

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

Eduarda Coradini da Silva

**Comparação de métodos para determinação de condutividade hidráulica nos sedimentos
de uma bacia hidrográfica costeira**

Florianópolis
2022

Eduarda Coradini da Silva

Comparação de métodos para determinação de condutividade hidráulica nos sedimentos de uma bacia hidrográfica costeira

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 Bacharela em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientadora: Dra. Priscilla Kern

Florianópolis

2022

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

Silva, Eduarda Coradini da
Comparação de métodos para determinação de condutividade
hidráulica nos sedimentos de uma bacia hidrográfica
costeira / Eduarda Coradini da Silva ; orientadora,
Priscilla Kern, 2022.
84 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental,
Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Engenharia
ambiental. 3. Aquífero costeiro. 4. condutividade
hidráulica. I. Kern, Priscilla. II. Universidade Federal
de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e
Ambiental. III. Título.

Eduarda Coradini da Silva

Comparação de métodos para determinação de condutividade hidráulica nos sedimentos de uma bacia hidrográfica costeira

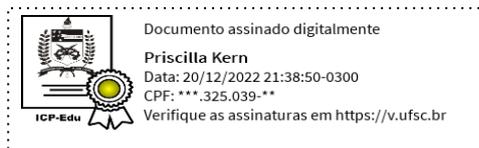
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de “Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental” e aprovado em sua forma final pelo Curso Engenharia Sanitária e Ambiental.

Florianópolis, 16 de dezembro de 2022.

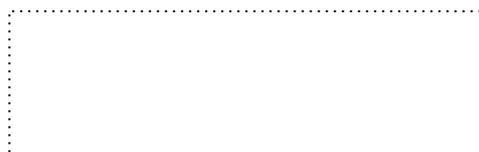


Prof^a. Maria Elisa Magri, Dr^a
Coordenação do Curso

Banca examinadora



Priscilla Kern, Dr^a.
Orientadora



Prof^a Patrícia Kazue Uda, Dr^a
Universidade Federal de Santa Catarina



Lucas Onghero, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 2022.

Este trabalho é dedicado aos meus avós, Antônio e Maria,
por me ensinarem pelo exemplo o que é amor.

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora Priscilla Kern, pela disponibilidade, entusiasmo e paciência com as minhas dúvidas. Pela confiança e grandes ensinamentos sobre esse local mágico que é a Lagoa da Conceição.

Ao LaHiMar, por viabilizarem esta pesquisa através de muita dedicação nos campos realizados, especialmente ao Henrique, pela disposição em ajudar, e à prof. Patrícia, pela oferta deste tema de estudo.

Ao NANOTEC, por possibilitarem de prontidão a realização das análises granulométricas.

À Fernanda e Lourenço, pelos ensinamentos diários na Bertuol Ambiental e por não medirem esforços no apoio à minha realização deste trabalho.

Aos meus pais, que, juntamente com meu irmão, nunca pensaram duas vezes antes de me apoiar em todos meus rumos, pelo carinho e zelo que nunca deixaram de me proporcionar, além do fato de serem as pessoas mais fantásticas que eu conheço.

Aos meus irmãos de outras mães, Marina, Majú, Gabriel, Talles e Rafael, que apesar de muitas vezes a diversos quilômetros de distância, estão sempre presentes de mente e coração na minha vida.

Aos meus amigos que criei na UFSC, que se tornaram minha segunda família. Agradeço pelos melhores momentos da minha vida ao lado de vocês e por toda a trajetória de crescimento, dificuldades e alegrias que tive e tenho o prazer de compartilhar com todos.

O valor de uma família é imensurável, portanto, não tenho como ser mais grata à Universidade Federal de Santa Catarina, por ser a casa dessa família durante esses anos. Por abrir portas e possibilidades que apenas a educação é capaz, além de ser um ambiente de pluralidade, acolhimento e respeito.

