHiMar), que sempre se dispuseram a ajudar e contribuir com o trabalho: Vanessa, Felipe, Victor, Alejandro, Patrícia, Marcos, Leo e Luigi. Um agradecimento especial à Priscilla que me acompanhou nos trabalhos de campo e no desenvolvimento das metodologias, onde pudemos encontrar os mais variados problemas não encontrados nas bibliografias.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil (CNPq) pelo apoio na bolsa de pesquisa.

Aos colegas da empresa Socioambiental, que me apoiaram com equipamentos, logística de campo e no desenvolvimento do trabalho.

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

Ao professor Henry Xavier Corseuil, pelos grandes ensinamentos, incentivos e conversas. Foi um professor fundamental na minha formação e que me apresentou à hidrogeologia e ao gerenciamento de áreas contaminadas. Desejo força nessa luta e que você possa transmitir seus ensinamentos para mais felizardos como eu.

Ao professor Érico Porto Filho, pelo incentivo em trabalhar com a Lagoa da Conceição, pelas contribuições ao estudo e fornecimento de bibliografia.

À minha família pelo apoio incondicional e à Laura pelo companheirismo, contribuição, suporte e paciência, que sempre me incentivou e possibilitou a concretização deste trabalho.

RESUMO

As interações e trocas entre as águas subterrâneas e superficiais (Asub-Asup) ocorrem em todos os tipos de corpos hídricos, como rios, lagos, lagoas costeiras e oceanos. A importância deste processo é cada vez mais reconhecida e estudada, onde recentes investigações no sul do Brasil identificaram grande importância das descargas de águas subterrâneas (DAS) nos aportes de nutrientes e ciclos biogeoquímicos de lagoas e oceanos. A área de estudo configura-se em uma laguna costeira sufocada, localizada na Ilha de Santa Catarina. Os métodos de identificação e quantificação utilizados neste trabalho foram o *seepage meter*, que consiste em medições diretas e pontuais dos fluxos na interface sedimento-água e foram confirmados e validados com os piezomanômetros, que medem as cargas hidráulicas no sedimento. A metodologia se mostrou bastante satisfatória para um diagnóstico inicial, sendo acessível e de baixo custo financeiro. Todavia, sua aplicação em campo se mostrou difícil e suscetível a erros de medição. Em relação aos resultados, com exceção da estação RR, os fluxos na interface Asub-Asup da Lagoa da Conceição fluem no sentido laguna-aquífero, com descargas médias entre -0,9 a -5,5 cm/d. Esses resultados foram 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. Foi sugerido que em certas localidades (RR e LIC), os fluxos Asub-Asup estão intrinsecamente relacionados ao uso dos recursos hídricos da região. Os padrões de interação Asub-Asup foram confirmados e validados através da medição de cargas hidráulicas com os piezomanômetros, onde também foram estimadas condutividades hidráulicas no sedimento

Palavras-chave: DESCARGAS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS (DAS); SEEPAGE METER; PIEZOMANÔMETROS.

ABSTRACT

The groundwater-surface water interaction (GW-SW) occurs in nearly all surface-water environments, such as rivers, lakes, lagoons and oceans. The reconnaissance of this process has grown rapidly. Recent studies in south Brazil have shown great influence of submarine groundwater discharge (SGD) in coastal lagoons and in the Atlantic Ocean biogeochemical cycle. The study area is a choked coastal lagoon located in Santa Catarina Island, Brazil. Seepage meters and piezomanometers were used to identify and quantify GW-SW fluxes in the sediment-water interface. The methodology revealed very satisfactory results for an initial analysis with low budget. Nevertheless, the field application has shown to be very labor-intensive and susceptible to errors. The results shown that the GW-SW fluxes flow from surface to groundwater (except for RR) with average discharge of -0,9 to -5,5 cm/d. These results were associated with the local geomorphology, as the high slope and crystalline rocks predominance promote superficial flows of the precipitation water, causing less recharge to the fractured crystalline aquifer that would flow to the coastal lagoon. The spatiotemporal heterogeneity of SGD was related to the heterogeneity of the local aquifer. It was suggested that in certain sites (RR and LIC) the SGD fluxes are intrinsically related to the use of water resources. The GW-SW patterns were confirmed and validated with the piezomanometers with measured the hydraulic head and hydraulic conductivity.

Keywords: SUBMARINE GROUNDWATER DISCHARGE (SGD); SEEPAGE METER; PIEZOMANOMETERS.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. OBJETIVOS	12
2.1 Geral	12
2.2 Específicos.....	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1 Sistemas Estuarinos e Lagunas Costeiras	12
3.2 Ciclo Hidrológico	14
3.3 Bacia Hidrográfica e Unidades de Resposta Hidrológica.....	15
3.4 Hidrogeologia e o Movimento das Águas Subterrâneas.....	16
3.5 Interação entre Águas Superficiais e Águas subterrâneas (Asub-Asup)	18
3.6 Métodos de Identificação e Quantificação da Interação Asub-Asup	24
3.6.1 <i>Seepage meter</i>	25
3.6.2 Mini piezômetros e piezomanômetros	28
3.6.3 Fórmulas empíricas de condutividade hidráulica a partir da granulometria.....	29
4. ÁREA DE ESTUDO	30
4.1 Localização.....	30
4.2 Geologia e Hidrogeologia.....	33
4.3 Distribuição espacial dos sedimentos da laguna	35
4.4 Hidrografia e Unidades de Resposta Hidrológica (URHs)	37
5. MATERIAL E MÉTODOS	39
5.1 Malha Amostral	41
5.2 <i>Seepage meter</i>	43
5.3 Monitoramento do nível d'água na Lagoa da Conceição	48
5.4 Granulometria.....	49
5.5 Mini piezômetros	51

5.6	Piezomanômetros	55
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
6.1	Seepage Meters	58
6.1.1	Precipitação	59
6.1.2	Estação CC	61
6.1.3	Estação CRV	63
6.1.4	Estação PA	64
6.1.5	Estação RR	65
6.1.6	Estação LIC	67
6.1.7	Identificação dos padrões das interações Asub-Asup	69
6.1.8	A utilização dos <i>Seepage Meters</i>	74
6.2	Estimativa da condutividade hidráulica do sedimento	75
6.3	Piezomanômetros	78
7.	CONCLUSÃO	81
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema representativo das componentes do ciclo hidrológico em uma laguna costeira.	15
Figura 2 – Esquema representativo das águas subterrâneas em um aquífero livre	17
Figura 3 – Interação Asub-Asup.....	20
Figura 4 – Modelo conceitual das descargas de águas subterrâneas em ambientes costeiros (DAS).....	21
Figura 5 - Interação Asub-Asup em estuários.	23
Figura 6 – Classificação de ambientes lacustres em seis classes principais baseadas em tipos e influências relativas ao movimento das águas superficiais e subterrâneas.....	24
Figura 7 – Esquema de funcionamento do <i>seepage meter</i> e convenção dos sentidos do fluxo	26
Figura 8 – Localização da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição e sub-bacias	31
Figura 9 - Batimetria da laguna e área adjacente ao canal	33
Figura 10 – Mapa das unidades hidrogeológicas da área de estudo.	35
Figura 11 – Distribuição espacial das fácies texturais do sedimento na laguna.	37
Figura 12 - Divisão da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição em URHs.....	39
Figura 13 - Fluxograma da metodologia	41
Figura 14 - Localização Estações Amostrais.....	43
Figura 15 - <i>Seepage meters</i> antes e após instalação no sedimento.....	44
Figura 16 – Imagem aérea com destaque para os <i>seepage meters</i> instalados na estação de monitoramento PA.	46
Figura 17 - Coletores plásticos e conexões	47
Figura 18 - Instalação da régua linimétrica no interior da laguna	49
Figura 19 – <i>Core sampler</i> e amostras de sedimento.....	50
Figura 20 – Analisador de distribuição de tamanho partículas do Laboratório de Oceanografia Costeira (UFSC).....	50
Figura 21 – Esquema do funcionamento dos mini piezômetros. (A) Representação da ocorrência de descargas de águas subterrâneas. (B) Representação de infiltração.....	52
Figura 22: Materiais utilizados na confecção do mini piezômetro.	53
Figura 23: Esquema de instalação do mini piezômetro: 1) penetração do invólucro externo; 2) Inserção do mini piezômetro e remoção do invólucro; 3) Mini piezômetro instalado.	54
Figura 24 – Mini piezômetros instalados na estação LIC.....	54

Figura 25 – Piezomanômetro	56
Figura 26 – Detalhe seção filtrante da mangueira do piezomanômetro	56
Figura 27 - Esquema do funcionamento do piezomanômetro.....	57
Figura 28 – Precipitação registrada na estação Epagri/CIRAM Itacorubi e Normal Climatológica 1981-2010	60
Figura 29 – Precipitação diária registrada na estação Epagri/CIRAM Itacorubi e dados de nível relativo da Lagoa da Conceição	61
Figura 30 – Perfil topobatimétrico e configuração do transecto na estação CC.....	62
Figura 31: Descargas de águas subterrâneas na estação CC ao longo do período monitorado.....	62
Figura 32 - Perfil topobatimétrico e configuração do transecto na estação CRV.....	63
Figura 33: Descargas de águas subterrâneas na estação CRV ao longo do período monitorado.....	64
Figura 34 - Perfil topobatimétrico e configuração do transecto na estação PA	65
Figura 35: Descargas de águas subterrâneas na estação PA ao longo do período monitorado.....	65
Figura 36 - Perfil topobatimétrico e configuração do transecto na estação RR.....	66
Figura 37: Descargas de águas subterrâneas na estação RR ao longo do período monitorado.....	67
Figura 38 - Perfil topobatimétrico e configuração do transecto na estação LIC.....	68
Figura 39: Descargas de águas subterrâneas na estação LIC ao longo do período monitorado.....	69
Figura 40 - Diagrama de caixa das descargas de interação Asub-Asup na Lagoa da Conceição por (a) <i>seepage meter</i> e (b) agrupados por estação.	70
Figura 41 - Padrão do fluxo de águas subterrâneas na estação LIC. As setas vermelhas indicam o fluxo negativo em relação à laguna (infiltração) As setas azuis indicam o sentido do fluxo subterrâneo e o escoamento superficial através de pequenos córregos.	71
Figura 42 - Influência da lagoa de evapoinfiltração no fluxo de água subterrânea regional da Lagoa da Conceição. Setas azuis indicam o fluxo do aquífero para a laguna. Setas vermelhas indicam a infiltração na LEI.	72
Figura 43 - DAS nas estações do corpo central da laguna. A linha contínua indica as descargas de águas subterrâneas médias (DASm) nas três estações. A linha pontilhada indica o nível relativo da laguna.	72

Figura 44 - Comportamento do fluxo subterrâneo (setas vermelhas) com o nível oceânico abaixo do nível da laguna (linha vermelha). As setas azuis indicam o sentido do fluxo quando o nível oceânico se encontra acima do nível da laguna (linha azul). A linha equipotencial preta indica a cunha de intrusão salina e setas pretas o padrão de recirculação..... 73
Figura 45 – Diferença de cargas hidráulicas na estação LIC..... 80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Magnitude das DAS em outros estudos.....	22
Tabela 2 – Coordenadas das estações amostrais	42
Tabela 3: Tempo médio de permanência dos coletores em cada estação.	48
Tabela 4: Relação das datas das coletas realizadas.	59
Tabela 5 – Granulometria dos sedimentos e estimativa de condutividade hidráulica.....	77
Tabela 6 – Resultados obtidos com o piezomanômetro e comparação das condutividades hidráulicas calculadas.....	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Asub	Águas Subterrâneas
Asup	Águas Superficiais
CASAN	Companhia Catarinense de Águas e Saneamento
CIRAM	Centro de Informações de Recursos Ambientais de Santa Catarina
DAS	Descargas de Águas Subterrâneas
DN	Diâmetro Nominal
EPAGRI	Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural
GPS	Global Positioning System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPUF	Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis
LAHIMAR	Laboratório de Hidráulica Marítima (UFSC)
LEI	Lagoa de Evapoinfiltração
LOC	Laboratório de Oceanografia Costeira (UFSC)
NA	Nível d'Água
PVC	Policloreto de Vinila
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
URH	Unidade de Resposta Hidrológica
UTM	Universal Transversa de Mercator
SGD	Submarine Groundwater Discharge

1. INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas e superficiais (Asub-Asup) foram historicamente estudadas e analisadas como recursos e compartimentos isolados. Estudos integrados da interface Asub-Asup vêm sendo desenvolvidos com o objetivo de quantificar balanços hídricos e avaliar possíveis efeitos das atividades humanas em rios, lagos, lagoas e oceanos (SOPHOCLEOUS, 2002).

O desenvolvimento de metodologias de quantificação dos fluxos de água entre estes compartimentos é um dos aspectos importantes dos estudos na interface Asub-Asup. Entre eles, destacam-se as metodologias diretas e pontuais (*seepage meters*, mini piezômetros e piezomanômetros), metodologias indiretas (uso de traçadores) e modelagem numérica integrada.

As interações e trocas entre as águas de superfície e as águas subterrâneas ocorrem em todos os tipos de corpos hídricos, como rios, lagos, lagoas costeiras e áreas alagadas, sendo essa interação dependente das características geológicas e climatológicas da região (WINTER et al., 1998).

A importância deste processo é cada vez mais reconhecida e estudada. Estudos recentes no sul do Brasil em lagoas costeiras apontaram fluxos importantes na interface sedimento-água e também identificaram grande relação entre as águas subterrâneas, os ciclos biogeoquímicos e o aporte de nutrientes (ANDRADE et al., 2012; ATTISANO, 2012; ATTISANO et al., 2008; BURNETT et al., 2006; DEBNATH; MUKHERJEE, 2016; JI et al., 2013; LEOTE; IBÁÑEZ; ROCHA, 2008; NIENCHESKI et al., 2007; ROCHA; ANDRADE; NIENCHESKI, 2015; SANTOS et al., 2008).

Lagoas costeiras são de imensa importância para áreas costeiras em termos de ecossistema e riquezas naturais. As lagoas são áreas de produtividade natural elevada e também promovem excelentes oportunidades para a agricultura, piscicultura e turismo (GÖNENÇ; WOLFLIN, 2004).

A Lagoa da Conceição é o maior ambiente lagunar da Ilha de Santa Catarina e o quinto maior do estado. Além da importância ecológica, é um patrimônio paisagístico, arqueológico e econômico (SIERRA DE LEDO; SORIANO-SIERRA, 1999). Este ambiente destaca-se pelo seu papel ecológico, sendo local de abrigo e reprodução para diversas espécies de organismos marinhos (PORTO FILHO, 1993; SIERRA DE LEDO; SORIANO-SIERRA, 1999; SILVA, 2016).

Nas últimas décadas, estudos têm mostrado alterações das características hidroquímicas e biológicas na Lagoa da Conceição (CURY et al., 2017; FONSECA, 2006). Os processos que afetam as condições, variabilidades físicas e qualitativas do sistema são de grande complexidade e, portanto, necessitam abordagem multidisciplinar. Com base nisto, o Laboratório de Hidráulica Marítima (LAHIMAR), vem investigando os fenômenos físico-químicos e hidrodinâmicos do ambiente estuarino associado ao ecossistema da Lagoa da Conceição (BIER, 2013; GODOY, 2009; GROHS, 2016; ODRESKI, 2012; ROCHA, 2007; SILVA, 2010, 2013, 2016; WILL, 2017).

O presente estudo visa realizar o desenvolvimento de metodologias diretas capazes de realizar uma investigação inicial e análise exploratória de dados da interação Asub-Asup na Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição, localizada em Florianópolis/SC, que contempla uma laguna costeira interligada com o oceano.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

O objetivo geral deste trabalho é investigar as interações Asub-Asup na Lagoa da Conceição a partir de metodologias diretas e de baixo custo.

2.2 Específicos

- Desenvolver, instalar e aplicar metodologias capazes de investigar fluxos de entrada e saída de águas subterrâneas em um ambiente lagunar;
- Levantar dados primários e realizar análise exploratória preliminar;
- Apontar falhas, possíveis erros e melhorias nas metodologias;
- Identificar padrões de interação águas subterrânea-superficial na Lagoa da Conceição.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Sistemas Estuarinos e Lagunas Costeiras

O conceito clássico de sistemas estuarinos foi estabelecido por Pritchard (1967), que define como corpos d'água costeiros, semifechados, livremente conectados com o oceano, onde a água salgada é diluída com a água doce que drena a bacia hidrográfica. Uma definição mais recente

foi descrita por Dyer (1997) onde um estuário é um corpo de água costeiro semifechado com ligação livre com o oceano aberto, estendendo-se rio acima até o limite da influência da maré, sendo que em seu interior a água do mar é diluída pela água doce oriunda da drenagem da bacia hidrográfica.

Uma característica fundamental de um estuário é a interação que ocorre no seu interior entre a água salgada e doce, e por isso, é muito comum a classificação pela salinidade, relatando graus de mistura entre essas duas massas de água. Em um estuário típico, a salinidade diminui do oceano para o rio, permitindo assim a subdivisão em áreas dependendo da salinidade apresentada: uma área com alta salinidade é chamada de polihalina, com salinidades médias constitui a parte mesohalina, e a região de menor salinidade, oligohalina (DAY JR et al., 1989).

As lagunas costeiras, são sistemas estuarinos que apresentam a formação geográfica de um corpo d'água semifechado com conexão permanente ou intermitente com o oceano, possibilitando um maior tempo de residência da água no corpo hídrico (HUNG; HUNG, 2003).

No Brasil, em geral utiliza-se o termo “lagoa” para referir-se a todos os corpos d'água costeiros e mesmo interiores, independentemente de sua origem. No entanto, quando estas são conectadas com o mar, a nomenclatura geomorfologicamente apropriada seria “lagunas costeiras”. O termo “lagoa” é mantido na maioria dos trabalhos científicos devido ao seu caráter de ampla aceitação regional e popular (ESTEVES, 1998)

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 da maré no seu interior, que estão dinamicamente relacionadas com as condições dos canais e aberturas para o oceano, ficando assim divididas em:

- Lagunas sufocadas: ambiente costeiro formado por células elípticas, conectado ao mar por somente um canal estreito que funciona como um filtro, atenuando as oscilações de maré dentro da laguna.
- Lagunas restritas: ambiente costeiro amplo com dois ou mais canais estreitos e a circulação forçada pela maré é bem definida.

- Lagunas vazadas ou abertas: sistema marinho alongado com entradas múltiplas onde as amplitudes de maré são moderadas ou grandes.

De acordo com a classificação estabelecida, a Lagoa da Conceição, localizada em Florianópolis/SC é classificada como uma laguna sufocada, visto a única conexão com o oceano através do canal da Barra da Lagoa. (ANDRADE, 2001; GODOY, 2009; ROCHA, 2007).

3.2 Ciclo Hidrológico

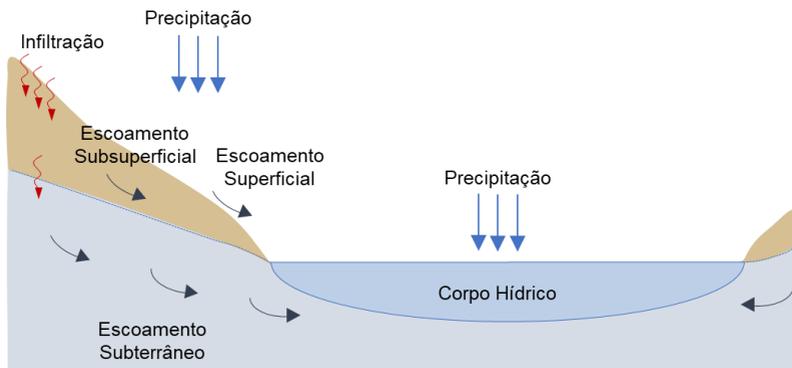
O movimento da água na atmosfera, na superfície da Terra, no subsolo ou nas grandes massas constituídas pelos oceanos, mares e lagos representa o ciclo hidrológico (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988).

