



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Vinícius Adriano Bento Ferreira

**Caracterização dos fluxos de água subterrânea da bacia hidrográfica da Lagoa
da Conceição**

Florianópolis

2023

Vinícius Adriano Bento Ferreira

Caracterização dos fluxos de água subterrânea da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientadora: Priscilla Kern, Msc

Florianópolis

2023

Ficha catalográfica para trabalhos acadêmicos

Ferreira, Vinícius Adriano Bento
Caracterização dos fluxos de água subterrânea da bacia
hidrográfica da Lagoa da Conceição / Vinícius Adriano Bento
Ferreira ; orientadora, Priscilla Kern, 2023.
87 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade
Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Fluxo Subterrâneo. 4.
Lagoa da Conceição. I. Kern, Priscilla. II. Universidade Federal
de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e
Ambiental. III. Título.

Vinícius Adriano Bento Ferreira

**Caracterização dos fluxos de água subterrânea da bacia hidrográfica da Lagoa da
Conceição**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel e aprovado em sua forma final pelo Curso Engenharia Sanitária e Ambiental

Local Florianópolis, 8 de Dezembro de 2023.

Coordenação do Curso

Banca examinadora

Priscilla Kern, Msc.

Orientadora

Prof.(a) Patricia Kazue Uda, Dra

Instituição UFSC

Thiago de Liz Arcari, Msc.

Florianópolis, 2023

AGRADECIMENTOS

. Agradeço aos meus pais, Airton e Leticia, por serem as fontes do meu amor e inspiração. Vocês são minhas maiores referências. Maria, também te amo. Um agradecimento especial a toda a minha família, incluindo avós, tios e primos, por estarem ao meu lado desde sempre.

Agradeço à minha namorada, Lara, pela parceria e companheirismo nos momentos difíceis. Magda e Marcelo, obrigado por me acolherem como parte da família.

Um caloroso agradecimento aos meus amigos de colégio, Gianluca, Ricardo, Henrique, André e Pedro, pela amizade de anos. Aos amigos da faculdade, Gui, Marcelo, Flavio, Eduardo, Vini, pela companhia durante o curso.

Obrigado, Priscilla, por desde o terceiro semestre me ensinar tanto e aceitar ser minha orientadora. Expresso minha gratidão à professora Patrícia pelos ensinamentos desde o início da graduação e por aceitar fazer parte da banca. Agradeço também ao Thiago Arcari por contribuir com suas avaliações ao trabalho.

Agradeço a todos os integrantes e bolsistas do Lahimar pelo suporte e disponibilidade na pesquisa.

Não poderia deixar de mencionar minha gratidão à UFSC e aos professores pela oportunidade de estudar e me desenvolver no curso de engenharia sanitária e ambiental. Cada um de vocês desempenhou um papel crucial nesta jornada, e por isso sou imensamente grato.

RESUMO

As lagunas costeiras, ecossistemas marinhos essenciais, desempenham papéis cruciais na zona costeira, conectando-se ao oceano por canais. Apesar disso, os fluxos de água subterrânea nessas áreas foram negligenciados devido à invisibilidade das descargas de águas subterrâneas (DAS). O estudo se concentra na Lagoa da Conceição, uma laguna costeira em Santa Catarina, Brasil, de significativa importância ecológica, paisagística e econômica. O objetivo principal deste trabalho é caracterizar os fluxos de água subterrânea da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição. Para tal, é necessário avaliar as interações entre águas subterrâneas e superficiais na laguna em diferentes regiões, utilizando seepage meters; relacionar variações no nível piezométrico na bacia hidrológica com as DAS na laguna e, por fim investigar a correlação entre fluxos de água subterrânea e o gradiente hidráulico formado pela diferença dos níveis lagunar e oceânico. Os dados de chuva, nível externo (oceano), nível interno, DAS e carga hidráulica, provenientes de diversas fontes, sofreram análises estatísticas, realizadas a fim de explorar correlações e caracterizar fluxos na bacia hidrográfica. O valor médio do nível externo encontrado foi 55 ± 14 cm, o nível interno apresentou média de 90 ± 11 cm e a média do gradiente entre laguna e oceano foi de 35 ± 15 cm. Os seepage meters, embora mais trabalhosos que os piezômetros, mostraram eficácia. A média de DAS para o LIC foi 0.7 ± 1.5 cm, PDP 0.2 ± 1.1 cm, REN 1.3 ± 3.2 cm, e BDC -4.1 ± 5.1 cm. A correlação das DAS com o fluxo calculado por meio dos níveis dos piezômetros e a condutividade hidráulica corroborou os resultados dos piezômetros, permitindo uma expansão de seu uso. As médias para carga hidráulica dos piezômetros foram, LIC 111 ± 17 cm, KAI 123 ± 15 cm, BLU 317 ± 12 cm, CAM 91 ± 14 cm, REN 96 ± 10 cm, ASFZ 200 ± 6 cm e PDP 93 ± 9 cm. Observou-se que o fluxo predominante na bacia hidrográfica é do subsistema sul para o central, seguindo para o oceano. Na área das Rendeiras, observa-se um fluxo positivo pontual devido à influência da Lagoa de evapoinfiltração (LEI). Este estudo destaca a importância das descargas subterrâneas na dinâmica da Lagoa da Conceição, contribuindo para a compreensão dos processos hidrológicos. A pesquisa representa uma continuidade à linha de pesquisa desenvolvida pelo Laboratório de Hidráulica Marítima (LaHiMar) e destaca a necessidade de considerar a interação entre águas subterrâneas e superficiais na gestão e preservação desses ambientes.

Palavras-chave: Lagunas costeiras, descargas de águas subterrâneas (DAS), interação entre águas subterrâneas e superficiais, seepage meters, mini piezômetros, gradiente hidráulico.

ABSTRACT

Coastal lagoons, essential marine ecosystems, play crucial roles in the coastal zone by connecting to the ocean through channels. Despite this, groundwater flows in these areas have been neglected due to the invisibility of submarine groundwater discharges (SGD). The study focuses on Lagoa da Conceição, a coastal lagoon in Santa Catarina, Brazil, of significant ecological, scenic, and economic importance. The main objective of this work is to characterize groundwater flows in the watershed of Lagoa da Conceição. To achieve this, it is necessary to assess the interactions between groundwater and surface waters in the lagoon in different regions, using seepage meters; relate variations in the piezometric level in the watershed to SGD in the lagoon, and finally investigate the correlation between groundwater flows and the hydraulic gradient formed by the difference between lagoon and ocean levels. Data from various sources, including rainfall, external level (ocean), internal level, SGD, and hydraulic head, underwent statistical analyses to explore correlations and characterize flows in the watershed. The average external level was found to be 55 ± 14 cm, the internal level had an average of 90 ± 11 cm, and the average gradient between lagoon and ocean was 35 ± 15 cm. Seepage meters, although more laborious than piezometers, proved effective. The average SGD for LIC was 0.7 ± 1.5 cm, PDP 0.2 ± 1.1 cm, REN 1.3 ± 3.2 cm, and BDC -4.1 ± 5.1 cm. The correlation of SGD with the flow calculated through piezometer levels and hydraulic conductivity supported the results of piezometers, allowing for an expansion of their use. The average hydraulic head for piezometers was LIC 111 ± 17 cm, KAI 123 ± 15 cm, BLU 317 ± 12 cm, CAM 91 ± 14 cm, REN 96 ± 10 cm, ASFZ 200 ± 6 cm, and PDP 93 ± 9 cm. It was observed that the predominant flow in the watershed is from the southern subsystem to the central, heading towards the ocean. In the Rendeiras area, a punctual positive flow is observed due to the influence of the Lagoa de Evapoinfiltração (LEI). This study highlights the importance of groundwater discharges in the dynamics of Lagoa da Conceição, contributing to the understanding of hydrological processes. The research represents a continuation of the research line developed by the Maritime Hydraulics Laboratory (LaHiMar) and emphasizes the need to consider the interaction between groundwater and surface waters in the management and preservation of these environments.

Keywords: Coastal lagoons, groundwater discharge (GWD), interaction between groundwater and surface water, seepage meters, mini piezometers, hydraulic gradient.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de tipos de lagunas costeiras.....	18
Figura 2 - Ciclo hidrológico simplificado em zonas costeiras.....	21
Figura 3 - Esquema de Bacias Hidrogeológicas.....	22
Figura 4 - Tipos de aquífero.....	23
Figura 5 - Zona de transição água doce-salgada em um aquífero idealizado	26
Figura 6 - Métodos físicos para medição de DAS.....	28
Figura 7 - Esquema funcionamento <i>Seepage meter</i>	29
Figura 8 - Esquema de funcionamento dos minis piezômetros.....	30
Figura 9 - Fluxograma Metodológico.....	32
Figura 10 - Mapa de localização da área de estudo.....	33
Figura 11 - URHs Lagoa da Conceição.....	34
Figura 12 - Precipitação média mensal de Florianópolis de 2003-2022.....	35
Figura 13 - Mapa de unidades hidrogeológicas.....	36
Figura 14 - Tipos de solo da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição....	37
Figura 15 - Batimetria da Lagoa da Conceição.....	38
Figura 16 - Localização Diver, Marégrafo e Estação Meteorológica.....	39
Figura 17 - Localização Piezômetros no subsistema sul.....	40
Figura 18 - Localização Seepages e piezômetros.....	41
Figura 19 - Esquema sistema RTK.....	42
Figura 20 - Tipo de dado disponível pela data.....	43
Figura 21 - Esquema posicionamento Diver LaHiMar.....	44
Figura 22 - Esquema do tanque de fluxo controlado para calibração do <i>Seepage meter</i>	45
Figura 23 - Esquema de instalação <i>Seepage meter</i>	46
Figura 24 - Sentido do fluxo no <i>Seepage meter</i>	47
Figura 25 - Campanhas para monitoramento de DAS.....	47
Figura 26 - Materiais utilizados na confecção do mini piezômetro.....	49
Figura 27 - Instalação mini piezômetros.....	50
Figura 28 - Campanhas medição mini piezômetros.....	51
Figura 29 - Equipamento pio.....	51
Figura 30 - Esquema para cálculo de Carga Hidráulica.....	52

Figura 31 - Estrutura e informações contidas em um Boxplot	53
Figura 32 - Histogramas e <i>Normal Probability Plot</i>	54
Figura 33 - Precipitação acumulada por dia, Níveis Interno e Externo e Gradiente Hidráulico.....	57
Figura 34 - Gráfico boxplot das DAS por seção de monitoramento.....	60
Figura 35 - Gráfico boxplot das DAS por seepage instalado por seção de monitoramento	61
Figura 36 - Cargas hidráulicas dos Piezômetros por Data	65
Figura 37 - DAS e Carga Hidráulica LIC, Níveis Interno e Externo e Gradiente Hidráulico	67
Figura 38 - DAS e Carga Hidráulica PDP, Níveis Interno e Externo e Gradiente Hidráulico	68
Figura 39 - DAS e Carga Hidráulica REN, Níveis Interno e Externo e Gradiente Hidráulico	69
Figura 40 - DAS BDC, Níveis Interno e Externo e Gradiente Hidráulico.....	70
Figura 41 - Carga Hidráulica KAI e Níveis Interno e Externo, Gradiente Hidráulico	71
Figura 42 - Histograma e Normal Probability Plot para DAS por local de monitoramento	73
Figura 43 - Histograma e Normal Probability Plot para Piezômetros por local de monitoramento	74
Figura 44 - Histograma e Normal Probability Plot para Níveis Internos e Nível Externo e Gradiente Hidráulico	75
Figura 45 - Gradiente Hidráulico (cm) por Carga Hidráulica (cm) para Piezômetros PDP, REN, KAI e LIC	78
Figura 46 - DAS para diferentes faixas de Gradiente Hidráulico	80
Figura 47 - Boxplots DAS para diferentes faixas de Gradiente Hidráulico....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Mini piezômetros e suas coordenadas	49
Tabela 2 - Estatísticas básicas para Níveis Interno e Externo e Gradiente Hidráulico	56
Tabela 3 - Estatísticas Básicas das DAS (cm/dia) por Local de Piezômetro	58
Tabela 4 - Estatísticas Básicas das Piezômetros por Local	63
Tabela 5 - Coeficientes de correlação. Diagonal superior: coeficiente de correlação de Pearson (correlação paramétrica). Diagonal inferior: coeficiente de correlação de Spearman R (correlação não-paramétrica). Em vermelho estão indicadas as correlações que são significativas ($p < 0,05$).....	77
Tabela 6 - Faixas de Gradiente Hidráulico: Baixo, Médio e Alto.....	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Asub	Águas Subterrâneas
Asup	Águas Superficiais)
ASFZ	Assezfaz (seção)
BLU	Beco da Lua (seção)
BDC	Beco dos Coroas
CAM	Camping do Rio Vermelho (seção)
CASAN	Companhia Catarinense de Águas e Saneamento
CH	Carga Hidráulica
DAS	Descargas de Águas Subterrâneas
DN	Diâmetro Nominal
EPAGRI	Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural
GPS	Global Positioning System
K	Condutividade Hidráulica
KAI	Servidão Kairos (seção)
LAHIMAR	Laboratório de Hidráulica Marítima (UFSC)
LEI	Lagoa de Evapoinfiltração
LIC	Lagoa late Clube (seção)
NA	Nível d'Água
PDP	Ponto dos Pombos (seção)
PDA	Ponta das Almas (seção)
REN	Rendeiras (seção)
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
URH	Unidade de Resposta Hidrológica
UTM	Universal Transversa de Mercator

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	OBJETIVO GERAL	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	LAGUNAS COSTEIRAS	17
3.2	INTERAÇÃO DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS EM REGIÕES COSTEIRAS	19
3.2.1	Ciclo Hidrológico em Lagunas Costeiras	19
3.2.2	Bacia Hidrogeológica	21
3.2.3	Aquíferos costeiros	22
3.2.4	Fluxo de água subterrânea na zona costeira	24
3.2.5	Interação entre Águas Superficiais e Águas subterrâneas	25
3.2.6	Métodos de quantificação de DAS	27
3.2.6.1	<i>Seepage meter</i>	28
3.2.6.2	<i>Piezômetros e mini piezômetros</i>	29
4	METODOLOGIA	31
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	32
4.1.1	Unidades de Resposta Hidrológica (URHs)	33
4.1.2	Climatologia Regional	34
4.1.3	Geologia, Hidrogeologia e Pedologia	35
4.1.4	Batimetria	37
4.1.5	Localização dos Equipamentos	38
4.2	LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO DOS EQUIPAMENTOS DE MONITORAMENTO	41
4.3	DADOS UTILIZADOS	42
4.3.1	Chuva, nível externo e níveis interno	43
4.3.2	DAS <i>Seepage meters</i>	44
4.3.3	Nível Piezômetro	48
4.4	ANÁLISE DOS DADOS	52
4.4.1	Gráficos Bloxpot	52

4.4.2	Coeficientes de correlação	53
5	RESULTADOS	56
5.1	CHUVA, NÍVEIS E GRADIENTE HIDRÁULICO.....	56
5.2	DESCARGAS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS (DAS) EM DIFERENTES PONTOS DA LAGOA DA CONCEIÇÃO E NÍVEL PIEZOMÉTRICO	57
5.3	RELAÇÃO DA VARIAÇÃO DO NÍVEL PIEZOMÉTRICO COM AS DAS NA LAGUNA.....	65
5.4	CORRELAÇÃO ENTRE A VARIAÇÃO DOS FLUXOS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA COM O GRADIENTE HIDRÁULICO	71
6	CONCLUSÕES	82
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

1 INTRODUÇÃO

As lagunas costeiras são ecossistemas marinhos rasos que desempenham diversas funções essenciais, conectando-se ao oceano por um ou mais canais (KJERFVE; BARUCH, 1994). Elas exercem um papel crucial no transporte e deposição de matéria na zona costeira (KJERFVE, 1986), além de fornecerem serviços ecossistêmicos e oportunidades econômicas, como agricultura, piscicultura e turismo (KENNISH; PAERL, 2010).

As descargas de águas subterrâneas desempenham um papel crucial na preservação ou recuperação de ecossistemas valiosos em corpos d'água superficiais e na transição entre águas subterrâneas e superficiais subjacentes (DUQUE; ROSENBERRY, 2022). Os fluxos de água subterrânea foram por muitos anos negligenciados em ambientes como as lagunas costeiras, conforme destacado por Lewandowski et al. (2013), isso se deve, em parte, à natureza invisível das descargas de águas subterrâneas (DAS), tornando sua mensuração desafiadora devido à falta de métodos simples e eficazes. A complexidade em quantificar a quantidade de DAS também é influenciada pela desuniformidade das descargas, exigindo múltiplas medidas, e pela difusão das descargas em uma extensa área. A variabilidade espacial e temporal do fluxo de água subterrânea é afetada por diversos fatores, incluindo forças terrestres e marítimas, como precipitação, características físicas dos aquíferos e variação da maré. Esses elementos exercem influência nas cargas hidráulicas e na velocidade do fluxo, contribuindo para a complexidade do desafio de compreender e quantificar as descargas subterrâneas (KERN; FRANCO; UDA, 2022).

A Lagoa da Conceição, com cerca de 20 km², é uma laguna costeira subtropical na Ilha de Santa Catarina, sul do Brasil, sendo vital para atividades locais e turísticas, como pesca, transporte, recreação e esportes. A ruptura de uma lagoa de evapoinfiltração, em janeiro de 2021 despejou 79.000 m³ de efluente tratado provenientes da Estação de Tratamento de Esgotos do bairro na laguna. O evento causou danos significativos ao ecossistema e dando destaque a necessidade de monitoramento ambiental na laguna (DE LIZ ARCARI et al., 2023) e, também, das descargas subterrâneas, que, neste caso, também carregam uma alta carga de nutrientes. Levando em conta os danos causados pelas descargas subterrâneas em cenários de contaminação, estudos hidrológicos são necessários para compreender a hidrodinâmica e garantir a preservação sustentável desse ambiente (KERN, 2019).

Diversos trabalhos e pesquisas foram desenvolvidos na bacia hidrológica da Lagoa da Conceição, levantando e avaliando dados contribuindo para melhor compreensão do funcionamento hidrológico na laguna. Arcari (2018), Kern (2019), Ikezawa (2019) e Tavares et al.(2023) avaliaram aportes de descargas de águas subterrâneas a partir do monitoramento com equipamentos de baixo custo, como piezômetros e seepages, calibrados por (KERN et al., 2023). Além disso foram estudados a hidrodinâmica da laguna (SILVA, 2021), relação entre os níveis oceânico e lagunar (HESS et al., 2023) e condutividade hidráulica (SILVA, 2022).

Nesse contexto, essa pesquisa pretende avaliar as interações entre águas subterrâneas e superficiais em diferentes pontos da laguna por meio de *seepage meters* e mini piezômetros, relacionar a variação do nível piezométrico na bacia hidrológica da Lagoa da Conceição com as DAS na laguna e investigar a correlação entre a variação dos fluxos de água subterrânea com o gradiente hidráulico formado pela diferença dos níveis lagunar e oceânico, dando continuidade dando continuidade à linha de pesquisa desenvolvida pelo Laboratório de Hidráulica Marítima (LaHiMar).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Caracterizar os fluxos de água subterrânea da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar as interações entre águas subterrâneas e superficiais em diferentes pontos da laguna por meio de *seepage meters* e mini piezômetros;
- Relacionar a variação do nível piezométrico na bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição com as DAS na laguna.
- Investigar a correlação entre a variação dos fluxos de água subterrânea com o gradiente hidráulico formado pela diferença dos níveis lagunar e oceânico.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 LAGUNAS COSTEIRAS

As lagunas costeiras são corpos de água rasos que se estendem paralelamente à linha costeira, separadas do oceano por barreiras naturais, como restingas, recifes ou bancos de areia (KJERFVE, 1994). As barreiras têm o poder de interromper a livre circulação de água entre a bacia lagunar e o oceano, ocasionando um amortecimento dos efeitos das ondas, dos ventos e das correntes (KENNISH; PAERL, 2010). Essas lagunas mantêm uma ou mais conexões com o oceano, que pode ser intermitente, ou constante, dependendo da extensão das barreiras.

Segundo Kennish e Pearl (2010), as lagunas costeiras são, normalmente, mais longas do que largas, ocupando 13% das áreas costeiras do planeta, presentes em todos os continentes com exceção da Antártica, sendo mais comuns nas costas da África e da América do Norte. Na América do Sul, esses ecossistemas contribuem significativamente para a extensão costeira, representando aproximadamente 12,2% da costa (BARNES, 1980). A maior concentração de lagunas costeiras encontra-se nas costas atlânticas e do Golfo dos Estados Unidos, cobrindo aproximadamente 2800 km de litoral. Esses ecossistemas variam amplamente em tamanho, indo desde pequenas áreas até grandes sistemas como a Lagoa dos Patos, no Brasil, com mais de 10.000 km² (BIRD, 1994).

Lagunas costeiras geralmente têm profundidades médias inferiores a 2 metros, embora áreas mais profundas possam ser encontradas em canais de entrada ou reentrâncias isoladas. A natureza rasa dessas lagunas torna-as sensíveis às mudanças das marés e às condições climáticas locais. Essa característica impacta diretamente nos processos físicos e ecológicos que ocorrem nessas áreas úmidas costeiras (KENNISH; PAERL, 2010).

Kjerfve (1986, 1994) classificou as lagunas costeiras em três tipos com base na forma como ocorre a troca de água com o oceano:

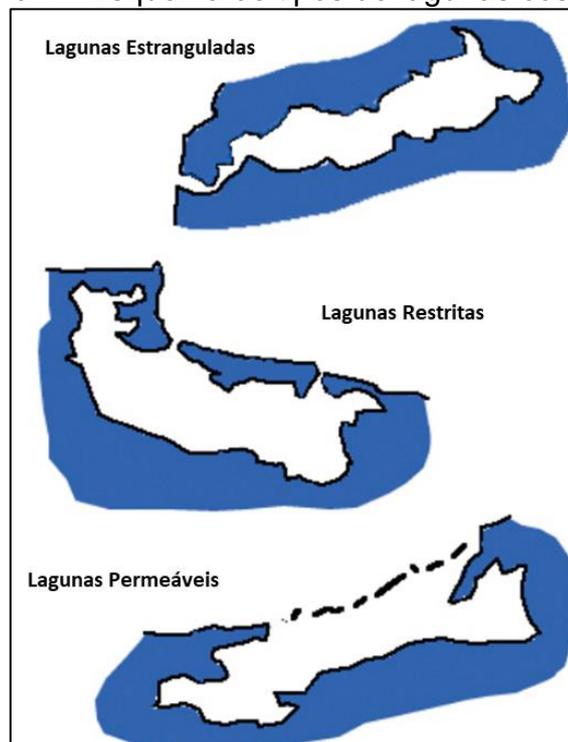
- Lagunas Estranguladas (Choked Lagoons): Estas lagunas geralmente possuem um canal estreito em direção ao mar e se formam em áreas onde a energia das ondas no mar é elevada. O estreito canal desempenha o papel de um "filtro dinâmico", amplificando em grande medida as correntes de maré e as flutuações no nível da água dentro da lagoa (BIER, 2018). Em regiões áridas, as taxas elevadas de

evaporação e a reduzida entrada de maré resultam em lagunas temporariamente ou permanentemente hipersalinas. No Brasil, Lagoa da Conceição e Lagoa dos Patos são exemplos de Lagunas estranguladas.

- **Lagunas Restritas (Restricted Lagoons):** As lagunas restritas possuem mais de um canal em direção ao mar, "restringindo" temporariamente a troca de água, embora, na realidade, haja uma boa troca de água e um transporte líquido em direção ao mar. O vento desempenha um papel importante nas lagunas restritas, pois as correntes superficiais podem se desenvolver devido ao vento, resultando na mistura da água. O tempo de renovação da água é significativamente menor do que nas lagunas estranguladas. Um exemplo de laguna restrita é a Baía de Chincoteague, nos Estados Unidos.

- **Lagunas Permeáveis (Leaky Lagoons):** As lagunas permeáveis possuem canais amplos em direção ao mar, permitindo uma troca de água desimpedida e correntes de água rápidas. Como afirmado por Kjerfve (1994), as "lagunas permeáveis ocupam o extremo oposto do espectro em relação às lagunas estranguladas". Um exemplo de laguna permeável é o Mississippi Sound, nos Estados Unidos.

Figura 1 - Esquema de tipos de lagunas costeiras



Fonte: Adaptado de Kjerfve (1986)

Nos ecossistemas costeiros, as lagunas costeiras desempenham um papel versátil e de grande relevância. Elas oferecem uma variedade de habitats essenciais para a reprodução, alimentação e abrigo de uma biodiversidade rica de organismos estuarinos, marinhos e terrestres. Além de seu valor ecológico, essas áreas também são cruciais para atividades econômicas humanas, como pesca, aquicultura, geração de energia elétrica, biotecnologia, transporte e navegação, contribuindo significativamente para as economias das regiões costeiras. As lagunas também desempenham funções importantes na modificação física e química do ambiente, incluindo a remoção de nutrientes e contaminantes, e influenciam positivamente a qualidade ambiental das águas costeiras. Adicionalmente, servem como barreiras naturais, protegendo áreas de bacias hidrográficas costeiras contra impactos adversos de eventos climáticos extremos e erosão costeira (KENNISH; PAERL, 2010).

Por serem ambientes delicados, as lagunas costeiras sofrem com os impactos das atividades humanas, que incluem urbanização descontrolada, poluição de fontes terrestres e aquáticas, dragagem e desenvolvimento costeiro. Para proteger a integridade desses ecossistemas valiosos, é essencial adotar estratégias de gestão abrangentes. Isso envolve um monitoramento contínuo para identificar e mitigar os impactos, a aplicação de regulamentações mais rigorosas para controlar a entrada de nutrientes e poluentes, a criação de reservas estuarinas para minimizar as pressões humanas e a promoção da conscientização pública sobre a importância da preservação das lagunas costeiras. (KENNISH; PAERL, 2010).

3.2 INTERAÇÃO DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS EM REGIÕES COSTEIRAS

3.2.1 Ciclo Hidrológico em Lagunas Costeiras

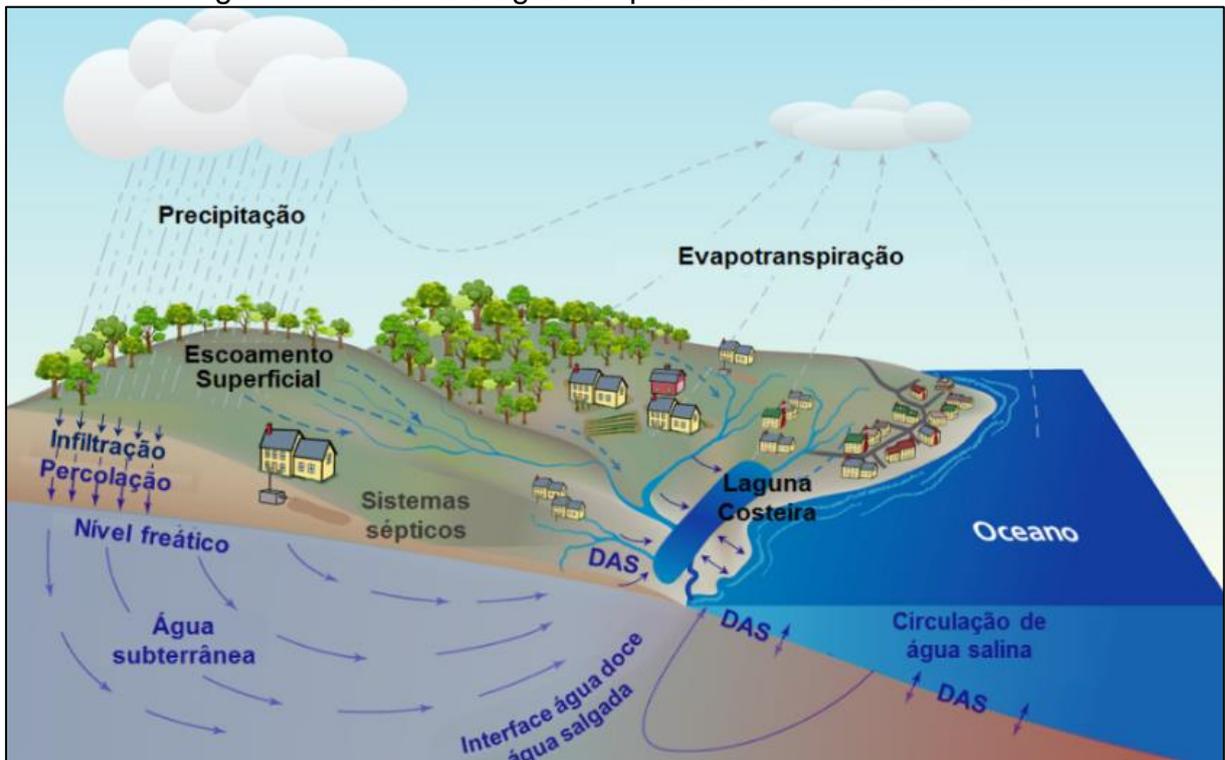
O ciclo hidrológico em lagunas costeiras é um fenômeno complexo, influenciado por múltiplos fatores e processos interligados. Este ciclo abrange diversos componentes que desempenham funções cruciais (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988). O ciclo tem início com a precipitação pluvial, que fornece água doce para as lagunas costeiras. A evaporação, por outro lado, representa uma perda significativa de água para a atmosfera e é influenciada por fatores climáticos locais, como

temperatura e umidade. Parte da precipitação infiltra no solo, contribuindo para a formação e recarga dos aquíferos, essenciais para a disponibilidade de água doce na região, especialmente durante períodos de escassez. A água infiltrada também alimenta nascentes próximas às lagunas, desempenhando um papel vital na manutenção do equilíbrio hidrológico. Quando a capacidade de infiltração do solo é excedida o escoamento superficial ocorre, resultando no fluxo de água através dos sistemas fluviais da bacia hidrográfica em direção às lagunas costeiras. Esse escoamento transporta sedimentos e nutrientes que podem afetar a qualidade da água na laguna (KERN; FRANCO; UDA, 2022).