Conforme Speidel *et al.* (1988), os componentes do ciclo hidrológico envolvem principalmente a precipitação pluvial, evaporação, drenagem superficial e infiltração de água. Embora o conceito de ciclo hidrológico ser simples, o fenômeno é bastante complexo, por não apresentar somente um grande ciclo, mas sim diversos ciclos menores interligados e com diversas escalas (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988).

A precipitação pluvial, componente fundamental do ciclo hidrológico, atinge a superfície terrestre e toma diferentes caminhos. Parte dela pode infiltrar no solo e atuar na formação do lençol freático e de nascentes, ou fazer parte do escoamento superficial. A partir dos escoamentos, os cursos de águas são formados. Estes são divididos em escoamento superficial, escoamento subsuperficial ou hipodérmico e escoamento subterrâneo, os quais se diferem principalmente pela profundidade e localização onde a água flui (TUCCI, 2012).

Nas bacias hidrográficas de lagunas costeiras o escoamento deve ser analisado de forma regional, onde os cursos de água presentes na bacia representam uma área de captação natural das águas provenientes da precipitação, que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, a laguna. Da mesma maneira, as águas que precipitaram na bacia hidrográfica e infiltraram, compõem os escoamentos subsuperficiais e subterrâneos, que também irão fluir no sentido da laguna. A Figura 1 apresenta o esquema representativo do escoamento em uma bacia hidrográfica.

Figura 1 – Esquema representativo das componentes do ciclo hidrológico em uma laguna costeira.



Fonte: Elaborado pelo autor

3.3 Bacia Hidrográfica e Unidades de Resposta Hidrológica

A bacia hidrográfica pode ser considerada um sistema físico onde a entrada é o volume de água precipitado sobre a superfície da área de contribuição e a saída é o volume de água escoado pelo exutório, considerando-se como perdas intermediárias os volumes evaporados e transpirados (TUCCI, 2012).

O comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica é função de suas características geomorfológicas, tais como forma, relevo, área, geologia, rede de drenagem, solo e do tipo de cobertura (uso e ocupação). Dessa maneira, as características físicas, bióticas e antrópicas de uma bacia possuem importante função nos processos do ciclo hidrológico, influenciando diretamente a infiltração, a quantidade de água produzida como deflúvio, a evapotranspiração e os escoamentos superficiais e subterrâneos (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988)

A contribuição da bacia pode não necessariamente ser definida topograficamente pelo divisor de águas. A geologia local pode fazer com que áreas externas à bacia contribuam para o exutório pelo fluxo subterrâneo (WILSON, 1990). Assim pode-se definir bacia hidrogeológica como o conjunto de áreas cujo escoamento, superficial e subterrâneo, alimenta o deflúvio em determinada seção transversal do curso de água. A bacia hidrogeológica, eventualmente, pode ser idêntica à bacia hidrográfica (GARCEZ; ALVAREZ, 1988).

A subdivisão de uma bacia hidrográfica em sub-bacias permite a melhor caracterização dos problemas difusos, tornando mais fácil a identificação de focos de degradação de recursos naturais, a natureza dos

processos de degradação e o grau de comprometimento da sustentabilidade do meio (FERNANDES; SILVA, 1994).

As definições que envolvem as subdivisões da bacia hidrográfica (sub-bacia e microbacia) apresentam abordagens diferentes tocando fatores que vão do físico, político ao ecológico (TEODORO et al., 2007).

Com o objetivo de simplificar e facilitar os estudos em uma área com diversas sub-bacias, estas podem ser agrupadas ou divididas, por similaridade de características morfológicas e hidrológicas em unidades de resposta hidrológica (URH). URHs são sub-bacias agrupadas que possuem características morfométricas semelhantes (NEITSCH et al., 2002)

Lanna e Indursky (1983) conceituam províncias hidrológicas como sendo regiões hidrologicamente homogêneas, ou seja, aquelas regiões que apresentariam similaridade (ou variabilidade mínima) nos fenômenos integrantes do processo hidrológico. A similaridade hidrológica inclui fatores físicos (tamanho, forma, declividade, padrão de drenagem, seção transversal de canal), fatores climáticos (temperatura, vento, precipitação, insolação), fatores biológicos (vegetação), fatores geológicos (solo, formação geológica, aquíferos) e efeitos antrópicos (uso da terra, estruturas de desvio e controle fluvial).

A delimitação de regiões hidrologicamente homogêneas permite a identificação de áreas com comportamento similar, de forma que possibilitem a transferência de informações de um local para o outro. Assim, a escassez de dados hidrológicos é combatida com a otimização das informações disponíveis através de um conjunto de ferramentas que buscam explorar ao máximo estas informações, visando a estimativa de variáveis hidrológicas em locais sem dados (TUCCI, 2012).

3.4 Hidrogeologia e o Movimento das Águas Subterrâneas

A hidrogeologia é o ramo da hidrologia que estuda a água em seu ciclo subterrâneo, investigando as relações entre o material geológico e o fluxo d'água (HEATH, 1983).

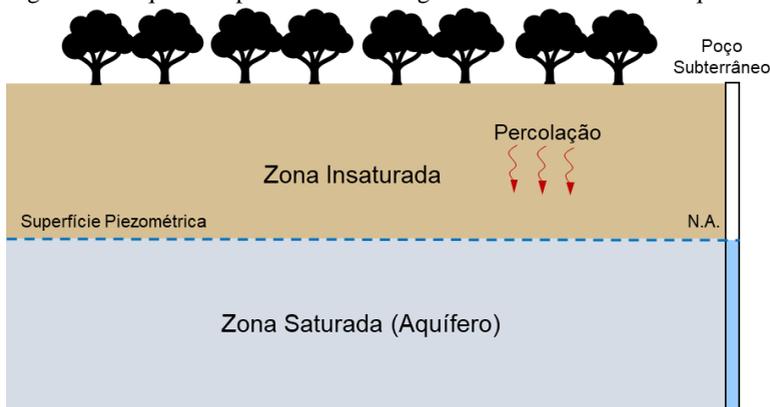
A água subterrânea ocorre em duas diferentes zonas:

- Zona insaturada: ocorre imediatamente abaixo da superfície do solo, onde os poros estão parcialmente preenchidos por gases (vapor d'água e ar) e água;
- Zona saturada: localiza-se abaixo da zona insaturada, onde os poros estão preenchidos totalmente com água. Sua recarga se dá através da infiltração e percolação de água através da zona insaturada.

A superfície piezométrica é o nível da zona saturada em que a pressão hidráulica é igual a pressão atmosférica e pode ser representada pelo nível estático d'água em um poço ocioso em um aquífero não confinado (HEATH, 1983).

A carga hidráulica representa o nível de energia que a água subterrânea se encontra, composta basicamente de três 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. Em aquíferos não confinados, onde a pressão hidráulica da superfície é igual a pressão atmosférica, a carga hidráulica se equivale ao nível da superfície piezométrica. A medição da carga hidráulica em aquíferos livres se dá pela medição do nível da superfície piezométrica em poços ou piezômetros (HEATH, 1983).

Figura 2 – Esquema representativo das águas subterrâneas em um aquífero livre



Fonte: Elaborado pelo autor

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. 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).

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 01 (FETTER, 2000) :

$$q = -K \frac{dh}{dl} \quad (1)$$

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.

3.5 Interação entre Águas Superficiais e Águas subterrâneas (Asub-Asup)

As interações e trocas entre os compartimentos Asub-Asup são regidas intrinsecamente pelos fatores geomorfológicos, características hidrogeológicas do aquífero, clima e, no caso de zonas costeiras, a hidrodinâmica local (SOPHOCLEOUS, 2002). Estas podem ocorrer em todos os tipos de corpos hídricos, como rios, lagos, lagoas costeiras e áreas alagadas (WINTER et al., 1998). Estudos nessa área vêm apresentando grande relação com ciclos biogeoquímicos e aporte de nutrientes, principalmente em áreas urbanizadas (ATTISANO et al., 2008; BURNETT et al., 2006; DEBNATH; MUKHERJEE, 2016; JI et al., 2013; LEOTE; IBÁNHEZ; ROCHA, 2008; ROCHA, 2014; SANTOS et al., 2008)

Moore *et al* (2008) defende que o volume total de descargas de águas subterrâneas (DAS) para o Oceano Atlântico é similar ao volume

de águas das drenagens fluviais para o oceano. Ainda, Moore (2010) estima que devido as DAS apresentarem maiores concentrações de nutrientes, carbono e metais, as DAS são provavelmente mais importantes que as descargas fluviais para os ciclos biogeoquímicos dos oceanos.

De maneira geral, houve um rápido crescimento no número de artigos envolvendo as descargas de águas subterrâneas nos últimos 20 anos. Esses artigos incluem diversas identificações e quantificações de DAS em variados locais e ambientes, assim como diferentes técnicas e metodologias de quantificação (BURNETT et al., 2006; BURNETT; TANIGUCHI; OBERDORFER, 2001, 2001; LEWANDOWSKI et al., 2015; MARTIN et al., 2007; MOORE, 2010; RAPAGLIA et al., 2015; ROCHA et al., 2016; SANTOS et al., 2008).

Winter et al. (1998) apresenta de forma bastante ampla os mecanismos de interação A-sub-Asup, englobando diversos tipos de corpos d'água. De maneira geral, o movimento das águas subterrâneas ocorrem do ponto de maior para menor carga hidráulica. Em outras palavras, para o aquífero descarregar em um corpo superficial, o nível da superfície piezométrica do aquífero na vizinhança do corpo hídrico deve ser maior do que o nível d'água do compartimento superficial. Em contrapartida, se o nível d'água no corpo hídrico é maior do que o nível piezométrico, ocorre a infiltração, ou seja, o fluxo ocorre do corpo de água superficial para o subterrâneo.

A distribuição da condutividade hidráulica (K) nos aquíferos também contribui para o padrão de fluxo da água subterrânea que, além disso, é afetado pelo clima, já que a chuva é a principal fonte de recarga da maioria dos aquíferos (CUNHA, 2017).

No compartimento subterrâneo, é possível identificar três sistemas de fluxo d'água subterrânea em uma bacia hidrográfica: o fluxo local, intermediário e regional, que se diferenciam entre si pela distância percorrida entre a zona de recarga e descarga. No fluxo local, a água se move próximo à zona de descarga, enquanto que no fluxo regional, a água flui em grandes distâncias, onde a descarga geralmente está associada a grandes rios, lagos e oceano (TÓTH, 1963 apud SOPHOCLEOUS, 2002).

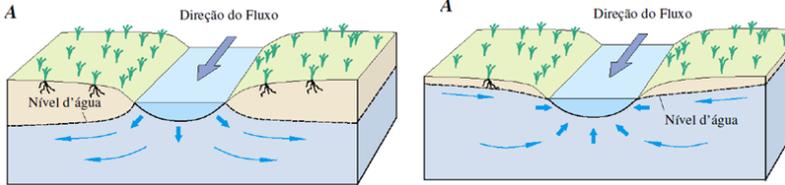
Em áreas com altas declividades, a tendência é de um domínio do sistema de fluxo local, enquanto que áreas planas tendem a ter domínio dos sistemas intermediários e regionais (SOPHOCLEOUS, 2002).

A Figura 3 ilustra o comportamento das linhas de fluxo subterrâneo no encontro de corpo de água superficial. Em A, pode ser observado a infiltração e em B o aporte de águas subterrâneas para o meio superficial.

Figura 3 – Interação Asub-Asup.

CORPO D'ÁGUA SUPERFICIAL PERDENDO
ÁGUA PARA O AQUIFERO (1)

CORPO D'ÁGUA SUPERFICIAL RECEBENDO
ÁGUA DO AQUIFERO (2)



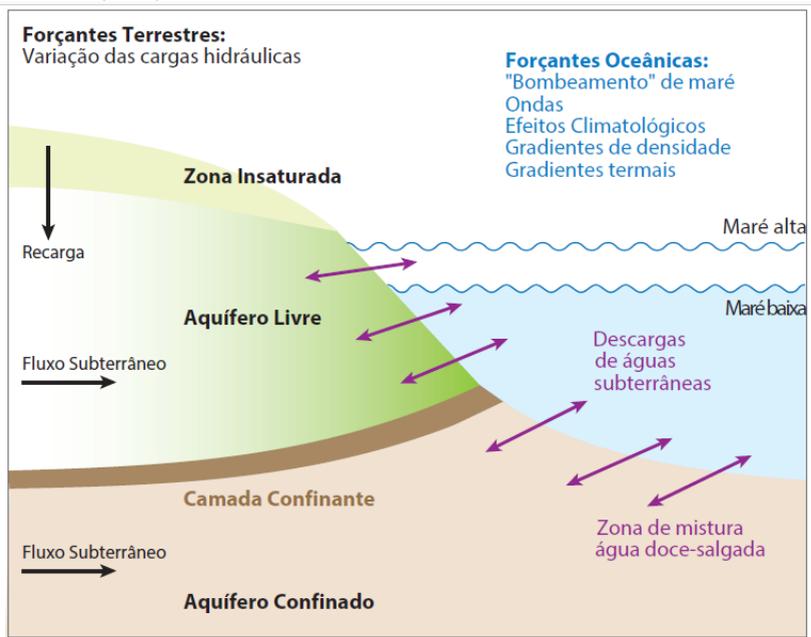
Fonte: Adaptado de Winter (1998)

Em zonas costeiras, a Descarga de Águas Subterrâneas em sistemas marinhos (DAS, do inglês *Submarine Groudwater Discharge – SGD*) é definido como todo e qualquer fluxo de água em margens continentais do sedimento para o oceano, independente da composição do fluido ou forças atuantes (BURNETT et al., 2003). Ainda, Burnett *et al.* (2003) explica que as descargas de águas subterrâneas foram por muitos anos negligenciada cientificamente. Lewandowski *et al.* (2014) enumera diversas razões para isso, entre elas:

- As descargas de águas subterrâneas não são visíveis;
- As DAS são difusas e ocorrem em uma grande área, fazendo com que as descargas locais sejam muito pequenas;
- Apesar de existirem diferentes métodos para mensurar as DAS, ainda não existe um método simples, prático e eficaz;
- As descargas são espacialmente e temporalmente heterogêneas, fazendo-se necessário um grande número de medições.

A Figura 4 apresenta o modelo conceitual das descargas de águas subterrâneas em áreas costeiras, bem como suas forças terrestres e oceânicas.

Figura 4 – Modelo conceitual das descargas de águas subterrâneas em ambientes costeiros (DAS).



Fonte: Adaptado de Moore (2010)

Apesar da dificuldade de investigação das interações Asub-Asup em ambientes costeiros, no Brasil o processo já vem sendo reconhecido e estudado, podendo-se referir a Niencheski et al. (2007), Santos et al. (2008), Attisano et al. (2008), Andrade et al. (2012) e Rocha (2014) que vêm estudando DAS em lagoas e praias do estado do Rio Grande do Sul. O estudo pioneiro no Brasil, foi realizado por Oliveira et al. (2003) onde foi estimado expressivas DAS em Ubatuba/SP, utilizando traçadores de radioisótopos.

Alguns valores de DAS obtidos em estudos anteriores são apresentados na Tabela 1:

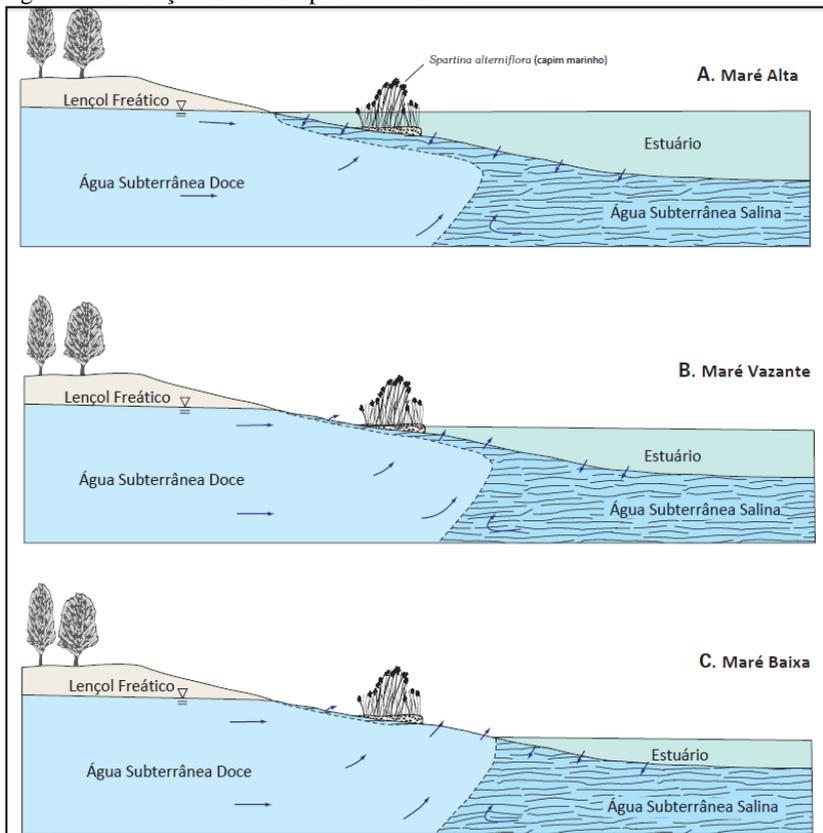
Tabela 1 – Magnitude das DAS em outros estudos

DAS (cm/dia)	Método	Local	Referência
0,01	Seepage meters	Grandes Lagos, EUA	Cherkauer; McBride, 1988
0,01	Seepage meters	Pântano de Spartina alteriflora, Carolina do Norte, EUA	Yelverton; Hackney, 1986
0,01-0,7	Seepage meters	Lagoas costeiras do Rio Grande do Sul, Brasil	Rocha, 2014
0,04	Seepage meters	Mangue Everglades, Florida, EUA	Harvey e outros, 2004
0,08	Seepage meters	Costa do Golfo do México	Cable e outros, 1997a
0,1	Traçador radioativo	Laguna Laoye, China	Ji et al., 2012
0,4-1,1	Traçador radioativo	Laguna Sul de Veneza, Itália	Gattacceca et al., 2011
0,8-5	Traçador radioativo	Laguna de Lesina, Itália	Rapaglia et al., 2012
3-8	Traçador radioativo	Lagoa de Veneza, Itália	Rapaglia et al., 2010
5	Traçador radioativo	Laguna Norte de Veneza, Itália	Garcia-Solsona et al., 2008
6,2-90,1	Seepage meters	Rio da Onça, SP-Brasil	Arantes, 2006
10-30	Traçador radioativo	Lagoas costeiras de sal, sul da Ilha de Rodes, EUA	Scott e Moran, 2001
25-125	Seepage meters	Ria Formosa, Portugal	Leote et al, 2008
100	Seepage meters	Mirror Lake, EUA	Asbury, 1990
130	Seepage meters	Mountain Lake, EUA	Belanger e Walker, 1990
240	Seepage meters	Lake Belle Taine, EUA	Rosenberry, 2000
275	Seepage meters	West Neck Bay, EUA	Paulsen e outros, 2001
350	Traçador radioativo	Lagoa dos Patos–Mirim, Brasil	Niencheski et al., 2007

Fonte: Adaptado (JI et al., 2013; ROSENBERRY; LABAUGH; HUNT, 2008)

No caso dos estuários, o padrão temporal da descarga de água subterrânea está intimamente relacionado com o ciclo das marés dentro do estuário (Figura 5). Durante a maré alta, quando o nível da maré é superior aos níveis das águas subterrâneas, a água salgada infiltra-se na encosta da praia e no aquífero subjacente (Figura 5A). Durante a maré vazante, o nível de água e os gradientes na encosta da praia são invertidos, o nível da água subterrânea excede o nível da maré, e ocorre a descarga da água doce do solo e da água salgada (infiltrada) na praia e diretamente no estuário (Figura 5B). Na maré mais baixa, a água doce subterrânea descarrega diretamente na praia exposta (Figura 5C).

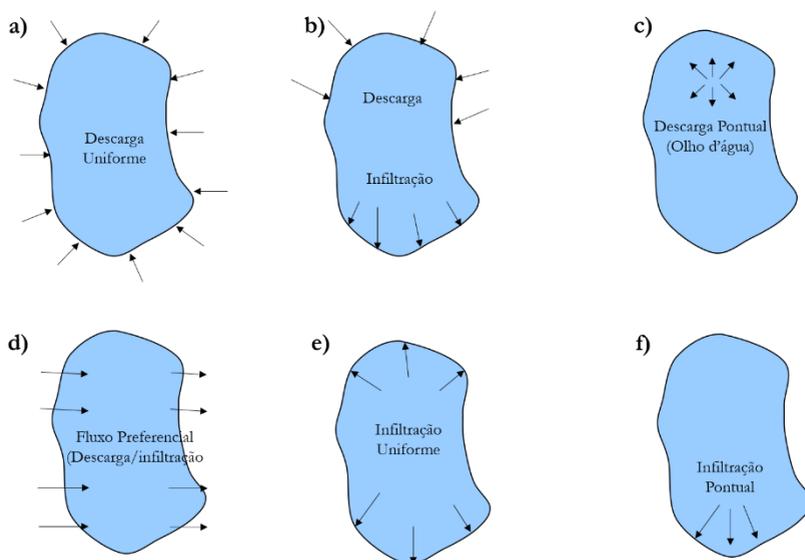
Figura 5 - Interação Asub-Asup em estuários.



Fonte: adaptado de Portnoy *et al* (1998); Urish e Ganbar (1997) *apud* Barlow (2003)

Alguns estudos classificam os corpos d'água no que diz respeito às características e contribuições relativas das entradas de água subterrânea e superficial. A Figura 6 apresenta as relações que podem existir entre lagoas e os regimes de águas subterrâneas. Em alguns casos, a classificação pode variar de acordo com a época do ano, ocorrendo variações devido aos diferentes regimes hidrológicos. Os termos nesta figura são usados para descrever o movimento das águas para o corpo superficial, sendo descarga o fluxo sentido subterrâneo-superficial e infiltração o movimento superficial-subterrâneo.

Figura 6 – Classificação de ambientes lacustres em seis classes principais baseadas em tipos e influências relativas ao movimento das águas superficiais e subterrâneas.



Fonte: Adaptado de Boyle (1994)

3.6 Métodos de Identificação e Quantificação da Interação Asub-Asup

Existem diversos métodos para a identificação e quantificação das interações Asub-Asup. As abordagens mais comuns de identificação e estimativa são:

- Medidas diretas e pontuais, com o uso de equipamentos como *Seepage meter* e mini piezômetros;
- Métodos de traçadores químicos, como temperatura, salinidade, pH, corantes e elementos radioativos, sendo o mais utilizado o radônio (^{222}Rn) (BURNETT; KIM, 2001)

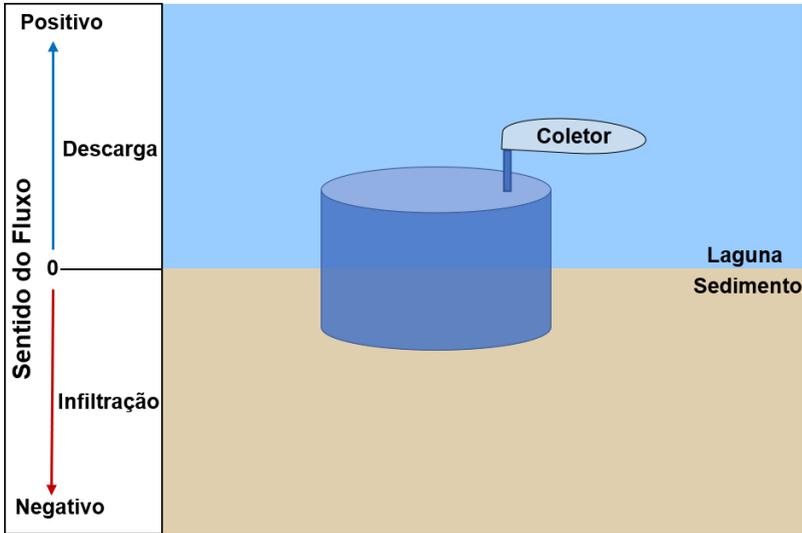
Outros métodos consistem em modelagem numérica, imagens aéreas infravermelhas, perfis termais e rede de poços de monitoramento.

Para a abordagem por modelamento numérico, os estudos esbarram em uma questão fundamental: a escassez de dados básicos, tais como dados de caracterização geológica e hidrogeológica, e séries históricas de monitoramento ambiental (pluviometria, vazões de cursos d'água, níveis d'água subterrânea e superficial, qualidade das águas, entre outros) (CUNHA, 2017).

3.6.1 *Seepage meter*

O método de amostragem conhecido como *seepage meter* foi primeiramente descrito por Lee (1977). Este método consiste em cobrir e isolar uma pequena área da interface sedimento-água enterrando a meia seção de um tambor, com um coletor flexível acoplado, onde a água que flui entre a interface sedimento-água é quantificada em um intervalo de tempo predeterminado. A Figura 7 demonstra o esquema de funcionamento da metodologia.

Figura 7 – Esquema de funcionamento do *seepage meter* e convenção dos sentidos do fluxo



Fonte: Elaborado pelo autor

Lee (1977) desenvolveu a metodologia utilizando-a em diversos lagos nos Estados Unidos, onde também identificou que a água coletada nos coletores era quimicamente similar às águas dos poços de água subterrâneas da região.

Desde então, diversos estudos utilizaram a metodologia, que se destaca por sua simplicidade, resposta rápida e baixos custos envolvidos, sendo um equipamento importante para a investigação e fase confirmatória da quantificação das interações Asub-Asup em pontos específicos (ARANTES, 2003; BRODIE et al., 2009; BURNETT et al., 2006; CABLE; MARTIN; JAEGER, 2006; DEBNATH; MUKHERJEE, 2016; KOOPMANS; BERG, 2011; LEOTE; IBÁNHEZ; ROCHA, 2008; MARTIN et al., 2007; MWASHOTE et al., 2010; ROCHA; ANDRADE; NIENCHESKI, 2015; SHAW; PREPAS, 1989; SHINN; REICH; HICKEY, 2002; SOLDER et al., 2016; VAINU et al., 2014).

Além disso, uma das vantagens do método é quantificação de fluxos da interação Asub-Asup sem a necessidade de realizar medidas de condutividade hidráulica do sedimento. Porém, em praticamente todos os estudos onde a metodologia fora utilizada há o seguinte consenso:

- Muitos medidores e medidas são necessárias a fim de avaliar os padrões de DAS, visto a variabilidade espaço-temporal dos fluxos (SHAW; PREPAS, 1989);
- As maiores fontes de erros de medição estão relacionadas aos coletores plásticos (MURDOCH; KELLY, 2003; ROSENBERRY; MENHEER, 2006a; SHAW; PREPAS, 1989);
- O coletor plástico deve inicialmente conter um volume conhecido de água, minimizando fluxos anômalos e para que fluxos negativos possam ser quantificados (SHAW; PREPAS, 1989);
- Fluxos anômalos podem ocorrer devido a processos de advecção intersticial (efeito Bernoulli) causados pelo movimento da água como ondas e correntes (CABLE; MARTIN; JAEGER, 2006).

Segundo Murdoch e Kelly (2003), que avaliaram a funcionalidade dos *seepage meters* através de ensaios em laboratório, a aplicação do equipamento é longe de ser simples, embora a aparência descomplicada. Os experimentos em laboratório, identificaram que fluxos anômalos estão na maioria das vezes relacionados ao coletor flexível. Alguns estudos defendem que deve ser aplicado um fator de correção para os fluxos medidos devido à resistência dos coletores (MURDOCH; KELLY, 2003; ROSENBERRY; MENHEER, 2006a).

Rosenberry e Menheer (2006) desenvolveram um estudo em laboratório com o objetivo de calibração dos *seepage meters* utilizando um tanque de água com substrato de areia. Um reservatório suspenso com controlador de vazão que alimenta o tanque por uma placa difusora pelo sedimento. Ficou constado no estudo a boa eficiência dos *seepage meters* em quantificar os fluxos subterrâneos em um ambiente controlado. No experimento, foram testados 4 tipos de coletores, onde os fatores de correção variaram de 0,93 a 1,89, que evidenciou a necessidade de os coletores serem de material maleável e flexível, diminuindo os erros de medição.

Uma das grandes desvantagens da utilização dos *seepage meters* em zonas costeiras é a necessidade de intensa de mão-de-obra, visto a necessidade de realizar diversas medidas onde o pesquisador deve estar constantemente em campo para instalar e desacoplar os coletores. Para contornar isso, alguns trabalhos visam o desenvolvimento de *seepage meters* automáticos, onde destaca-se o trabalho de Taniguchi e Fukuo (1993) que desenvolveram um *seepage meter* automatizado a partir da medição de fluxos por impulsos de calor.

Com o objetivo de minimizar e identificar possíveis fontes de erros, estudos recomendam a utilização dos *seepage meters* em conjunto

com outros métodos de identificação e quantificação de DAS. A combinação de *seepage meters* com mini piezômetros além de confirmar o sentido do fluxo Asub-Asup, possibilita a obtenção da condutividade hidráulica do sedimento.

3.6.2 Mini piezômetros e piezomanômetros

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.

Consistem em um tubo ou mangueira de pequeno diâmetro com seção filtrante no sedimento em uma profundidade preestabelecida.

O equipamento não proporciona uma quantificação direta dos fluxos Asub-Asup, porém quando utilizados em combinação com *seepage meters*, é capaz de estimar a condutividade hidráulica no sedimento, sendo uma importante ferramenta de investigação e reconhecimento das interações Asub-Asup (KELLY; MURDOCH, 2003; LABAUGH; ROSENBERRY, 2008).

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).

Para facilitar e possibilitar medidas mais precisas, Winter et al. (1988) desenvolveu 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).

Ainda, estudos vêm sendo desenvolvidos para o cálculo da condutividade hidráulica sem a necessidade de combinação com *seepage meters*. Cardenas e Zlotnik (2003) propõem 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.

3.6.3 Fórmulas empíricas de condutividade hidráulica a partir da granulometria

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).

A fórmula de Hazen (1892), uma das mais conhecidas para estimativa de condutividade hidráulica em areias saturadas, leva em conta somente o diâmetro efetivo do material (D_{10}) e o fator empírico de Hazen (C_h). A equação de Hazen foi desenvolvida utilizando filtros de areia para purificação de água, onde eram utilizadas areias limpas com coeficiente de uniformidade menor que 2 (TERZAGHI; PECK, 1967). A fórmula 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 3mm (ODONG, 2007).

A equação de Kozeny-Carman foi concebida primeiramente por Kozeny (1927) e modificada posteriormente por Carman (1937). A equação foi desenvolvida seguindo fórmulas semi-empíricas e semi-teóricas para prever a permeabilidade em meios porosos. A equação de Kozeny-Carman é uma das equações mais usadas e aceitas para a estimativa de condutividade hidráulica a partir da granulometria do meio (CARRIER, 2003; ODONG, 2007). A fórmula é apropriada para solos com diâmetro efetivo menor que 3mm e não argilosos (ODONG, 2007).

Odong (2007) realizou um estudo para avaliar a confiabilidade das fórmulas empíricas em estimar a condutividade hidráulica em diferentes tipos de solo, onde a fórmula de Kozeny-Carman apresentou as melhores estimativas na maioria das amostras analisadas. As fórmulas utilizadas foram Hazen (1892), Kozeny-Carman (1927, 1937), Breyer (1964), Slitcher (1905), Terzagui (1925), USBR e Alyamani & Sen (1993).

4. ÁREA DE ESTUDO

Com o objetivo de contextualizar a área de estudo, neste item serão levantadas e descritas as características relevantes para o presente trabalho.

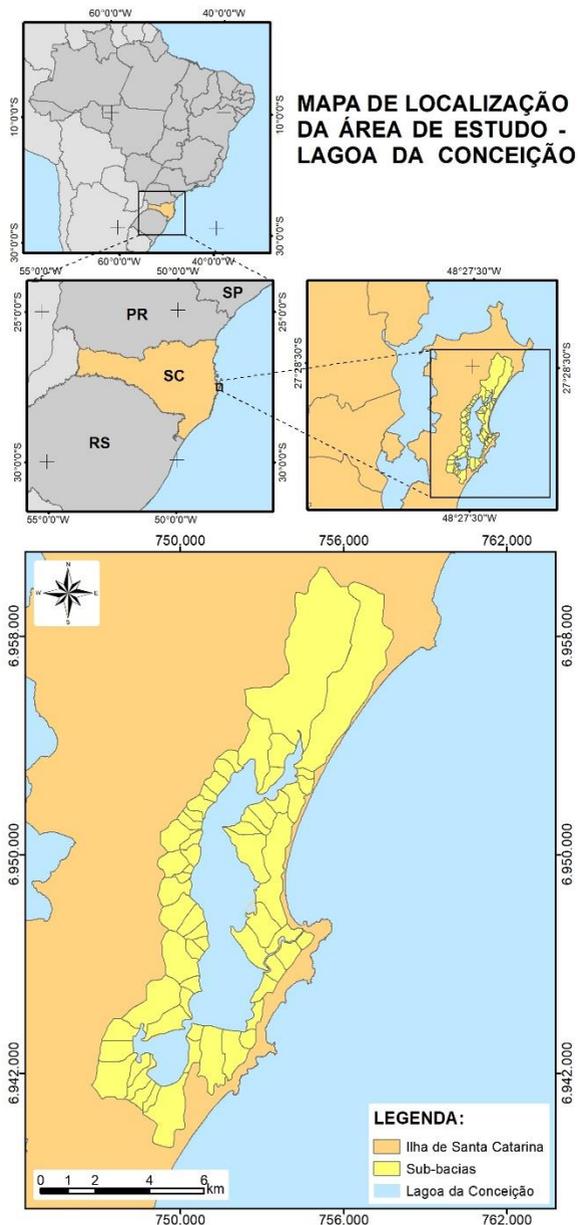
4.1 Localização

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 na Figura 8. A área total da bacia hidrográfica é de 82,1 km², onde desta, a laguna ocupa uma área de 20,3 km², estendendo-se por 13 km sentido norte-sul, orientado paralelamente à costa. Sua forma alongada é irregular e recortada por dunas e morros que formam três subsistemas popularmente conhecidos como Lagoa Central, do Norte e do Sul ou simplesmente Lagoa do Meio, de Cima, e de Baixo (MUEHE; CARUSO JR., 1989).

A laguna é delimitada à oeste e sul por encostas altas e íngremes do complexo cristalino vegetado e a leste por depósitos de areias marinhas, formando uma planície costeira sedimentar. Na porção sudeste, a laguna é separada do oceano por um grande campo de dunas.

A Lagoa de Cima (subsistema norte e central) e a Lagoa de Baixo (subsistema sul) se interligam através de uma estreita passagem onde localiza-se a Ponte da Lagoa, que liga o Centrinho da Lagoa à Avenida das Rendeiras.

Figura 8 – Localização da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição e sub-bacias



Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com a classificação descrita no item 3.1, a Lagoa da Conceição pode ser classificada como uma laguna sufocada, com uma única conexão com o Oceano Atlântico, o Canal da Barra da Lagoa. O canal possui um total de 2,8 km de extensão e promove a troca de água entre a laguna e o oceano, tornando a água do interior da laguna salobra. 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, como verificaram Bier (2018), Oliveira (2016), Odreski (2012) e Pereira (2004).

Andrade (2001), através de modelagem hidrodinâmica, verificou que 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), Rocha (2007) e Godoy (2009) verificaram que 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. 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.

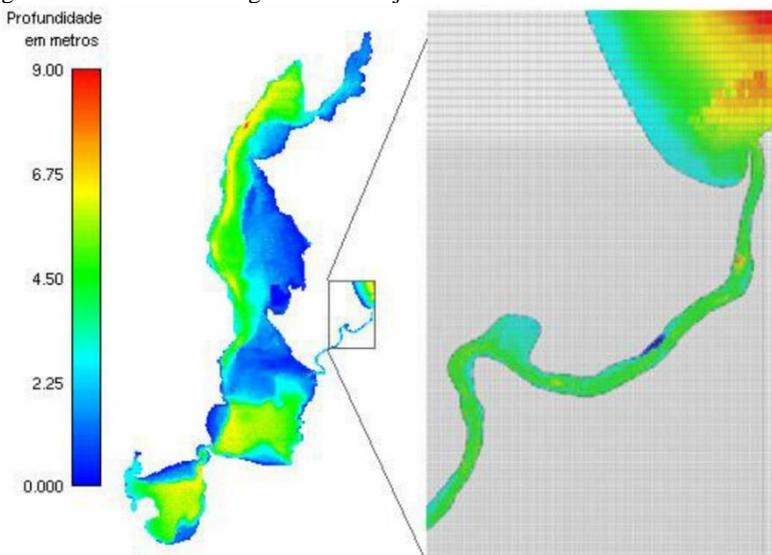
Já Oliveira (2016), a partir de simulações com o modelo TELEMAC-3D, verificou diferenças significativas de nível entre os subsistemas da laguna, constatando, assim como já observado por Andrade (2001), que o vento possui uma forte função na circulação da laguna, onde além de causar variação de nível 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.

O primeiro levantamento batimétrico da Lagoa da Conceição foi realizado na década de 1980 por Muehe e Caruso Jr. (1989), onde foram percorridos 32 perfis longitudinais do eixo norte-sul da laguna, com o uso de ecobatímetro, bússola e teodolitos.

Outro levantamento batimétrico da Lagoa da Conceição foi realizado em 2001 pela empresa Aerolevantamentos e Consultoria S/A,

a serviço do Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis (IPUF). Foi realizada a medição de 527 perfis transversais ao sentido norte-sul do corpo lagunar. Em 2006, Godoy (2009) realizou uma nova campanha de batimetria na laguna, com o objetivo de corrigir falhas e melhorar a resolução em certas áreas da carta batimétrica. A batimetria é apresentada na Figura 9

Figura 9 - Batimetria da laguna e área adjacente ao canal



Fonte: Godoy (2009)

4.2 Geologia e Hidrogeologia

Sob o ponto de vista da morfologia, a Ilha de Santa Catarina, pode ser dividida em maciços rochosos, ocorrendo sob a forma de morros altos escarpados, que contrastam com planícies sedimentares de origem marinha e costeira (GUEDES JUNIOR, 1999).

Os maciços rochosos são cortados localmente por diques de diabásio, sobrepostos por coberturas sedimentares recentes (CARUSO JR, 1993). A partir do Mapa Geológico da Ilha de Santa Catarina (TOMAZZOLI; PELLERIN, 2014), observa-se o grande domínio do Granito Ilha, que delimita a bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição à oeste e sul, com algumas porções também na parte Oeste, como no Morro da Galheta.