As águas subterrâneas, que descarregam nas águas costeiras (oceanos ou lagunas), conhecidas como descargas de águas subterrâneas (DAS), desempenham um papel essencial no ciclo. Essas DAS podem apresentar variações na salinidade devido à mistura entre a água doce infiltrada da chuva e a água salgada do oceano. As interações e a magnitude das DAS em ambientes lacustres dependem da geologia local, área da bacia e dos gradientes hidráulicos, incluindo o gradiente entre a linha freática na bacia e o nível da laguna, bem como o gradiente entre o nível oceânico e o nível da laguna (KERN, 2019).

Nas bacias hidrográficas de lagunas costeiras, é crucial realizar uma análise de escoamento em uma perspectiva regional. Os cursos de água que percorrem a bacia atuam como canais naturais de captação das águas que resultam da precipitação, convergindo-as para um único ponto de deságue, que é a laguna. Paralelamente, as águas provenientes da precipitação que se infiltram na bacia hidrográfica contribuem para a formação dos escoamentos subterrâneos, que também seguem em direção à laguna (ARCARI, 2018). A Figura 2 apresenta o ciclo hidrológico, de forma simplificada, em zonas costeiras

Figura 2 - Ciclo hidrológico simplificado em zonas costeiras



Fonte: (KERN; FRANCO; UDA, 2022) modificado de (HEATH, 1983)

3.2.2 Bacia Hidrogeológica

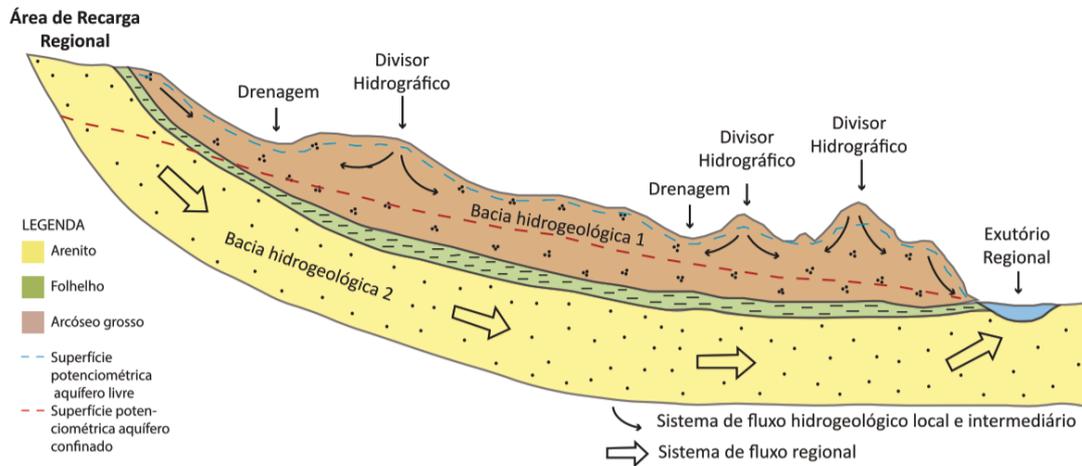
Tiedman et al. (1998) definiu bacias hidrogeológicas como os contornos e caminhos percorridos pelas águas subterrâneas nos aquíferos, considerando tanto as zonas de recarga quanto as zonas de exultório. Apesar da definição apresentada, o conceito de bacia hidrogeológica não é tão bem encontrado e definido na literatura como o conceito de bacias hidrográficas. Isso acontece devido a maior facilidade de delimitação das bacias hidrográficas, a partir de mapas e imagens de satélite. Já as bacias hidrogeológicas são de difícil delimitação, portanto se torna mais difícil defini-las (GALVÃO; CAMPOS, 2023a).

As bacias hidrogeológicas e hidrográficas podem compartilhar os mesmos limites ou não. Quando os limites são compartilhados podem ser chamados de limites simétricos, caso contrário são chamados de limites assimétricos. A assimetria pode ser causada por diversos fatores como quebras pronunciadas no relevo, existências de falhas ou dobras e presença de heterogeneidades no meio subterrâneo (GALVÃO; CAMPOS, 2023b).

A Figura 3 apresenta através de um esquema, o exemplo em que uma bacia hidrográfica compartilha limites com duas bacias hidrogeológicas distintas, dispostas

lateralmente ou verticalmente. O oposto pode acontecer, também, onde uma bacia hidrogeológica é sobreposta por duas bacias hidrográficas (GALVÃO; CAMPOS, 2023a).

Figura 3 - Esquema de Bacias Hidrogeológicas



Fonte:(GALVÃO; CAMPOS, 2023a)

Arraes e Campos (2007) propuseram as seguintes metodologias para a delimitação de bacias hidrogeológicas: estudos hidrológicos, estudos potenciométricos, ensaios de traçador, geoquímica isotópica, análise de lineamentos e estudos geofísicos. Deve-se, ainda, levar em conta os fluxos hidrogeológicos e o regime hídrico da rede de drenagem superficial. Arraes e Campos (2007) alertam que os divisores de bacias hidrogeológicas podem mudar com o tempo. Isso acontece por conta da formação de cones de depressão regionais, que podem baixar a superfície potenciométrica, de forma a inverter o fluxo, mudando o limite de duas bacias.

Segundo Galvão e Campos (2023a) o conhecimento dos contornos das bacias hidrogeológicas, assim como a relação com as bacias hidrográficas sobrepostas tem fundamental importância em diversos estudos e aplicações, como: aquíferos transfronteiriços, gestão integrada de recursos hídricos, remediação de aquíferos contaminados e estudos de simulação numérica de fluxo.

3.2.3 Aquíferos costeiros

As formações geológicas saturadas, compostas por rochas permeáveis e contendo uma quantidade substancial de água adequada para abastecimento, são denominadas aquíferos (BEDIENT; RIFAI; NEWELL, 1994). Dentro dessa

classificação, há dois tipos principais de aquíferos: os aquíferos livres e os aquíferos confinados.

Os aquíferos livres são caracterizados por serem formações geológicas permeáveis, geralmente situadas na superfície da Terra, que se estendem por toda a sua extensão e têm sua base delimitada por camadas impermeáveis. A superfície superior da zona saturada nos aquíferos livres está em equilíbrio com a pressão atmosférica e se comunica livremente com ela. Esses aquíferos são diretamente recarregados pela água da chuva e são os mais comuns e explorados pela população. No entanto, também são suscetíveis a problemas de contaminação (BORGHETTI; BORGHETTI; ROSA FILHO, 2004).

Por outro lado, os aquíferos confinados são caracterizados por formações geológicas permeáveis, mas são limitados por camadas impermeáveis tanto acima quanto abaixo. Além disso, eles estão sob pressão superior à atmosférica (FEITOSA et al., 2008). A pressão nos aquíferos confinados é exercida pelas camadas impermeáveis que os cercam, comprimindo a água no interior do aquífero. A Figura 4 apresenta um esquema com o posicionamento dos tipos de aquífero.

Figura 4 - Tipos de aquífero



Fonte: (ABAS, 2023)

Os aquíferos costeiros são caracterizados por sua proximidade ao mar ou lagoas costeiras, o que resulta em uma influência significativa das águas salgadas sobre suas características. Nesses ambientes, observa-se o encontro entre o fluxo subterrâneo de água doce, que se move do continente em direção ao mar, e o fluxo

subterrâneo de água salgada, que avança no aquífero a partir do oceano. Esse intercâmbio entre água doce e água salgada desempenha um papel essencial na definição das propriedades e dinâmicas desses aquíferos costeiros (FERREIRA, 2012).

Aquíferos costeiros desempenham um papel crucial na conexão entre o oceano e os recursos de águas subterrâneas. A interação entre a água oceânica e as águas subterrâneas continentais resulta em comportamentos complexos de elementos dissolvidos, que são liberados no oceano. Essas interações impactam a qualidade da água costeira e os ecossistemas, devido à descarga de águas subterrâneas e seus elementos químicos associados no oceano costeiro. Essa dinâmica é relevante para compreender e preservar os sistemas costeiros. (DE SOUZA et al., 2021)

3.2.4 Fluxo de água subterrânea na zona costeira

O fluxo de águas subterrâneas pode ocorrer em duas zonas diferentes, sendo elas: Zona insaturada, que ocorre imediatamente após a superfície do solo, onde os poros estão parcialmente preenchidos por gases e água. E zona saturada que se encontra logo abaixo da zona insaturada, onde os poros estão totalmente preenchidos de água. A recarga da zona saturada está relacionada com a infiltração e percolação da água presente na zona insaturada (ARCARI, 2018).

O movimento das águas subterrâneas ocorre devido à diferença de cargas hidráulicas, fluindo do ponto com maior carga hidráulica para o ponto com menor carga hidráulica. A carga hidráulica compreende a energia cinética, a energia potencial gravitacional e a energia de pressão. Em águas subterrâneas, as velocidades são negligenciáveis, tornando a energia cinética insignificante. Portanto, a carga hidráulica é a soma da carga de elevação (altitude ou cota do ponto) e da carga de pressão hidrostática (KERN, 2019). Em aquíferos não confinados, onde a pressão hidráulica na superfície é igual à pressão atmosférica, a carga hidráulica efetiva se equivale ao nível da superfície piezométrica, mensurado por meio de poços ou piezômetros (HEATH, 1983).

O gradiente hidráulico é a força regente das descargas subterrâneas, que corresponde a variação das cargas hidráulicas da região montanhosa das bacias hidrográficas até o local em que acontece a descarga das águas superficiais na costa (KERN; FRANCO; UDA, 2022).

O fluxo de água em um aquífero é governado pela Equação (4), desenvolvida por Darcy em 1856. Darcy determinou que a vazão específica por unidade de área (q) através de um meio poroso é proporcional à diferença de carga de água (dh) e inversamente proporcional à distância entre dois pontos (dl). Além disso, essa quantidade de fluxo é diretamente proporcional à condutividade hidráulica (K), que representa a capacidade do meio poroso para transmitir o fluido. A condutividade hidráulica é influenciada pelas características do meio (porosidade, tamanho, distribuição, forma e arranjo das partículas) e pelas propriedades do fluido (viscosidade e massa específica) (FETTER, 2000).

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

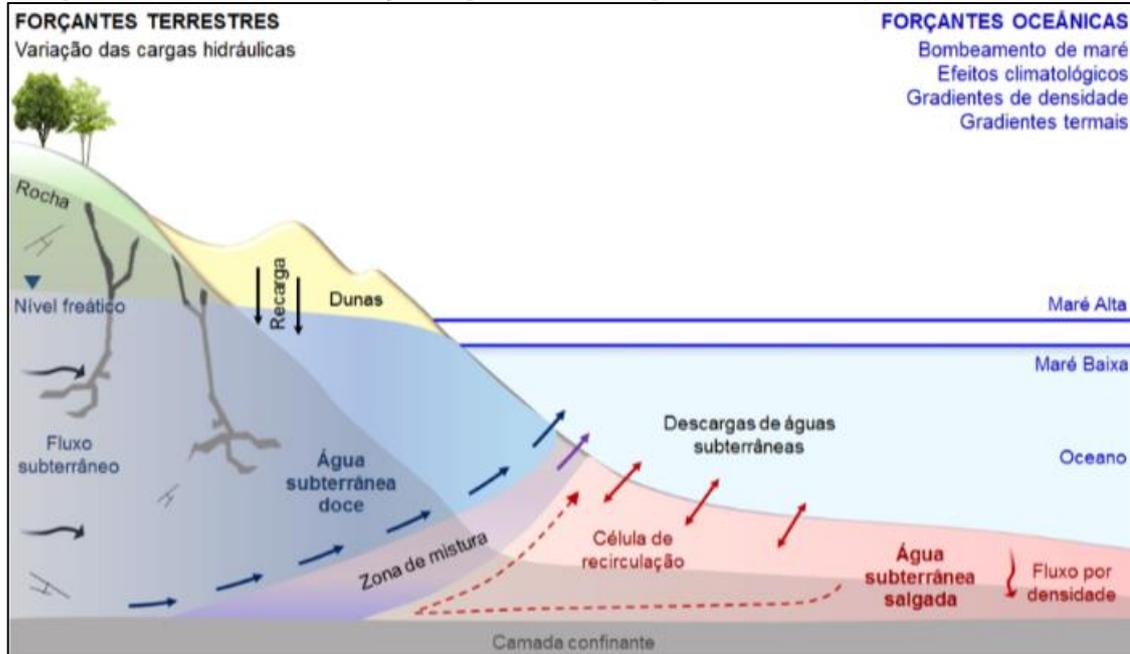
3.2.5 Interação entre Águas Superficiais e Águas subterrâneas

As trocas e interações entre águas subterrâneas e superficiais são intrinsicamente governadas pelos fatores geomorfológicos, as propriedades hidrogeológicas do aquífero, as condições climáticas e, quando se trata de áreas costeiras, da dinâmica hídrica local (SOPHOCLEOUS, 2002).

Dentro dos aquíferos costeiros as zonas de água doce e água salgada são separadas por uma zona de transição, onde ocorre a mistura entre elas. A interação que acontece na zona de mistura é produzida pelos processos de dispersão e difusão molecular, que ocorrem devido as variações espaciais na estrutura geológica e nas propriedades hidráulicas do aquífero. Flutuações diárias nas fases de maré, posição do nível do mar a longo prazo e as variações nas taxas de recarga de água subterrânea representam forças dinâmicas que operam em uma gama de escalas de tempo, regendo a movimentação na zona de transição (BARLOW, 2003; KERN; FRANCO; UDA, 2022).

Tais forças dinâmicas, fazem com que as zonas de água salgada e doce se movimentem, hora em direção ao mar, hora em direção a terra, como demonstrado na Figura 5. Arcari (2018) descreveu que se o nível de água no corpo hídrico for maior do que o nível piezométrico a água tende a infiltrar no sentido superficial para o subterrâneo. Por outro lado, se o nível piezométrico do aquífero for maior que o nível de água superficial, o aquífero descarrega no corpo superficial.

Figura 5 - Zona de transição água doce-salgada em um aquífero idealizado



Fonte: (KERN; FRANCO; UDA, 2022)

Na zona de mistura pode ocorrer, também, a penetração de água do oceano na linha de costa adentro. Tal fenômeno, é também conhecido como intrusão salina, resultado de uma exploração desordenada e indiscriminada dos aquíferos costeiros. Observando a importância e a complexidade dos processos que ocorrem nos aquíferos, pesquisadores do mundo inteiro, buscam entender o sistema de fluxo e os processos de transporte que acontecem nesses ambientes. As pesquisas têm como finalidade melhorar a segurança na exploração dos aquíferos e evitar a maior contaminação desses sistemas costeiros (KERN; FRANCO; UDA, 2022).

Dentre as pesquisas sobre interação das águas subterrâneas e superficiais é importante destacar o esforço para quantificação das descargas de águas subterrâneas (DAS). No contexto costeiro as DAS são 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). Segundo Lewandowski et al.(2013) as DAS foram por muitos anos negligenciadas no contexto científico, por alguns motivos, como: Por serem subterrâneas, as descargas não são visíveis. Métodos para mensuras as DAS ainda não são simples e eficazes. As descargas são desuniformes precisando de muitas medidas e por fim, as DAS são difusas ocorrendo em uma grande área, por isso, as descargas locais tendem a ser pequenas. Estudos

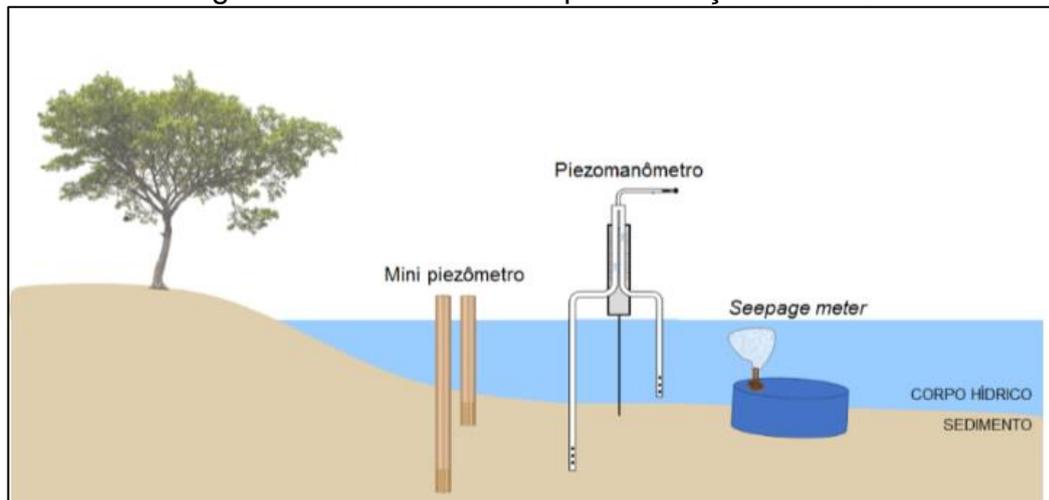
como (KERN, 2019) e (ARCARI, 2018) exploraram o tema de descargas na Bacia da Lagoa da Conceição em Florianópolis.

3.2.6 Métodos de quantificação de DAS

As descargas de águas subterrâneas desempenham um papel crucial na preservação ou recuperação de ecossistemas valiosos em corpos d'água superficiais e na transição entre águas subterrâneas e superficiais subjacentes (DUQUE; ROSENBERRY, 2022). O desafio de quantificar a quantidade de descarga de águas subterrâneas é complexo, devido à variabilidade espacial e temporal do fluxo de água subterrânea. Essa variabilidade está sujeita a múltiplos fatores, incluindo forças terrestres e marítimas, como precipitação, características físicas dos aquíferos e variação da maré, como citado na seção 3.2.5. Esses elementos influenciam as cargas hidráulicas e a velocidade do fluxo. Existem diversas abordagens, tanto qualitativas quanto quantitativas, desenvolvidas para a avaliação da descarga de águas subterrâneas em áreas lagunares ou submarinas. Dada a limitação de cada método, é recomendável combinar técnicas diferentes em uma mesma localidade (KERN; FRANCO; UDA, 2022).

De acordo com Duque, Rosenberry, 2022, a avaliação da DAS se baseia em quatro princípios: modelagem numérica, medição física direta, uso de traçadores químicos e emprego de traçadores. Entre os métodos diretos destacam-se os “*seepage meters*” que são responsáveis por medições diretas da taxa de fluxo. Os piezômetros e mini piezômetros medem a direção e a magnitude dos gradientes hidráulicos através da interface sedimento-água. A Figura 6 representa os métodos de medição direta citados.

Figura 6 - Métodos físicos para medição de DAS



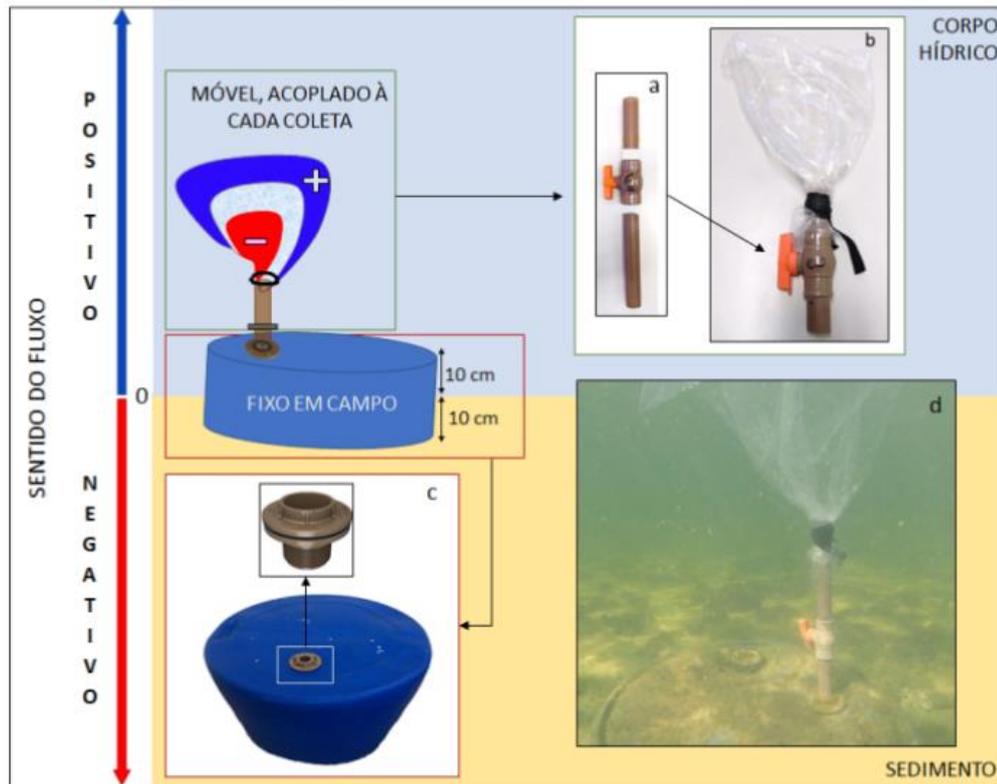
Fonte: (KERN; FRANCO; UDA, 2022)

3.2.6.1 *Seepage meter*

Os infiltrômetros, também conhecidos como *Seepage meters*, são instrumentos usados para medir a taxa de fluxo através da interface sedimento-água. Essa medição da taxa de infiltração ocorre no leito de lagos, estuários e rios. Os *Seepage meters* são os únicos instrumentos capazes de quantificar diretamente a interação entre águas subterrâneas e superficiais. Todas as demais abordagens requerem a mensuração de um parâmetro indireto, porém correlacionado (ROSENBERRY et al., 2020).

Os *seepage meters* oferecem um método para adquirir informações relativas à direção, taxa e variação do fluxo de infiltração através da interface sedimento-água. Esses dispositivos podem ser fabricados de forma econômica e são adaptáveis às especificações de cada aplicação. O princípio fundamental do equipamento envolve o isolamento de uma área na interface entre água superficial e sedimento, usando um cilindro aberto na base e na parte superior, conectado a uma bolsa coletora de plástico (conforme ilustrado na Figura 7). Observa-se a alteração do volume na bolsa coletora ao longo de um intervalo de tempo para determinar a direção e a taxa de infiltração entre as águas superficiais e subterrâneas. Aumentos no volume da bolsa indicam um fluxo das águas subterrâneas para as superficiais, enquanto a diminuição do volume sugere o oposto (KERN, 2019).

Figura 7 - Esquema funcionamento Seepage meter



Fonte: (KERN, 2019)

Uma das vantagens dos *seepage meters* é a capacidade de medir a interação entre águas subterrâneas e superficiais sem a necessidade de realizar medições de condutividade hidráulica no sedimento. É importante ressaltar que as medições obtidas com o *seepage meter* devem ser ajustadas por meio de um fator de correção para levar em consideração eventuais perdas por atrito nos componentes do instrumento, como descrito por Martinez (2010).

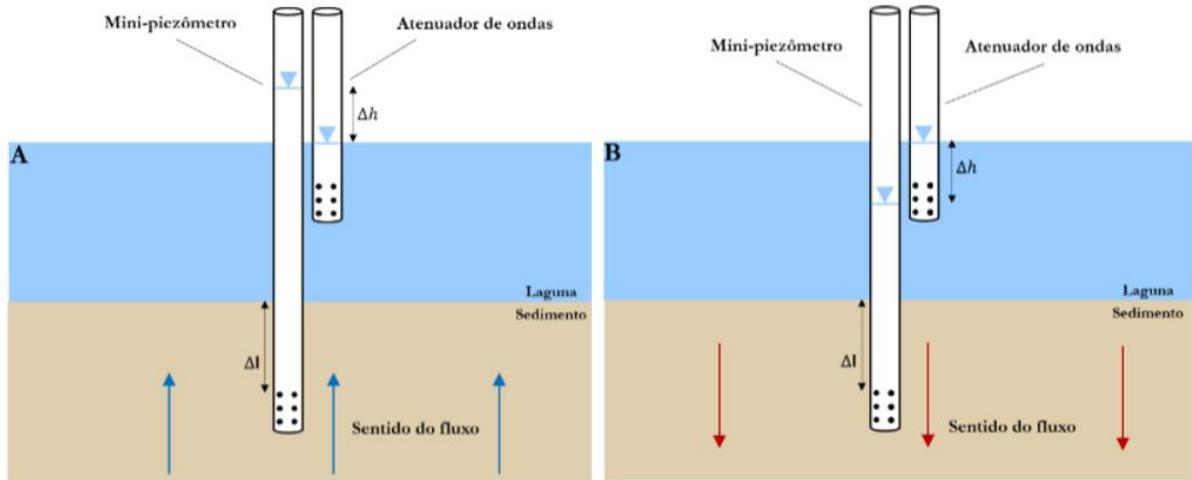
3.2.6.2 Piezômetros e mini piezômetros

Os piezômetros e os mini piezômetros têm a função de medir o gradiente hidráulico em corpos hídricos. Os minis piezômetros, em essência, representam versões em pequena escala dos piezômetros convencionais. Para aferir o nível em um mini piezômetro, é necessário empregar um sensor de nível ou um piezomanômetro (KERN; FRANCO; UDA, 2022).

Mini piezômetros são pequenos tubos com uma seção filtrante. Esses equipamentos são inseridos a uma determinada profundidade no sedimento. A Figura

8 demonstra o funcionamento dos minis piezômetros, onde A representa a ocorrência de descargas de águas subterrâneas e B representa a ocorrência de infiltração.

Figura 8 - Esquema de funcionamento dos minis piezômetros



Fonte:(ARCARI, 2018)

4 METODOLOGIA

A Figura 1 e Figura 9 representam a estrutura metodológica do presente trabalho. O trabalho iniciou-se com uma pesquisa na bibliografia sobre temas como lagunas costeiras (3.1), interações entre águas superficiais e subterrâneas, ciclo hidrológico e exemplos de estudos sobre variação do nível de lagunas costeiras relacionado ao nível oceânico (3.2).