Na porção leste, têm-se o domínio de depósitos lagunares praiais, depósitos flúvio lagunares-lacustres e depósitos marinhos praiais. À sudeste ocorre uma extensa faixa de depósitos eólicos (dunas longitudinais fixas e dunas transversais ativas).

Guedes Júnior (1999) elaborou 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, o autor denomina a unidade como Aquífero Ilha. As rochas que compõem este aquífero mostram-se intensamente fraturadas ao longo de toda a Ilha, o que facilita a ocorrência de boas vazões, tratando-se de rochas ígneas. O aquífero é classificado como fraturado, livre, anisotrópico e heterogêneo.

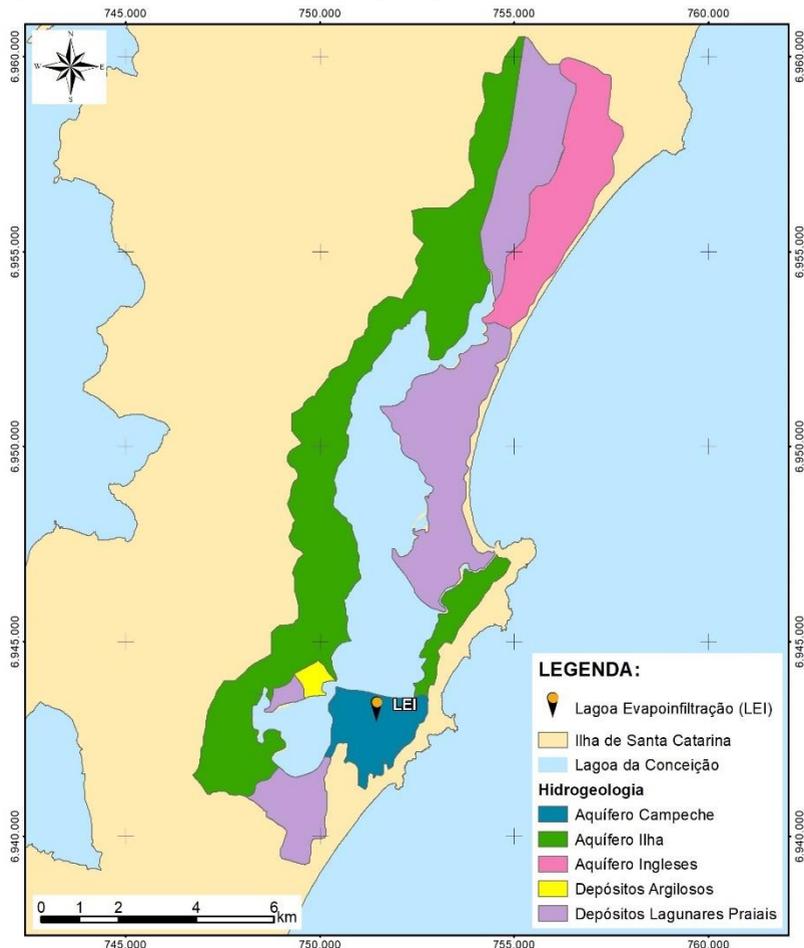
Nos topos dos morros, a camada de solo é pequena, assim como as declividades, permitindo uma maior infiltração das águas de precipitação (áreas de recarga). Já nas encostas, a maior declividade e uma maior espessura de solo, permite um maior escoamento superficial das águas que precipitam.

O Aquífero Campeche localiza-se na porção sudeste da bacia hidrográfica e 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 superficial das águas subterrâneas de 50 cm/dia (ZANATTA; RAMAGE, 2011).

O aquífero 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 m² 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).

Figura 10 – Mapa das unidades hidrogeológicas da área de estudo.



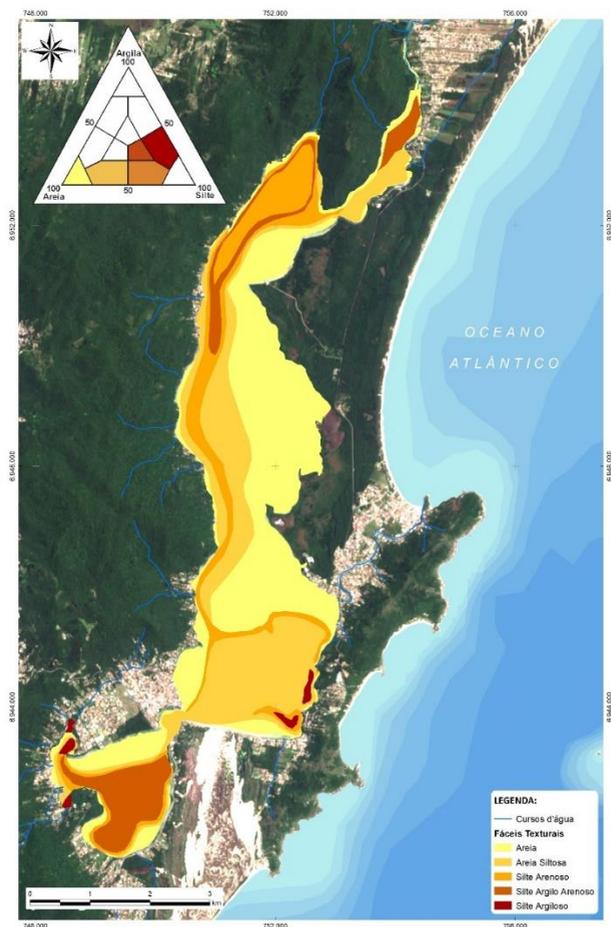
Fonte: Adaptado de Guedes Junior (1999)

4.3 Distribuição espacial dos sedimentos da laguna

A laguna apresenta domínio de sedimentos arenosos e lamosos, os quais foram originados por processos intempéricos e erosivos das rochas do Embasamento Cristalino e do retrabalhamentos dos depósitos da Planície Costeira (GRÉ; HORN FILHO, 1999). Os setores mais rasos são

constituídos de sedimentos arenosos e os mais profundos de sedimentos finos. A distribuição espacial dos sedimentos é influenciada pelas condições hidrodinâmicas da lagoa, pelas características do solo da bacia hidrográfica adjacente e principalmente, pela profundidade e morfologia do corpo laguna (PORTO FILHO, 1993). Segundo Caruso Jr (1993), os sedimentos depositados na margem oeste da laguna têm por característica a imaturidade mineralógica e textural. Isto ocorre devido à borda oeste recebe sedimentos provenientes dos morros, sendo a ação gravitacional e os pequenos córregos, os principais agentes transportadores destes sedimentos. A distribuição espacial das fácies texturais dos sedimentos é apresentada na Figura 11

Figura 11 – Distribuição espacial das fácies texturais do sedimento na laguna.



Fonte: Adaptado de Porto Filho (1993)

4.4 Hidrografia e Unidades de Resposta Hidrológica (URHs)

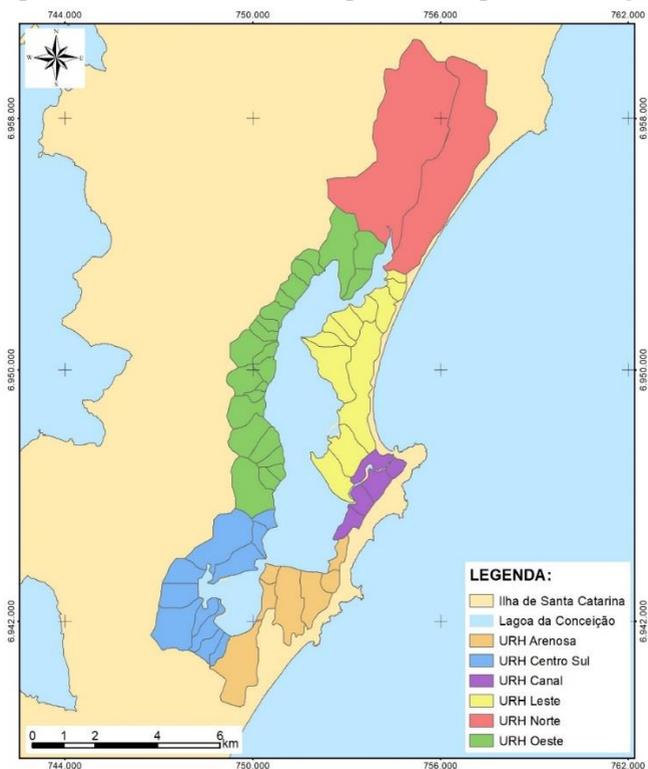
Segundo Sierra de Ledo e Soriano-Sierra (1994), os aportes hidrológicos na laguna provêm de diversos córregos que nascem no Embasamento Cristalino na margem oeste e sul, do Rio João Gualberto (principal curso d'água), que deságua no extremo norte da laguna e da precipitação pluvial direta. Odebrecht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

Por meio da análise de agrupamento dos diversos comportamentos hidrológicos, resultados de geoprocessamento a partir do modelo digital de elevação da Secretaria de Desenvolvimento Sustentável de Santa Catarina, Bier (2013) setorizou a bacia da Lagoa da Conceição em zonas de mesmas características morfométricas e hidrológicas a fim de distinguir de forma concreta os diversos comportamentos hidrológicos da bacia hidrográfica e facilitar a interpretação do espaço físico da Lagoa da Conceição. A bacia hidrográfica foi dividida em seis Unidades de Resposta Hidrológica (URHs) distintas, 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 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 infiltração, devido ao tipo de solo presente (areias quartzóicas e marinhas) e baixa ocupação urbana. A 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 de escoamento superficial;
- **Canal:** setor com elevada urbanização, implicando em uma elevada impermeabilização, mesmo que o solo local seja composto por areias marinhas. Todo o 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 quartzóicas. Entretanto, 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. Mesmo possuindo uma vegetação densa, o que proporciona grandes

interceptações da chuva, a declividade e tipo de solo proporcionam baixas infiltrações e consequente um elevado escoamento superficial, apresentando diversos córregos e cachoeiras de pequeno porte. Sendo assim, 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. As URHs são apresentadas na Figura 12:

Figura 12 - Divisão da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição em URHs



Fonte: Adaptado de Bier (2013)

5. MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização dos objetivos deste trabalho, o primeiro passo foi o levantamento dos métodos que buscam avaliar e quantificar as interações entre Asub-Asup. Dentre todas as metodologias, foram definidos os métodos que melhor condizem com o estágio inicial e exploratório da pesquisa. Sendo assim, iniciou-se o desenvolvimento das

metodologias e equipamentos de quantificação de interação Asub-Asup. As metodologias adotadas foram:

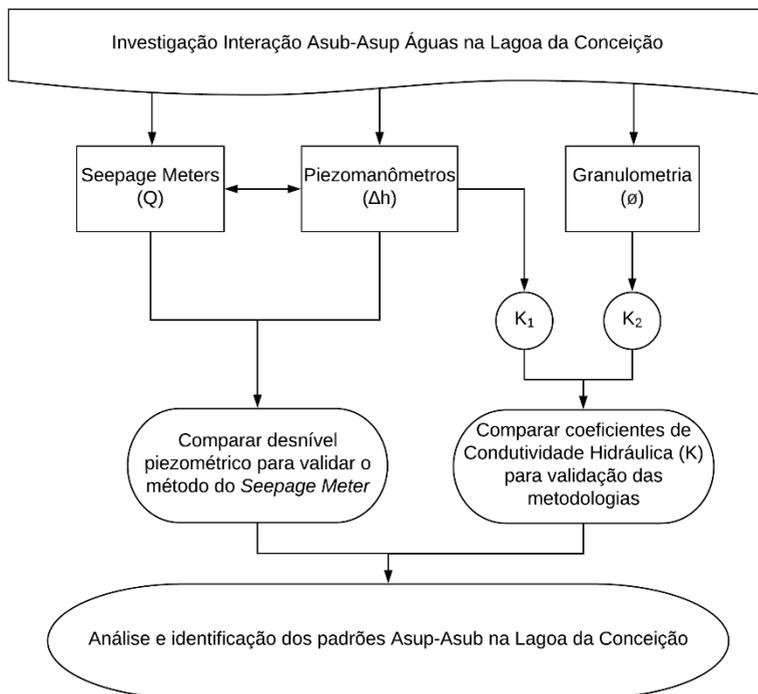
- *Seepage meters*: foi realizado o desenvolvimento do equipamento, que permite a quantificação de descargas/recargas de água subterrânea em corpos hídricos;
- Mini piezômetros e piezomanômetros: desenvolveu-se o equipamento que identificou descargas/recargas de água subterrânea em corpos hídricos. Em conjunto com *seepage meters*, foi capaz de estimar a condutividade hidráulica do sedimento;
- Granulometria: Com o uso de fórmulas empíricas, a partir do ensaio granulométrico, foi possível estimar a condutividade hidráulica do sedimento;

As metodologias foram utilizadas de modo a serem complementares entre si. Dessa forma, foi possível uma comparação e confirmação dos resultados entre as metodologias.

Resumidamente, a primeira metodologia utilizada foram os *seepage meters* para quantificação dos fluxos subterrâneos. Em seguida, foi utilizado os mini piezômetros e piezomanômetros para confirmação do sentido do fluxo na interface sedimento-água. Com o uso concomitante dos *seepage meters* e piezomanômetros foi possível o cálculo da condutividade hidráulica local. A condutividade hidráulica também foi estimada com a utilização de fórmulas empíricas a partir da granulometria. Esses dados foram comparados e validaram as metodologias utilizadas.

A Figura 13 apresenta o fluxograma da metodologia adotada.

Figura 13 - Fluxograma da metodologia



5.1 Malha Amostral

Com o objetivo de identificar os diferentes padrões de interação Asub-Asup na Lagoa da Conceição, foram estabelecidas 5 estações de monitoramento (Figura 14). As estações foram definidas em função das diferentes características geomorfológicas da laguna e das sub-bacias adjacentes, sendo elas:

- **Costa Cachoeira (CC):** Estação localizada na porção oeste da laguna, próximo do distrito da Costa da Lagoa. A sub-bacia hidrográfica adjacente se destaca pela alta declividade, formação geológica do complexo cristalino e densa vegetação.
- **Costa Rio Vermelho (CRV):** Localizada no estreito cordão lagunar-praial, na margem leste da laguna. O cordão possui baixa declividade e elevação de poucos metros. É a estação mais próxima do oceano, sendo assim um local susceptível à interação de águas entre a laguna e o oceano.

- **Ponta das Almas (PA):** Localizada na margem oeste da laguna, apresenta características semelhantes à estação CC, porém com maior urbanização e menor declividade da bacia adjacente.
- **Rendeiras (RR):** Estação localizada nas proximidades da Av. das Rendeiras. Esta estação está localizada próxima a um campo de dunas onde ocorre a infiltração artificial decorrente de uma lagoa de evapoinfiltração de uma estação de tratamento de esgotos. Esta estação recebe o efluente de cerca de 15.000 habitantes.
- **Lagoa Iate Clube (LIC):** Localizada nas imediações do Lagoa Iate Clube. É um local de elevada urbanização, com a presença de poços de captação de águas subterrâneas para abastecimento público e presença de ponteiras para abastecimento domiciliar.

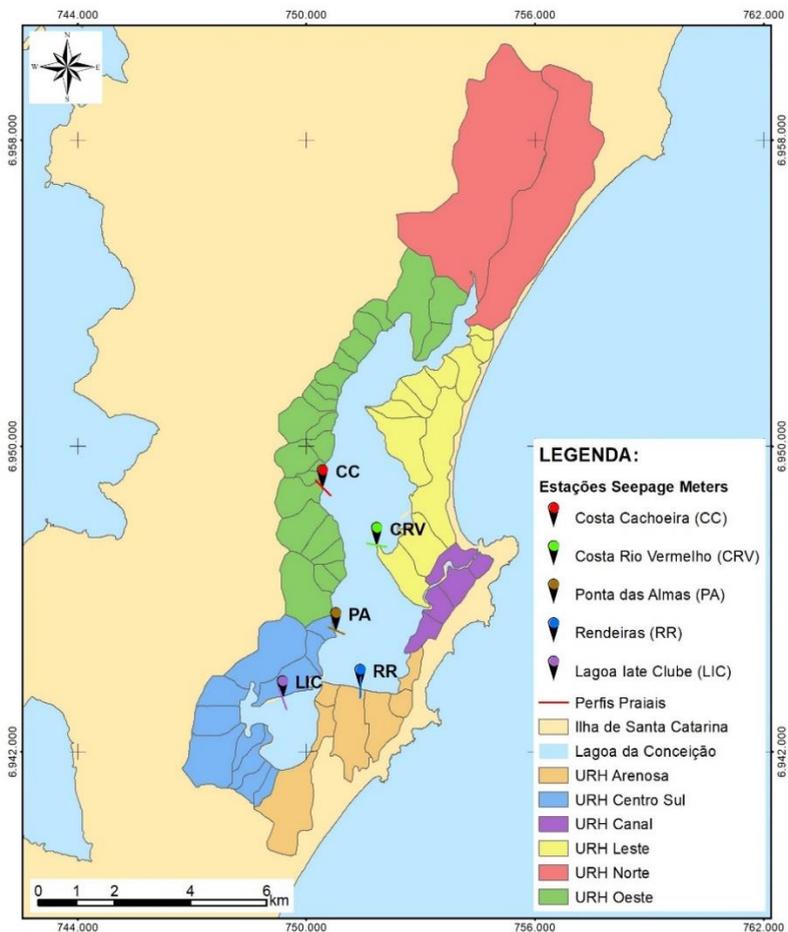
Tabela 2 – Coordenadas das estações amostrais

Estação amostral	Longitude UTM	Latitude UTM
CC	750398	6948726
CRV	751925	6947527
PA	750734	6945174
RR	751456	6943661
LIC	749245	6943217

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a instalação dos equipamentos, buscou-se locais onde não há a presença de pedras, pedregulhos, assim como vegetação de fundo. Foi também priorizado locais de fácil acesso e sem a presença frequente de transeuntes.

Figura 14 - Localização Estações Amostrais



Fonte: Elaborado pelo autor

5.2 Seepage meter

Para o levantamento de dados da interação A-sub-A-sup, foram confeccionados equipamentos de medição de fluxos na interface sedimento-água denominados *seepage meters*, conforme metodologia descrita em Lee (1977). O método foi adotado pela simplicidade, baixo custo, e por ser a metodologia mais utilizada na fase inicial de investigação e análise exploratória de dados (BRODIE et al., 2009).

Após pesquisa bibliográfica, foram realizados testes pilotos a fim de desenvolver o melhor design da metodologia para o uso na área de

estudo. Os tambores devem ser robustos e estáveis a fim de não causarem interferência nas medições, e ainda, ter diâmetro relativamente grande, visto que testes em laboratório indicaram que a variabilidade nas medições diminuem conforme aumento do diâmetro do tambor (ROSENBERY; MENHEER, 2006b). Para facilitar a inserção no sedimento, as paredes do tambor devem ter pequena espessura. Foi identificado que para ambientes lânticos, não há necessidade de uma câmara de proteção para o coletor, e que não é necessário lastros para fixar o medidor.

Para o presente trabalho, foram selecionados tambores plásticos de polietileno de alta densidade pela facilidade de transporte, baixo custo, facilidade de corte e disponibilidade.

Foram testados tambores plásticos de 100 e 200 litros, com diâmetro de 50 e 60 cm de diâmetro, respectivamente. Assim como Rosenberry e Menheer (2006b), foi observado que os tambores com maior diâmetro apresentaram resultados com menor variabilidade, sendo estes então adotados para o estudo.

A Figura 15 apresenta os *seepage meters* antes (esquerda) e após (direita) instalação.

Figura 15 - *Seepage meters* antes e após instalação no sedimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O coletor plástico acoplado ao tambor é a peça mais importante do equipamento e também a maior fonte de erros de medição (MURDOCH; KELLY, 2003). O princípio é que toda descarga de água subterrânea na área da seção transversal do sedimento deve deslocar a água contida no tambor para o coletor plástico, assim como toda infiltração (fluxo sentido superficial-subterrâneo) deve ser refletido na perda de água do coletor para o tambor, sendo assim, a água no coletor plástico deve estar em equilíbrio hidráulico com o tambor e o corpo hídrico (BRODIE et al., 2009). O coletor deve ter pequena espessura, flexível e maleável, de modo que cause a menor resistência possível ao fluxo d'água, e por outro lado, deve ser resistente o suficiente a fim de não causar vazamentos. Uma

diversidade de coletores foram testadas em outros estudos, como recipientes de vinho de caixa, *bladders* de hidratação, sacolas médicas para procedimentos intravenosos, sacos plásticos para cozimento, balões e preservativos, onde foram observados resultados não satisfatórios devido à pouca flexibilidade, elasticidade e pequeno diâmetro de entrada (ARANTES, 2003; BRODIE et al., 2009; KELLY; MURDOCH, 2003; ROSENBERRY; MENHEER, 2006b).

Após testes em campo, foi definido para o presente estudo um coletor plástico, composto de polietileno de baixa densidade com espessura de 0,08 mm e dimensões 35 por 45 cm, facilmente encontrado em lojas de embalagens.

A conexão entre o coletor e o tambor foi feita por um flange de 25 mm com *o-ring* para vedação, um registro de esfera 25 mm e tubo conector. Testes em laboratório recomendam que o diâmetro da conexão exceda 7,9 mm para reduzir a resistência hidráulica que pode vir a causar erros nas medições (ROSENBERRY; MORIN, 2004). O acoplamento entre o coletor plástico e o tubo conector foi feito a partir de amarração com câmara de ar de pneu automotivo, garantindo a vedação. O registro tem a função de evitar perdas ou ganhos de água durante a inserção e retirada dos coletores nos *seepage meters*.

A instalação dos *seepage meters* no sedimento da laguna foi realizada em local livre de vegetação e pedras. Os equipamentos foram inseridos no sedimento de modo a atingir vedação adequada (aproximadamente 15 cm, no caso de areias finas e médias). A parte superior do tambor não deve ficar 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.

Os tambores foram instalados em cada estação de monitoramento em triplicata, posicionados em forma de transecto perpendicular à linha de costa, com distância entre eles variando de 2 a 5 metros. O objetivo foi identificar como as DAS se comportam espacialmente naquela estação. Na primeira campanha o tambor foi cravado no sedimento, sendo sua retirada acontecendo somente após a última a campanha. A Figura 16 mostra imagem aérea da estação PA com o transecto de *seepage meters*.

Figura 16 – Imagem aérea com destaque para os *seepage meters* instalados na estação de monitoramento PA.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os coletores plásticos foram preenchidos com cerca de 500 a 1000 mL da água da laguna antes de serem acoplados para as medições. Este procedimento, além de permitir quantificar os fluxos sentido laguna-aquífero, é importante para mitigar resultados anômalos devido à resistência do coletor plástico, que pode dificultar ou promover o fluxo de água devido a sua expansão, conforme demonstrou o estudo de Shaw e Prepas (1989). A Figura 17 apresenta os coletores plásticos confeccionados.

Figura 17 - Coletores plásticos e conexões



Fonte: Elaborado pelo autor.

A vazão e a direção do fluxo entre as águas superficiais e subterrâneas são medidas pela variação do volume de água coletada durante determinado período. O período de amostragem necessário varia de acordo com a magnitude das descargas e volume do coletor. Ao final da medição, o coletor não deve estar completamente cheio ou vazio, pois pode mascarar os resultados. Os períodos de medição deste estudo variaram entre 1 e 4h.

A medição do volume nos coletores foi feita antes e após o período de amostragem, utilizando balança de precisão ou proveta de 1000 mL graduada. As DAS foram calculadas pela Equação 2:

$$DAS = \frac{V_{final} - V_{inicial}}{\Delta T \times A} \times 0,144 \quad (2)$$

onde:

DAS: descargas de águas subterrâneas (cm/dia);

V: Volume inicial e final amostrado (mL);

ΔT : Período de amostragem (min);

A: Área do *seepage meter* (m²)

Quando o fluxo ocorre no sentido superficial-subterrâneo, o volume final é menor que o inicial, convencionando a classificação de “fluxo negativo”. Enquanto que, para o “fluxo positivo”, considerou-se o movimento do manancial subterrâneo para compartimento superficial, pois o volume final no coletor é maior que o volume inicial.

Em cada campanha, todas as estações foram monitoradas no mesmo período do dia. Inicialmente, foram pesados e acoplados os

coletores aos *seepages meters* em todas as estações. Dado o período de tempo necessário, era feita a retirada e medição de volume em cada estação de monitoramento. A Tabela 3 apresenta o tempo médio de permanência dos coletores em cada estação. A embarcação utilizada para deslocamento de estação a estação realizava o trajeto no seguinte sentido: LIC, RR, PA, CRV e CC.

Tabela 3: Tempo médio de permanência dos coletores em cada estação.

Seção	Tempo médio de permanência do coletor no <i>seepage meter</i> (minutos)
CC	52
CRV	86
PA	116
RR	120
LIC	190

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 Monitoramento do nível d'água na Lagoa da Conceição

Em fevereiro de 2017 foi instalada uma régua linimétrica para a aferição do nível da laguna nos dias de campanhas de monitoramento. A régua foi instalada na estação PA, nas coordenadas 6945174 N, 750734 L.

Foi fixada uma estrutura de madeira de 2,0 metros no sedimento da laguna e 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.

Figura 18 - Instalação da régua limimétrica no interior da laguna



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4 Granulometria

Para análise granulométrica, os sedimentos foram coletados utilizando um *core sampler* de PVC, de um modo que foi amostrada uma camada de 0,70m e posteriormente homogeneizada. As amostras foram acondicionadas em saco plásticos, devidamente etiquetados e enviadas para o Laboratório de Oceanografia Costeira da UFSC (**Figura 19**). As análises foram realizadas no analisador de distribuição de tamanho de partículas por difração a laser Horiba LA-950 (**Figura 20**).

A análise analisador de partículas HORIBA LA-950 é realizada através da difração de duas fontes de luz com diferentes comprimentos de onda para aumentar a precisão da técnica, sendo elas o laser vermelho de 650 nm e o LED azul de 405 nm. A dispersão da luz é convertida para o tamanho da partícula utilizando a Solução de Mie (1908), que considera que o ângulo de difração é inversamente proporcional ao tamanho da partícula. O instrumento é controlado através do software do equipamento, onde ocorre também a conversão da dispersão de luz para tamanho da partícula. A frequência é calculada com base no volume de amostra depositada. O analisador possui uma amplitude de medição de 0,01 μm a 3000 μm (3 mm) e 84 intervalos de classificação

Figura 19 – Core sampler e amostras de sedimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 20 – Analisador de distribuição de tamanho partícula do Laboratório de Oceanografia Costeira (UFSC).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a estimativa da condutividade hidráulica, foi aplicada a fórmula de Hazen e a fórmula de Kozeny-Carman. A fórmula de Hazen é dada por:

$$K = C_h d_{10}^2 \quad (3)$$

onde:

K =condutividade hidráulica (cm/s);

C_h =fator empírico de Hazen (normalmente igual a 100) e

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

Enquanto a fórmula de Kozeny-Carman é dada por:

$$K = \left(\frac{\rho g}{\mu} \right) \left[\frac{n^3}{(1-n)^2} \right] \left(\frac{d_{10}^2}{180} \right) \quad (4)$$

onde:

ρ = densidade da água (kg/m³)

g = aceleração da gravidade (m/s²)

μ = viscosidade dinâmica da água

n = porosidade (%)

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

Para o cálculo de porosidade (n), a seguinte fórmula foi utilizada:

$$n = 0,255(1 + 0,83^U) \quad (5)$$

onde U é o coeficiente de uniformidade dos grãos, calculado pela fórmula:

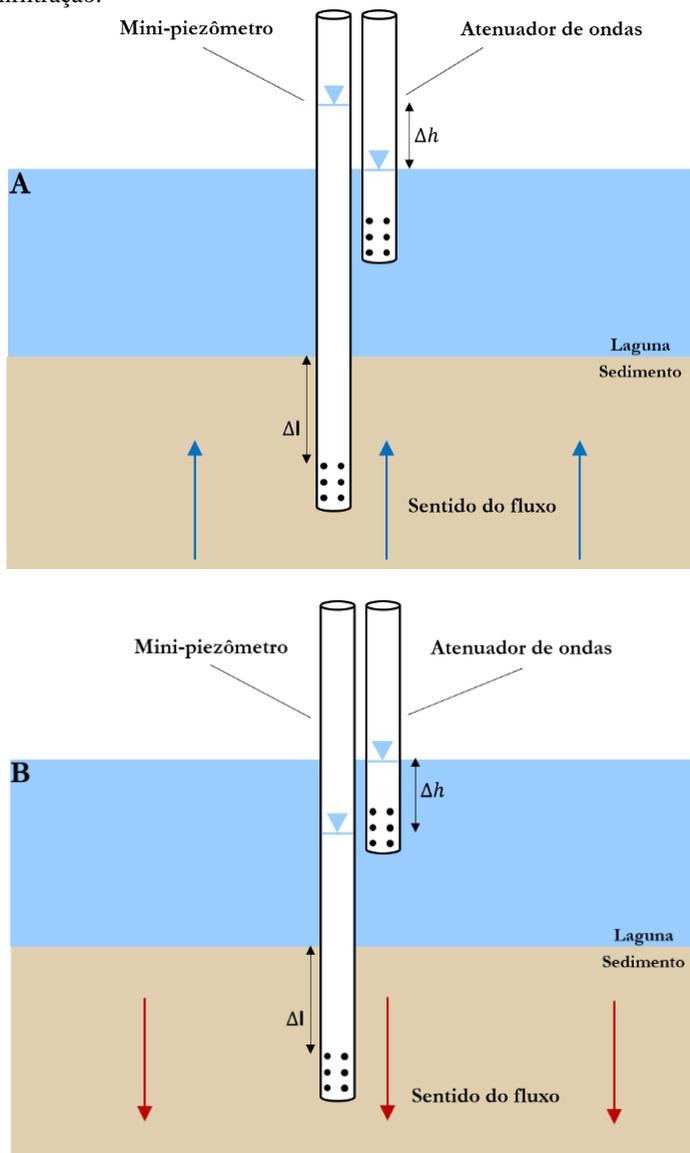
$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (6)$$

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

5.5 Mini piezômetros

Mini piezômetros são pequenos tubos com seção filtrante, inseridos a uma determinada profundidade no sedimento que medem a diferença de cargas hidráulicas do meio subterrâneo e superficial (Δh). A Figura 21 apresenta o esquema de funcionamento dos mini piezômetros nos casos de ocorrência de DAS e infiltração. O diâmetro do mini piezômetros é dependente do objetivo do estudo. Para medições únicas e pontais, recomenda-se diâmetros menores como mangueiras 3/8", pois facilitam a inserção no sedimento. Porém, para estudos com uma maior escala temporal, recomenda-se tubos de PVC com maiores diâmetros, onde é possível a inserção de sondas multiparâmetro e medidores de nível. Optou-se por instalar 3 mini piezômetros rígidos de PVC na estação LIC.

Figura 21 – Esquema do funcionamento dos mini piezômetros. (A) Representação da ocorrência de descargas de águas subterrâneas. (B) Representação de infiltração.

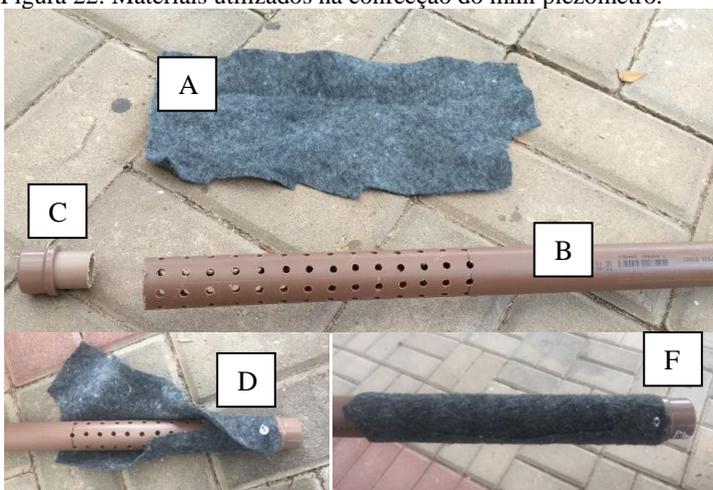


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os materiais utilizados para a construção do mini piezômetro foram:

- Invólucro Exterior: Tubo de PVC (DN 40);
- Mini piezômetro (Figura 22, F): Tubo de PVC (DN 32) com seção filtrante; (Figura 22, B)
- Tela filtro: Tela para proteger a ponta do mini piezômetro da entrada de sedimentos (nylon ou bidim); (Figura 22, A)
- Rebite, para fixar o filtro no tubo. (Figura 22, D)
- Cap de fundo (DN 32) (Figura 22, C).

Figura 22: Materiais utilizados na confecção do mini piezômetro.

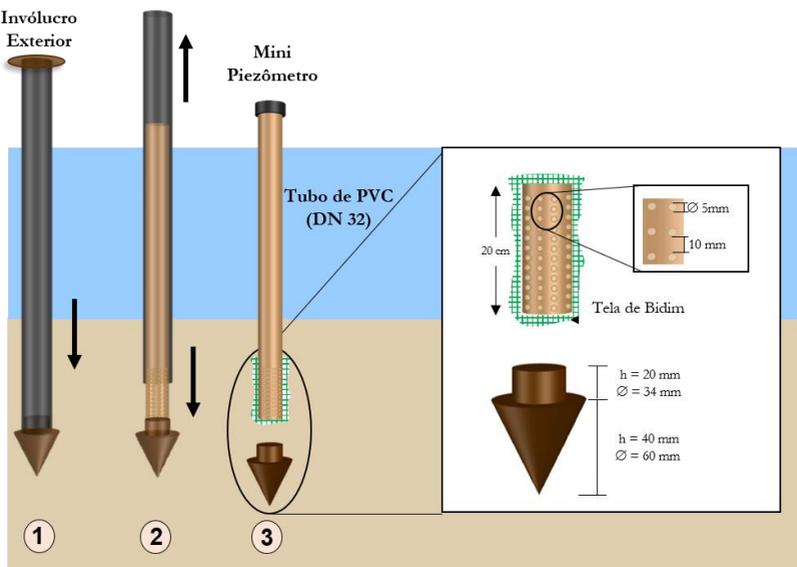


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a instalação, o tipo de sedimento ditará o melhor material para utilizar como invólucro exterior do mini piezômetro. Em sedimentos grosseiros é possível utilizar PVC, porém para sedimentos mais finos, um tubo de aço é mais adequado. A ponta do invólucro deve ser confeccionada em forma cônica, para facilitar a penetração do tubo no sedimento. No presente estudo foi utilizado um peão de madeira.

O invólucro foi inserido no sedimento até a profundidade desejada utilizando uma marreta. Após a inserção, foi inserido o mini piezômetro e retirado o tubo exterior, possibilitando a entrada de água na seção filtrante (Figura 23). Na estação LIC, os mini piezômetros foram inseridos no sedimento em uma profundidade de 78, 72 e 39 cm (Figura 24).

Figura 23: Esquema de instalação do mini piezômetro: 1) penetração do invólucro externo; 2) Inserção do mini piezômetro e remoção do invólucro; 3) Mini piezômetro instalado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24 – Mini piezômetros instalados na estação LIC



Após estabilização do sedimento e dos níveis d'água, realizou-se a tentativa de medição do nível subterrâneo (interior do mini piezômetro) e do nível da laguna com um medidor de nível eletrônico. Porém, devido ao pequeno desnível entre os compartimentos subterrâneos e superficiais, não foi possível a medição em função da precisão do equipamento (~1cm). Visto isso, para possibilitar as medidas e obter maiores precisões em relação aos desníveis, foi confeccionado o piezomanômetro, conforme seção a seguir.

5.6 Piezomanômetros

Os piezomanômetros (Figura 25) permitem a medição da diferença de cargas hidráulicas locais com maior facilidade e precisão. Consiste no acoplamento de um tubo flexível onde uma extremidade está inserida no sedimento e a outra mergulhada no corpo hídrico, formando um manômetro em U. 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 (Figura 26). Para conduzir a água superficial e subterrânea para o manômetro foi utilizada uma bomba de vácuo manual, modelo Kitest KA-056.

Figura 25 – Piezomanômetro



Figura 26 – Detalhe seção filtrante da mangueira do piezomanômetro



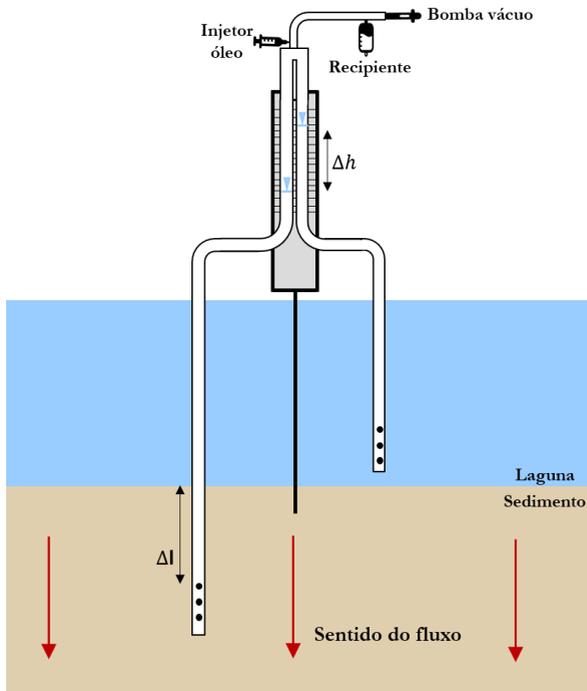
A diferença do nível d'água entre o tubo inserido no sedimento e a tubo no corpo superficial é a diferença de carga hidráulica (Δh). Essa, dividida pela profundidade da seção filtrante (Δl) configura-se o gradiente hidráulico vertical (GHv), conforme equação 7:

$$GHv = \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (8)$$

As diferenças de cargas hidráulicas entre a água subterrânea e a água superficial foram medidas diretamente no manômetro, onde para estabilização dos níveis, foi aguardado um período de 10 minutos.

Quando o nível d'água no tubo do sedimento é superior à do tubo da água superficial, é indicado que a direção do fluxo na interface sedimento-água se dá do compartimento subterrâneo para o superficial (DAS). Logo, quando o nível d'água do tubo do sedimento é inferior à do tubo da água superficial, é verificado que naquele local ocorre infiltração das águas superficiais, conforme Figura 27.

Figura 27 - Esquema do funcionamento do piezomanômetro



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em muitas situações, o desnível entre o nível subterrâneo e superficial é muito pequeno, dificultando e gerando erros à medição. Para contornar isso, é possível realizar a magnificação do desnível utilizando um manômetro com um fluido de menor densidade, onde o óleo vegetal é comumente utilizado. O fator de magnificação do desnível para o manômetro com óleo é dado pela seguinte equação:

$$\Delta h_m = \Delta h_{\text{água}} \left[\frac{\rho_{\text{água}}}{\rho_{\text{óleo}} - \rho_{\text{água}}} \right] \quad (9)$$

onde Δh_m é o desnível medido no manômetro magnificado, $\Delta h_{\text{água}}$ é a diferença de carga hidráulica, $\rho_{\text{água}}$ é a densidade da água e $\rho_{\text{óleo}}$ é a densidade do óleo.