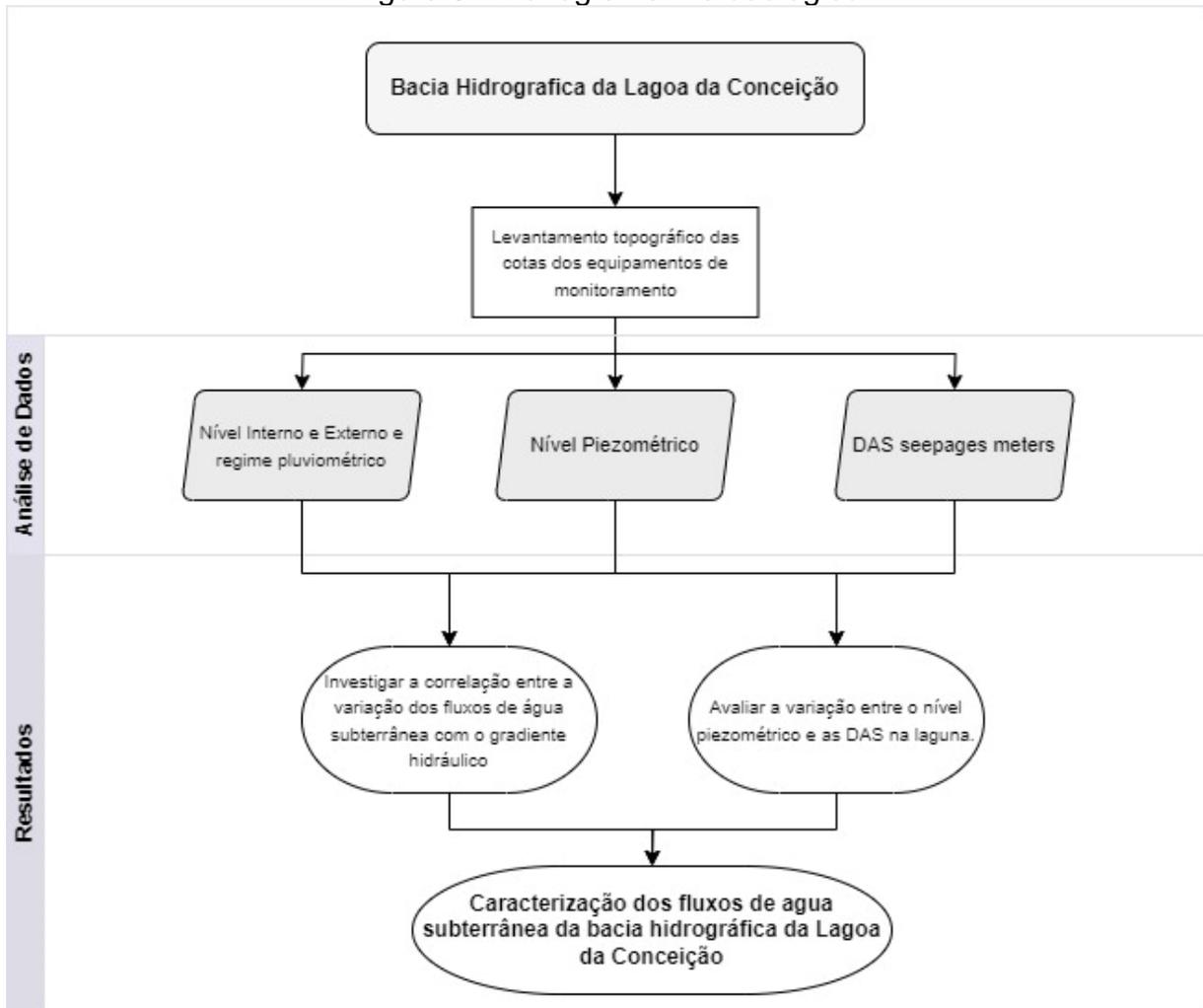
A área de estudo compreende a Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição. A localização e cota de todos os equipamentos de monitoramento foi determinada pelo levantamento topográfico realizado pelo LaHiMar com o uso do RTK/NTRIP.

Os dados de níveis d'água provieram de diversas fontes. A Epagri disponibilizou os dados de chuva e do nível externo (nível do oceano), enquanto os dados de nível interno originaram-se do monitoramento realizado pelo LaHiMar (subsistema Sul) e pelo departamento de meteorologia da UFSC (subsistema Norte). Quanto aos dados de DAS e carga hidráulica, foram coletados nas campanhas de monitoramento conduzidas pelo LaHiMar.

Com os dados reunidos, realizou-se uma análise estatística das variáveis coletadas. O objetivo era investigar a correlação entre as variações dos fluxos de água subterrânea e o gradiente hidráulico, formado pela diferença entre os níveis da lagoa e o oceano. Também foram avaliadas as variações entre o nível piezométrico e as DAS na lagoa por meio da elaboração de gráficos ilustrativos. Com base nos gráficos e nos coeficientes de correlação, caracterizaram-se os fluxos de água na Bacia Hidrogeológica da Lagoa da Conceição.

As análises estatísticas foram conduzidas utilizando o software Excel e a linguagem de programação Python. Para a criação dos gráficos, utilizou-se principalmente as bibliotecas pandas, matplotlib, plotly e seaborn. Além disso, os mapas foram gerados por meio do software QGIS.

Figura 9 - Fluxograma Metodológico



Fonte: Elaborado pelo Autor

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

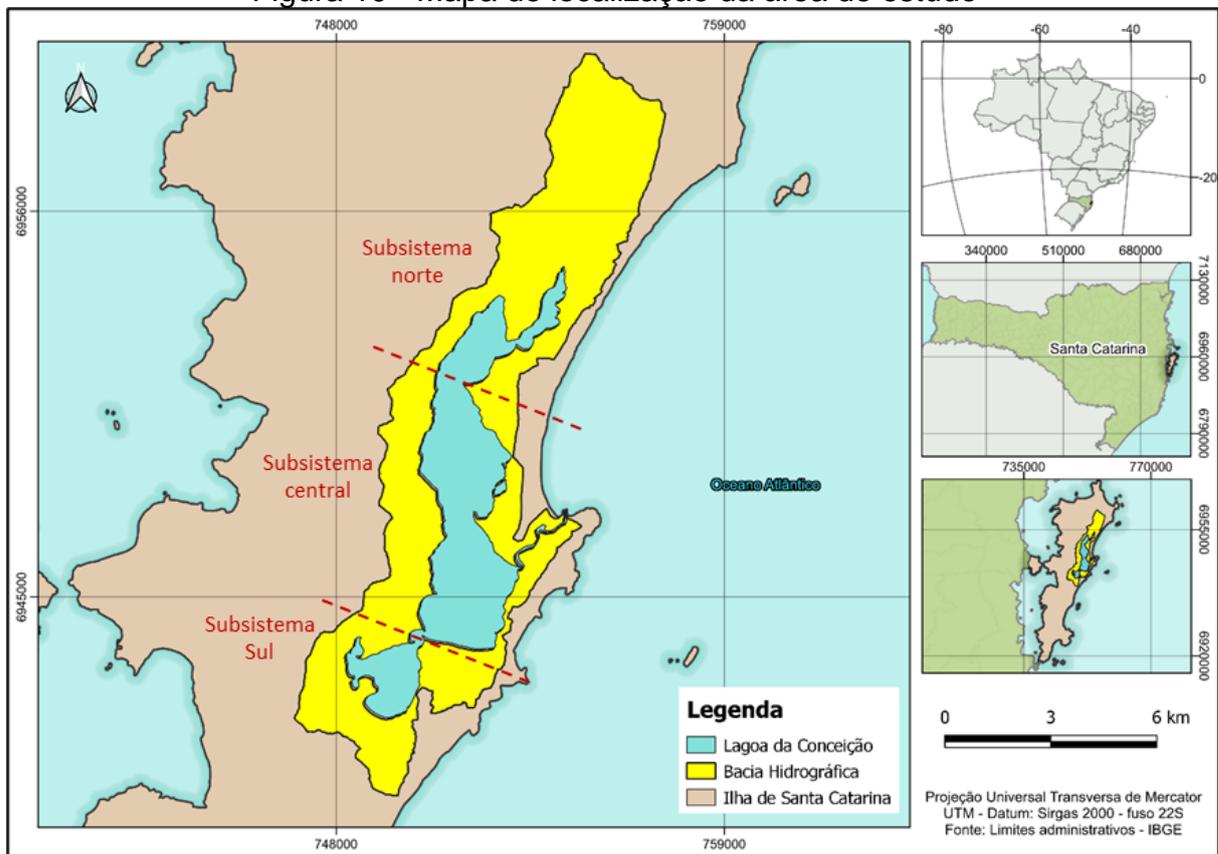
Como discutido na seção 3.2.2 os limites de uma bacia hidrogeológica podem ou não coincidir com os limites de uma bacia hidrológica. Porém, como as bacias hidrogeológicas são de difícil delimitação, neste estudo optou-se por utilizar as delimitações da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição apesar do estudo tratar dos fluxos subterrâneos.

A bacia hidrológica da Lagoa da Conceição se encontra na porção centro leste da Ilha de Santa Catarina (6946807 N; 751632 L; 22 J). A laguna presente na bacia pode ser classificada como uma laguna costeira estrangulada, como descrito na seção 3.1. A laguna “Lagoa da Conceição” possui uma lâmina d’água de 22 km², volume de

66.648.179 m³ e uma bacia hidrográfica de 78 km² (SILVA, 2021). A Figura 10 apresenta a localização da área de estudo.

A Lagoa da Conceição desponta como um ecossistema lagunar costeiro de significativa importância ecológica, paisagística e econômica na região. Com seu extenso corpo hídrico, é reconhecida como o maior ambiente lagunar da região e o quinto maior do estado (ARCARI et al., 2019). Além de abrigar uma diversidade de espécies marinhas, ela também se destaca como um patrimônio arqueológico, atraindo a atenção de visitantes e turistas (PORTO FILHO, 1993)

Figura 10 - Mapa de localização da área de estudo



Fonte: Elaborado pelo Autor

4.1.1 Unidades de Resposta Hidrológica (URHs)

Silva (2021) agrupou sub-bacias que apresentam características morfométricas e hidrológicas similares em 4 unidades de resposta hidrológica (URHs). As 4 URHs estão representadas na Figura 11.

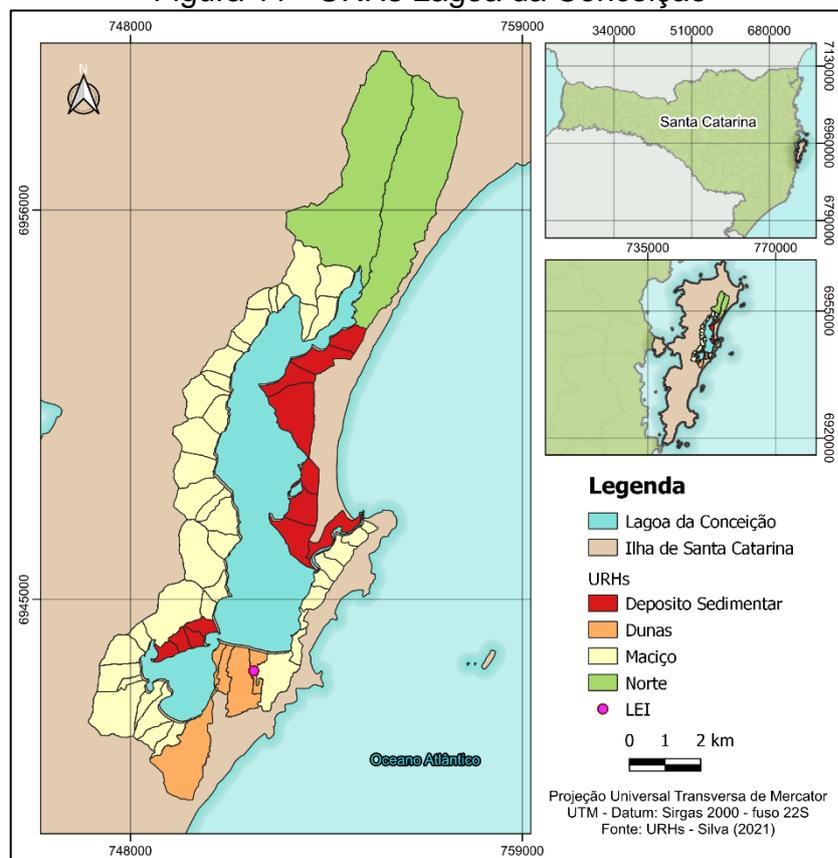
A URH Deposito Sedimentar compreende áreas com altas taxas de infiltração de água no solo devido à presença de solos como areias quartzóicas e marinhas, com baixa declividade.

A URH de Dunas é caracterizada por solos altamente permeáveis, incluindo dunas, areais marinhos e quartzólicas. A região possui um aquífero livre e arenoso.

A URH Norte compreende as duas maiores sub-bacias, João Gualberto e Rio Vermelho. Essas áreas não apresentam elevadas taxas de declividade e urbanização.

A URH Maciço é uma seção da bacia hidrográfica que engloba uma região altamente urbanizada, resultando em elevada impermeabilização do solo e considerável declividade média da bacia. Isso contribui para uma significativa contribuição hidrológica na Lagoa da Conceição.

Figura 11 - URHs Lagoa da Conceição



Fonte: Elaborado pelo Autor

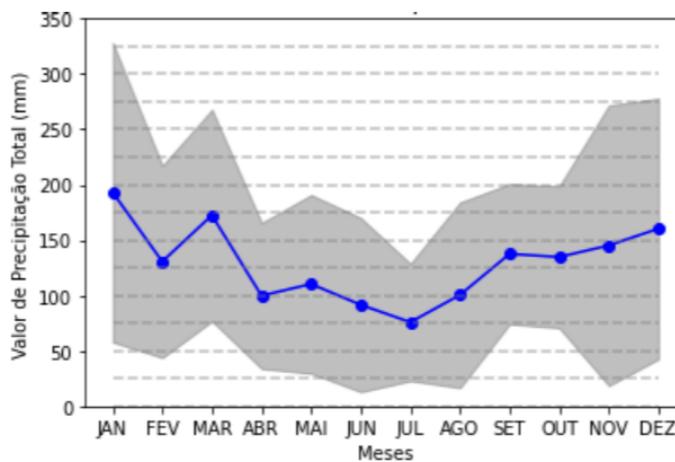
4.1.2 Climatologia Regional

A região apresenta um clima agradável devido à influência da maritimidade, controlada pelas massas de ar Polar Marítima e Tropical Marítima. Ela experimenta variações moderadas de temperatura ao longo do ano, graças à circulação das brisas terrestres e marítimas resultantes da proximidade com o mar. A temperatura média anual é de 20,4 graus, com uma umidade relativa média do ar de 80%. De acordo com

a classificação de Köppen, o clima é classificado como Mesotérmico Úmido, dentro da zona intermediária subtropical(SILVA, 2021).

A precipitação é distribuída pelo ano inteiro, mostrando maiores valores no verão e menores no inverno. Na Figura 12, o desvio padrão da precipitação acumulada de cada mês é exibido em tons de cinza, enquanto a média de precipitação de cada mês é representada em azul. Pode-se concluir que no verão as chuvas são mais intensas e com maior variabilidade durante os anos, já no inverno o comportamento é contrário (HESS et al., 2023)

Figura 12 - Precipitação média mensal de Florianópolis de 2003-2022



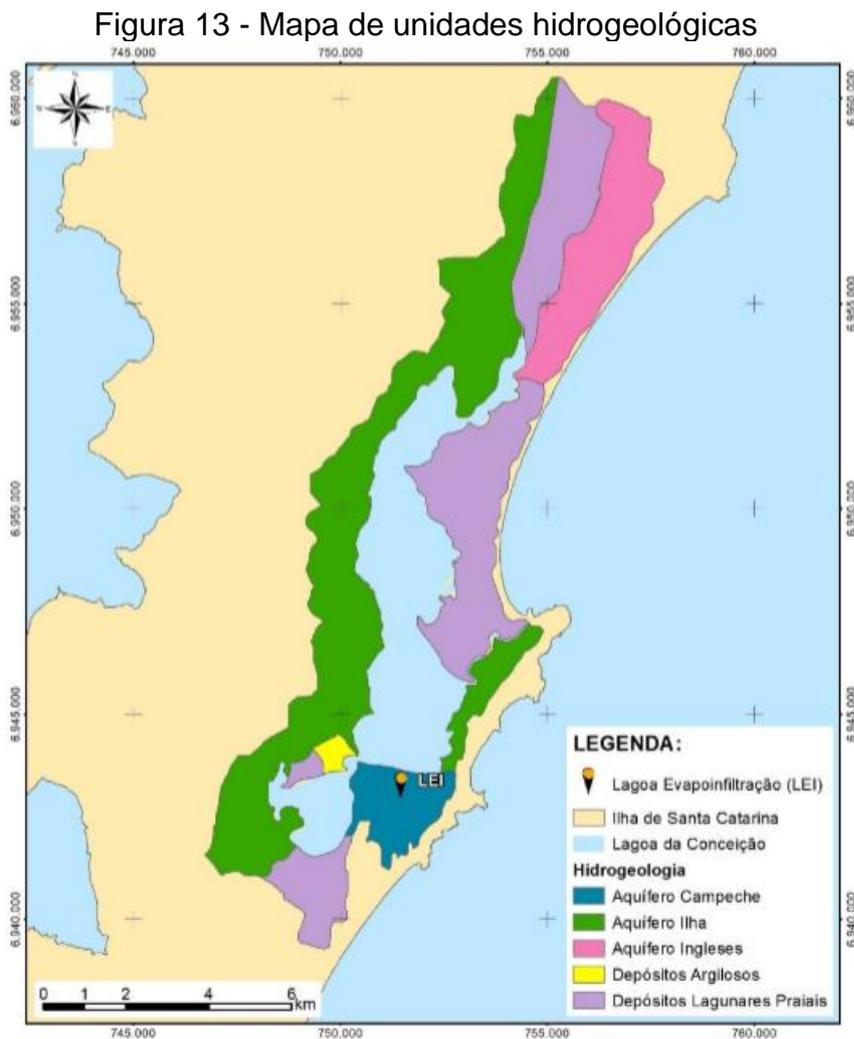
Fonte (HESS et al., 2023)

4.1.3 Geologia, Hidrogeologia e Pedologia

Sob uma perspectiva morfológica, a Ilha de Santa Catarina apresenta uma divisão marcada entre maciços rochosos, caracterizados por morros altos e escarpados, contrastando com planícies sedimentares de origem marinha e costeira. Esses maciços rochosos são, em algumas áreas, atravessados por diques de diabásio e cobertos por sedimentos recentes. O domínio geológico do Granito Ilha delimita a bacia da Lagoa da Conceição a oeste e sul, com extensões na parte oeste. Na porção leste, predominam depósitos lagunares praias, flúvio lagunares-lacustres e marinhos praias, enquanto ao sudeste estende-se uma ampla área de depósitos eólicos, incluindo dunas longitudinais fixas e dunas transversais ativas(ARCARI, 2018; GUEDES JUNIOR, 1999; ODEBRECHT; CARUSO GOMES JR., 1999).

Guedes Júnior (1999) identificou aquíferos distintos presentes na Ilha de Santa Catarina .O Aquífero Ilha, localizado na margem oeste da bacia da Lagoa da

Conceição, é fraturado, com características variáveis de infiltração e escoamento superficial. O Aquífero Campeche, na porção sudeste, consiste em dunas ativas com alto potencial de água subterrânea. O fluxo subterrâneo se dirige para a Lagoa da Conceição e Praia da Joaquina. Além disso, a recarga ocorre por meio de uma lagoa de evapoinfiltração (LEI) associada à Estação de Tratamento de Esgotos da CASAN. A Figura 13 representa os aquíferos presentes na bacia.

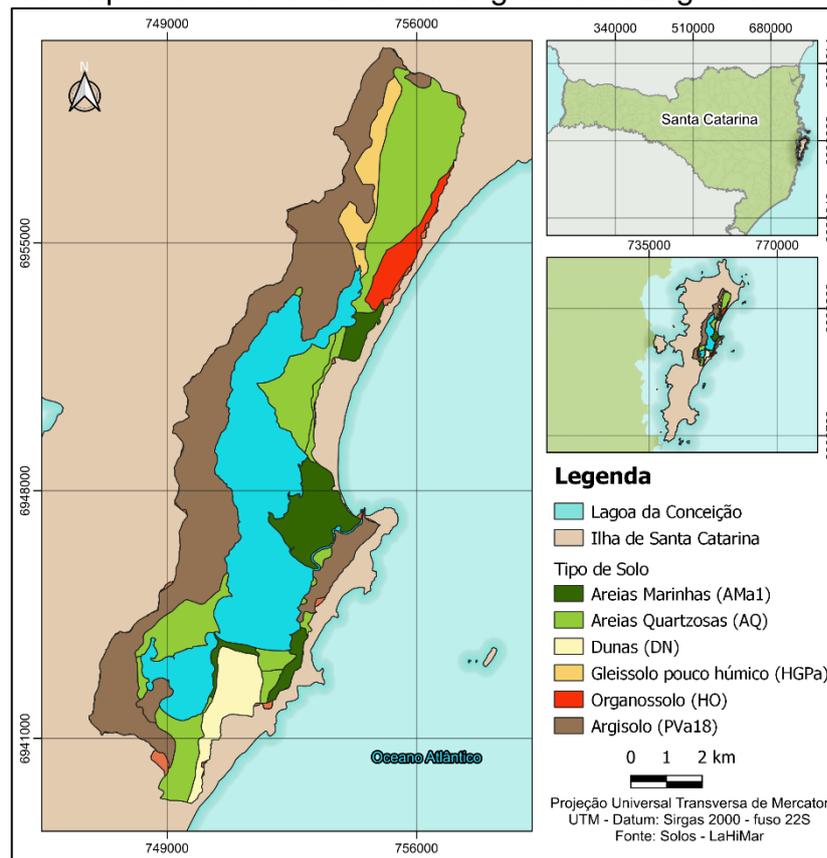


Fonte Adaptado de (GUEDES JUNIOR, 1999) apud (ARCARI, 2018)

A Figura 14 exhibe os tipos de solo presentes nas sub-bacias das estações. As areias quartzosas geralmente possuem uma textura de areia ou areia franca com uma profundidade significativa, resultando em uma alta taxa de infiltração. As dunas, caracterizadas por depósitos arenosos de dunas móveis afetados pelo vento, também apresentam uma taxa de infiltração superior às areias quartzosas. Por outro lado, o argissolo, encontrado em encostas de morros e colinas, possui uma textura areno-

argilosa e uma profundidade de aproximadamente 1,5 metros, o que resulta em uma baixa infiltração de água e, conseqüentemente, um alto escoamento superficial. As areias marinhas têm uma alta capacidade de infiltração, mesmo sob condições de umidade elevada (KERN, 2019).

Figura 14 - Tipos de solo da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição



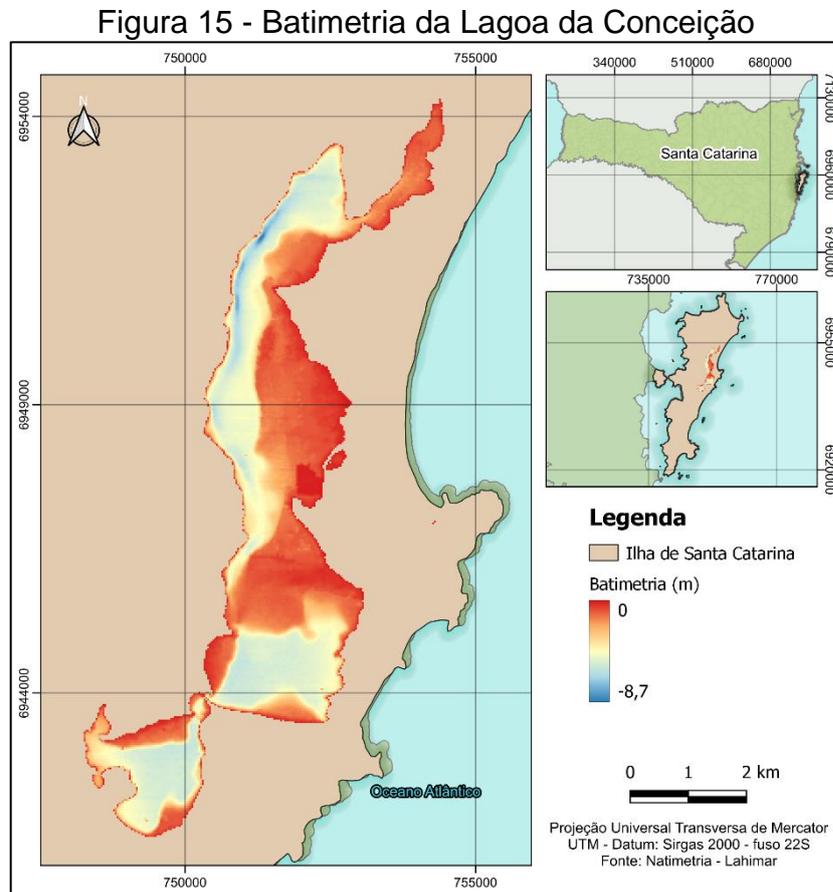
Fonte: Elaborado pelo Autor

4.1.4 Batimetria

O primeiro levantamento batimétrico da Lagoa da Conceição foi conduzido na década de 1980 por Muehe e Caruso Jr. (1989). Posteriormente, em 2006, uma equipe do LaHiMar realizou uma campanha de batimetria na laguna e no Canal da Barra da Lagoa, conforme relatado por (GODOY, 2009).

A laguna é um corpo de água geralmente raso, apresentando uma profundidade média de cerca de 2 metros. No entanto, as profundidades variam significativamente ao longo de sua extensão, com áreas de apenas algumas dezenas de centímetros em grandes bancos de areia, enquanto atingem até 4 metros no setor

Sul, 5 metros no setor Central e 9 metros nas regiões mais profundas do setor Norte e Centro-Norte (SILVA, 2021). A Figura 15



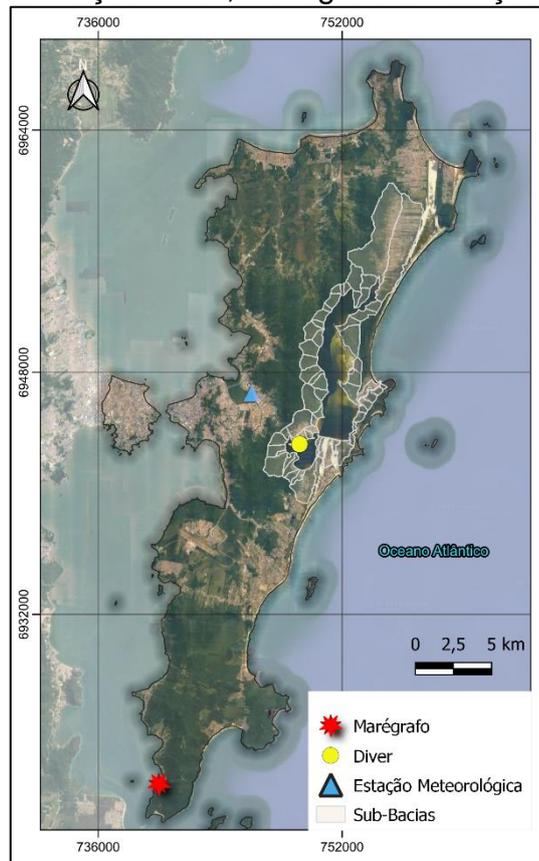
Fonte: Elaborado pelo Autor

4.1.5 Localização dos Equipamentos

Para uma melhor visualização os equipamentos de monitoramento foram divididos em 3 mapas (Figura 16, Figura 17 e Figura 18).

Os equipamentos que proveram os dados de nível interno do subsistema sul da laguna (Diver), nível externo (Marégrafo) e pluviométricos (Estação meteorológica) estão espalhados pela Ilha de Santa Catarina. Como os equipamentos estão relativamente distantes uns dos outros o mapa da Figura 16 traz uma visão mais ampla de Florianópolis sem muito detalhamento.