Os piezomanômetros foram utilizados na estação LIC, onde o tubo flexível foi inserido no interior do mini piezômetro já instalado. Na estação RR, o tubo flexível foi inserido diretamente no sedimento, em uma profundidade de 1,0m, seguindo os passos de instalação dos mini piezômetros.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aqui serão apresentados os resultados provenientes da utilização dos equipamentos (*seepage meter*, mini piezômetros e piezomanômetros) construídos de acordo com descrição feita na seção anterior. Nesta seção não foram inclusos os resultados referentes ao teste-piloto, utilizado para aperfeiçoamento da metodologia e construção adequada dos equipamentos utilizados para as medições da DAS na Lagoa da Conceição. Os resultados serão apresentados e discutidos primeiramente por metodologia e posteriormente com a composição de um modelo conceitual das interações Asub-Asup.

6.1 Seepage Meters

Entre os dias 02/08/2017 e 26/01/2018 foram feitas 16 inserções a campo para realizar as medições das descargas subterrâneas nos *seepage meters*. As medições foram todas realizadas no mesmo período de modo que todos os equipamentos estivessem expostos às mesmas condições climáticas e gradientes hidráulicos.

As primeiras estações mobilizadas foram PA e RR, e nas campanhas seguintes foram feitas as instalações dos equipamentos nas estações CC, CRV e LIC. Na Campanha 16, somente foi possível realizar

a coleta de amostras na estação PA, devido à incapacidade de localizar os equipamentos nas outras estações, em decorrência de fortes chuvas que diminuíram a visibilidade da água da laguna. A Tabela 4 apresenta as datas das coletas e o respectivo nível da laguna.

Tabela 4: Relação das datas das coletas realizadas.

Campanha	Data	Nível	Estações monitoradas
1	02/08/2017	0,17	PA e RR
2	04/08/2017	0,36	PA e RR
3	16/08/2017	0,18	CC, CRV, PA, RR e LIC
4	24/08/2017	0,24	CC, CRV, PA, RR e LIC
5	01/09/2017	0,22	CC, CRV, PA, RR e LIC
6	06/09/2017	0,12	CC, CRV, PA, RR e LIC
7	13/09/2017	0,12	CC, CRV, PA, RR e LIC
8	19/09/2017	0,28	CC, CRV, PA, RR e LIC
9	24/09/2017	0,23	CC, CRV, PA, RR e LIC
10	04/10/2017	0,30	CC, CRV, PA, RR e LIC
11	11/10/2017	0,22	CC, CRV, PA, RR e LIC
12	01/11/2017	0,25	CC, CRV, PA, RR e LIC
13	10/11/2017	-	CC, CRV, PA, RR e LIC
14	14/11/2017	0,45	CC, CRV, PA, RR e LIC
15	12/12/2017	0,32	CC, CRV, PA, RR e LIC
16	26/01/2018	0,46	PA

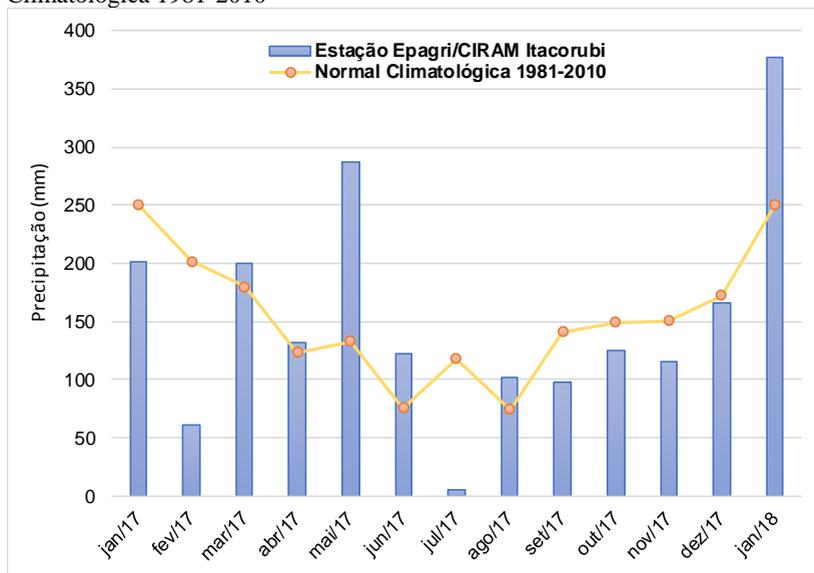
6.1.1 Precipitação

A Figura 28 apresenta a precipitação registrada na estação Epagri/CIRAM Itacorubi, código 1006 para o ano de 2017 e janeiro de 2018 localizada cerca de 3 km da área de estudo. A Figura 28 também mostra as Normais Climatológicas 1981-2010 (INMET/2018) de precipitação acumulada mensal para Florianópolis/SC.

Observa-se que o mês de julho apresentou precipitação bem abaixo da Normal Climatológica, com total de apenas 4,55 mm acumulados. De modo geral, os meses subsequentes apresentaram acumulados mensais próximos à Normal Climatológica, onde o acumulado anual no ano de

2017 foi de 1.612 mm, o que representa uma precipitação média anual normal.

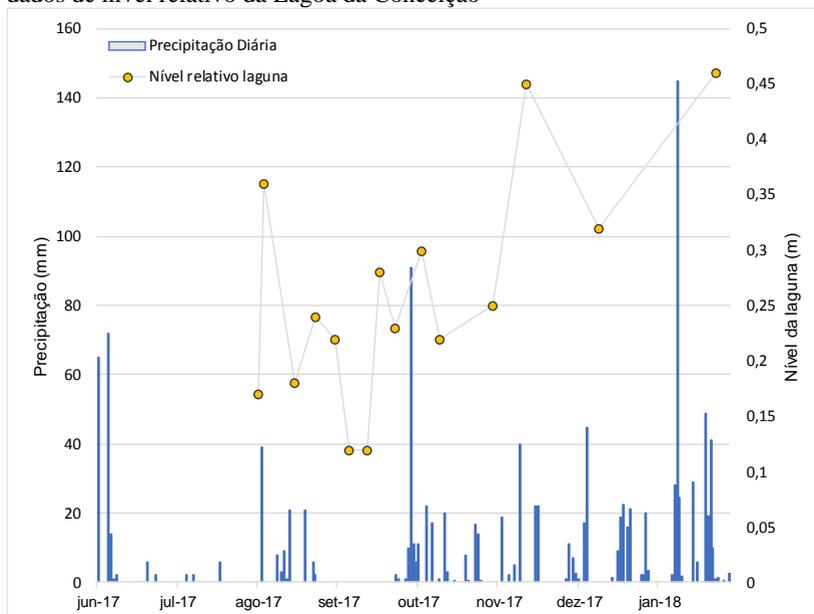
Figura 28 – Precipitação registrada na estação Epagri/CIRAM Itacorubi e Normal Climatológica 1981-2010



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 29 apresenta os dados diários de precipitação registrados na estação Epagri/CIRAM Itacorubi entre os dias 01/06/2017 a 31/01/2018, bem como os dados de níveis da laguna medidos na régua linimétrica instalada. No gráfico observa-se que os menores níveis na laguna ocorreram no mês de setembro, onde teve-se um período relativamente longo de estiagem. Embora não se tenha uma série temporal completa dos dados de níveis da laguna, as medições discretas na régua realizadas nos dias de saídas de campo evidenciaram que as variações do nível da laguna ocorrem não só em função do regime de ventos como também pelo volume de precipitações.

Figura 29 – Precipitação diária registrada na estação Epagri/CIRAM Itacorubi e dados de nível relativo da Lagoa da Conceição



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.1.2 Estação CC

A estação Costa Cachoeira (CC) localiza-se na porção oeste da laguna, onde é delimitada por altas encostas de morros do complexo cristalino. A Figura 30 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* (#10 e #12), pois o equipamento intermediário da triplicata foi desprendido logo no início do monitoramento.

A Figura 31 apresenta os resultados obtidos na estação, onde observa-se a alta variabilidade dos fluxos da interface na localidade, com fluxos alternando entre positivos e negativos.

O equipamento mais próximo da costa (#10) apresentou fluxos majoritariamente negativos (sentido superficial-subterrâneo), enquanto que o #12 alternou entre positivo e negativo. As duas séries temporais apresentaram tendências semelhantes, porém em faixas de amplitudes distintas.

A alta variabilidade dos fluxos locais foi associada à composição hidrogeológica da localidade, que consiste em rochas do complexo

crystalino fraturado, onde as águas subterrâneas percorrem caminhos específicos na rocha, não se distribuindo homogeneamente no meio. Devido à alta declividade da bacia adjacente, há um predomínio do escoamento superficial na localidade, onde as infiltrações no aquífero se limitam aos topos de morros. Em razão disso, não se observam descargas de águas subterrâneas proeminentes na estação, onde os resultados positivos obtidos possivelmente se devem a medições de comportamentos anômalos dos *seepage meters*.

Figura 30 – Perfil topobatimétrico e configuração do transecto na estação CC.

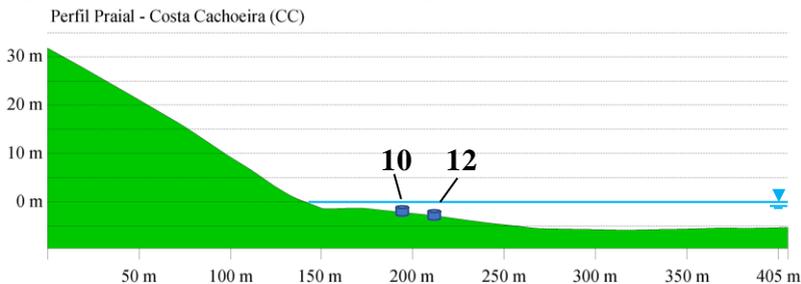
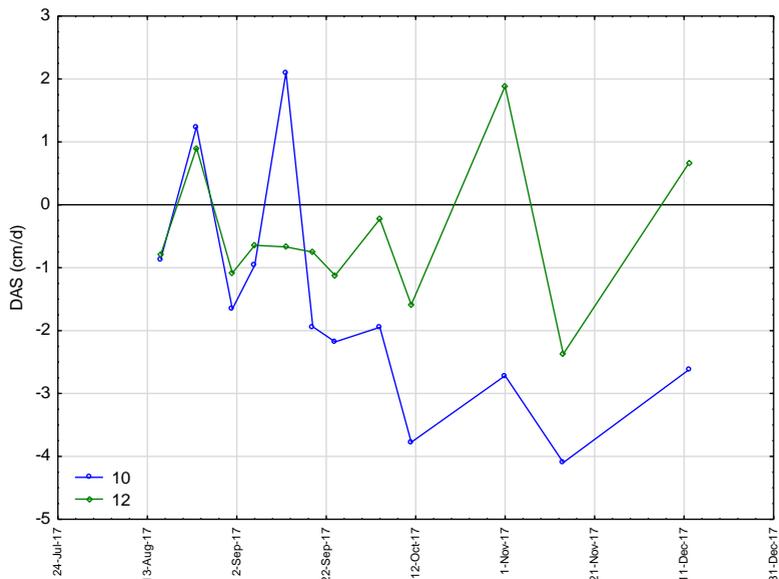


Figura 31: Descargas de águas subterrâneas na estação CC ao longo do período monitorado.



6.1.3 Estação CRV

Na estação CRV, localizada no cordão lagunar-praial que faz a divisão entre a laguna e o oceano, também foi possível observar que as descargas no local foram predominantemente negativas durante o período monitorado, sobretudo com maior magnitude que a estação CC. A Figura 32 traz o perfil topobatimétrico da localidade e a configuração do transecto de *seepage meters*. A Figura 33 apresenta os resultados obtidos na estação, onde observa-se boa aderência entre os resultados dos três medidores, com valores bastante semelhantes nos equipamentos #13 e #14 e descargas com menor magnitude no *seepage meter* #15, que se encontra mais afastado da linha de costa da laguna. A grande 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.

Figura 32 - Perfil topobatimétrico e configuração do transecto na estação CRV.
Perfil Praial - Costa Rio Vermelho (CRV)

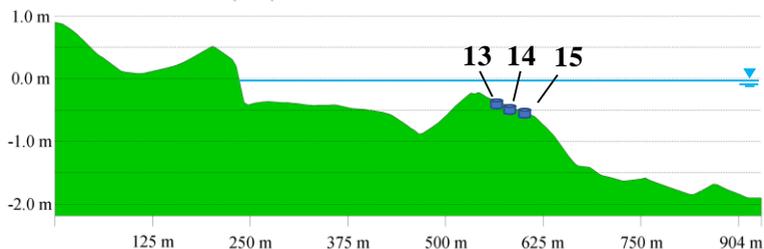
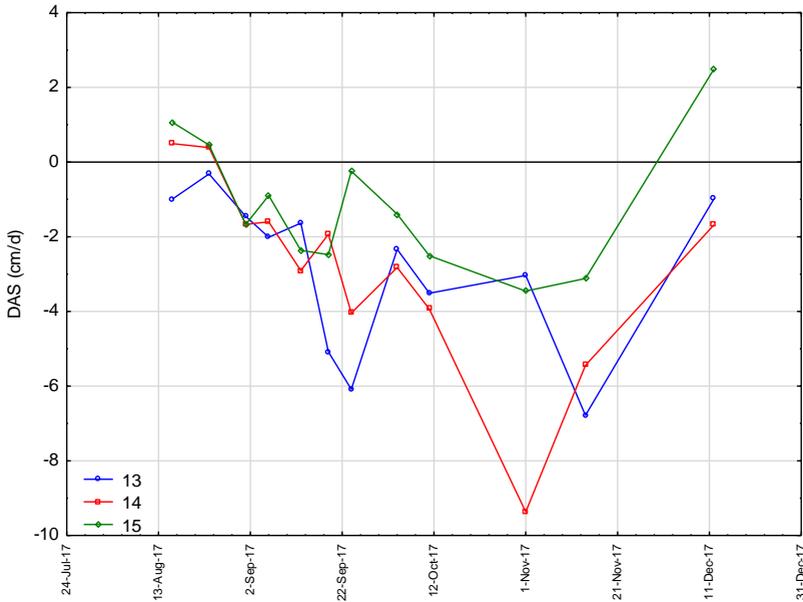


Figura 33: Descargas de águas subterrâneas na estação CRV ao longo do período monitorado.



6.1.4 Estação PA

A estação Ponta das Almas (PA), assim como a estação CC, localiza-se na margem oeste da laguna, na base dos morros do complexo cristalino. Porém, nesta estação ocorre maior presença de areias quartzólicas e menor declividade da bacia, possibilitando uma maior infiltração para o aquífero.

A Figura 35 apresenta os dados medidos na estação, que apresentou alta variabilidade temporal e espacial. Observou-se descargas anômalas e distintas entre os equipamentos do transecto. Assim como na estação CC, a alta variabilidade dos fluxos locais foi associada ao aquífero cristalino fraturado e do predomínio do escoamento superficial na localidade. No entanto, há de se destacar possíveis erros inerentes à metodologia, onde descargas anômalas podem estar relacionadas ao efeito de advecção intersticial (efeito Bernoulli) causados pelo movimento das ondas, bolhas de gases presos no interior do equipamento e micro furos nos coletores.

Figura 34 - Perfil topobatimétrico e configuração do transecto na estação PA
 Perfil Praia - Estação Ponta das Almas (PA)

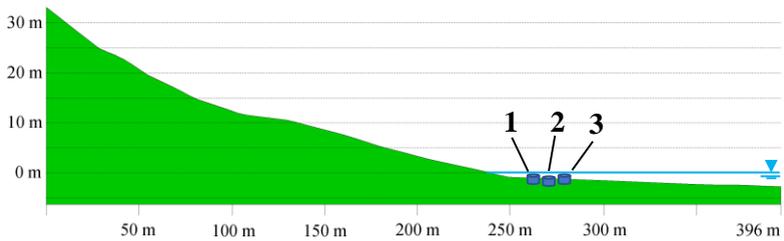
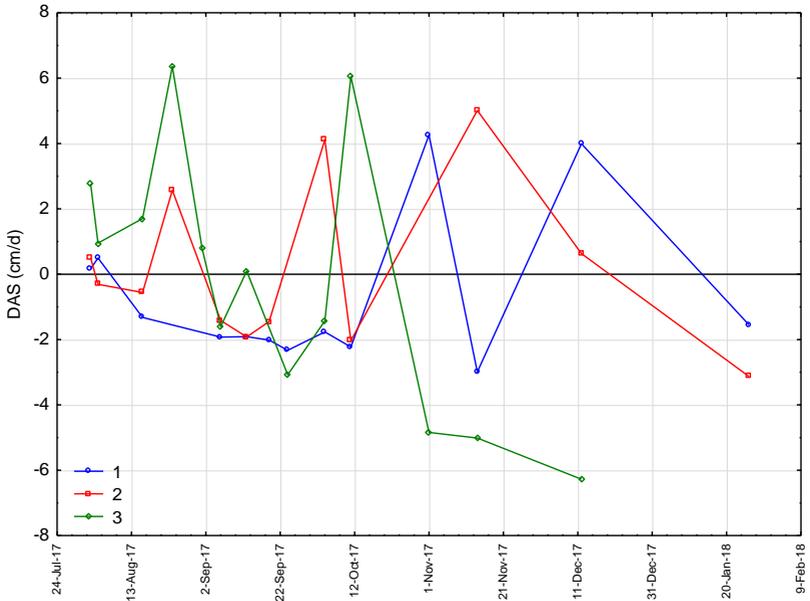


Figura 35: Descargas de águas subterrâneas na estação PA ao longo do período monitorado.



6.1.5 Estação RR

Diferente das outras estações, a Estação RR 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 Figura 36 traz o perfil topobatimétrico da localidade e a configuração do transecto de *seepage meters*.

A Figura 37 apresenta os resultados obtidos na estação, onde diferentemente das demais localidades, os valores de descargas de águas subterrâneas foram sempre positivos, indicando fluxos no sentido aquífero-laguna. De modo geral, as descargas variaram entre -0,5 a 6,0 cm/d, com descarga média de 1,30 cm/d. Os valores observados mostram uma possível contribuição das recargas artificiais nas descargas de águas subterrâneas na laguna, onde o leito da lagoa de evapoinfiltração (LEI) encontra-se a aproximadamente 8,0 m acima do nível médio da laguna.

Os 3 equipamentos do transecto apresentaram comportamentos semelhantes entre si, porém os maiores valores de DAS foram medidos no *seepage meter* #6, enquanto que as menores foram medidas no equipamento #4. As observações na estação se mostraram estáveis ao longo do monitoramento e não apresentaram relação com as variações do nível no corpo lagunar.

Conforme observa-se no gráfico, 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* eram então substituídos nas campanhas seguintes.

Figura 36 - Perfil topobatimétrico e configuração do transecto na estação RR
Perfil Praial - Estação Rendeiras (RR)

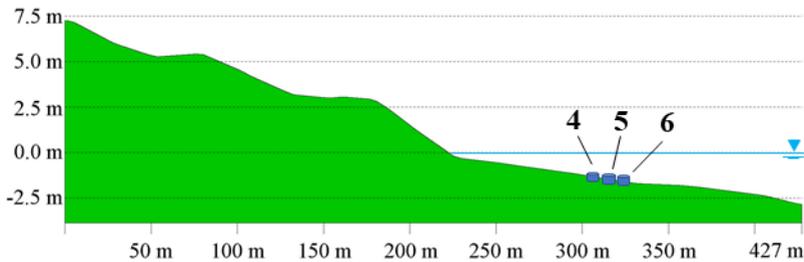
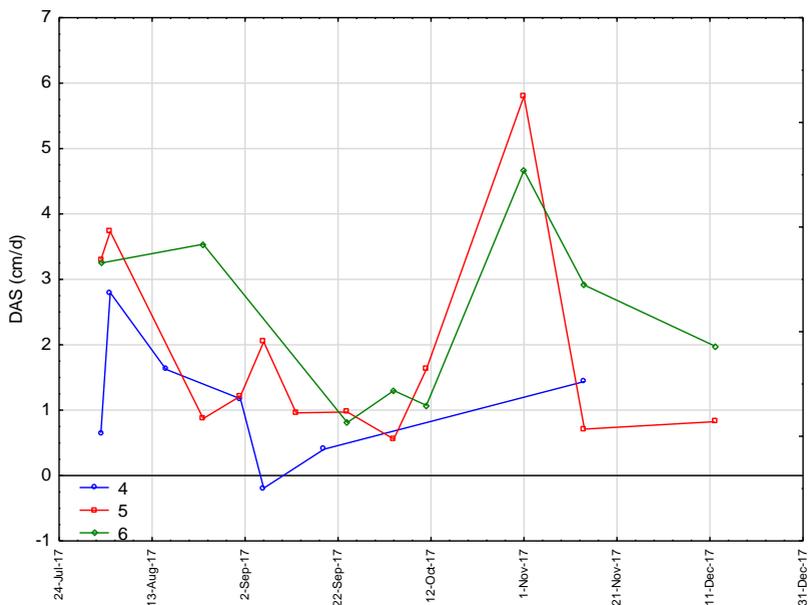


Figura 37: Descargas de águas subterrâneas na estação RR ao longo do período monitorado.



6.1.6 Estação LIC

A estação Lagoa Iate Clube (LIC) está localizada na porção sul da laguna, onde a sub-bacia adjacente possui alta urbanização e relativa baixa declividade. Os equipamentos foram instalados próximos à um píer distante cerca de 150 m da linha de costa. A Figura 38 mostra a configuração do transecto e seção topobatimétrica.

A Figura 39 apresenta os resultados obtidos nesta estação, que apresentou significativos valores de infiltração (fluxo sentido laguna-aquífero) em todas as coletas, apontando uma ordem de grandeza de até 3 vezes superior ao restante do sistema (descargas de -12 cm/d). Aqui, ocorreu um erro referente à capacidade do volume de água inserido nos coletores dos equipamentos, pois não era esperado que a magnitude de infiltração fosse tão alta no local. Nas primeiras 9 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. A partir da nona campanha os coletores foram substituídos por coletores de maior volume, possibilitando medições corretas, onde pode-se observar um expressivo aumento das infiltrações no gráfico.

Observou-se que o *seepage meter* #7, localizado mais próximo da linha de costa, apresentou a maior média de infiltração, enquanto que o #9, mais afastado da costa, apresentou a menor.

Levando-se em conta a hidrogeologia local, não era esperado a ocorrência de fluxos no sentido laguna-aquífero na localidade. 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, porém devido às incertezas metodológicas, não se pode afirmar que tenha tamanha influência no comportamento hidrogeológico.

Figura 38 - Perfil topobatimétrico e configuração do transecto na estação LIC
Perfil Praial - Estação Lagoa late Clube (LIC)

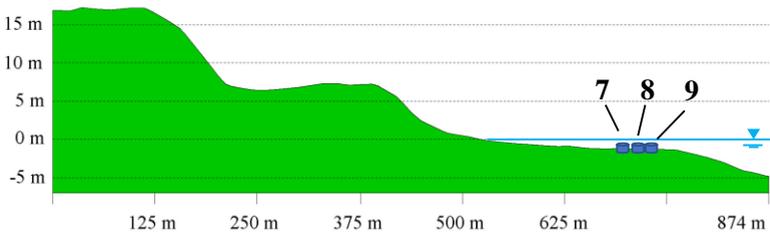
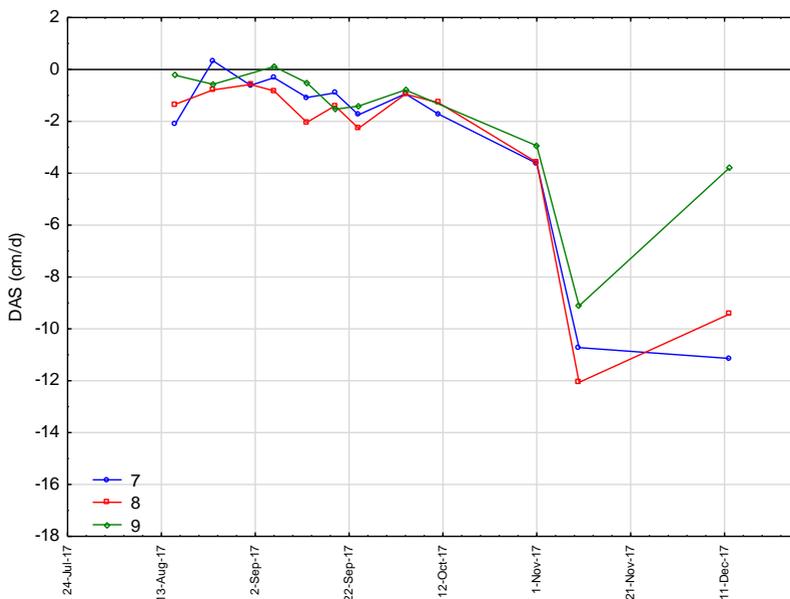


Figura 39: Descargas de águas subterrâneas na estação LIC ao longo do período monitorado



6.1.7 Identificação dos padrões das interações Asub-Asup

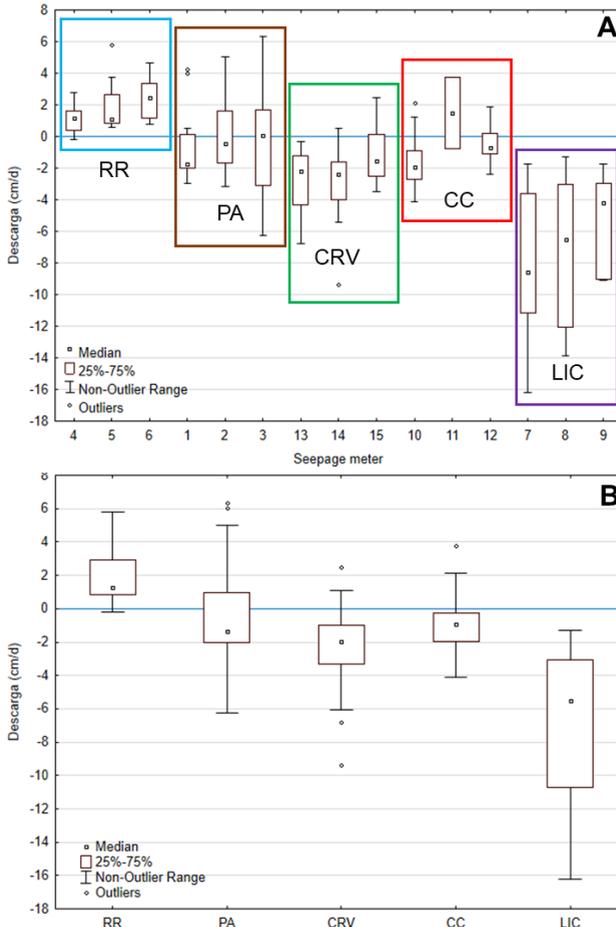
Com base nos resultados obtidos pela metodologia do *seepage meter*, foram identificados três padrões distintos de interação entre Asub-Asup na laguna. A Figura 40 mostra os diagramas de caixas dos resultados obtidos nas cinco estações amostrais, onde verifica-se que, conforme descrito na seção anterior, a estação RR apresenta descargas majoritariamente positivas, as estações PA, CRV e CC apresentaram em sua maioria descargas negativas, porém com maior variabilidade e a estação LIC apresentou fluxos no sentido laguna-aquífero com maiores magnitudes. Para a confecção do diagrama de caixa, foram excluídas todas as medições realizadas em LIC antes da troca da bolsa coletora, pois antes da troca acredita-se que os resultados eram subestimados.

Na estação CC, na base do maciço cristalino, as descargas médias resultaram em valores negativos de $-0,92$ cm/d variando entre $-4,0$ a $2,1$ cm/d. Os valores negativos se intensificam na estação CRV, localizada no cordão lagunar-praial, onde apresentou valor médio de $-1,97$ cm/d. As descargas na estação PA seguiram um padrão semelhante as da estação

CC, com média de -1,37 cm/d. Em RR as descargas variaram entre -0,5 a 6,0 cm/d, com descarga média de 1,30 cm/d e na estação LIC o valor médio foi de -5,51 cm/d.

Por se tratar de uma abordagem inicial exploratória, os dados no diagrama de caixa não possuem distinção temporal, ou seja, são independentes do tempo o qual foram coletados.

Figura 40 - Diagrama de caixa das descargas de interação Asub-Asup na Lagoa da Conceição por (a) *seepage meter* e (b) agrupados por estação.



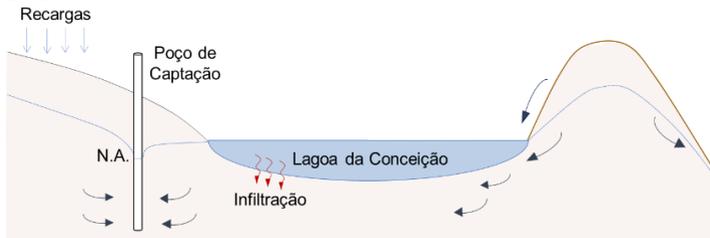
Analisando os resultados espacialmente, foi evidenciado a heterogeneidade das interações Asub-Asup no sistema. A estação RR se

distingue das demais por apresentar fluxos positivos para a laguna, enquanto que na estação LIC ocorre expressivos valores de infiltração. Nessas duas estações, supõem-se que essas interações ocorram por influência antrópica, onde em RR ocorre infiltração artificial por disposição final de efluentes em uma lagoa de evapoinfiltração enquanto que em LIC supostamente ocorre a captação de águas subterrâneas em poços e ponteiros.

A Figura 41 mostra o modelo conceitual do fluxo local em LIC, onde as setas vermelhas indicam o fluxo negativo em relação à laguna (infiltração), que nesta situação abastece o manancial subterrâneo, que, por sua vez, abastece o poço de captação. As setas azuis indicam o sentido do fluxo subterrâneo e o escoamento superficial através de pequenos córregos. A Figura 42 traz o modelo conceitual em RR, onde ocorre DAS no sentido aquífero-laguna devido ao gradiente hidráulico do aquífero adjacente (setas azuis). As setas vermelhas indicam a infiltração na LEI.

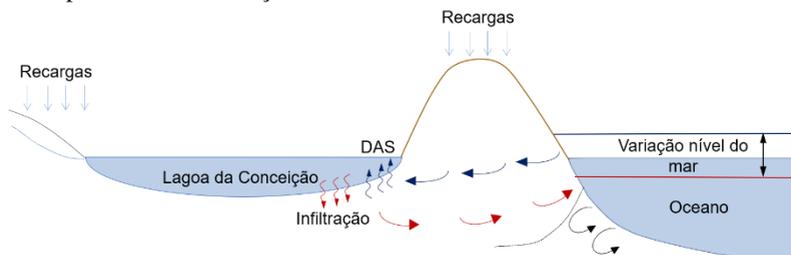
Cabe ressaltar que este é o primeiro estudo com levantamento de dados na área e que os padrões levantados ainda estão em estágio inicial de investigação, onde a metodologia utilizada no estudo não é capaz de aferir com certeza a influência das atividades antrópicas na laguna.

Figura 41 - Padrão do fluxo de águas subterrâneas na estação LIC. As setas vermelhas indicam o fluxo negativo em relação à laguna (infiltração) As setas azuis indicam o sentido do fluxo subterrâneo e o escoamento superficial através de pequenos córregos.



A Figura 44 apresenta o modelo conceitual para o corpo central da laguna. A interação Asub-Asup ocorre aparentemente em função da heterogeneidade do aquífero fraturado na margem oeste e das diferenças de nível entre a laguna e o oceano. No momento em que o nível oceânico se encontra abaixo do nível da laguna, ocorre o fluxo no sentido laguna-aquífero-oceano (setas vermelhas), promovendo a infiltração de água na laguna. Todavia, quando o nível oceânico está acima do nível da laguna, ocorre o movimento oposto, em que o gradiente hidráulico formado entre o nível do oceano e a laguna promove fluxo no sentido oceano-aquífero-laguna (setas azuis).

Figura 44 - Comportamento do fluxo subterrâneo (setas vermelhas) com o nível oceânico abaixo do nível da laguna (linha vermelha). As setas azuis indicam o sentido do fluxo quando o nível oceânico se encontra acima do nível da laguna (linha azul). A linha equipotencial preta indica a cunha de intrusão salina e setas pretas o padrão de recirculação.



A principal forçante das variações no nível do oceano e da laguna na região são os regimes de ventos atuantes. Os ventos do quadrante sul causam o fenômeno de empilhamento, elevando o nível do mar, já os ventos do quadrante norte/nordeste causam o efeito contrário. Para o nível da laguna, devido à sinuosidade e comprimento do Canal da Barra da Lagoa, há um efeito de retardamento e filtragem das oscilações do nível oceânico, ocasionando o gradiente hidráulico entre os dois sistemas.

Há que se ressaltar as grandes incertezas nesses comportamentos devido a heterogeneidade inerente do sistema no espaço e no tempo, conforme observaram Niencheski et al. (2007) para o sistema Lagoa dos Patos-Mirim, Bokuniewicz et al. (2008) e Taniguchi et al. (2008) que evidenciaram a heterogeneidade espacial e temporal nas DAS do aquífero fraturado de Ubatuba/SP, que se assemelha com a hidrogeologia deste estudo.

O presente trabalho não contemplou a análise de variação do nível oceânico bem como sua diferença em relação ao nível lagunar. Entretanto,

apresentou o primeiro modelo conceitual da área de estudo, que deverá ser consolidado com novas abordagens.

6.1.8 A utilização dos *Seepage Meters*

Os resultados obtidos neste estudo com os *seepage meters* foram bastante satisfatórios para a investigação e diagnóstico inicial, sendo possível identificar padrões e quantificar as DAS em diferentes locais da Lagoa da Conceição, com metodologia acessível e baixo custo financeiro.

Embora a metodologia tenha aparência simples, na prática há diversas dificuldades na aplicação. Significantes erros de medição foram identificados e que podem ocorrer devido ao design e operação dos equipamentos. Entre eles, estão:

- Processos de advecção intersticial (efeito Bernoulli) causados pelo movimento da água como ondas e correntes, podendo influenciar em resultados anômalos, conforme verificado por Cable et al. (2006). Na Lagoa da Conceição, não há a presença de velocidades consideráveis de correnteza, mas a ação dos ventos acarreta na geração de ondas que podem interferir nas medições;

- Os fluxos medidos podem não estar relacionados totalmente a fluxos subterrâneos, pois também podem provir de fluxos subsuperficiais como recirculação de águas superficiais. Para isso, é necessária a correta instalação dos tambores, de modo que atinjam profundidade adequada. Neste estudo, a profundidade de instalação dos tambores foi de aproximadamente 15 cm, porém devido ao movimento do sedimento, há uma incerteza em relação à origem dos fluxos;

- A conexão entre o coletor plástico e o tubo conector é uma das possíveis grandes fontes 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 do saco coletor para o tambor. 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;

- 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. Também não se descarta a ação de roubo e vandalismo;

- Micro furos nos sacos coletores: 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;

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

Em virtude das dificuldades de aplicação, é necessária uma análise crítica em relação aos resultados apresentados. A variabilidade dos dados e a apresentação de descargas anômalas podem estar intrinsicamente relacionadas à metodologia. Para contornar possíveis fontes de erros, a utilização de triplicatas em cada estação amostral foi determinante.

Assim, mesmo com as diversas dificuldades e significantes limitações, o método apresentou resultados importantes para o primeiro diagnóstico das interações Asub-Asup na área de estudo, possibilitando a identificação de padrões por meio de medições diretas. Recomenda-se que a metodologia seja utilizada em conjunto com outros métodos de quantificação indiretos, como mini piezômetros e traçadores.

6.2 Estimativa da condutividade hidráulica do sedimento

A partir de ensaios granulométricos realizados nas estações amostrais, foi estimada a condutividade hidráulica do sedimento a partir das fórmulas de Hazen (K_h) e Kozeny-Carman (K_{k-c}). A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos nos ensaios granulométricos e as estimativas de condutividade hidráulica a partir das fórmulas empíricas.

Verifica-se que o diâmetro efetivo (d_{10}) variou entre 0,078 mm na estação PA e 0,186 mm na estação CC. Foi observado que o Coeficiente de Uniformidade (C_u) em todas as estações foi menor que 5, indicando sedimentos uniformes. Da mesma maneira, para o Coeficiente de Curvatura (C_c), com exceção da estação CC, 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 CC, 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, conforme verificou Caruso Jr (1993). O mesmo não ocorre na estação PA pois 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} e 10^{-3} cm/s, sendo esses valores típicos de sedimentos arenosos. Observou-se que para as estações CRV e LIC, as duas metodologias apresentaram valores muito próximos, enquanto que na estação PA houve uma diferença de 16% entre as fórmulas. Na estação CC e RR os resultados apresentaram uma diferença de 38% e 34%, respectivamente.

Visto que a fórmula de Hazen leva em conta somente o diâmetro efetivo, essas diferenças são consideradas normais. Em conformidade com Carrier (2003) e Odong (2007), os resultados obtidos pela fórmula de Kozeny-Carman serão utilizados neste estudo como referência.

A estação RR apresentou o maior valor ($3,93 \times 10^{-2}$ cm/s) de condutividade hidráulica dentre as estações, valor bastante superior ao utilizado por Zanatta (2005) ($5,0 \times 10^{-3}$ cm/s). A estação CC apresentou o segundo maior valor de condutividade hidráulica ($2,50 \times 10^{-2}$ cm/s) e as demais estações obtiveram resultados bastante próximos, variando de $5,22 \times 10^{-3}$ a $6,69 \times 10^{-3}$ cm/s.

Tabela 5 – Granulometria dos sedimentos e estimativa de condutividade hidráulica

Ponto	d₁₀ (mm)	d₃₀ (mm)	d₆₀ (mm)	d₅₀ (mm)	Cu	Cc	n	K_h (cm/s)	K_{k-c} (cm/s)
CC	0,186	0,379	0,763	0,619	4,1	1,0	0,374	3,46 x 10 ⁻²	2,50 x 10 ⁻²
CRV	0,079	0,165	0,230	0,208	2,9	1,5	0,403	6,25 x 10 ⁻³	6,24 x 10 ⁻³
PA	0,078	0,172	0,249	0,222	3,4	1,6	0,389	6,06 x 10 ⁻³	5,22 x 10 ⁻³
RR	0,161	0,207	0,263	0,243	1,6	1,0	0,443	2,58 x 10 ⁻²	3,93 x 10 ⁻²
LIC	0,082	0,169	0,231	0,209	2,9	1,6	0,402	6,75 x 10 ⁻³	6,69 x 10 ⁻³

6.3 Piezomanômetros

Foram realizadas duas campanhas para o monitoramento das cargas hidráulicas na Lagoa da Conceição. O objetivo principal destas medições foi validar e confirmar o comportamento e sentido dos fluxos Asub-Asup identificados com os *seepage meters*. As medições com os piezomanômetros foram feitas na estação LIC, onde foram identificados fluxos negativos com o *seepage meter* e na estação RR, onde observou-se fluxos no sentido subterrâneo-superficial (positivos).