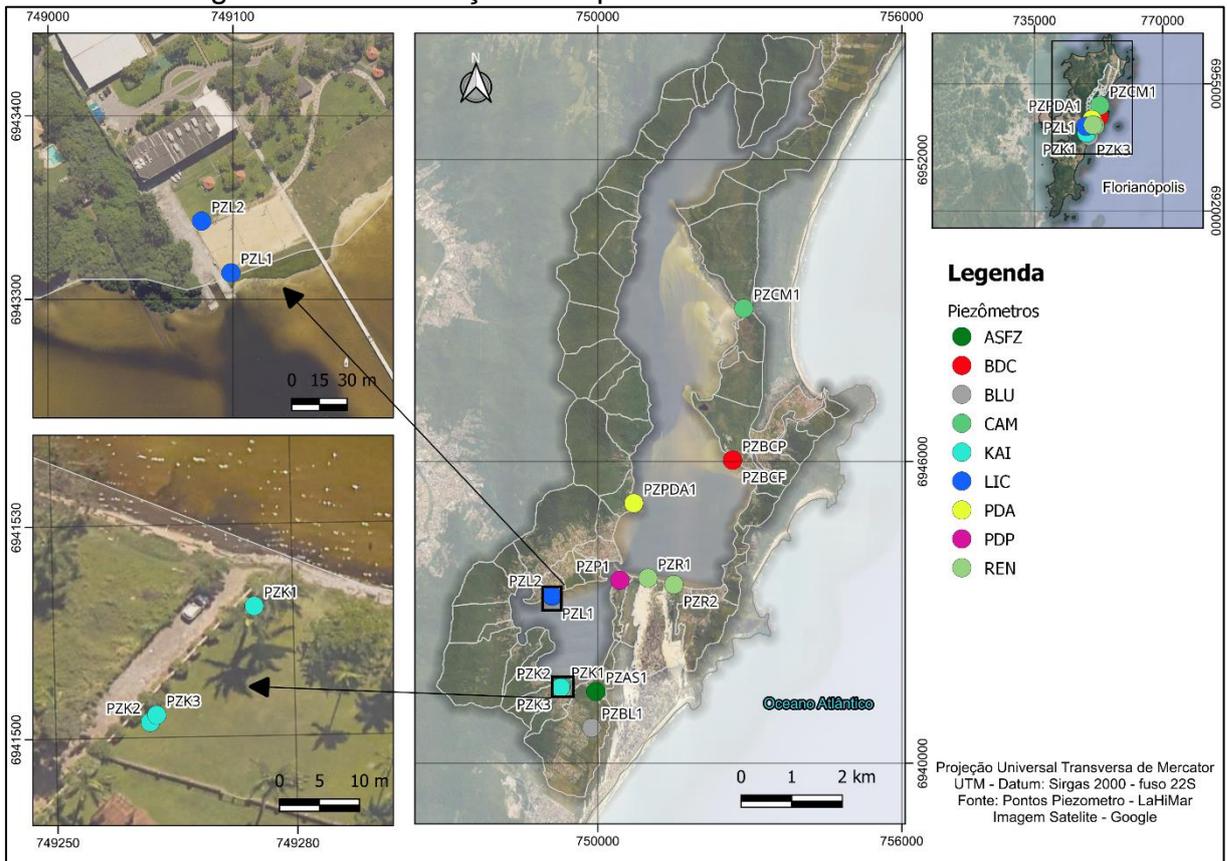
Figura 16 - Localização Diver, Marégrafo e Estação Meteorológica



Fonte: Elaborado pelo Autor

Os minis piezômetros estão distribuídos pela bacia hidrológica da Lagoa da Conceição. A Figura 17 destaca os piezômetros localizados no Lagoa late Clube (LIC) e os que ficam na Servidão Kairos (KAI). Nesses dois pontos de monitoramento foram instalados mais de um equipamento. Além deles, os pontos do Camping do Rio Vermelho (CAM), Avenida das Rendeiras (REN), Ponta das Almas (PDA), Ponto dos Pombos (PDP), Pousada Assezaz (ASFZ), Beco da Lua (BLU) e Beco dos Coroas (BDC) também foram representados.

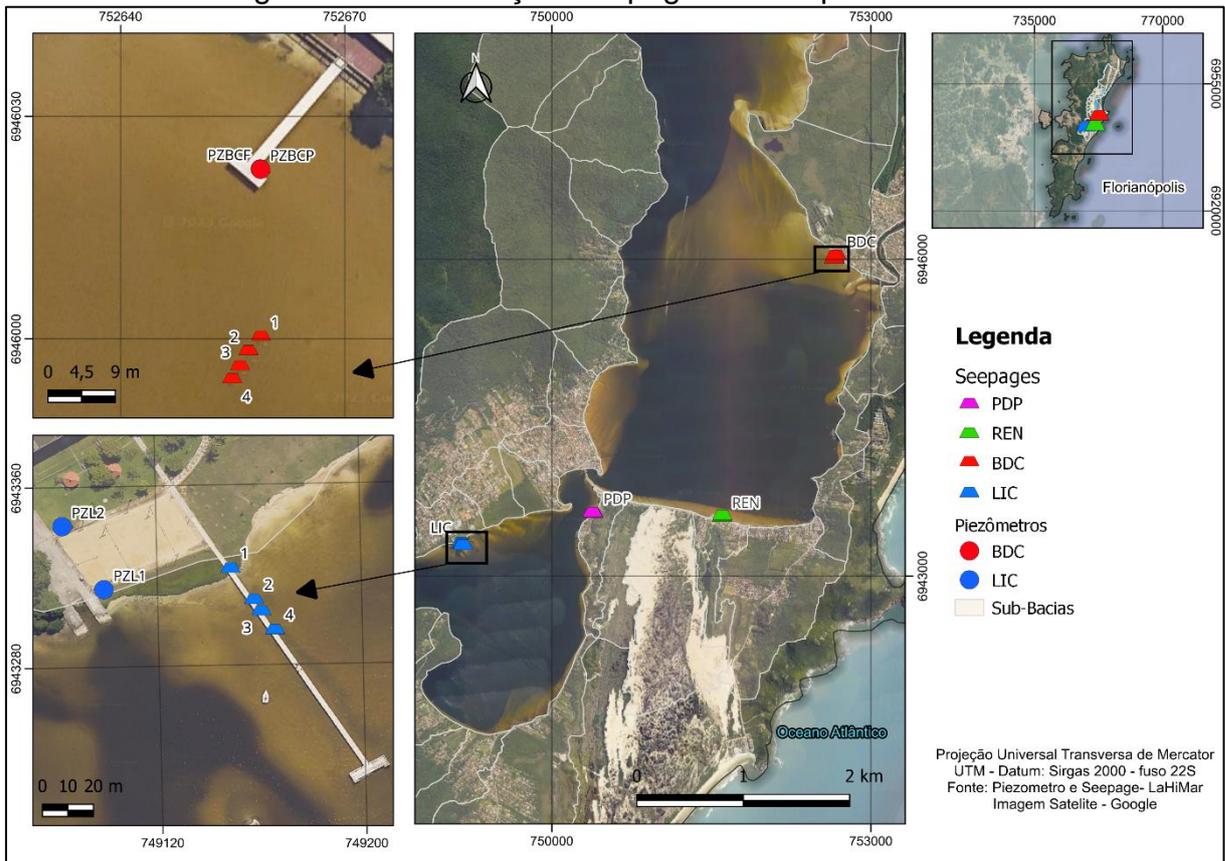
Figura 17 - Localização mini-piezômetros no subsistema sul



Fonte: Elaborado pelo Autor

Os seepages se encontram divididos em quatro pontos diferentes, sendo eles: Lagoa late Clube (LIC), Becos dos Coroas (BDC), Avenida das Rendeiras (REN) e Ponta dos Pombos (PDP). Em cada ponto de monitoramento existem quatro seepages. A Figura 18 apresenta um detalhamento do posicionamento dos pontos de monitoramento LIC e BDC, dando destaque para a localização dos 4 seepages presentes.

Figura 18 - Localização Seepages e mini-piezômetros



Fonte: Elaborado pelo Autor

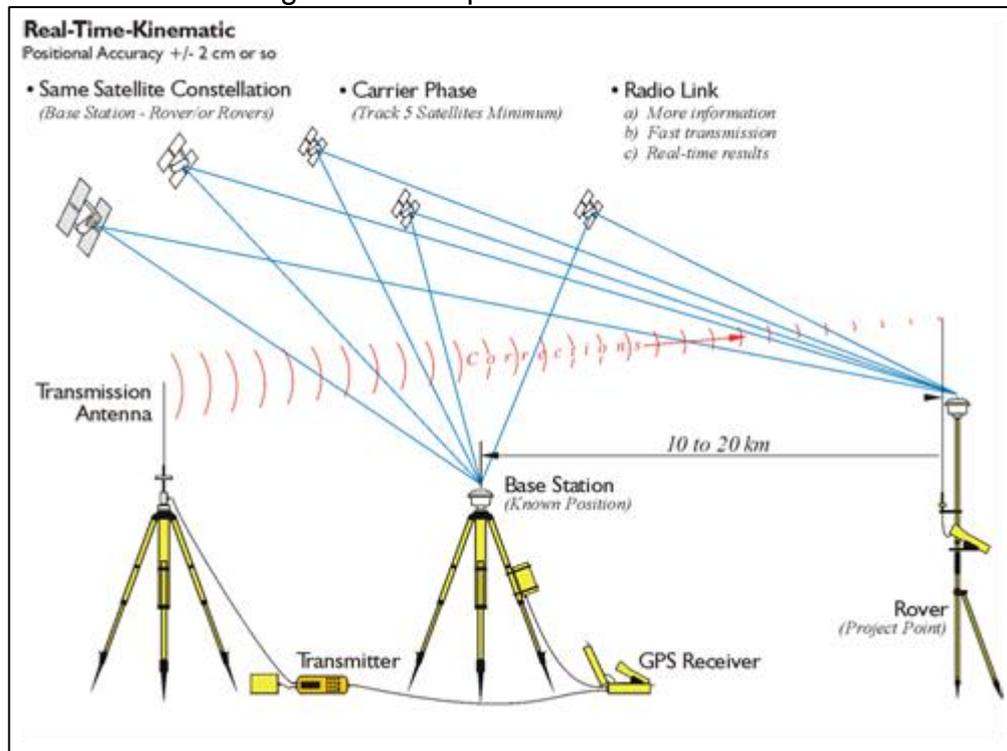
4.2 LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO DOS EQUIPAMENTOS DE MONITORAMENTO

O levantamento topográfico dos equipamentos de monitoramento foi realizado pela equipe do Laboratório de Hidráulica Marítima da UFSC (LaHiMar). O levantamento utilizou a tecnologia GNSS RTK, permitindo mais precisão nos dados coletados.

A tecnologia RTK (Real-Time Kinematic) é um sistema de posicionamento global que permite determinar com alta precisão a posição tridimensional em tempo real. Diferentemente de outros métodos, o RTK não requer visibilidade direta entre os pontos medidos e opera em condições climáticas adversas 24 horas por dia. A técnica utiliza medições de fases das portadoras e pseudodistâncias para calcular distâncias entre as antenas GNSS (Global Navigation Satellite System), garantindo uma precisão de 1 a 1,50 cm. O sistema é composto por duas antenas, uma base e uma móvel, que se comunicam em tempo real, permitindo levantamentos topográficos rápidos e

precisos sem necessidade de visadas entre os pontos, como mostra a Figura 19(LOOSE, 2022).

Figura 19 - Esquema sistema RTK



Fonte: (PENN STATE, 2023a)

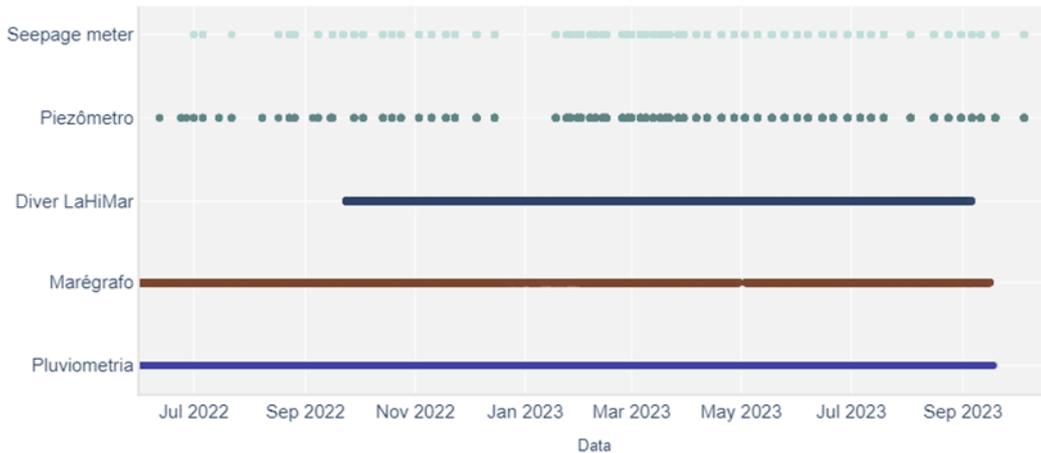
O sistema GNSS RTK foi escolhido para o levantamento topográfico devido à sua rapidez e precisão, eliminando a necessidade de visadas entre pontos(FLORENTINO; LIMA, 2021).

A técnica RTK recebe correções em tempo real, no caso do levantamento feito pelo LaHiMar foi utilizado o sistema de correção RTK/NTRIP, amarrado ao marco da UFSC. O NTRIP significa “*Network Transport of RTCM via Internet Protocol*”, ou seja, as correções chegam em tempo real, via a rede de telefonia móvel, através da internet. Foi utilizado o sistema do IBGE, que é gratuito. O sistema é composto de receptores que mandam continuamente os dados em formato RCTM. Os dados ficam armazenados em um servidor e o interessado pode acessá-los pelo aplicativo “Cliente” do IBGE (RIBAS; THUM, 2014).

4.3 DADOS UTILIZADOS

Foram utilizados dados de diversas fontes para a análise. As series históricas, do nível oceânico e pluviometria, foram filtradas em um período de julho de 2022 até outubro de 2023. A Figura 20 apresenta o período de tempo em que cada tipo de dado apresentou resultado.

Figura 20 - Tipo de dado disponível pela data



Fonte: Elaborado pelo Autor

4.3.1 Chuva, nível externo e níveis interno

Os dados de chuva e nível externo foram fornecidos pela Epagri (Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina).

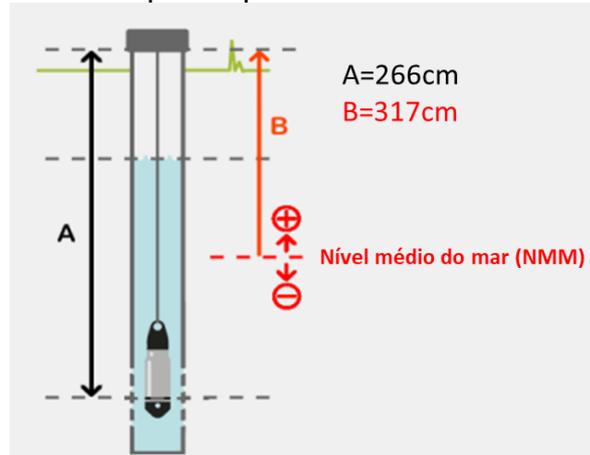
Os dados de chuva foram obtidos a partir da estação meteorológica localizada no Cetre/Epagri (Centro de Treinamento da Epagri) no bairro do Itacorubi, em Florianópolis. As coordenadas de latitude e longitude do equipamento são $-27,5814^\circ$ e $-48,5072^\circ$, respectivamente, com uma altitude de 5 metros. As medições de chuva foram registradas a cada hora e estão expressas em milímetros.

Já os dados de nível externo são provenientes do marégrafo situado no Sul da Ilha de Santa Catarina, com coordenadas de latitude $-27,8161^\circ$ e longitude $-48,5639^\circ$. O marégrafo registra automaticamente as marés na região sul da ilha, possibilitando o cálculo do nível médio do mar.

Os dados de nível interno provêm do monitoramento conduzido pelo LaHiMar (subsistema Sul). O LaHiMar utiliza um sensor de pressão TD-Diver localizado no Lagoa late Clube (LIC) para medir o nível interno da laguna. Os dados foram coletados a cada 30 minutos, no período de 23 de setembro de 2022 a 5 de setembro de 2023, conforme ilustrado na Figura 20. A compensação barométrica foi realizada com base na estação automática de Florianópolis do INMET. O ponto de monitoramento foi

georreferenciado usando a técnica RTK/NTRIP, discutida de forma mais abrangente na seção 4.2. A cota do topo do tubo onde o sensor está instalado é de 3,17 metros, e o cabo tem um comprimento de 2,66 metros, conforme esquematizado na Figura 21.

Figura 21 - Esquema posicionamento Diver LaHiMar



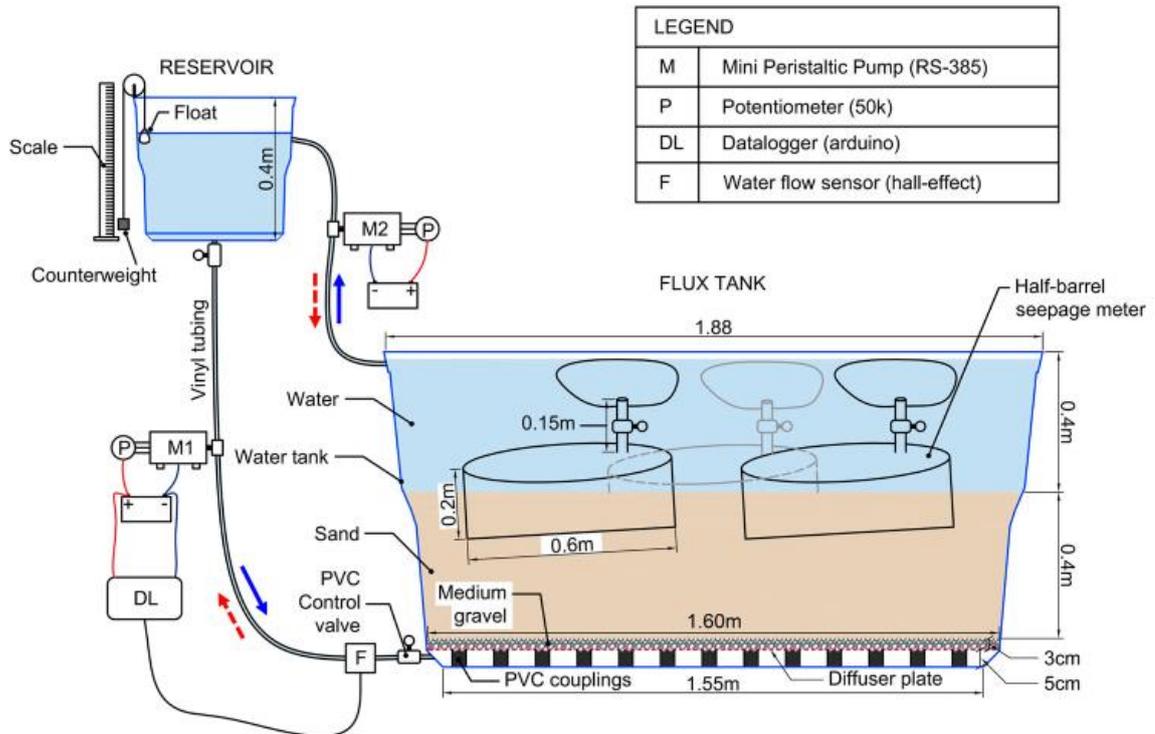
Fonte: Software Diver

4.3.2 DAS Seepage meters

Lee (1977) criou uma metodologia para o monitoramento do fluxo subterrâneo com o uso de *Seepage meters*. Os seepages são eficazes simples e robustos. Na Figura 7 é possível identificar os principais componentes do sistema: Um tubo de PVC DN25 com cortes variando de 10 a 8 cm (a). Também é composto por um registro de esfera em PVC DN25 (a), uma bolsa coletora de plástico (b), metade de um tambor cilíndrico feito de polietileno de alta densidade, um conjunto flange de PVC com o-ring para a vedação (a) e uma borracha para acoplar a bolsa coletora ao registro de esfera (b).

Como citado na seção 3.2.6 os seepages necessitam de um fator de correção. (KERN et al., 2023) construiu um sistema de calibração de tanque de fluxo controlado (CFTCD), conforme o esquema da Figura 22. Os valores para os fatores de correção (FC) obtidos foram: 1,09 para valores positivos e 1,03 para valores negativos.

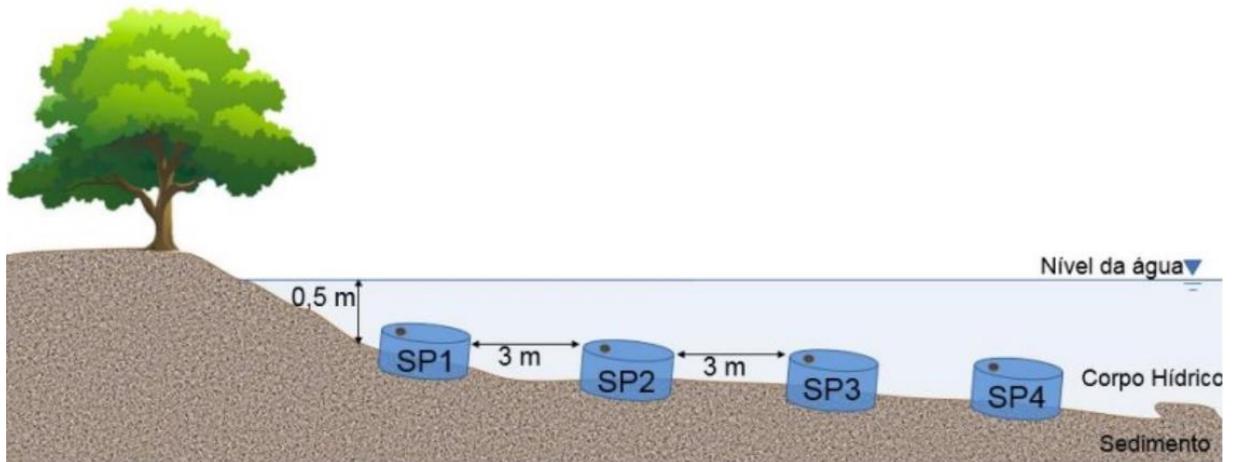
Figura 22 - Esquema do tanque de fluxo controlado para calibração do Seepage meter



Fonte: (KERN et al., 2023)

A instalação foi executada de maneira a posicionar quatro *Seepage meters* em cada um dos quatro pontos de monitoramento (4 seções). Eles foram alinhados perpendicularmente em relação à costa, com uma distância de 3 metros entre cada equipamento, conforme ilustrado na Figura 23. Essa configuração tinha como objetivo analisar a distribuição espacial da DAS em cada seção e avaliar a influência da proximidade da costa nas medições de seepage.

Figura 23 - Esquema de instalação Seepage meter



Fonte: adaptado (KERN, 2019)

Os tambores foram fixados no mínimo 10cm no solo, com o lado que possui o adaptador de rosca com vedação posicionado em uma altitude mais elevada, permitindo a saída de possíveis gases retidos no equipamento. Após a instalação, foi necessário aguardar um período de 24 horas antes de realizar a primeira medição, a fim de permitir a estabilização do sedimento.

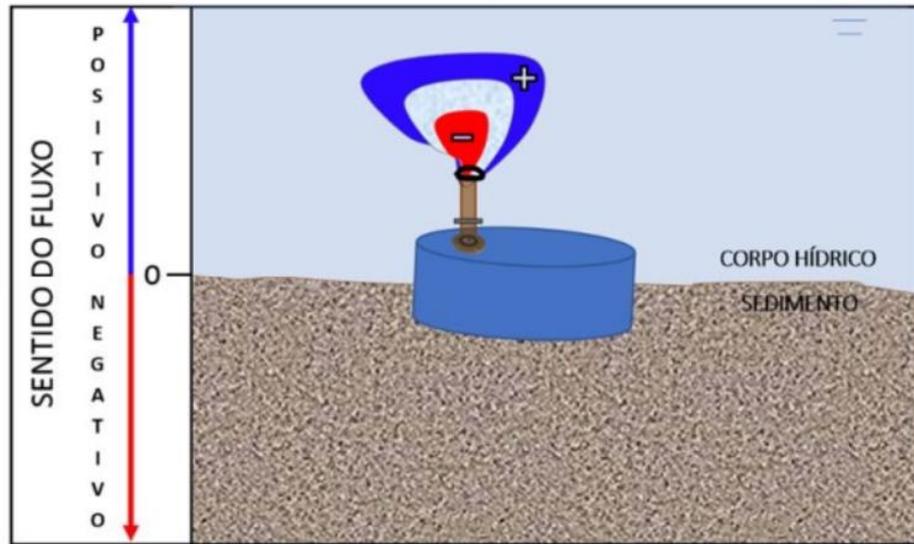
Para preparar o equipamento, conforme ilustrado na Figura 7b, inicia-se amarrando uma sacola plástica no registro com o auxílio de uma fita de borracha. A seguir, é inserido um volume de 1,5 litros de água na sacola, e o conjunto é então inserido no *Seepage meter*, como demonstrado na Figura 7d. Após um intervalo de tempo definido, de aproximadamente 40 minutos, procede-se à retirada e medição da quantidade de água contida na sacola. Se o volume total for superior a 1,5 litros, isso indica uma descarga positiva de água subterrânea no local, o que sinaliza que o fluxo provém do sedimento em direção à lagoa. Caso o volume seja inferior a 1,5 litros, o fluxo é considerado negativo, indicando infiltração, ou seja, um fluxo da lagoa em direção ao sedimento. A Figura 24 exemplifica a interpretação do sentido do fluxo em relação à bolsa coletora.

Após coletar os dados de fluxo subterrâneo, a descarga de água subterrânea é calculada considerando a equação (2) (TAVARES et al., 2023):

$$DAS \left[\frac{cm}{dia} \right] = \frac{V_{final} - V_{inicial}}{\Delta T \times A} \times 1.440 \quad (2)$$

Onde V_{final} = Volume (ml) final de água encontrado na sacola plástica; $V_{inicial}$ = Volume (ml) inicial de água colocado na sacola plástica; ΔT = Diferença de tempo, em minutos, que ocorreu a medição; A = Area do *Seepage meter*, em m²

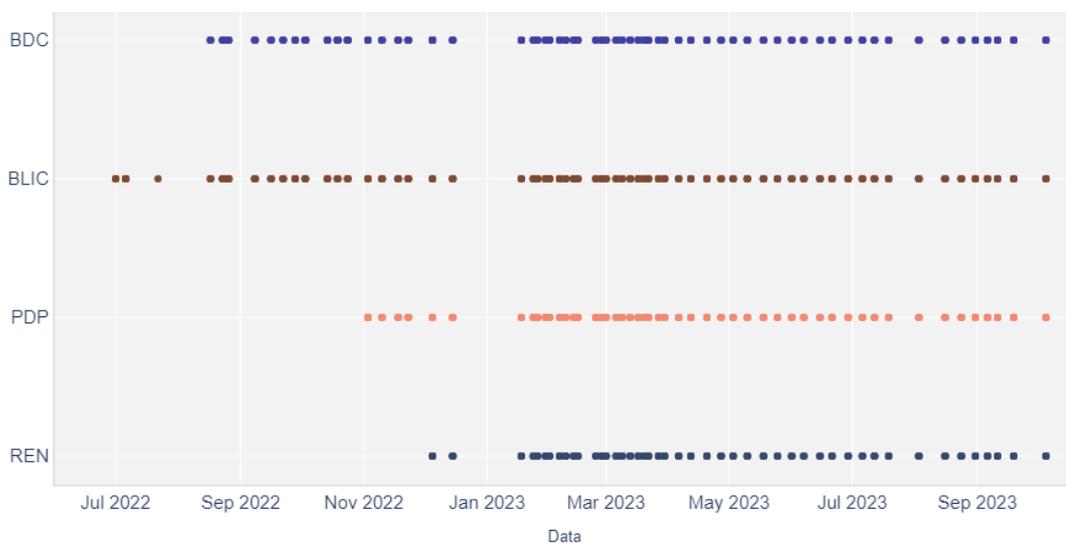
Figura 24 - Sentido do fluxo no Seepage meter



Fonte: (KERN, 2019)

O monitoramento dos medidores de infiltração (*Seepage meters*) foi conduzido por meio de campanhas semanais, que tiveram início em junho de 2022 e continuaram até outubro de 2023, as quais são evidenciadas na Figura 25. Nos 14 primeiros campos, não houve monitoramento da REN e do PDP devido a problemas na instalação dos medidores de infiltração nesses pontos. A partir de janeiro de 2023, as campanhas de monitoramento foram estendidas a todos os quatro pontos de observação.