Na estação LIC, as medições de desnível confirmaram o padrão de infiltração nesta localidade, onde foi possível observar que nível no tubo do compartimento subterrâneo foi inferior ao nível do tubo do compartimento superficial nos três mini piezômetros instalados no local (Figura 45). Na estação RR, também se confirmou o sentido do fluxo Asup-Asub, onde o nível do tubo subterrâneo foi superior ao nível do tubo superficial. A Tabela 6 apresenta os desníveis (Δh) encontrados nas medições após um período de 10 minutos para estabilização dos níveis.

Para possibilitar a medição da condutividade hidráulica com os piezomanômetros, medições com *seepage meters* foram realizadas concomitantemente às medições de desnível, calculando a condutividade hidráulica vertical (K_v) a partir da Equação de Darcy. A Tabela 6 traz os resultados encontrados para K_v e uma comparação com a condutividade hidráulica obtida através da fórmula de Kozeny-Carman (K_{k-c}).

Observou-se que os três mini piezômetros instalados na estação LIC em profundidades diferentes apresentaram valores próximos, variando entre $6,39 \times 10^{-3}$ a $7,98 \times 10^{-3}$. Esses valores, quando comparados com o K_{k-c} , mostraram diferenças entre 2 a 19%, o que foi considerado bastante aceitável, visto que as fórmulas empíricas fornecem uma estimativa considerando apenas a granulometria do sedimento.

Na estação RR, visto que não foi feita a instalação de mini piezômetros no local, diferentemente da estação LIC, o tubo flexível foi inserido diretamente no sedimento. Assim, foi realizada somente uma medição de desnível e cálculo de condutividade hidráulica vertical. A diferença entre K_v e K_{k-c} foi de 75%, o que se pode também considerar aceitável, visto as limitações das fórmulas empíricas. Outro fator que deve ser levado em consideração, é que a pequena seção filtrante de 5 cm estava inserida em uma profundidade de 1,00 m, onde a condutividade hidráulica medida representa a condutividade hidráulica do sedimento nesta profundidade. Já o ensaio granulométrico foi feito a partir da homogeneização de uma camada de 70 cm do sedimento, o que pode ter levado à essa dissimelhança.

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 os *seepage meters* acarretam na confirmação dos padrões de interação Asub-Asup verificados.

A maior dificuldade encontrada foi a inserção dos tubos no sedimento, onde sem o porte de invólucros rígidos e ponteiros desenhadas especificamente para o trabalho tornou a inserção demorada e dificultosa. Sugere-se para próximos estudos a fabricação de uma peça metálica com ponteira e seção filtrante, facilitando assim a utilização dos mini piezômetros e piezomanômetros.

Após a inserção dos tubos, a medição foi realizada sem maiores dificuldades, onde teve-se de atentar à formação de bolhas de ar no interior da tubulação e pequenos vazamentos entre as conexões da tubulação. Para diminuir a criação de bolhas, a aplicação de vácuo foi feita lenta e gradual. A eliminação das bolhas se fez pela agitação dos tubos até que essas se dissolveram. Para contornar pequenos vazamentos, a extremidade do tubo flexível foi mergulhada em água quente antes da inserção nas conexões.

Figura 45 – Diferença de cargas hidráulicas na estação LIC.



Tabela 6 – Resultados obtidos com o piezomanômetro e comparação das condutividades hidráulicas calculadas

Estação	Mini piezômetro	Δh (m)	Δl (m)	GH_v	DAS (cm/d)	K_v (cm/s)	K_{k-c} (cm/s)	Diferença
LIC	PZ1	-0,009	0,72	0,013	-7,07	$6,55 \times 10^{-3}$	$6,69 \times 10^{-3}$	-2%
	PZ2	-0,008	0,78	0,010	-7,07	$7,98 \times 10^{-3}$	$6,69 \times 10^{-3}$	19%
	PZ3	-0,005	0,39	0,013	-7,07	$6,39 \times 10^{-3}$	$6,69 \times 10^{-3}$	-4%
RR	PZ4	0,006	1,00	0,006	1,82	$9,83 \times 10^{-3}$	$3,93 \times 10^{-2}$	-75%

7. CONCLUSÃO

O presente estudo realizou a primeira investigação das interações Asub-Asup na Lagoa da Conceição a partir de metodologia de quantificação direta e pontual. O trabalho apresentou resultados importantes identificando diferentes padrões nas DAS no corpo hídrico da Lagoa da Conceição.

Foi sugerido que em certas localidades (RR e LIC), os fluxos Asub-Asup estão intrinsecamente relacionados ao uso dos recursos hídricos da região, porém este comportamento não pode ser confirmado apenas com a metodologia utilizada neste trabalho. Foi observado também que o regime de DAS pode estar relacionado ao gradiente hidráulico promovido em função das eventuais diferenças de nível entre a laguna e o oceano.

Diante dos resultados observados, com exceção da estação RR, os fluxos na interface Asub-Asup da Lagoa da Conceição fluem no sentido laguna-aquífero, com descargas médias entre -0,9 a -5,5 cm/d. Esses resultados foram 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 metodologia de quantificação dos fluxos na interface (*seepage meters*) apresentou bons resultados para um diagnóstico inicial, sendo uma metodologia acessível e de baixo custo financeiro. Todavia, a aplicação da metodologia em campo se mostrou dificultosa e suscetível a erros de medição.

Os padrões de interação Asub-Asup foram confirmados e validados através da medição de cargas hidráulicas com os piezomanômetros, onde também foram estimadas condutividades hidráulicas no sedimento. A partir de fórmulas empíricas, também foram estimadas as condutividades hidráulicas utilizando ensaios granulométricos, que apresentaram boa aproximação com os resultados obtidos nos piezomanômetros.

Para futuros trabalhos sobre a interação Asub-Asup na área de estudo recomenda-se:

- Realizar análise das diferenças de nível d'água entre o oceano e a laguna, através de uma série histórica de dados medidos concomitantemente à quantificação das DAS.

- Analisar os parâmetros de qualidade da água das descargas de águas subterrâneas na estação RR e sua influência nos aportes de nutrientes e ciclos biogeoquímicos.
- Realizar estudos confirmatórios com a utilização de traçadores geoquímicos.
- 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.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

ANDRADE, R. C. **Estudo da Circulação Hidrodinâmica da Lagoa da Conceição-SC**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica), UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2001.

ARANTES, E. J. **Emprego de infiltrômetros na caracterização da interação entre rio e aquífero**. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento), Universidade de São Paulo, 2003.

ATTISANO, K. 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.

ATTISANO, K. K. **Aporte subterrâneo: uma fonte complementar de nutrientes para a Costa Sul do Brasil e plataforma adjacente**. Tese (Doutorado em Oceanografia Biológica), FURG, Rio Grande, RS. 2012.

BARLOW, P. M. **Ground Water in Freshwater-Saltwater Environments of the Atlantic Coast**. U S Geological Survey - Circular 1262, v. Circular 1, p. 121, 2003.

BAXTER, C.; HAUER, F. R.; WOESSNER, W. W. **Measuring Groundwater–Stream Water Exchange: New Techniques for Installing Minipiezometers and Estimating Hydraulic Conductivity**. Transactions of the American Fisheries Society, v. 132, p. 493–502, 2003.

BIER, F. B. **Caracterização morfométrica e hidrológica da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição, Florianópolis – SC**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

BIER, F. B. **Aspectos hidrodinâmicos e sedimentológicos em um canal de maré: estudo de caso do Canal da Barra da Lagoa, Florianópolis - SC**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

BOKUNIEWICZ, H. et al. **Direct measurements of submarine groundwater discharge (SGD) over a fractured rock aquifer in Flamengo Bay Brazil**. Estuarine, Coastal and Shelf Science, v. 76, n. 3, p. 466–472, 2008.

BOYLE, D. R. **Design of a seepage meter for measuring groundwater**

fluxes in the nonlittoral zones of lakes-Evaluation in a boreal forest lake. American Society of Limnology and Oceanography, v. 39, n. 3, p. 670–681, 1994.

BRODIE, R. S. et al. Seepage meter: progressing a simple method of directly measuring water flow between surface water and groundwater systems. Australian Journal of Earth Sciences, v. 56, n. 1, p. 3–11, 2009.

BURNETT, W. C. et al. Groundwater and pore water inputs to the coastal zone. Biogeochemistry, v. 66, p. 3–33, 2003.

BURNETT, W. C. et al. Quantifying submarine groundwater discharge in the coastal zone via multiple methods. Science of the Total Environment, v. 367, n. 2–3, p. 498–543, 2006.

BURNETT, W. C.; KIM, G. A continuous monitor for assessment of ²²²Rn in the coastal ocean. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, v. 249, n. 1, p. 167–172, 2001.

BURNETT, W. C.; TANIGUCHI, M.; OBERDORFER, J. Measurement and significance of the direct discharge of groundwater into the coastal zone. Journal of Sea Research, v. 46, n. 2, p. 109–116, 2001.

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.

CARDENAS, M. B.; ZLOTNIK, V. A. A Simple Constant-Head Injection Test for Streambed Hydraulic Conductivity Estimation. Ground Water, v. 41, n. 6, p. 867–871, 2003.

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

CARRIER, W. D. Goodbye, Hazen; Hello, Kozeny-Carman. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 129, n. 11, p. 1054–1056, 2003.

CHOW, V. TE; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. Applied Hidrology. McGraw-Hill, 1988.

CUNHA, V. C. V. DA. Avaliação da interação entre águas subterrâneas e superficiais na bacia do Rio das Fêmeas, Sistema Aquífero Urucuia - Bahia. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia das Radiações Minerais e Materiais), Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, 2017.

CURY, V. E. S. et al. **Space time evolution of the trophic state of a subtropical lagoon : Lagoa da Conceição , Florianópolis Island of Santa Catarina , Brazil.** RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 22, n. 10, p. 17, 2017.

DAY JR, J. W. et al. **Estuarine Ecology.** Wiley, 1989.

DEBNATH, P.; MUKHERJEE, A. **Quantification of tidally-influenced seasonal groundwater discharge to the Bay of Bengal by seepage meter study.** Journal of Hydrology, v. 537, p. 106–116, 2016.

DYER, K. R. DYER, Keith R. **Estuaries: a physical introduction.** 2. ed. Chichester: Wiley, 1997.

ESTEVES, F. A. **Fundamentos de Limnologia.** 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.

FERNANDES, M. R.; SILVA, J. C. **Programa estadual de manejo de sub-bacias hidrográficas: fundamentos e estratégias.** Belo Horizonte. 1994

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

FITTS, C. R. **Groundwater science.** San Diego: Academic Press, 2002.

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.

GARCEZ, L. N.; ALVAREZ, G. A. **Hidrologia.** São Paulo, SP: Edgar Blucher, 1988.

GODOY, F. B. **Modelagem hidrológico-hidrodinâmica da Lagoa da Conceição - SC.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2009.

GÖNENÇ, I. E.; WOLFLIN, J. P. **Coastal Lagoons - Ecosystem Processes and Modeling for Sustainable Use and Development.** CRC Press, 2004.

GROHS, R. D. **Avaliação do balanço hídrico no solo pelo modelo TOPMODEL aplicado à bacia hidrográfica do Rio João Gualberto, Florianópolis -SC.** Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

GUEDES JUNIOR, A. **Mapeamento hidrogeológico da Ilha de Santa Catarina utilizando geoprocessamento.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

- HEATH, R. C. **Basic Ground-Water Hydrology**. 1. ed. Denver: [s.n.].
- HUNG, J. J.; HUNG, P. Y. **Carbon and nutrient dynamics in a hypertrophic lagoon in southwestern Taiwan**. *Journal of Marine Systems*, v. 42, p. 97–114, 2003.
- 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.
- 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.
- KOOPMANS, D.; BERG, P. **An alternative to traditional seepage meters: Dye displacement**. *Water Resources Research*, v. 47, n. 1, p. 1–11, 2011.
- KOZENY, J. **Über kapillare leitung der wasser in boden**. *Royal Academy of Science*, v. 136, p. 271–306, 1927.
- 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.
- LANNA, A.; INDURSKY, A. B. **Predição de vazões médias mensais com modelos empíricos**. *Revista Brasileira de Engenharia*, p. 59–91, 1983.
- LEE, D. R. **A device for measuring seepage flux in lakes and estuaries**. *Limnology and Oceanography*, v. 22, n. 1, p. 140–147, 1977.
- LEOTE, C.; IBÁNHEZ, 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.
- LEWANDOWSKI, J. et al. **From submarine to lacustrine groundwater discharge**. *IAHS-AISH Proceedings and Reports*, v. 365, n. July 2013, p. 72–78, 2014.
- 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**. USDA, University of Florida IFAS Extension

Online. 2013

MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; KJERFVE, B. **Princípios da Oceanografia Física de Estuários**. 42. ed. São Paulo, SP: EdUSP, 2002.

MOORE, W. S. **The Effect of Submarine Groundwater Discharge on the Ocean**. *Annual Review of Marine Science*, v. 2, n. 1, p. 59–88, 2010.

MOORE, W. S.; SARMIENTO, J. L.; KEY, R. M. **Submarine groundwater discharge revealed by ^{228}Ra distribution in the upper Atlantic Ocean**. *Nature Geoscience*, v. 1, n. 5, p. 309–311, 2008.

MUEHE, D.; CARUSO JR., F. **Batimetria e algumas considerações sobre a evolução geológica da Lagoa da Conceição - Ilha de Santa Catarina**. *Geosul*, n. 7, p. 32–45, 1989.

MURDOCH, L. C.; KELLY, S. E. **Factors affecting the performance of conventional seepage meters**. *Water Resources Research*, v. 39, n. 6, p. 1–10, 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, 2010.

NEITSCH, S. L. et al. **Soil and water assessment tool theoretical documentation** Texas Water Resources Institute, 2002. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0011239709&partnerID=tZOtx3y1>>

NIENCHESKI, L. F. H. et al. **Submarine groundwater discharge of nutrients to the ocean along a coastal lagoon barrier, Southern Brazil**. *Marine Chemistry*, v. 106, n. 3–4, p. 546–561, 2007.

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**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis., 2012.

OLIVEIRA, J. et al. **Reconnaissance of submarine groundwater discharge at Ubatuba coast, Brazil, using ^{222}Rn as a natural tracer**. *Journal of Environmental Radioactivity*, v. 69, n. 1–2, p. 37–52, 2003.

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.

PORTO FILHO, É. **Sedimentometria e algumas considerações sobre a biogeoquímica dos sedimentos de fundo da Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina.** Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1993.

PRITCHARD, D. W. **What is an estuary: physical viewpoint.** American Association for the Advancement of Science, 1967.

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. et al. **Assessing land-ocean connectivity via submarine groundwater discharge (SGD) in the Ria Formosa Lagoon (Portugal): Combining radon measurements and stable isotope hydrology.** *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 20, n. 8, p. 3077–3098, 2016.

ROCHA, C. M. **Advecção de água subterrânea para as lagoas costeiras do Litoral Norte do RS, Brasil.** Dissertação (Mestrado em Oceanografia Química). Universidade Federal do Rio Grande, 2014.

ROCHA, C. M.; ANDRADE, C. F. F.; NIENCHESKI, L. F. H. **Descarga de água subterrânea para as lagoas costeiras do Litoral Norte do Rio Grande do Sul, Brasil.** *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, v. 19, n. 2, p. 76–84, 2015.

ROCHA, C. B. M. DA. **Implementação e uso do modelo Mike 21 ná análise de cenários hidrodinâmicos na Lagoa da Conceição - SC.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2007.

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.

ROSENBERRY, D. O.; MENHEER, M. A. **A System for Calibrating Seepage Meters Used to Measure Flow Between Ground Water and Surface Water.** U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2006-5053, p. 21, 2006a.

ROSENBERRY, D. O.; MENHEER, M. A. **A System for Calibrating Seepage Meters Used to Measure Flow Between Ground Water and**

Surface Water. Scientific Investigations Report 2005-5053, 2006b.

ROSENBERRY, D. O.; MORIN, R. H. **Use of an Electromagnetic Seepage Meter to Investigate Temporal Variability in Lake Seepage.** Groundwater, v. 42, n. 1, p. 68–77, 2004.

SANTOS, I. R. et al. **Tracing anthropogenically driven groundwater discharge into a coastal lagoon from southern Brazil.** Journal of Hydrology, v. 353, n. 3–4, p. 275–293, 2008.

SANTOS, V. **Disposição dos efluentes tratados em uma lagoa de evapoinfiltração.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2018.

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, 1989.

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

SIERRA DE LEDO, B.; SORIANO-SIERRA, E. **O Ecossistema da Lagoa da Conceição.** 1. ed. Florianópolis: NEMAR - CCB - UFSC, 1999.

SILVA, J. C. **Análise numérica da influência do Rio João Gualberto sobre a hidrodinâmica residual da Lagoa da Conceição – Florianópolis. SC.** Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis 2010.

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.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2013.

SILVA, V. E. C. **Análise espaço temporal do estado trófico de uma laguna costeira subtropical: Lagoa da Conceição, Florianópolis, Santa Catarina.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2016.

SOLDER, J. E. et al. **A Tube Seepage Meter for In Situ Measurement of Seepage Rate and Groundwater Sampling.** Groundwater, v. 54, n. 4, p. 588–595, 2016.

SOPHOCLEOUS, M. **Interactions between groundwater and surface water: The state of the science.** Hydrogeology Journal, v. 10, n. 1, p. 52–67, 2002.

SPEIDEL, D. H.; RUEDISILI, L. C.; AGNEW, A. F. **Perspectives on water: uses and abuses**. New York: Oxford University Press, 1988.

TANIGUCHI, M.; FUKUO, Y. **Continuous Measurements of Ground-Water Seepage Using an Automatic Seepage Meter**. *Ground Water*, v. 31, n. 4, p. 675–679, 1993.

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.

TEODORO, V. L. I. T. et al. **O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local**. *Revista Uniara*, v. 20, p. 137–156, 2007.

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

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4. ed. Porto Alegre, RS: UFRGS/ABRH, 2012.

VAINU, M. et al. **Groundwater seepage patterns in a closed-basin lake before and after an increase in groundwater pumping rates from an unconfined aquifer in the Kurtna Kame Field**. n. 3, p. 189–196, 2014.

WILL, R. **Aplicação do HEC-HMS como contribuição ao estudo dos aportes hídricos na Lagoa da Conceição gerados pelo Rio João Gualberto**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental). 2017.

WILSON, E. M. **Engineering Hydrology**. London: Macmillan Education UK, 1990.

WINTER, T. C. et al. **Ground water and surface water: A single resource**. U.S. Geological Survey Circular 1139, p. 79, 1998.

WINTER, T. C.; LABAUGH, J. W.; ROSENBERY, D. O. **The design and use of a hydraulic potentiometer in hydraulic of differences head direct measurement between and surface water groundwater**. *Limnology and Oceanography*, v. 33, n. 5, p. 1209–1214, 1988.

ZANATTA, L. C. **Riscos de poluição em lençol freático com infiltração de efluente tratado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2005.

ZANATTA, L. C.; RAMAGE, L. Avaliação da eficiência da infiltração de efluentes nas dunas do aquífero Campeche, Florianópolis, S.C. **XVIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**, p. 1–15, 2011.