Figura 25 - Campanhas para monitoramento de DAS



Fonte: Elaborado pelo Autor

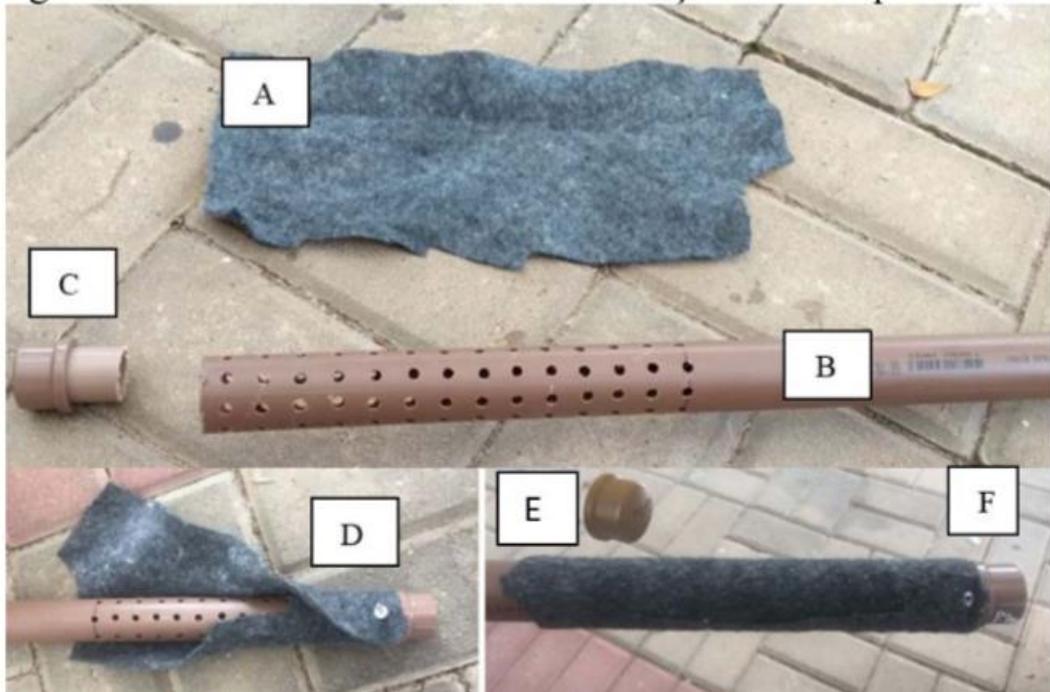
4.3.3 Nível Piezômetro

O monitoramento dos minis piezômetros é realizado a partir de sensores milimetrados inseridos nos equipamentos, que emitem um sinal sonoro ao entrar em contato com a água. Isso permite a medição da altura do nível do corpo hídrico no local.

O minipiezômetro é composto por um tubo de PVC de 3 metros (DN50) e uma malha manta geotêxtil que atua na retenção de impurezas e sedimentos finos, como algas, presentes no corpo hídrico. Isso garante que apenas a água seja direcionada para o interior do tubo PVC, permitindo a medição do nível real, sem interferências de volume adicional. O medidor de nível da água é equipado com uma haste de plástico de 1,5 metros, uma trena graduada, fita adesiva e um sensor que emite um sinal sonoro ao entrar em contato com a água (Figura 29)

A Figura 26 apresenta os elementos necessários na construção do mini piezômetro, cada um identificado por uma letra específica: A) Tela filtro (nylon ou bidim) protege a extremidade do piezômetro contra a entrada de sedimentos. B) Tubo de PVC com perfurações na extremidade serve como a estrutura principal. C) CAP é utilizado para resguardar a base do mini piezômetro. D) O rebite é empregado para fixar a tela filtro no tubo. E) A tampa tem a finalidade de evitar a entrada de detritos ou água no mini piezômetro. F) O resultado final é um mini piezômetro pronto para uso.

Figura 26 - Materiais utilizados na confecção do mini piezômetro



Fonte: (KERN, 2019)

Os minis piezômetros utilizados nesse estudo estão distribuídos em doze pontos, abrangendo as regiões sul, central e norte da Lagoa. Na região sul, são seis mini piezômetros, com dois localizados no ponto do Lagoa late Clube (LIC), três na Servidão Kairos (KAI), dois no Beco da Lua (BLU), e três na Osni Ortiga (ASFZ e PDP). Na região central, encontram-se, um na Ponta das Almas (PDA) e dois nas Rendeiras (REN). Na região norte três no Camping do rio vermelho (CAM).

Tabela 1 - Mini piezômetros e suas coordenadas

Local	Piezômetro	N° Piezômetro	UTM Y (m)	UTM X (m)	Cota Terreno (m)	Cota Topo Piezômetro (m)
ASFZ	PZAS1	12	749959,51	6941423,60	2,42	2,66
BLU	PZBL1	1	749878,58	6940702,98	3,99	4,21
CAM	PZCM1	9	752879,46	6949040,26	1,32	1,47
KAI	PZK1	3	749275,16	6941518,34	1,74	2,01
	PZK2	4	749261,84	6941502,18	2,07	2,30
	PZK3	2	749262,65	6941503,17	1,96	2,18
LIC	PZL1	5	749099,03	6943314,46	1,54	1,87
	PZL2	6	749083,17	6943342,70	1,93	2,06
PDP	PZP1	17	750433,05	6943635,91	0,94	1,26
PDA	PZPDA1	11	750707,83	6945168,08	1,24	1,38
REN	PZR1	15	750988,43	6943667,61	1,36	1,56
	PZR2 - LEI	14	751497,90	6943549,42	1,29	1,49

Fonte: Elaborado pelo Autor

A instalação dos minis piezômetros terrestres começou com a utilização de um trado de 15 cm de diâmetro e 2 m de comprimento, como ilustrado na Figura 27. O trado foi empregado para escavar um orifício no solo, no qual o tubo de PVC foi

inserido até uma profundidade de 2 metros. Posteriormente, uma marreta e uma tábua de madeira foram utilizadas para aplicar força ao tubo, garantindo que ele atingisse a profundidade desejada. A tábua serviu para evitar o contato direto da marreta com o tubo, evitando possíveis danos. É importante ressaltar que após a instalação, pode ocorrer um recalque, sendo necessário continuar a forçar o tubo por mais alguns segundos para estabilizá-lo. Além disso, é fundamental identificar o piezômetro e medir a altura total do piezômetro e, da cota do terreno até a boca do tubo, pois esses dados são utilizados no cálculo da carga hidráulica. Na instalação alguns piezômetros tiveram as partes de fora cortada, para que não ficassem sobrando grandes dimensões de tubo para fora. Após esse corte foi medido e anotado o tamanho total do mini piezômetro

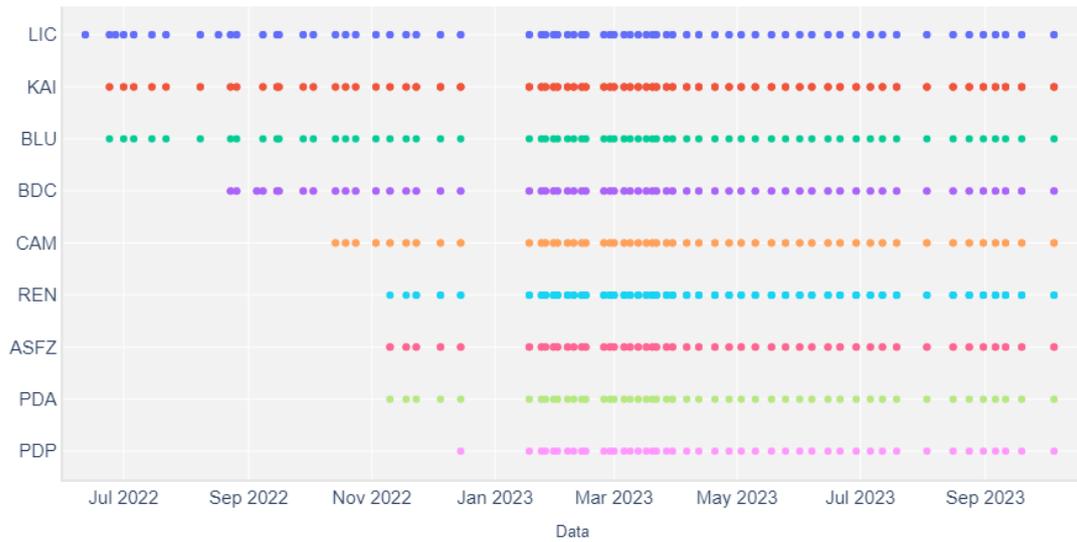
Figura 27 - Instalação mini piezômetros



Fonte: Arquivo LaHiMar

O monitoramento dos minis piezômetros foi conduzido por meio de campanhas semanais, que tiveram início em junho de 2022 e continuaram até outubro de 2023, as quais são evidenciadas na Figura 28. A partir de janeiro de 2023, as campanhas de monitoramento foram estendidas a todos os pontos de observação.

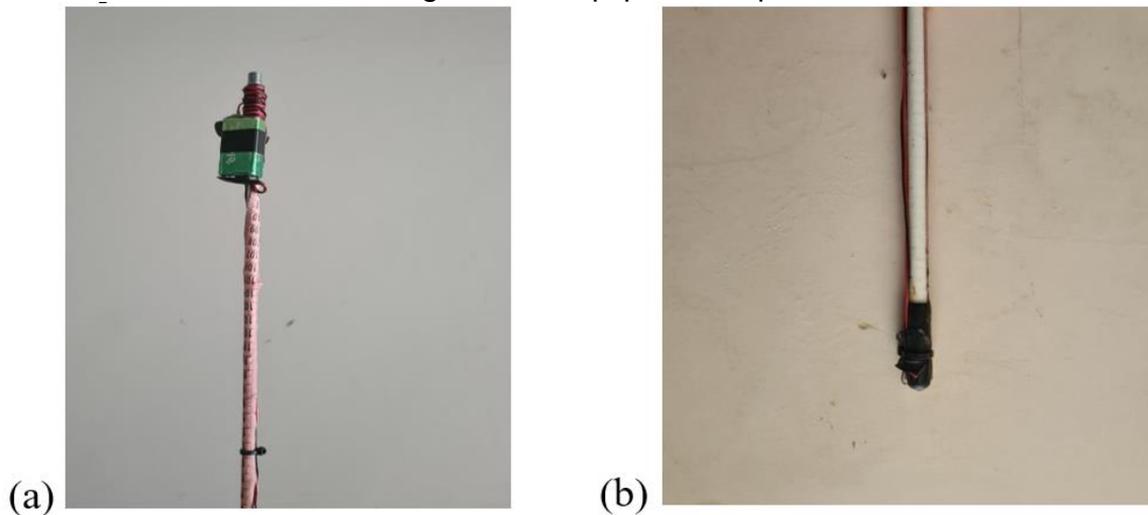
Figura 28 - Campanhas medição mini piezômetros



Fonte: Elaborado pelo Autor

O monitoramento do nível de água (NA) dentro do piezômetro é realizado por meio do equipamento “pio”, apresentado pela Figura 29, onde: (a) Parte superior pio com bateria acoplada 12V; (b)- Parte inferior pio com sensor.

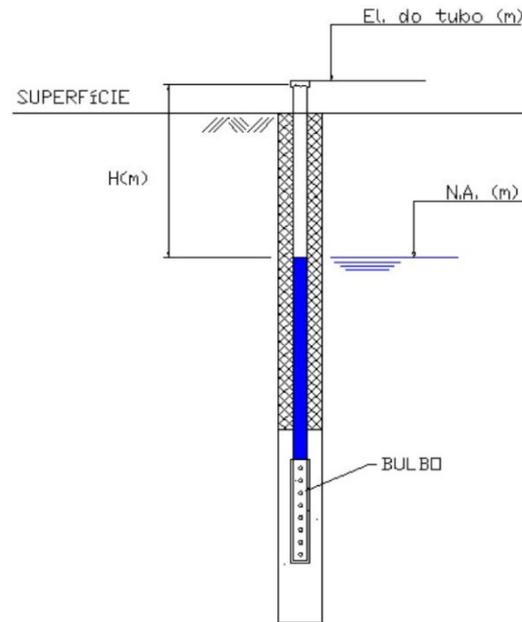
Figura 29 - Equipamento pio.



Fonte: Arquivo LaHiMar

A partir das medições do pio é possível calcular a Carga Hidráulica (CH) para cada Piezômetro. CH é a diferença entre a Cota de Elevação do Tubo (Figura 30), menos a distância do N.A. medida por meio do pio.

Figura 30 - Esquema para cálculo de Carga Hidráulica



Fonte: Arquivo LaHiMar

4.4 ANÁLISE DOS DADOS

Os dados coletados foram organizados e consolidados em uma planilha única do Excel, a qual foi utilizada como a base de dados primária para as análises subsequentes realizadas através de scripts em Python.

4.4.1 Gráficos Bloxpot

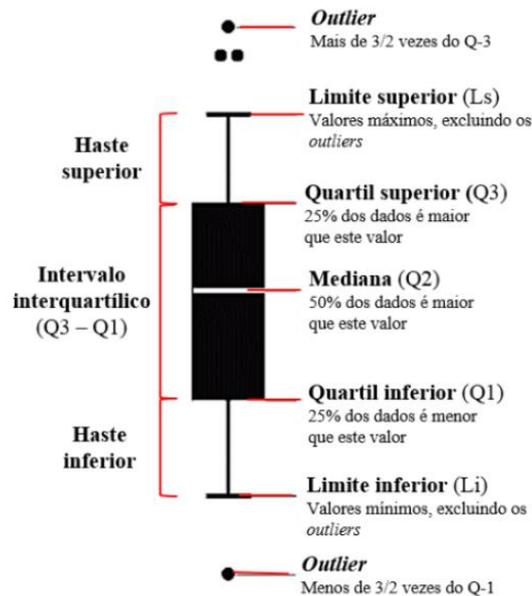
Boxplot é um recurso gráfico utilizado para sumarizar e analisar dados quantitativos (NETO et al., 2017). Os dados de DAS foram utilizados para criação desse tipo de gráfico. A estrutura básica de um Boxplot é composta por uma “caixa” retangular com uma linha representando a mediana. Além disso o gráfico contém uma haste em formato de T.

A Figura 31 representa todas as partes presentes em um gráfico Boxplot. Na disposição vertical do gráfico, o eixo vertical representa valores numéricos, enquanto o eixo horizontal representa o fator de interesse. Os principais elementos incluem: (NETO et al., 2017)

- Quartis (Q1, Q2, Q3): Q1 é o local onde se encontra 25% dos menores valores. Q2 (mediana) é o ponto que divide a metade superior e inferior da amostra (50%). Q3 é o local onde se encontra 75% dos maiores valores.
- Intervalo Interquartilico (IIQ): Diferença entre Q3 e Q1, representada pela dimensão da caixa.
- Limites Inferior e Superior das Hastes: Limite Inferior é o valor mínimo do conjunto de dados, até 1,5 vezes o IIQ, excluindo outliers e/ou extremos. Limite Superior valor máximo do conjunto de dados, até 1,5 vezes o IIQ, excluindo outliers e/ou extremos.
- Outliers (Valores Atípicos) e Extremos: Valores acima e/ou abaixo de 1,5 vezes o IIQ. Extremos: Valores acima e/ou abaixo de 2,5 vezes o IIQ (duas vezes e meia o intervalo interquartilico).

Essa abordagem detalhada permite uma análise mais aprofundada da distribuição dos dados, identificando não apenas os valores atípicos (outliers) mas também os extremos, proporcionando uma compreensão mais completa da variabilidade e padrões presentes no conjunto de dados.

Figura 31 - Estrutura e informações contidas em um Boxplot



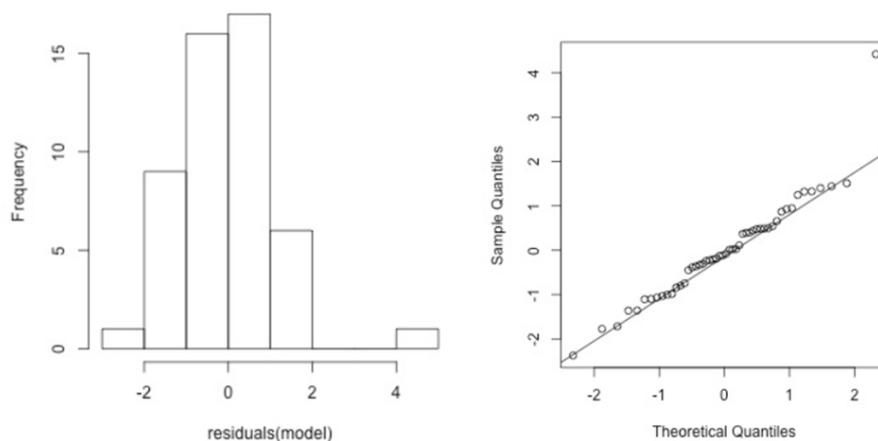
Fonte: (NETO et al., 2017)

4.4.2 Coeficientes de correlação

Para análise de correlação entre as variáveis, foram elaboradas três figuras que contêm histogramas com curvas de distribuição normal e gráficos de probabilidade normal (*normal probability plots*). Esses gráficos indicam de forma visual, a tendência de linearidade dos dados, para cada variável presente no estudo. Com isso é possível realizar uma melhor análise sobre as correlações

A Figura 32 apresenta um par de gráficos, na direita um histograma e na esquerda um *Normal Probability Plot*. O histograma sugere distribuição normal, mas com um valor atípico (outlier) notável. O gráfico de probabilidade normal confirma a distribuição normal, com exceção de um ponto discrepante. Recomenda-se prosseguir considerando os resíduos como normalmente distribuídos após remover esse valor atípico

Figura 32 - Histogramas e Normal Probability Plot



Fonte: (PENN STATE, 2023b)

A utilização da correlação tem como objetivo quantificar e avaliar a força e a direção da relação entre duas variáveis. Ao calcular a correlação de Pearson ou Spearman, busca-se compreender se há uma associação entre as variáveis e qual é a natureza dessa associação, seja ela linear ou não linear. Essa análise contribui para identificar padrões, prever comportamentos e compreender a interdependência entre as variáveis no estudo em questão (SOUSA, 2019).

O coeficiente de correlação de Pearson é definido pela equação (3) (JOHNSON; BHATTACHARYYA, 2010)

$$\rho_P = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

Onde (x_i, y_i) são pares de n observações das variáveis x e y com médias \bar{x} e \bar{y} , respectivamente. Portanto, a correlação de Pearson é uma medida de associação entre duas variáveis quantitativas contínuas, que indica o grau de relação linear entre elas. O coeficiente de correlação (ρ) varia de -1 a $+1$, representando força e direção da associação entre variáveis. Valores próximos a -1 indicam uma forte correlação negativa, enquanto valores próximos a $+1$ indicam uma forte correlação positiva. Quando ρ se aproxima de 0 , sugere uma correlação fraca ou inexistente. Em distribuições conjuntas normais, correlação nula implica independência linear entre as variáveis x e y . No entanto, uma correlação nula, mesmo pequena, pode indicar uma relação não linear entre as variáveis. (ORIGUELA, 2018)

O coeficiente de correlação de Spearman é definido pela equação (4) (JOHNSON; BHATTACHARYYA, 2010)

$$\rho_S = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \frac{n+1}{2})(S_i - \frac{n+1}{2})}{\frac{n(n^2-1)}{12}} \quad (4)$$

Os postos das variáveis ou posição dos dados dispostos na forma ordenada, representados por R_i e S_i , são utilizados no cálculo do coeficiente de Spearman, que varia de -1 a $+1$. Diferentemente do coeficiente de Pearson, o de Spearman não necessariamente indica uma associação linear, mas revela relações crescentes ou decrescentes. Em casos nos quais os dados seguem uma relação monotônica e não linear, o coeficiente de correlação de Spearman pode ser mais apropriado para capturar a natureza da relação entre as variáveis (ORIGUELA, 2018).

5 RESULTADOS

5.1 CHUVA, NÍVEIS E GRADIENTE HIDRÁULICO

A Tabela 2 apresenta as estatísticas descritivas para níveis Interno e externo e gradiente hidráulico. O gradiente hidráulico foi calculado diminuindo o Nível interno (nível da laguna), do Nível Externo (nível oceânico). O gradiente hidráulico, desta forma, pode apresentar-se de maneira negativa, quando existe uma maior elevação do nível externo, e de maneira positiva, quando existe uma elevação maior do nível interno. O gradiente hidráulico possui valores mínimos de -15,39 cm e máximos de 101,33 cm, com uma média de 35,50.

Tabela 2 - Estatísticas básicas para Níveis Interno e Externo e Gradiente Hidráulico

Dados	Mínimo (cm)	Máximo (cm)	Média (cm)	Desvio Padrão (cm)
Nível Interno (cm)	47,1	128,9	90,3	11,2
Nível Externo (cm)	14,9	127,3	54,9	14,3
Gradiente Hidraulico (cm)	-15,4	101,3	35,5	14,9

Fonte: Elaborado pelo Autor

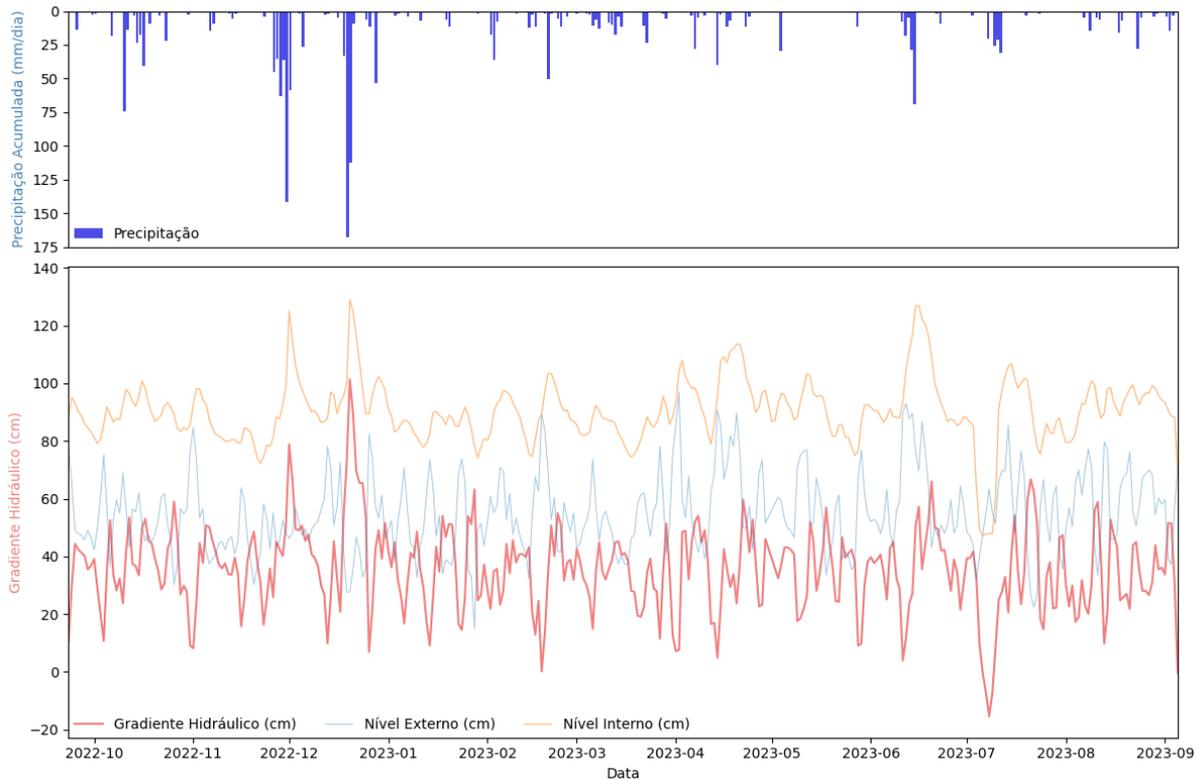
A Figura 33 apresenta os níveis interno e externo, junto com o gradiente hidráulico, além disso o gráfico superior apresenta a precipitação acumulada por dia (mm/dia), no período de setembro de 2022 até setembro de 2023. Subtraídos, os níveis interno e externo, resultam no gradiente hidráulico.

O nível interno é regido tanto pelo nível externo quanto pela precipitação, na Figura 33 é possível observar, entre dezembro de 2022 e janeiro de 2023, dois grandes picos nos valores de nível interno, coincidindo com os altos valores de precipitação para o mesmo período. Por sua vez, o nível externo permaneceu baixo, já que, é influenciado por outros fatores, como o vento. O gradiente, neste caso, subiu junto com o nível interno, considerando a diferença entre nível interno e externo.

No período de junho a julho de 2023 é possível acompanhar um comportamento diferente do descrito no parágrafo acima. Nesse caso o nível externo subiu, e conseqüentemente houve um grande pico de nível interno, assim como no período de dezembro de 2022 e janeiro de 2023, porém com outro cenário causal. Neste contexto, o período de junho e julho possui características de uma estação de seca, com isso a lagoa encontrava-se em um estágio de redução de nível. Simultaneamente, o nível externo, influenciado por diversas forçantes, estava também em um estado inferior, provocando o escoamento da lagoa através do canal e,

consequentemente, resultando em uma diminuição no nível interno da série temporal. Subsequentemente, observou-se a elevação do nível externo para sua média usual, ocasionando um gradiente hidráulico negativo. A pluviometria, se comparada com o cenário do parágrafo anterior, foi baixa. O gradiente então seguiu o aumento dos níveis.

Figura 33 - Precipitação acumulada por dia, Níveis Interno e Externo e Gradiente Hidráulico



Fonte: Elaborado pelo Autor

5.2 DESCARGAS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS (DAS) EM DIFERENTES PONTOS DA LAGOA DA CONCEIÇÃO E NÍVEL PIEZOMÉTRICO

A Tabela 3 apresenta as estatísticas descritivas das Descargas de águas subterrâneas (DAS) provenientes dos Seepage Meters instalados nas seções de monitoramento, em diferentes pontos da Lagoa da Conceição. A tabela exhibe as estatísticas descritivas dos dados de monitoramento de DAS, incluindo o número de coletas (N) em cada local, além da média, mediana, valores mínimo e máximo, e o desvio padrão, todos expressos em centímetros por dia (cm/dia). A descarga de água subterrânea no BLIC, com 245 dados coletados, revela uma variação notável no sentido do fluxo, oscilando entre -4,46 cm/dia e 11,06 cm/dia. A descarga média de

0,73 cm/dia sugere um fluxo subterrâneo predominantemente positivo nesse local. Isso sugere que a direção predominante do fluxo é do compartimento subterrâneo para o superficial

Com 253 dados coletados, o BDC se destaca por ser o único ponto com tendência de descarga negativa, com uma média de DAS de -4,14 cm/dia. O desvio padrão significativo de 5,11 cm/dia e a faixa extensa de valores, variando de -17,84 cm/dia a 16,60 cm/dia, destaca a natureza volátil das descargas neste local. Nesse ponto encontra-se o menor valor de DAS encontrada no período analisado: -17,84 cm/dia, devido à proximidade desse ponto em relação à linha de costa e ao gradiente hidráulico formado pela laguna e pelo mar.

O ponto REN, com 161 dados coletados, possui uma média de descarga de água subterrânea de 1,30 cm/dia. Apesar do menor número de coletas, os dados revelam uma média de DAS consistente. A presença de valores negativos, com um mínimo de -8,36 cm/dia, e o desvio padrão de 3,16 cm/dia indicam uma variabilidade, mas, em geral, o fluxo é predominantemente positivo. A influência antrópica direta da Lagoa de Evapoinfiltração (LEI) nesta região contribui para esses padrões de descarga.

O PDP, com 181 dados coletados, apresenta fluxos com pouca intensidade, resultando em uma média de fluxo próxima a zero. O desvio padrão relativamente baixo de 1,13 cm/dia indica uma menor variação em relação à média, sugerindo uma consistência nas contribuições para o nível de água subterrânea. Assim como REN, PDP sofre, possivelmente, influência antrópica direta da LEI, manifestando-se em fluxos predominantemente nulos.

Tabela 3 - Estatísticas Básicas das DAS (cm/dia) por Local de Piezômetro

Local	N	Média (cm/dia)	Mediana (cm/dia)	Mínimo (cm/dia)	Máximo (cm/dia)	Desvio Padrão (cm/dia)
BLIC	245	0,7	0,6	-4,5	11,1	1,5
BDC	253	-4,1	-3,1	-17,8	16,6	5,1
REN	161	1,3	1,1	-8,4	20,7	3,2
PDP	181	0,2	0,2	-3,5	4,8	1,1

Fonte: Elaborado pelo Autor

A Figura 34 fornece um boxplot das descargas (cm/d), destacando medianas e valores mínimo e máximo em cada seção. A distribuição multimodal das descargas indica comportamentos distintos entre as seções, evidenciando medianas diversas. Outliers, representados por pontos circulares, identificam valores notavelmente distantes da extremidade da caixa, definidos por 1,5 vezes o intervalo interquartil (IIQ),

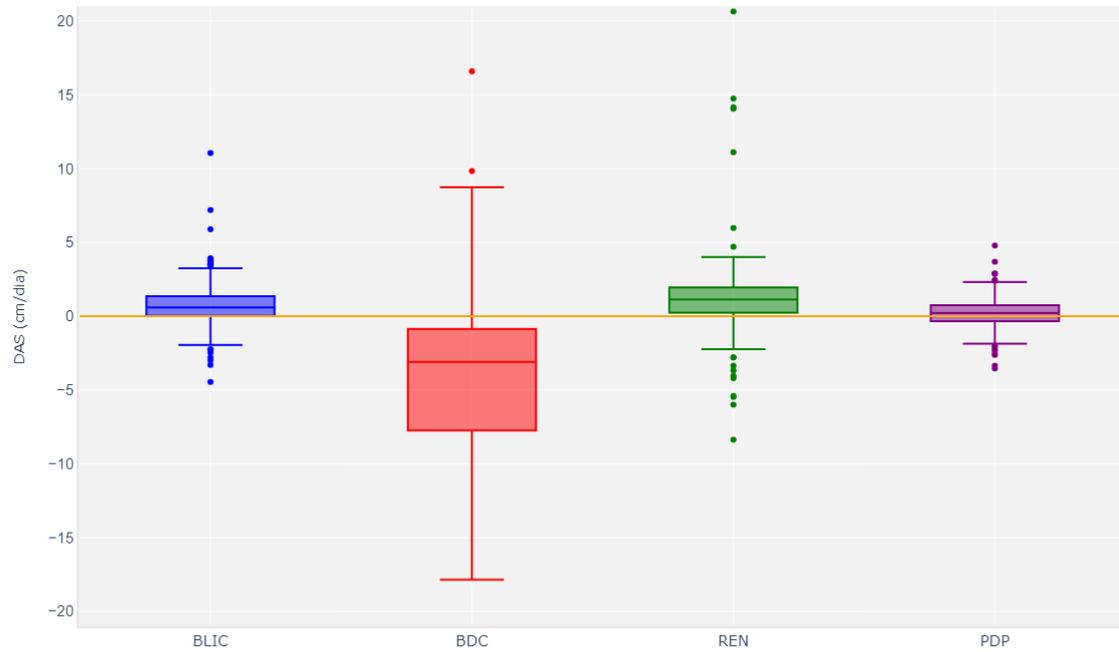
como discutido na seção 4.4.1. A figura explora as médias diárias dos 4 tambores instalados em cada ponto de monitoramento.

A “caixa” do BDC reflete o número alto de desvio padrão encontrado na seção de monitoramento. Os dados nesse ponto se encontram espalhados, quando em comparação com as outras seções. Percebe-se que o limite do quartil inferior se encontra abaixo do 0, ou seja, mais de 75% dos dados são negativos, destacando a tendência de descargas negativas do ponto. Este é o único ponto de monitoramento de DAS na região de fronteira com o mar, os fluxos preferencias do escoamento podem ocorrer através do canal da Barra da Lagoa, ou por via subterrânea, por diversos momentos, assim, devido ao gradiente hidráulico formado entre a laguna e o mar, é esperado que nessa localidade ocorram fluxos no sentido subterrâneo com maior frequência e intensidade.

BLIC e PDP se apresentam de maneira semelhante, com fluxos pouco intensos e com baixa variabilidade. Os fluxos têm tendencia positiva e a semelhança entre estes dois pontos pode ser explicada pela localização próxima entre eles, como a Figura 18 mostra.

O ponto REN apresenta os dados de DAS com maior fluxo positivo entre os pontos de monitoramento, como é possível observar na Figura 34. Pela presença da LEI a poucos metros dos equipamentos, os aportes positivos das Rendeiras são mais intensos.

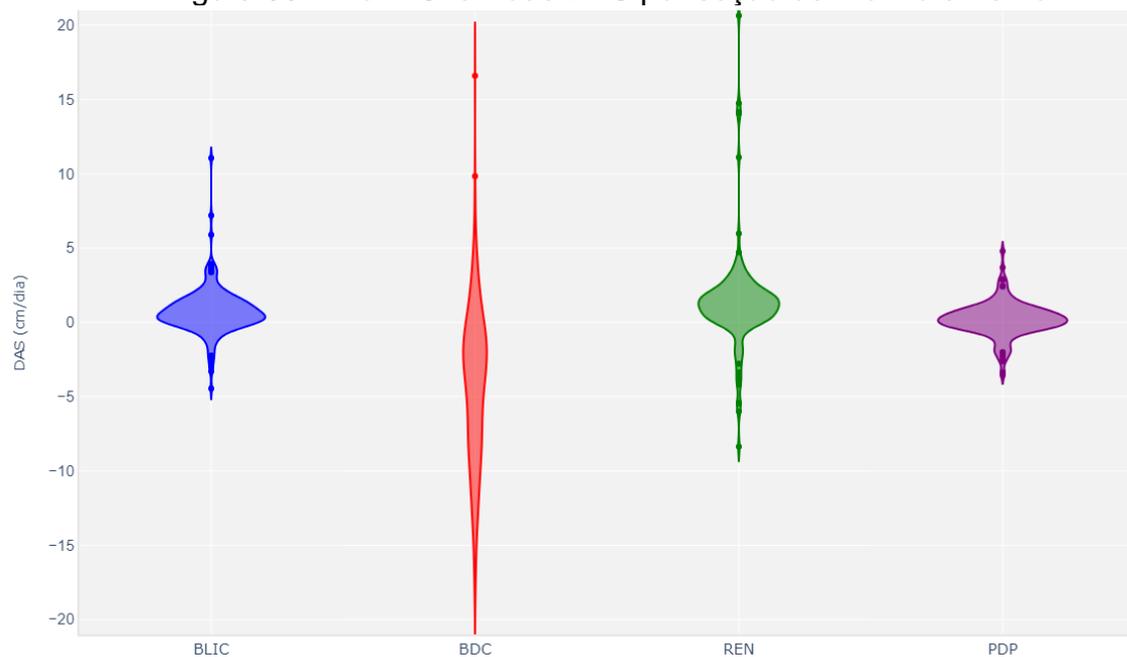
Figura 34 - Gráfico boxplot das DAS por seção de monitoramento



Fonte: Elaborado pelo Autor

Além do boxplot, foi plotado um “violin chart” para os mesmos dados. Com esse gráfico é possível observar melhor a distribuição dos dados.

Figura 35 - Violin Chart das DAS por seção de monitoramento

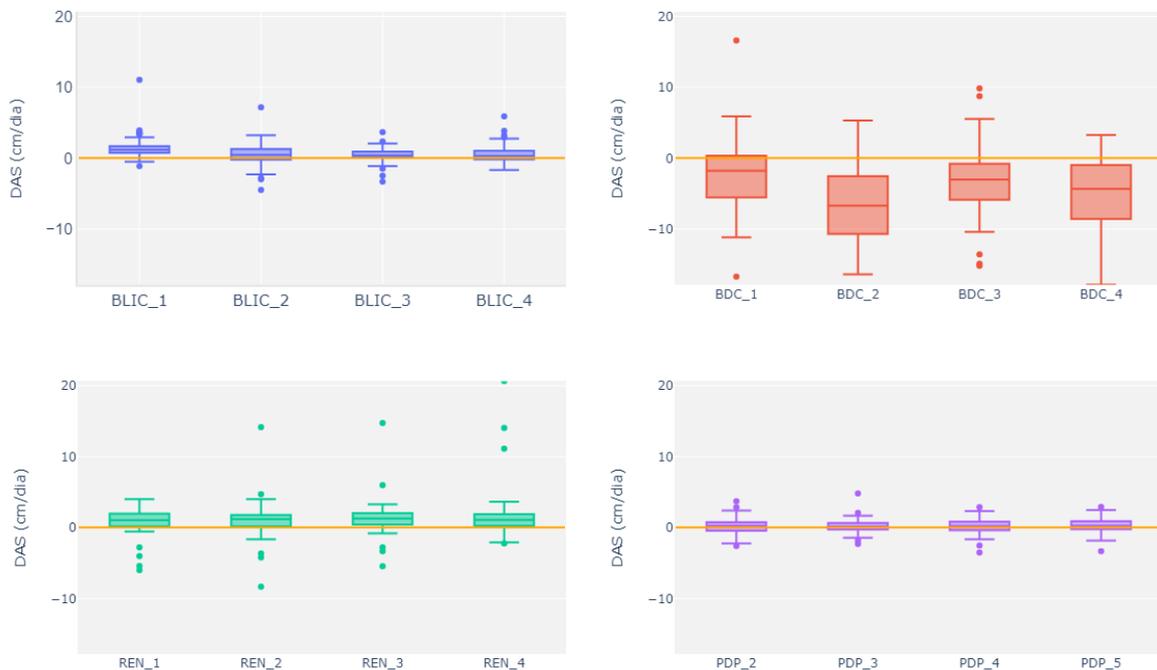


Fonte: Elaborado pelo Autor

A Figura 36 apresenta a variação de DAS por seepage em cada seção. A numeração dos seepages indicam a ordem em que eles foram instalados em relação a costa, sendo o 4 o mais distante e o 1 o mais próximo a costa. No PDP aconteceu uma troca na ordem dos piezômetros, onde o PDP_1 foi realocado para uma localização mais afastada da costa, 3 metros após o PDP_4 e renomeado como PDP_5. Desta forma, na seção de monitoramento PDP, o seepage mais próximo a costa é o PDP_2.

É possível perceber, que as medianas de cada tambor apresentam valores parecidos em BLIC, PDP e REN, advertindo para falta de variabilidade em relação a posição dos seepages. Já em BDC conseguimos observar uma tendencia de aumento da intensidade negativa do fluxo, principalmente entre o tambor 1 e 2, conforme o tambor se afasta da costa.

Figura 36 - Gráfico boxplot das DAS por seepage instalado por seção de monitoramento



Fonte: Elaborado pelo Autor

A Tabela 4 apresenta as estatísticas básicas das cargas hidráulicas dos piezômetros instalados pela bacia da Lagoa da Conceição. Os dados dos piezômetros localizados no BDC e no PDA foram desconsiderados nessa análise por conta da falta de exatidão da medida de elevação do tubo dos equipamentos.

Ao analisar os dados do piezômetro LIC, observa-se uma variação significativa no nível da água, abrangendo uma amplitude de 71,46 cm. Com 138 coletas, a média de 111,16 cm e a mediana de 112,69 cm indicam uma distribuição relativamente simétrica, enquanto o desvio padrão de 17,25 cm destaca uma certa variabilidade nos valores. A Tabela 4 traz, além da média para o local de monitoramento, os dois piezômetros que compõem a seção LIC: PZL1 e PZL2. Os pontos têm médias de 97,14 cm e 125,14 cm, respectivamente

O piezômetro KAI apresenta uma média de 122,96 cm, indicando um nível d'água consistentemente elevado ao longo das 179 coletas. A amplitude de 78,54 cm sugere uma variação alta em comparação aos outros dados, enquanto o desvio padrão de 14,65 cm reflete uma certa dispersão em torno da média. A Tabela 4 traz, além da média para o local de monitoramento, os três piezômetros que compõem a seção KAI: PZK1, PZK2 e PZK3. Os pontos têm médias de 111,05 cm, 135,13 cm, e 122,59 cm respectivamente

Dentre os piezômetros, BLU se destaca com a maior média, atingindo 316,95 cm. A amplitude expressiva de 90,30 cm revela uma considerável variação nos níveis d'água ao longo das 67 coletas. O desvio padrão de 12,52 cm indica uma distribuição mais concentrada em relação à média.

O piezômetro CAM apresenta uma variação de 50,50 cm ao longo das 51 coletas. A pequena quantidade de coletas pode explicar a variação menor em comparação aos outros pontos. A média de 91,05 cm e a mediana de 96,15 cm, sugerem uma tendência para valores mais baixos, enquanto o desvio padrão de 13,85 cm reflete uma dispersão parecida com os demais pontos.

Os dados do piezômetro REN revelam uma distribuição simétrica, com média de 95,59 cm e mediana de 94,85 cm ao longo das 103 coletas. A amplitude de 66,58 cm destaca uma variação moderada, enquanto o desvio padrão de 9,79 cm indica uma concentração dos dados em torno da média. A Tabela 4 traz, além da média para o local de monitoramento, os dois piezômetros que compõem a seção REN: PZR1 e PZR2(LEI). Os pontos têm médias de 92,96 cm e 97,76 cm, respectivamente

Com uma média de 199,38 cm e uma amplitude de 29,20 cm, o piezômetro ASFZ apresenta uma distribuição mais concentrada ao longo das 50 coletas. Assim como o ponto CAM, o menor número de coletas, reflete em uma menor amplitude dos dados. O desvio padrão de 6,45 cm destaca uma consistência nos valores, sugerindo uma estabilidade nos níveis d'água.

O piezômetro PDP, com 44 coletas, demonstra uma variação moderada nos dados, abrangendo uma amplitude de 45,50 cm. A média de 92,62 cm e a mediana de 90,99 cm sugerem uma distribuição mais centralizada, enquanto o desvio padrão de 9,26 cm indica uma dispersão moderada em relação à média.

Tabela 4 - Estatísticas Descritivas das cargas hidráulicas de Piezômetros por Local

Local	N	Média (cm)	Mediana (cm)	Mínimo (cm)	Máximo (cm)	Desvio Padrão (cm)
LIC	138	111.2	112.7	81.7	153.2	17.3
PZL1	69	97.1	95.1	81.7	132.7	10.8
PZL2	69	125.2	124.2	99.2	153.2	9.2
KAI	179	123.0	122.5	97.0	175.5	14.7
PZK1	66	111.1	108.5	97.0	161.2	11.8
PZK2	66	135.1	132.6	122.5	175.5	9.3
PZK3	47	122.6	120.7	109.7	163.2	9.9
BLU	67	317.0	314.3	301.3	391.6	12.5
CAM	51	91.1	96.2	60.7	111.2	13.9
REN	93	95.6	94.9	61.3	127.9	9.8
PZR1	42	93.0	92.0	61.3	118.3	9.7
PZR2-LEI	51	97.8	96.9	81.4	127.9	9.4
ASFZ	50	199.4	200.8	186.2	215.4	6.5
PDP	44	92.6	91.0	78.1	123.6	9.3

Fonte: Elaborado pelo Autor

A Figura 37 representa as cargas hidráulicas ao longo do tempo em todos os piezômetros da bacia hidrográfica. Médias foram calculadas para os transectos das seções de monitoramento LIC, Kairós e Rendeiras.

Analisando as cargas hidráulicas (CH), é possível identificar três regiões distintas na área de estudo. O ponto BLU, localizado no extremo sul da bacia hidrográfica, exibe o maior potencial hidráulico, seguido pelo ASFZ, situado na área noroeste do subsistema sul. Os demais pontos apresentam uma faixa de carga hidráulica semelhante.

O fluxo ocorre do maior para o menor potencial, indicando um movimento natural em direção à lagoa, fundamental para compreender as dinâmicas hidráulicas em estudo.

O ponto Assefaz, em marrom na Figura 37, ocupa uma posição intermediária nesse percurso, fazendo sentido como um ponto de transição de altos para baixos potenciais. Já o ponto CAM, em preto na Figura 37, mais próximo do mar, destaca-se por ter um potencial particularmente baixo em relação aos outros, indicando uma área de saída de água na lagoa e evidenciando uma distinção clara entre os diferentes pontos em relação à entrada e saída de água.

Ao comparar os diferentes pontos dentro da bacia hidrográfica, observa-se que, existem três regiões com diferentes grupos de potenciais hidráulicos no entorno da laguna.

O maior potencial hidráulico observado em BLU (verde), encontra-se na região Sul da BH, esse ponto possui também a maior cota topográfica e encontra-se em uma região de dunas, conseqüentemente área de recarga da bacia hidrográfica.

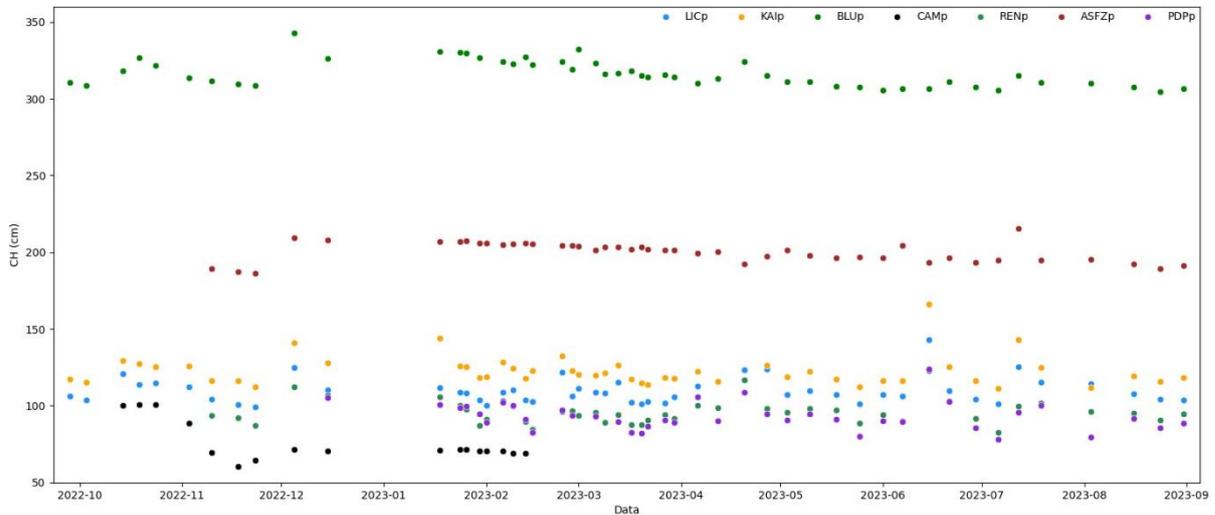
Assim como BLU, ASFZ (em marrom) também se encontra em uma área de recarga, com um potencial intermediário entre os BLU e a laguna, sugerindo o fluxo no sentido dos limites da bacia hidrográfica para a laguna.

No entorno da laguna, no subsistema sul e central, em ordem de maior potencial para menor potencial encontram-se os pontos KAI, LIC, REN e PDP. Os pontos KAI e LIC encontram-se nos limites noroestes do subsistema sul, a média das DAS próximo aos piezômetros do LIC é de 0.7cm/dia, pode-se aferir que o fluxo próximo a linha de costa nesses pontos é nulo, porém ampliando o olhar para o subsistema sul como um todo, é possível supor que o fluxo preferencial ocorre no sentido do subsistema sul para o central, com maior intensidade em direção a avenida das rendeiras. As DAS positivas medidas pontualmente nas rendeiras são provenientes da LEI que afeta o fluxo regional naquele local.

Por fim, o ponto com menor potencial hidráulico, também como esperado, encontra-se no CAM, local mais próximo do oceano, por onde se espera que ocorra um fluxo em direção ao oceano com maior frequência e intensidade.

Além disso, a medida que a carga hidráulica aumenta em um ponto, os outros pontos acompanham a mesma tendência, tanto no aumento quanto na diminuição da carga. Isso sugere uma conexão entre os diferentes pontos dentro do corpo lagunar, revelando uma harmonia na resposta do sistema às mudanças no nível da laguna.

Figura 37 - Cargas hidráulicas dos Piezômetros por Data



Fonte: Elaborado pelo Autor

5.3 RELAÇÃO DA VARIAÇÃO DO NÍVEL PIEZOMÉTRICO COM AS DAS NA LAGUNA

A Figura 38, Figura 39, Figura 40 apresentam dados de DAS e carga hidráulica para os determinados pontos de monitoramento, nas figuras é possível comparar esses dados com o nível interno da Lagoa e o gradiente hidráulico. As informações estão apresentadas por dia, que varia de setembro de 2022 até setembro de 2023 no eixo x.

Os dados de DAS para o ponto LIC indicam um fluxo positivo na maior parte das coletas. Os pontos apresentados se referem a média diária (cm/dia) dos 4 tambores instalados no local de monitoramento. Pode-se observar que as descargas negativas, ou seja, na direção laguna-sedimento se concentram entre os meses de fevereiro a julho de 2023.

Na Figura 38 é evidenciado que o ponto PZL2 exibe um potencial hidráulico superior em relação ao ponto PZL1. A Figura 17 detalha a localização dos pontos de monitoramento, permitindo concluir que o fluxo subterrâneo segue a direção do maior para o menor potencial. Pode-se inferir que, na área LIC, o fluxo subterrâneo ocorre da encosta em direção à laguna. As flutuações nos potenciais demonstram uma

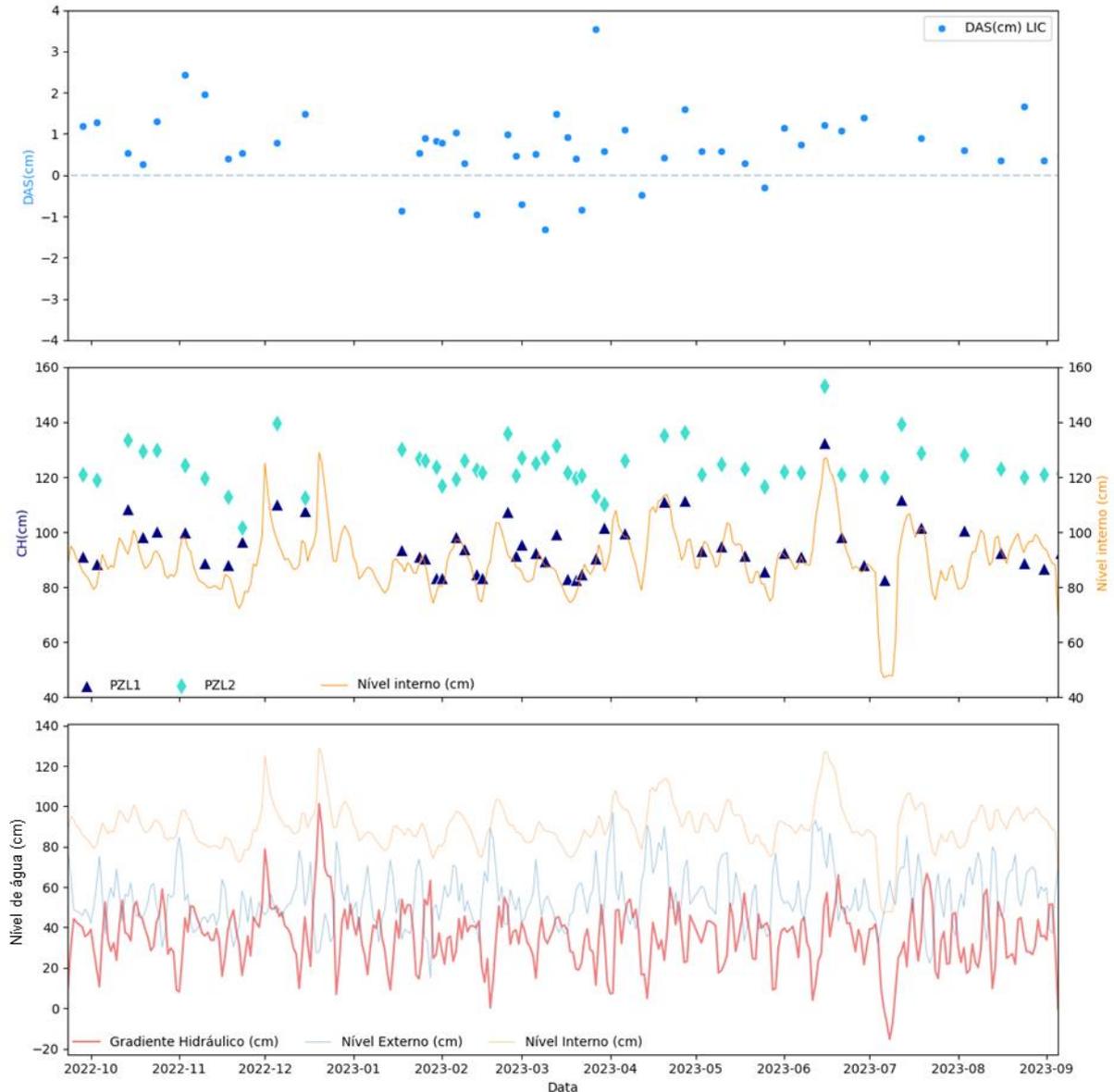
uniformidade, oscilando aproximadamente entre 80cm e 140cm. Essa consistência na variação sugere um padrão nas condições de carga hidráulica, fortalecendo a confiabilidade dos dados apresentados.

A Figura 38 mostra, que os dados de carga hidráulica seguem exatamente o padrão dos dados de nível interno, indicando uma forte relação entre as duas variáveis. Enquanto a Lagoa da Conceição atinge níveis elevados é esperado que os valores de carga hidráulica sejam maiores, também. É possível acompanhar esse crescimento mútuo na imagem, assim como o contrário.

É possível observar a diferença entre a média dos níveis piezométricos de pzL2 para o pzL1 de aproximadamente 28 cm que corrobora os resultados de descarga positiva nesse ponto.

Silva (2022) em seu estudo obteve valores de K por slug test nesse local na ordem de 0.005 cm/s. Os pontos possuem 35m de distância entre si, calculando a vazão por meio da condutividade e do gradiente hidráulico (0.008) entre os pontos chegamos a uma descarga de 3,5 cm/d, seguindo a equação (1). Esse valor é superior à média calculada a partir das DAS monitoradas (0.7cm/d), porém, encontra-se dentro da ordem de grandeza esperada para o local e respeita o sentido do fluxo.

Figura 38 - DAS e Carga Hidráulica LIC, Níveis Interno e Externo e Gradiente Hidráulico



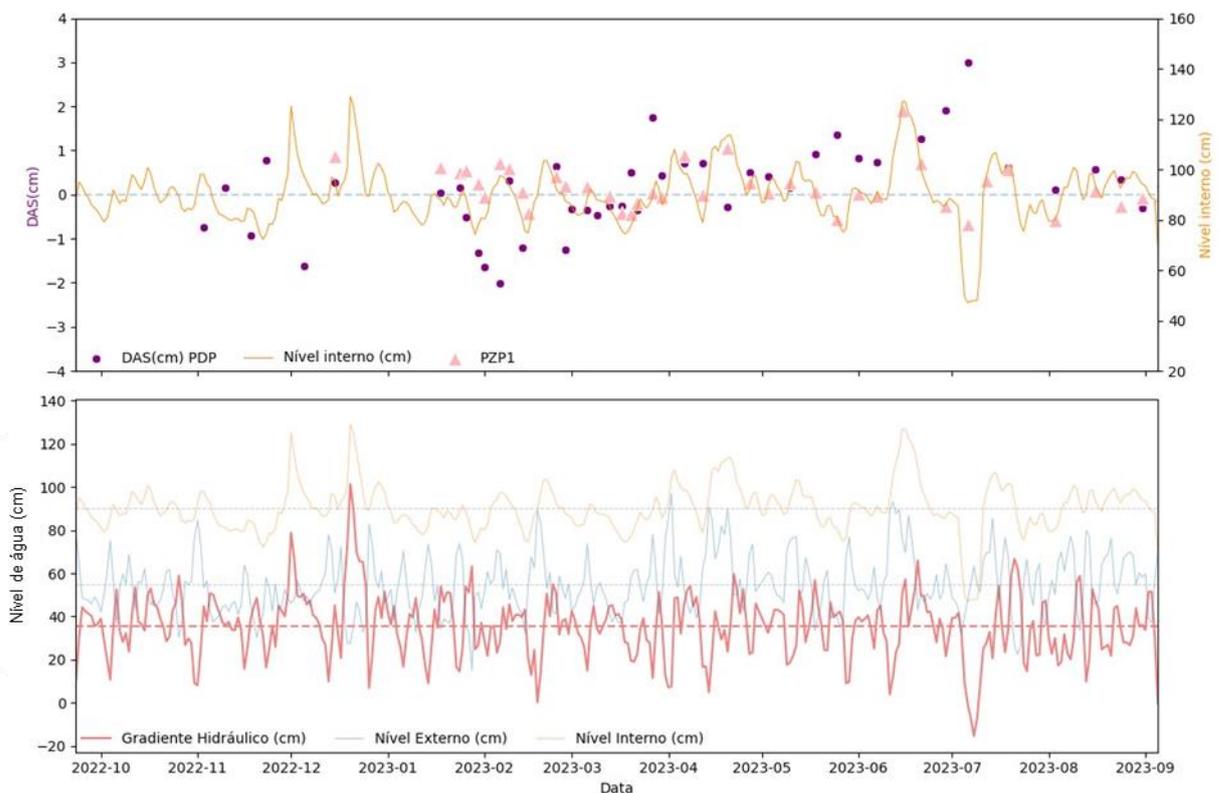
Fonte: Elaborado pelo Autor

Os dados de DAS para o ponto PDP se apresentam em sua maioria perto de 0, indicando um equilíbrio entre o fluxo positivo e negativo. Percebe-se uma tendência maior de fluxos negativos entre o período de fevereiro a abril de 2023, como representado na Figura 39.

Existe apenas um piezômetro neste ponto de monitoramento. Mesmo assim é possível observar o mesmo padrão que o LIC 1. Devido à proximidade do ponto com a laguna, os dados de carga hidráulica seguem os dados de nível interno da laguna, porém, quando as DAS na laguna são negativas o nível no piezômetro é superior ao nível da laguna, enquanto quando as DAS na laguna são positivas o comportamento se inverte e os níveis no piezômetro são menores que o da laguna.

Além disso, é possível observar que o sentido e a intensidade das DAS tem o comportamento inverso ao nível da laguna. Quando ocorre o aumento do nível monitorado no subsistema sul, as descargas se intensificam no sentido negativo, indicando um fluxo do subsistema sul para o central. Enquanto quando o nível no subsistema sul baixa, como ocorreu em julho de 2023 as descargas apresentaram valores positivos intensos. Uma hipótese para esse fenômeno é que quando o nível do subsistema sul baixa o fluxo proveniente de LEI aflore não somente nas REN, mas também no subsistema sul, enquanto quando o nível no subsistema sul está alto, devido ao aumento do gradiente entre o subsistema sul e central, o escoamento que normalmente ocorre pelo canal da ponte, ocorra também pelas vias subterrâneas e o fluxo da LEI intensifique-se nas REN.

Figura 39 - DAS e Carga Hidráulica PDP, Níveis Interno e Externo e Gradiente Hidráulico



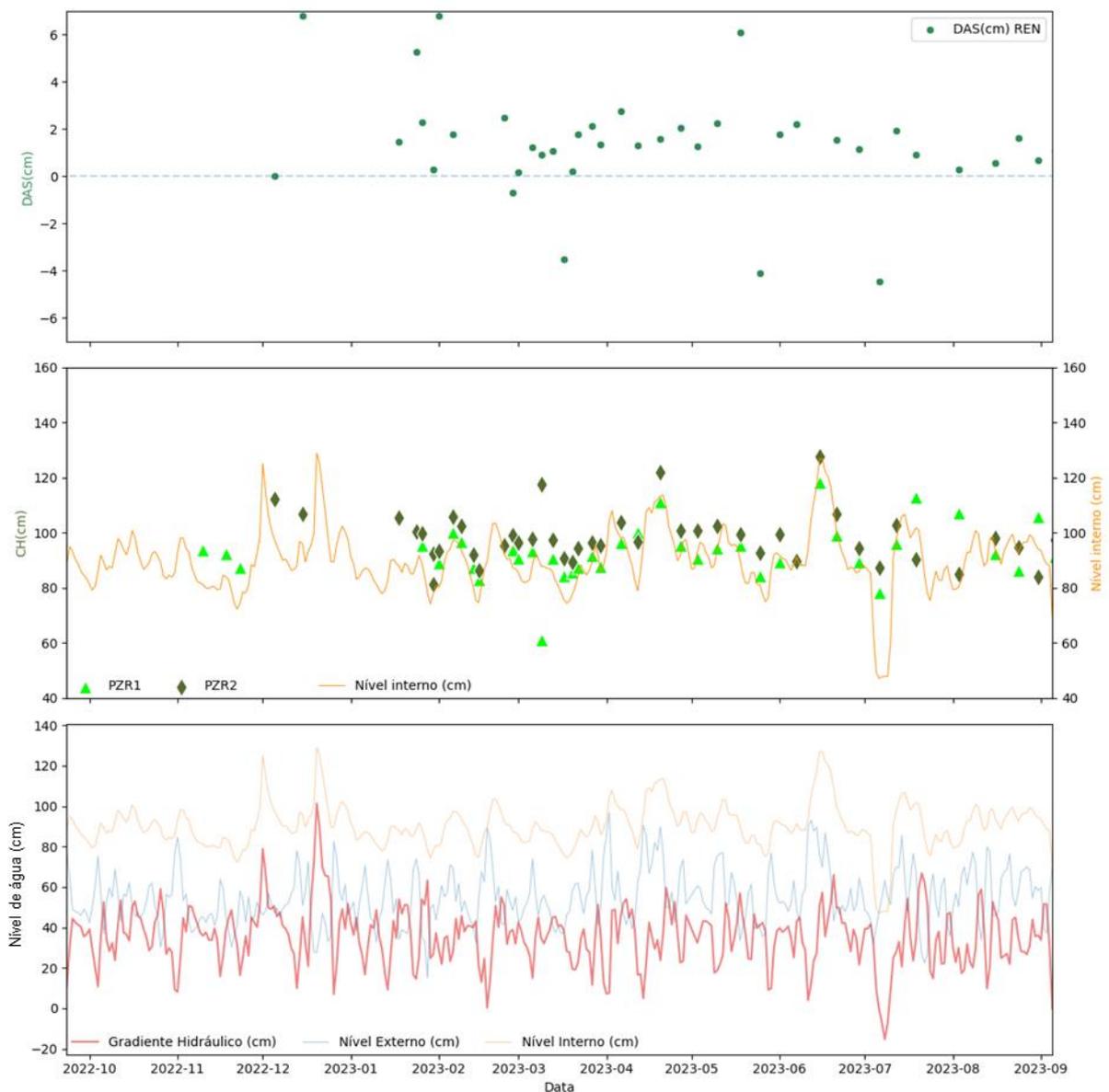
Fonte: Elaborado pelo Autor

Na Figura 40 para as DAS do ponto REN é possível observar a maior tendência positiva entre todos os pontos de monitoramento de seepages. Apesar da tendência positiva nota-se uma estabilidade dos dados conforme o tempo, variando entre 0 e 2, na maioria dos meses. Os valores positivos para este ponto podem estar

relacionados com a localização da LEI, que pode exercer um grande impacto nos resultados de DAS, como já discutido anteriormente

Diferente do LIC, os piezômetros localizados nas Rendeiras não formam um transecto em relação a laguna. Na Figura 40 observa-se uma pequena variância entre o PZR1 (próximo a peixaria) e o PZR2 (CASAN), estes valores fazem sentido, pois o PZR2 encontra-se entre a laguna e a lagoa de evapoinfiltração (LEI), assim, é esperado que ele apresente maior potencial hidráulico já que essa região sofre influência direta da LEI.

Figura 40 - DAS e Carga Hidráulica REN, Níveis Interno e Externo e Gradiente Hidráulico

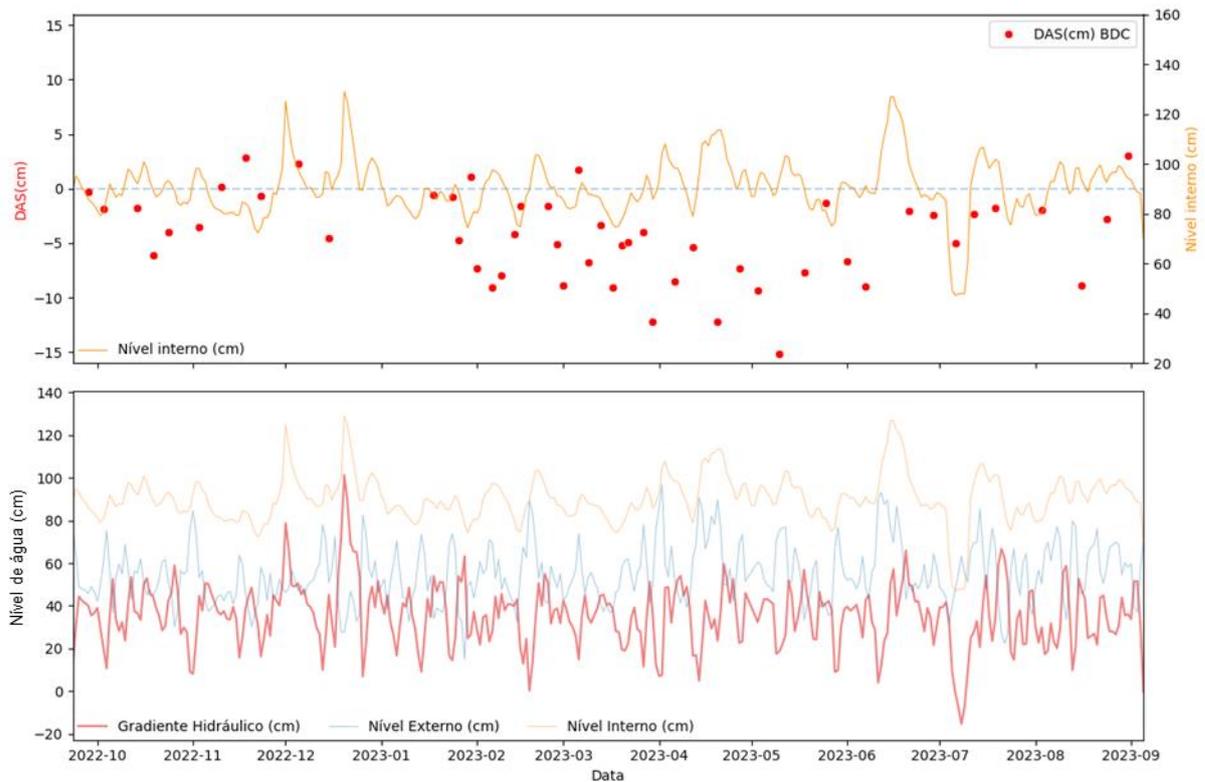


Fonte: Elaborado pelo Autor

Na Figura 41, são apresentados os dados das Descargas de Águas Subterrâneas (DAS) no ponto de monitoramento BDC. A representação permite uma análise comparativa desses dados em relação ao nível interno da lagoa e ao gradiente hidráulico. Como citado anteriormente, os dados de carga hidráulica localizados no BDC não foram considerados para este estudo.

Os dados de DAS para o ponto BDC destacam-se por ser os com a maior valores negativos entre os pontos de monitoramento. As descargas em direção laguna-sedimento acontecem durante todos os meses do ano e valores positivos encontrados são relativamente pequenos. Pela imagem não é possível atribuir uma relação entre as DAS e o gradiente hidráulico da laguna.

Figura 41 - DAS BDC, Níveis Interno e Externo e Gradiente Hidráulico



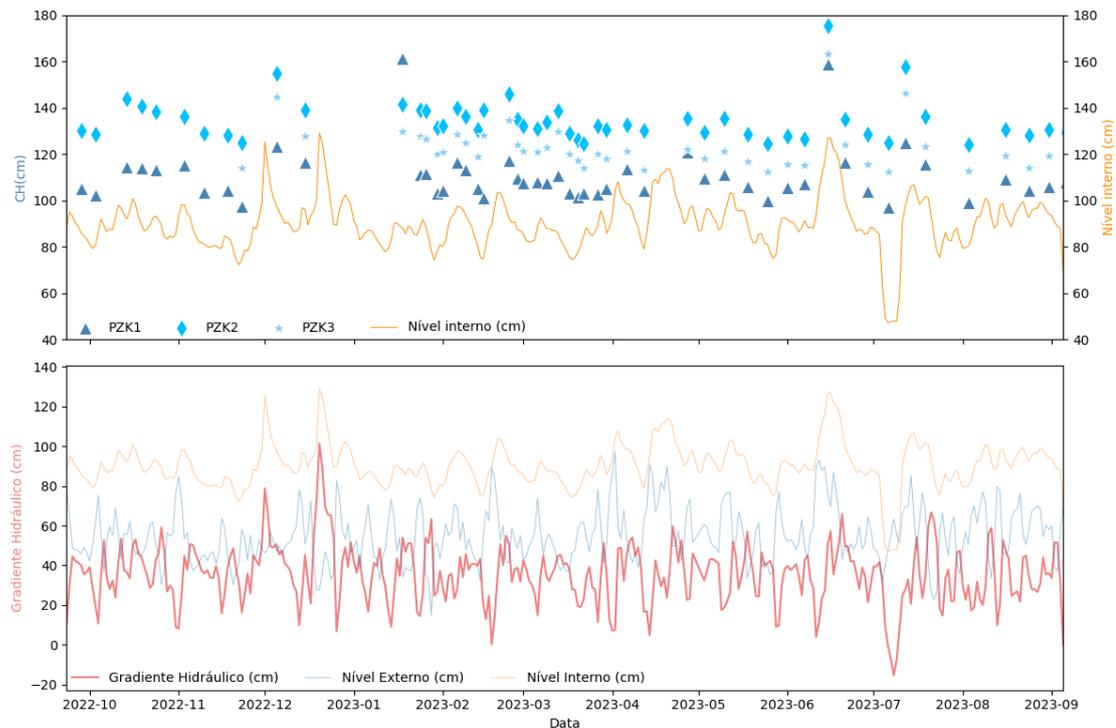
Fonte: Elaborado pelo Autor

Na Figura 42, nota-se um padrão consistente no fluxo na região de Kairós. Durante o período de monitoramento, o PZK3, o ponto mais afastado do corpo lagunar, manteve um potencial hidráulico constantemente superior ao PZK1, localizado mais próximo da lagoa. Em janeiro de 2023, começou o monitoramento contínuo do PZK2, posicionado entre os dois piezômetros mencionados. Conforme

esperado, a carga hidráulica medida no PZK2 encontra-se entre os valores dos outros dois piezômetros, respaldando a hipótese de que o fluxo ocorre da encosta em direção à área lagunar. No gráfico, também são identificáveis alguns eventos extremos, onde a carga hidráulica ultrapassa 150cm. Pode-se perceber que esse evento está relacionado ao nível interno que no mesmo período apresentou grande medida.

Para o ponto KAI Silva (2022) encontrou valores de condutividade de 0.005cm/s. A diferença das médias de nível piezométrico formado entre os piezômetros é de 24cm. A distância entre os piezômetros é de 20m, o que gera um gradiente hidráulico 0.012. Assim, conforme a equação (1) pode-se estimar que fluxo no local ocorre em direção a laguna com um valor de 5 cm/dia.

Figura 42 - Carga Hidráulica KAI e Níveis Interno e Externo, Gradiente Hidráulico



Fonte: Elaborado pelo Autor

5.4 CORRELAÇÃO ENTRE A VARIAÇÃO DOS FLUXOS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA COM O GRADIENTE HIDRÁULICO

As figuras Figura 43, Figura 44 e Figura 45 apresentam os histogramas dos dados apresentados nesse estudo. Para realizar os estudos de correlações entre os dados espera-se que os dados possuam uma distribuição aparentemente normal. A quantidade de dados influencia na interpretação dos gráficos de normalidade. Quanto

mais observações se tem de um determinado dado mais representatividade é obtida com a distribuição. No caso deste estudo os dados são limitados em período de um pouco menos de 1 ano. Desta forma é possível observar alguns padrões nas distribuições.

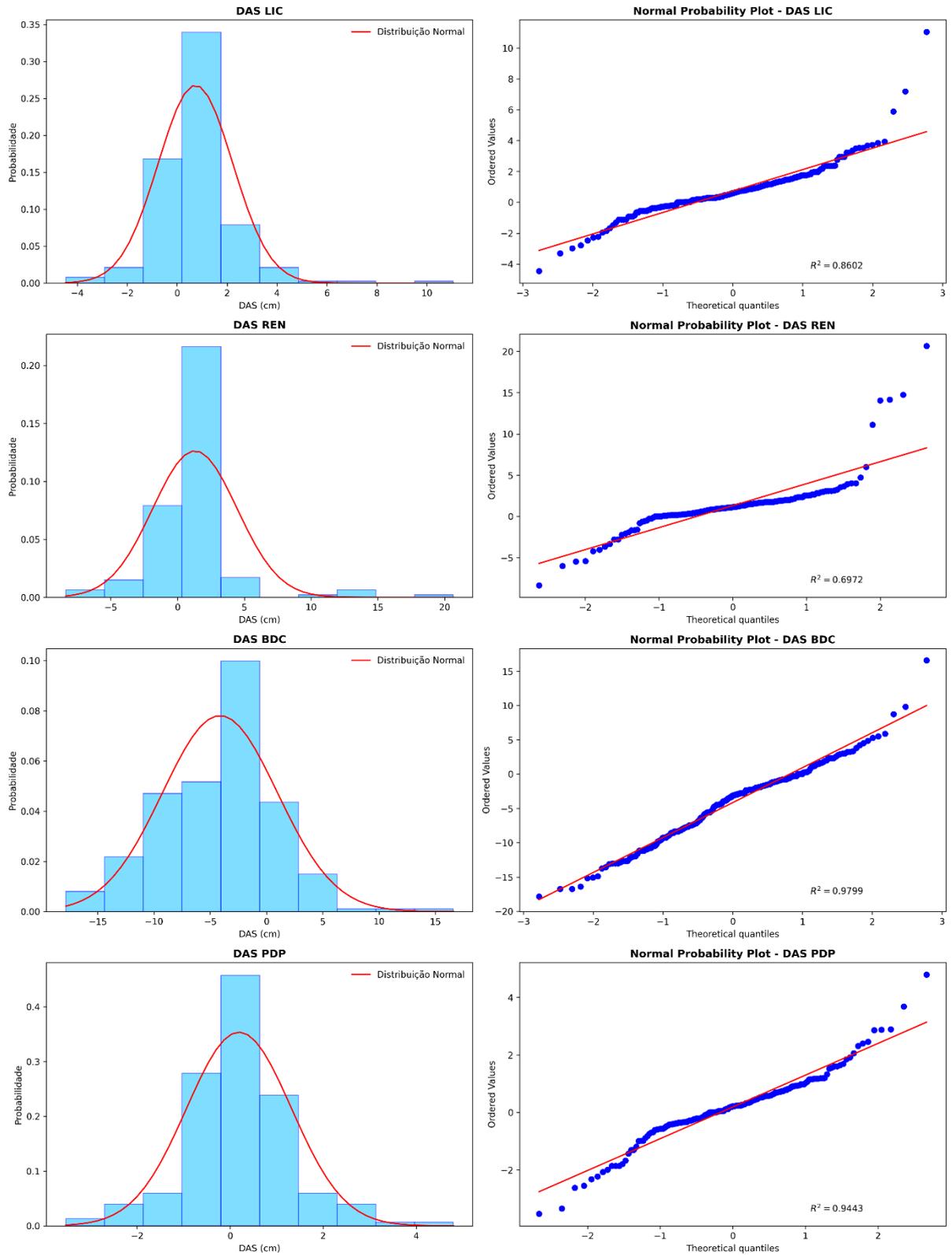
De maneira geral as figuras Figura 43, Figura 44 e Figura 45 mostram que os dados do estudo seguem uma tendência próxima a linearidade, distribuição mais próxima do padrão gaussiano, que é característico da distribuição normal.

A Figura 43 apresenta os histogramas e os gráficos de probabilidade normal para os pontos de monitoramento de DAS. Os histogramas do LIC, PDP e BDC apresentam um padrão semelhante à distribuição normal. O ponto REN também segue a distribuição normal, porém é possível observar que alguns valores extremos estão alterando a curva normal. Os outliers podem ser observados no gráfico de probabilidade a direita do histograma de REN.

A Figura 44 traz os histogramas e os gráficos de probabilidade normal para os dados coletados nos piezômetros instalados por toda a bacia da Lagoa da Conceição. Generalizando os pontos, é plausível notar que os dados seguem uma distribuição normal. No caso dos piezômetros, existem diversos pontos de monitoramento com menos de 60 observações. É o caso do CAM, PDP e ASFZ. A pequena quantidade de observações pode explicar os gráficos um pouco alterados, além dos outliers presentes. Nesses pontos é necessário uma análise mais detalhada e sugere-se que esses dados sejam manipulados de forma a encaixá-los e melhorá-los em uma distribuição normal.

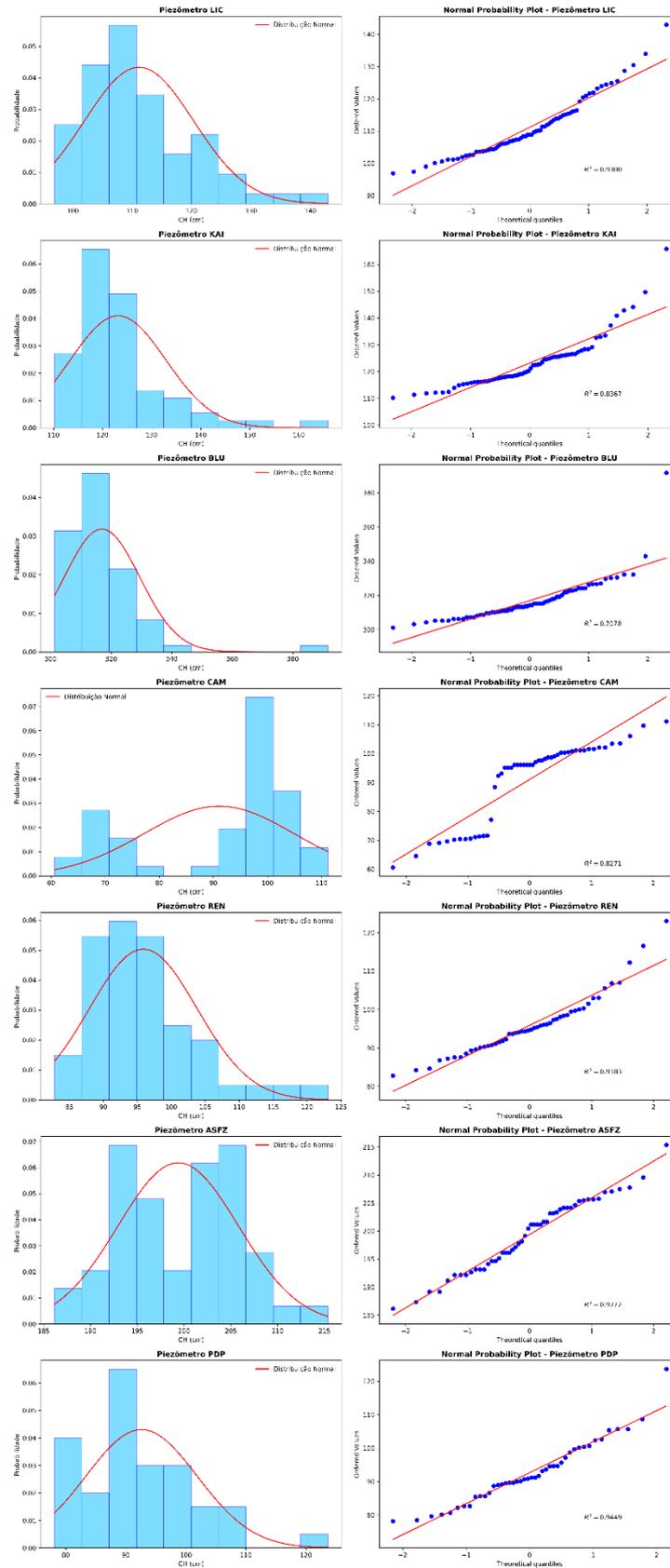
NA Figura 45 temos os histogramas e os gráficos de probabilidade normal para o Nível Externo, o nível interno e conseqüentemente para o gradiente hidráulico. Os dados apresentam uma tendência a linearidade, com a presença de alguns outliers. Estes dados, por serem medidos diversas vezes diariamente, apresentam um número de observações mais relevante. Com isso é possível afirmar que a distribuição apresentada segue uma distribuição que se assemelha a normal.

Figura 43 - Histograma e Normal Probability Plot para DAS por local de monitoramento



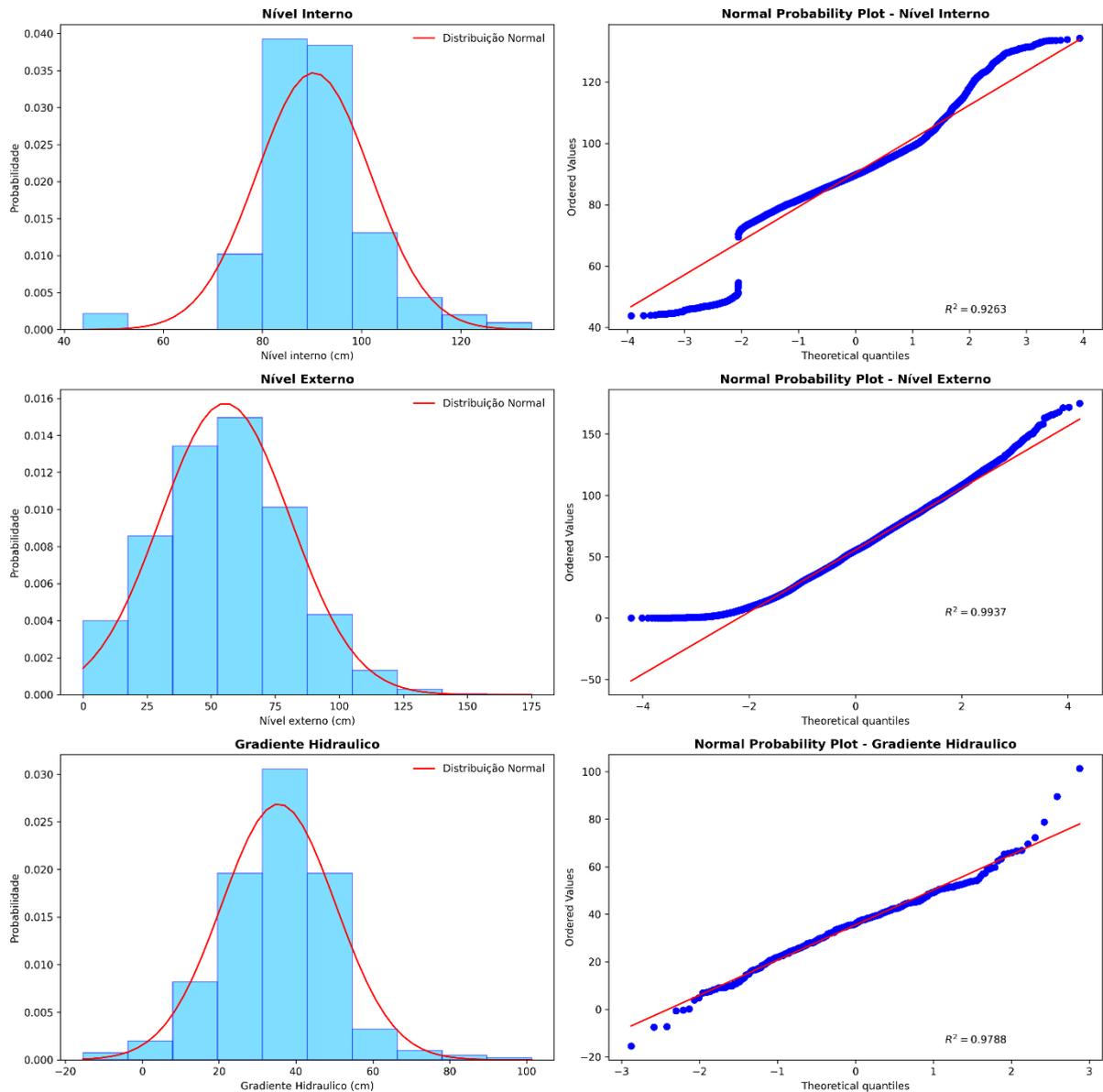
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 44 - Histograma e Normal Probability Plot para Piezômetros por local de monitoramento



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 45 - Histograma e Normal Probability Plot para Níveis Internos e Nível Externo e Gradiente Hidráulico



Fonte: Elaborado pelo Autor

A Tabela 5 apresenta a comparação entre Coeficientes de Pearson e Spearman para as variáveis do estudo. Na diagonal superior são mostrados os valores para o coeficiente de correlação de Pearson (correlação paramétrica). Já na diagonal inferior são apresentados os valores para o coeficiente de correlação de Spearman (correlação não-paramétrica). Os dados pintados de marrom claro indicam correlações que são significativas ($p < 0,05$).

No caso da correlação entre o gradiente hidráulico e as demais variáveis, destacado em negrito, o coeficiente de correlação de Pearson foi significativo ($P > 0.05$) entre o gradiente hidráulico e seguintes variáveis: Nível externo, Nível interno, PZ REN, PZ LIC, PZ KAI e PZ PDP, indicando a presença de uma relação linear entre o gradiente e as variáveis.

Porém, como o coeficiente de correlação de Spearman foi significativo para as mesmas variáveis (Nível externo, Nível interno, PZ REN, PZ LIC, PZ KAI e PZ PDP) além disso apresentou valores semelhantes ao de Pearson, pode haver uma relação monotônica entre as variáveis. Deve-se investigar uma tendência geral na relação entre o gradiente e as variáveis supracitadas, que não siga uma forma linear específica.

Os valores destacados, em marrom claro, destacam os valores de correlação que foram significativos apenas em um tipo de coeficiente de correlação, Spearman ou Person. As correlações de DAS REN com PZ KAI e PZ LIC, PZ BLU com PZ PDP, KAI, LIC e REN apresentaram valores significativos apenas para o coeficiente de Spearman. Isso revela que estes dados têm uma correlação não paramétrica, ou seja, a relação entre eles não segue uma forma linear específica, o aumento ou diminuição em um deles não implica em uma taxa constante com relação ao outro.

Já os valores de correlação de Nível externo com PZ PDP, KAI, LIC e REN, PZ BLU com DAS REN e PZ CAM apresentam valores significativos apenas para Pearson, indicando que estes dados seguem uma correlação paramétrica, seguindo uma relação linear. É possível observar que a relação entre PZ CAM e PZ BLU é significativa, porém negativa, sugerindo que o aumento de uma variável significa a diminuição da outra. É preciso melhor avaliar esses dados para que possa chegar a uma melhor conclusão sobre esse coeficiente.

PZ REN e PZ PDP apresentam uma forte relação, chegando a um coeficiente de 0,90 em Pearson. Tal relação é a de maior valor significativo entre todos os dados da série. Tal resultado pode ser explicado pela proximidade dos pontos, que se encontram no subsistema central da Lagoa da Conceição

Percebe-se que os valores de DAS LIC e DAS BDC não apresentam nenhum tipo de correlação significativa com os outros dados. Todos os outros dados tem, ao menos, algum tipo de correlação significativa com outro. De maneira geral, observa-se uma grande correlação entre os piezômetros entre si, que também compartilham correlações significativas com o Nível interno da laguna

Tabela 5 - Coeficientes de correlação. Diagonal superior: coeficiente de correlação de Pearson (correlação paramétrica). Diagonal inferior: coeficiente de correlação de Spearman R (correlação não-paramétrica). Em vermelho estão indicadas as correlações que são significativas ($p < 0,05$).

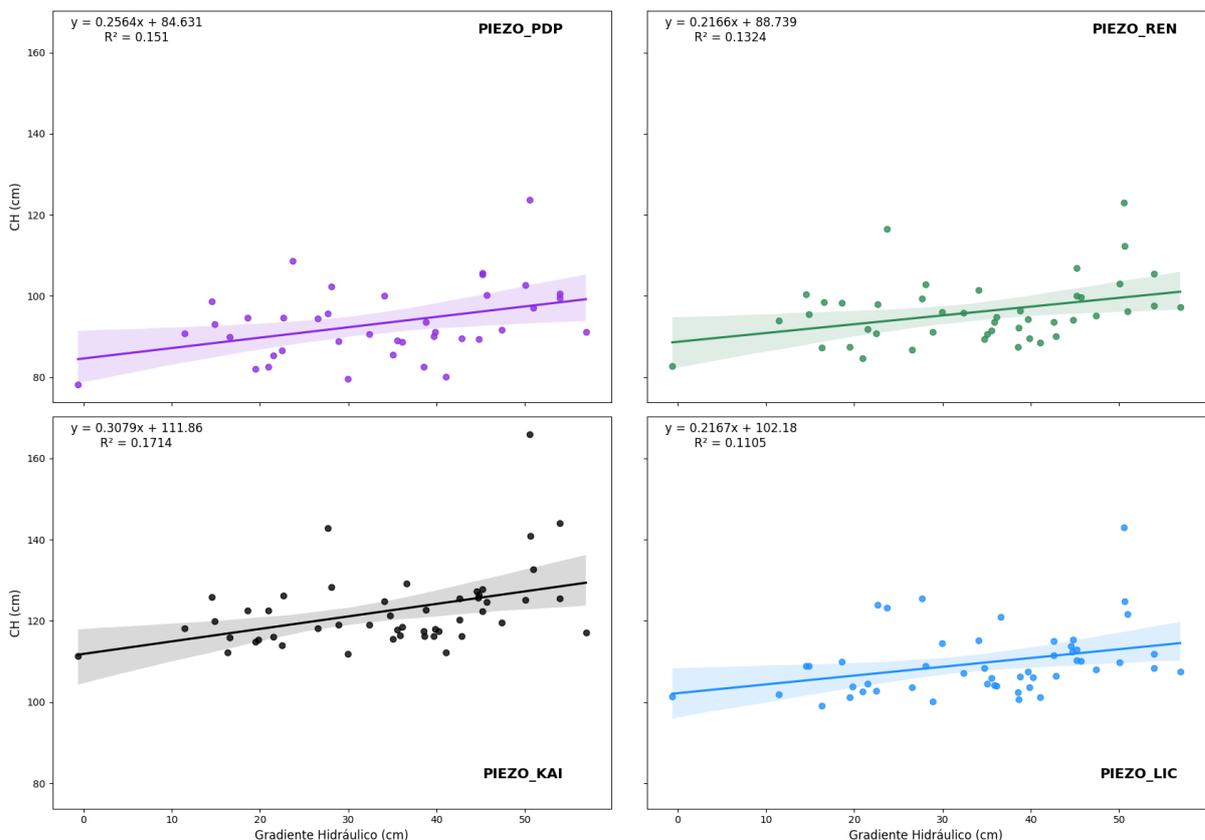
		Correlação paramétrica (Pearson)														
Correlação não paramétrica (Spearman)	Variáveis	DAS_LIC	DAS_BDC	DAS_REN	DAS_PDP	PZ_PDP	PZ_KAI	PZ_BLU	PZ_CAM	PZ_ASFZ	PZ_LIC	PZ_REN	Nível Interno	Nível Externo	Grad. Hid.	
		DAS_LIC	1,00	-0,01	0,13	0,24	0,05	0,16	-0,13	0,02	-0,23	0,16	0,08	0,22	0,22	-0,09
		DAS_BDC	0,02	1,00	-0,10	-0,09	-0,14	0,14	-0,01	-0,27	-0,07	-0,01	-0,07	-0,18	-0,13	0,00
		DAS_REN	0,24	-0,17	1,00	-0,21	0,53	0,29	0,43	-0,39	0,28	0,22	0,40	0,45	0,18	0,17
		DAS_PDP	0,21	-0,11	0,06	1,00	-0,29	-0,35	-0,56	0,44	-0,42	-0,16	-0,23	-0,24	0,03	-0,24
		PZ_PDP	0,03	-0,08	0,55	-0,21	1,00	0,81	0,19	-0,21	0,14	0,74	0,90	0,82	0,35	0,39
		PZ_KAI	0,14	0,07	0,40	-0,36	0,79	1,00	0,24	0,02	0,35	0,88	0,83	0,69	0,26	0,41
		PZ_BLU	-0,21	0,03	0,23	-0,61	0,46	0,58	1,00	-0,36	0,54	0,10	0,17	-0,04	-0,06	0,07
		PZ_CAM	-0,04	-0,19	-0,27	0,21	-0,11	0,10	0,00	1,00	-0,19	0,31	0,02	0,15	0,27	-0,13
		PZ_ASFZ	-0,16	-0,06	0,28	-0,46	0,24	0,50	0,73	-0,08	1,00	0,17	0,08	-0,02	-0,13	0,12
		PZ_LIC	0,10	-0,01	0,31	-0,10	0,72	0,84	0,34	0,39	0,23	1,00	0,82	0,71	0,43	0,33
		PZ_REN	0,08	-0,04	0,44	-0,09	0,86	0,73	0,31	0,09	0,15	0,82	1,00	0,83	0,38	0,36
		N. Interno	0,25	-0,17	0,39	0,06	0,74	0,64	-0,04	0,03	-0,03	0,71	0,78	1,00	0,31	0,46
		N. Externo	0,20	-0,05	0,26	0,03	0,23	0,12	-0,07	0,25	-0,17	0,24	0,26	0,33	1,00	-0,70
	Grad. Hid.	-0,01	-0,03	0,07	-0,07	0,37	0,44	0,10	-0,17	0,16	0,41	0,34	0,31	-0,74	1,00	

Fonte: Elaborado pelo Autor

Com o objetivo de analisar mais detalhadamente a correlação linear entre as variáveis que apresentaram uma correlação paramétrica significativa, a Figura 46 apresenta os gráficos *scatterplot*, mostrando a relação entre o gradiente hidráulico e a carga hidráulica.

Ao observar a Figura 46, é possível notar que, conforme esperado pelo coeficiente de correlação positivo apresentado na Tabela 5, quando o gradiente hidráulico aumenta, a carga hidráulica também aumenta. No entanto, os dados estão dispersos, o que indica uma variabilidade considerável na relação entre essas variáveis. Além disso, o coeficiente de determinação (R^2) das retas de regressão é baixo. Um baixo valor de R^2 sugere que a variação da carga hidráulica não pode ser explicada apenas pelo gradiente hidráulico. Isso indica a necessidade de estudar outros tipos de correlação ou considerar a influência de outras variáveis no cálculo do gradiente hidráulico, não exploradas neste trabalho.

Figura 46 - Gradiente Hidráulico (cm) por Carga Hidráulica (cm) para Piezômetros PDP, REN, KAI e LIC



Fonte: Elaborado pelo Autor

Para uma melhor análise dos dados o gradiente hidráulico foi dividido em três faixas: Gradiente Baixo, Médio e Alto. Essa divisão foi realizada a partir da média da série de dados no período de monitoramento. Para definição do limite baixo foi levado em consideração a subtração do desvio padrão (15cm) da média (35cm), chegando ao resultado de 20cm. O limite inferior do gradiente Alto foi levado em consideração a soma da média com o desvio padrão, resultando no valor de 50cm. As faixas estão apresentadas na Tabela 6, assim como o número de observações (N) por faixa de gradiente.

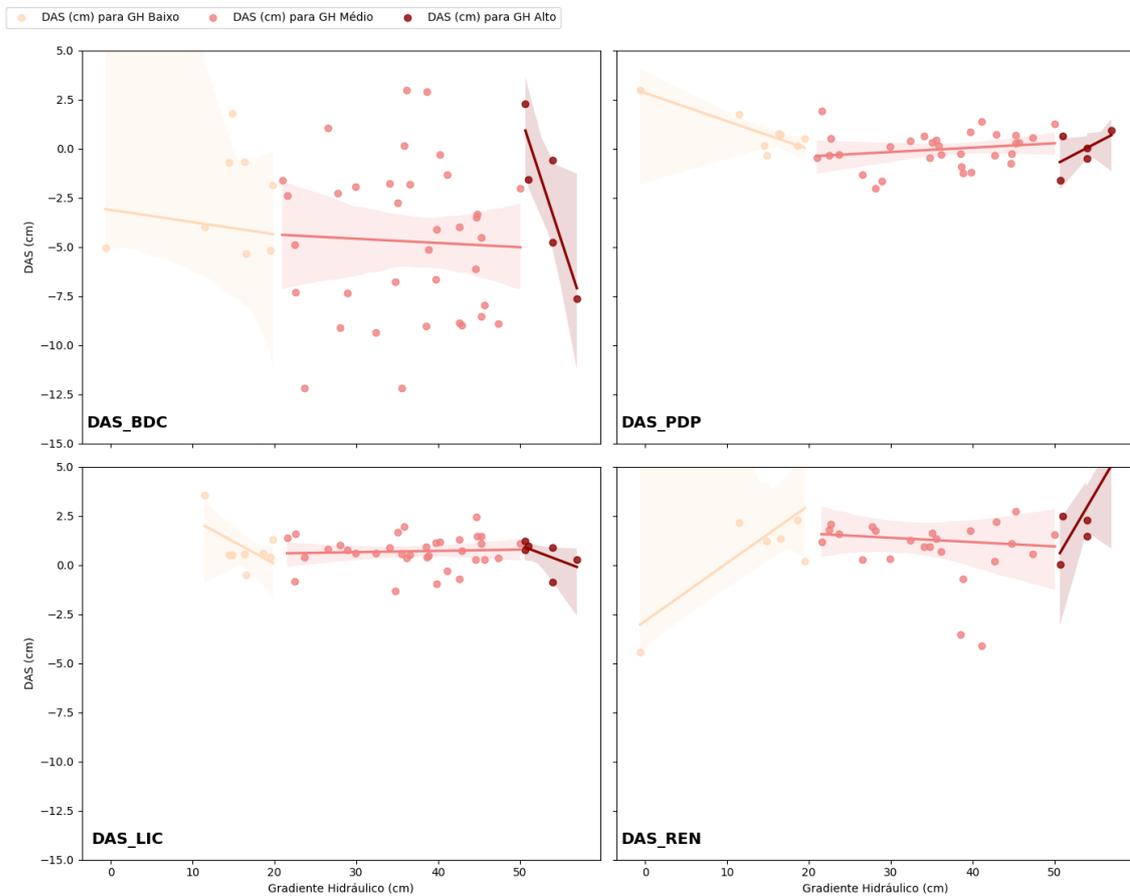
Tabela 6 - Faixas de Gradiente Hidráulico: Baixo, Médio e Alto

Gradiente Hidráulico	Gradiente Baixo	Gradiente Médio	Gradiente Alto
Limites	$\text{GH} < 20$	$20 < \text{GH} < 50$	$\text{GH} > 50$
N	50	249	49

Fonte: Elaborado pelo Autor

A Figura 47 apresenta as DAS para os 4 pontos de monitoramento para as diferentes faixas de gradiente hidráulico determinados na Tabela 6. Não é possível por meio dos gráficos identificar qualquer tendência ou padrão claro nas relações entre as variáveis analisadas. Fica evidente que a dispersão dos dados no BDC é muito maior que nas outras seções de monitoramento. Porém, não é possível aferir nenhum tipo de relação das DAS com o gradiente hidráulico. Além disso, há poucos dados para os gradientes baixos e altos, assim, recomenda-se que sejam realizados outros testes para correlacionar as DAS com a hidrodinâmica da laguna.

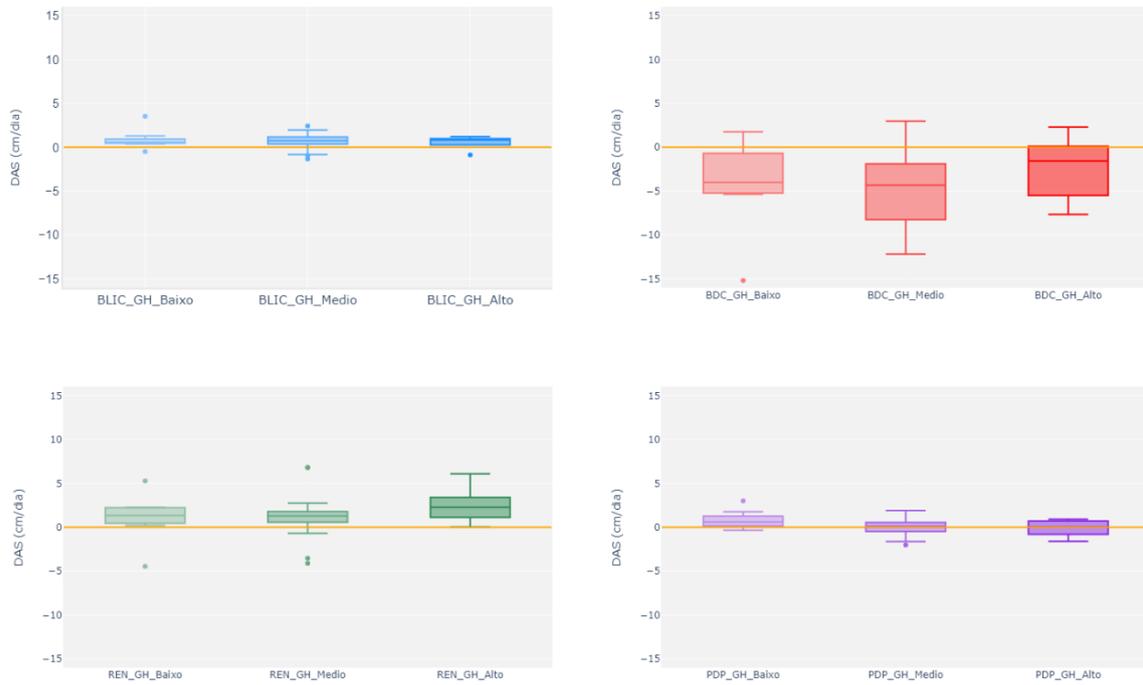
Figura 47 - DAS para diferentes faixas de Gradiente Hidráulico



Fonte: Elaborado pelo Autor

A Figura 48 mostra os boxplots para os valores de DAS, para cada ponto de monitoramento, separados em níveis de gradiente hidráulico calculados na Tabela 6. Observa-se que os dados de DAS das Rendeiras possuem um leve crescimento conforme a faixa do gradiente também cresce, e o BDC por sua vez tem o fluxo negativo mais intenso para o gradiente médio que para o baixo. De maneira geral não é possível identificar nenhuma tendência ou relação entre o gradiente e as DAS dos pontos de monitoramento, da mesma forma que, assim como na Figura 47, a Figura 48 destaca a importância da realização de outros testes para correlacionar as DAS com a hidrodinâmica da laguna.

Figura 48 - Boxplots DAS para diferentes faixas de Gradiente Hidráulico



Fonte: Elaborado pelo Autor

6 CONCLUSÕES

A análise dos padrões dos níveis oceânico e da laguna revelam uma relação entre os níveis interno e externo, juntamente com o gradiente hidráulico. Picos simultâneos nos valores de nível interno, associados a períodos de alta precipitação, indicam a influência significativa e rápida resposta da chuva no comportamento dos níveis na laguna.

Os seepage meter mostraram eficácia, embora sejam mais trabalhosos que os piezômetros, no que tange o monitoramento contínuo. É necessário investigar a correlação das DAS com o fluxo obtido por meio dos níveis dos piezômetros da condutividade hidráulica para validar os resultados dos piezômetros, permitindo uma expansão do seu uso em toda a bacia hidrográfica.

Quanto às descargas na laguna, observa-se um padrão nos transectos: quando próximas a zero, não há diferença em relação ao afastamento da linha de costa. No entanto, fluxos mais intensos, positivos ou negativos, aumentam com o afastamento da costa.

No subsistema sul, representado pelo LIC, as descargas, embora pouco intensas, são positivas, confirmadas por medições com DAS e piezômetros. No PDP as descargas de águas subterrâneas apresentam um comportamento inverso ao nível da laguna. A elevação do nível no subsistema sul resulta em descargas mais intensas no sentido negativo no PDP, indicando fluxo para o subsistema central. No subsistema central (REN), o fluxo é mais intenso em direção à laguna devido à presença da LEI, corroborado por DAS medidas na laguna e dos diferentes níveis piezométricos nas rendeiras (REN1 e REN2-LEI), onde apesar do PZ próximo a LEI possuir menor cota topográfica que o outro PZ localizado nas rendeiras, o PZ próximo a LEI possui maior potencial hidráulico. No ponto BDC, localizado em região de fronteira com o oceano, há uma clara tendência de fluxos no sentido subterrâneo com maior frequência e intensidade. Os valores de CH no piezômetro CAM são os menores de toda a BH, indicando que neste local ocorre o fluxo em direção ao oceano

Os valores de descarga calculados para LIC e KAI, a partir da condutividade hidráulica (K), encontram-se dentro da ordem de grandeza esperada para o local e respeitaram o sentido do fluxo.

O gradiente hidráulico apresentou correlações significativas com as variáveis Nível externo, Nível interno, PZ REN, PZ LIC, PZ KAI e PZ PDP, tanto para Pearson quanto para Spearman. Deve-se investigar uma tendência geral na relação entre o gradiente e as variáveis supracitadas, que não siga uma forma linear específica.

Os gráficos de correlação entre gradiente hidráulico e DAS realizados com os dados atuais apresentam considerável dispersão e não foi possível identificar uma tendência entre as variáveis, apesar da correlação significativa entre elas. Recomenda-se uma análise mais aprofundada para compreender melhor essas relações e categorizá-las em diferentes cenários. Por hora, não é viável estabelecer qualquer associação entre as DAS e o gradiente hidráulico. Adicionalmente, a disponibilidade limitada de dados para gradientes hidráulicos tanto baixos quanto altos sugere a necessidade de conduzir testes adicionais para avaliar a correlação entre as DAS e a dinâmica hidrodinâmica da laguna.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAS. **Águas Subterrâneas – O que são? – ABAS**. Disponível em: <<https://www.abas.org/aguas-subterraneas-o-que-sao/>>. Acesso em: 7 out. 2023.

ARCARI, T. **As interações entre águas subterrâneas e superficiais em uma laguna costeira: Lagoa da Conceição, Florianópolis/SC, Brasil**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.

ARCARI, T. D. L. et al. As interações entre águas subterrâneas e superficiais em uma laguna costeira: Lagoa da Conceição, Florianópolis/SC, Brasil. **Águas Subterrâneas**, v. 33, n. 1, p. 34–44, 26 jan. 2019.

ARRAES, T. DE M.; CAMPOS, J. E. G. Proposição de critérios para avaliação e delimitação de bacias hidrogeológicas. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 37, 2007.

BARLOW, P. M. *Ground Water in Freshwater-Saltwater Environments of the Atlantic Coast*. 2003.

BARNES, R. S. K. **Coastal lagoons**. [s.l.: s.n.].

BEDIENT, P. B.; RIFAI, H. S.; NEWELL, C. J. **Ground water contamination : transport and remediation**. [s.l.] PTR Prentice Hall, 1994.

BIER, F. B. Aspectos hidrodinâmicos e sedimentológicos em um canal de maré: estudo de caso do Canal da Barra da Lagoa, Florianópolis-SC. 2018.

BIRD, E. C. F. *Physical Setting and Geomorphology of Coastal Lagoons*. p. 9–36, 1994.

BORGHETTI, N. R. B.; BORGHETTI, J. R.; ROSA FILHO, E. F. **Aquífero Guarani: a verdadeira integração dos países do Mercosul**. Curitiba, PR: Grupo Integrado de Aquicultura e Estudos ambientais, 2004.

BURNETT, W. C. et al. Groundwater and pore water inputs to the coastal zone. **Biogeochemistry**, v. 66, n. 1–2, p. 3–33, nov. 2003.

CHOW, V. TE; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. [s.l.: s.n.].

DE LIZ ARCARI, A. et al. The Wastewater Contamination Index: A methodology to assess the risk of wastewater contamination from satellite-derived water quality indicators. **Frontiers in Environmental Science**, v. 11, p. 1130655, 2 mar. 2023.

DE SOUZA, G. K. et al. Effects of coastal lagoon water level on groundwater fluxes of nutrients to the coastal zone of southern Brazil. **Journal of Marine Systems**, v. 213, p. 103459, 1 jan. 2021.

DUQUE, C.; ROSENBERRY, D. O. Advances in the Study and Understanding of Groundwater Discharge to Surface Water. **Water 2022, Vol. 14, Page 1698**, v. 14, n. 11, p. 1698, 25 maio 2022.

FEITOSA, F. A. C. et al. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. [s.l.] CPRM, 2008.

FERREIRA, F. **Avaliação dos Impactes das Alterações Climáticas nos Aquíferos Costeiros do Concelho de Almada**. Lisboa: Universidade de Lisboa, 2012.

FETTER, C. W. **Applied Hydrogeology**. 4th Edition ed. [s.l.] Prentice Hall, 2000.

FLORENTINO, E. A.; LIMA, J. M. **ANÁLISE COMPARATIVA DE LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO ENTRE ESTAÇÃO TOTAL E GPS RTK**. Anápolis: UNIEVANGÉLICA, 2021.

GALVÃO, M. F.; CAMPOS, J. E. G. Bacias hidrogeológicas: conceitos e aplicações. **Derbyana**, v. 44, p. 786, 10 jul. 2023a.

GALVÃO, M. F.; CAMPOS, J. G. E. BACIAS HIDROGEOLÓGICAS: CONCEITOS E IMPLICAÇÕES. **XXII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**, 2023b.

GODOY, F. B. **Modelagem hidrológico-hidrodinâmica da Lagoa da Conceição - SC**. [s.l: s.n.].

GUEDES JUNIOR, A. **Mapeamento Hidrogeológico da Ilha de Santa Catarina utilizando geoprocessamento**. [s.l: s.n.].

HEATH, R. C. **Basic Ground-Water Hydrology**. [s.l: s.n.].

HESS, J. H. et al. Influência da precipitação e do nível oceânico nos níveis de uma laguna costeira. **XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**, 2023.

IKEZAWA, M. **Estudo sobre o aporte de água subterrânea na região leste da laguna da conceição, ilha de Santa Catarina, Brasil**. Florianópolis: [s.n.].

JOHNSON, R. A.; BHATTACHARYYA, G. K. **Statistics: Principles & Methods**. 6th Edition ed. [s.l.] John Wiley & Sons, Inc., 2010.

KENNISH, M. J.; PAERL, H. W. Coastal lagoons: critical habitats of environmental change. p. 1–14, 2010.

KERN, P. **Estimativa de fluxos na interface sedimento-água em diferentes regiões de uma laguna subtropical: lagoa da conceição – Florianópolis/SC.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.

KERN, P. et al. A low-cost system for calibrating methodologies used to measure GW-SW flow. **Journal of Applied Water Engineering and Research**, 1 ago. 2023.

KERN, P.; FRANCO, D.; UDA, P. K. Descarga de águas subterrâneas em lagunas costeiras subtropicais. Em: **Gestão Ambiental e Sustentabilidade em áreas costeiras e marinhas: Conceitos e Práticas.** [s.l: s.n.]. v. 2p. 87–110.

KJERFVE, B. Comparative oceanography of coastal lagoons. **Estuarine Variability**, p. 63–81, 1986.

KJERFVE, B. Coastal Lagoons. Em: KJERFVE, B. (Ed.). **Coastal Lagoon Processes (Elsevier Oceanography Series, 60).** [s.l: s.n.]. p. 1–8.

LEE, D. R. A device for measuring seepage flux in lakes and estuaries1. **Limnology and Oceanography**, v. 22, n. 1, p. 140–147, 1977.

LEWANDOWSKI, J. et al. From submarine to lacustrine groundwater discharge. v. 365, 2013.

LOOSE, D. **ANÁLISE E VALIDAÇÃO DO LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO PLANIALTIMÉTRICO COM USO DAS TECNOLOGIAS ESTAÇÃO TOTAL, GNSS RTK E RPA.** Lajeado: UNIVATES, 2022.

MARTINEZ, C. J. Mini-piezometers for Measuring Groundwater to Surface Water Exchange. **EDIS**, v. 2010, n. 2, 30 abr. 2010.

NETO, J. V. et al. Boxplot: um recurso gráfico para a análise e interpretação de dados quantitativos. **Revista Odontológica do Brasil Central**, v. 26, n. 76, 3 abr. 2017.

ODEBRECHT, C.; CARUSO GOMES JR., F. **Hidrografia e matéria particulada em suspensão na Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina, SC, Brasil.** Florianópolis NEMAR - CCB - UFSC, , 1999.

ORIGUELA, L. A. **Estudo da influência de eventos sobre a estrutura do mercado brasileiro de ações a partir de redes ponderadas por correlações de Pearson, Spearman e Kendall.** Riberão Preto: Universidade de São Paulo , 2018.

PENN STATE. **RTK and the Federal Communications Commission (FCC).**

Disponível em: <<https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1845>>. Acesso em: 24 out. 2023a.

PENN STATE. **4.6 - Normal Probability Plot of Residuals | STAT 501.**

Disponível em: <<https://online.stat.psu.edu/stat501/lesson/4/4.6>>. Acesso em: 27 nov. 2023b.

PORTO FILHO, É. Sedimentometria e algumas considerações sobre a biogeoquímica dos sedimentos de fundo da lagoa da Conceição, ilha de Santa Catarina. 1993.

RIBAS, A. A.; THUM, A. B. The use of RTK NTRIP technology: Analysis of the feasibility of using for georeferencing of rural properties. **UNISINOS**, 2014.

ROSENBERRY, D. O. et al. Variable Seepage Meter Efficiency in High-Permeability Settings. **Water 2020, Vol. 12, Page 3267**, v. 12, n. 11, p. 3267, 21 nov. 2020.

SILVA, E. C. **Comparação de métodos para determinação de condutividade hidráulica nos sedimentos de uma bacia hidrográfica costeira.** Florianópolis: UFSC, 2022.

SILVA, V. E. C. Análise hidrodinâmica e biogeoquímica de uma laguna costeira subtropical em bacia hidrográfica urbanizada: Lagoa da Conceição, Florianópolis, Santa Catarina. 2021.

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

SOUSA, Á. Coeficiente de correlação de Pearson e coeficiente de correlação de Spearman : o que medem e em que situações devem ser utilizados? **Correio dos Açores**, p. 19–19, 21 mar. 2019.

TAVARES, J. A. et al. **Caracterização das descargas subterrâneas em uma laguna costeira.** [s.l: s.n.].

TIEDEMAN, C. R.; GOODE, D. J.; HSIEH, P. A. Characterizing a ground water basin in a New England mountain and valley terrain. **Groundwater**, v. 36, n. 4, p. 611–620, 1998.