RESUMO

Aquíferos costeiros representam recursos importantes e são responsáveis por uma grande parte do setor econômico e social em muitos países. Entretanto, a antropização e desenvolvimento econômico nas regiões costeiras vêm causando diversos problemas hidrogeológicos, ecológicos e construtivos, como é o caso da região de estudo da presente pesquisa, a Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição. Nesse contexto, o estudo das propriedades hidráulicas, especialmente a condutividade hidráulica, se torna indispensável tanto para o conhecimento da própria dinâmica da água, quanto do potencial de contaminação e exploração do aquífero. Desta forma, foram realizados testes de campo e laboratoriais para determinação da condutividade hidráulica e sua caracterização na Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição. Para o método laboratorial foi realizada uma análise granulométrica através de um granulômetro a laser, onde determinou-se as características texturais da laguna, que é classificada integralmente como areia, com exceção de um ponto ao norte da bacia que é caracterizado como silte. A condutividade hidráulica pelo método granulométrico foi determinada pelas fórmulas empíricas de Hazen e Kozeny-Carman, onde foram encontrados valores entre 10^{-3} e 10^{-1} , com uma predominância de valores na faixa de 10^{-2} . Foi observada uma forte correlação entre os métodos, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,99. Ocorreu ainda uma superestimativa de aproximadamente 70% por parte do método Kozeny-Carman, sendo o método de Hazen escolhido como mais adequado da granulometria para este estudo por manter valores mais próximos aos testes de campo. Quanto aos testes em campo, o método realizado foi o *slug test*, com medições realizadas manualmente e através de um sensor de pressão. Os resultados tiveram valores mais consistentes através das análises com sensor de pressão, porém as análises manuais apresentaram valores com diferença de apenas 18% em relação ao sensor, sendo considerada uma forma segura de obtenção de dados. Os métodos utilizados para determinação da condutividade hidráulica a partir dos dados obtidos foram os do Hvorslev e Bouwer & Rice, onde o segundo apresentou uma superestimativa de aproximadamente 20% em relação ao primeiro, com um R^2 de 0,97. Os métodos apresentaram desvio padrão similar, sendo o método de Bouwer & Rice escolhido como o mais adequado, por ser recomendado para aquíferos livres, como é o caso da área de estudo. Os resultados para a condutividade hidráulica obtidos pelos *slug tests* apresentaram valores em uma ordem de grandeza menor que as análises granulométricas, ficando na casa de 10^{-3} , fenômeno observado também em estudos comparativos. Os *slug tests*, que levam em consideração parâmetros como a geometria do poço e do aquífero, apresentaram em valores mais verossímeis em comparação com as análises granulométricas, já que a granulometria utiliza apenas o diâmetro da partícula nas fórmulas empíricas. No que diz respeito a caracterização da condutividade hidráulica na Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição, observou-se menores valores de condutividade (e por consequência, menor fluxo subterrâneo) no ponto 7, na região norte da bacia, onde também se encontrou um solo siltoso. Os maiores valores foram verificados nos pontos 3 e 4, ao sul da bacia, local onde existe possivelmente um alto potencial hidráulico pela diferença existente na condutividade hidráulica entre dois pontos próximos.

Palavras-chave: aquífero costeiro; condutividade hidráulica; análise granulométrica; *slug test*.

ABSTRACT

Coastal aquifers represent important resources and are responsible for a large part of the economic and social field in many countries. However, anthropization and economic development in coastal regions have been causing several hydrogeological, ecological and constructive problems, which is the case of the region studied in this research, the Lagoa da Conceição. In this context, the study of hydraulic properties, especially hydraulic conductivity, becomes essential both for understanding the dynamics of water itself, as well as the risks of contamination and exploitation of the aquifer. In this way, field and laboratory tests were carried out to determine the hydraulic conductivity and its characterization in the Lagoa da Conceição. For the laboratory method, a granulometric analysis was carried out using a laser granulometer, where the textural characteristics of the lagoon were determined and classified entirely as sand, with the exception of a point to the north of the watershed that is characterized as silt. The hydraulic conductivity by the granulometric method was determined by the empirical formulas of Hazen and Kozeny-Carman, where values between 10^{-3} and 10^{-1} were found, with a predominance of values in the range of 10^{-2} . A coefficient of determination (R^2) of 0,99 was observed, with a strong correlation between the methods and an overestimation by the Kozeny-Carman method of 70%. The Hazen method being chosen as the most appropriate for this study, as it maintains values closer to the field tests. The method performed for field tests was the slug test, with measurements taken manually and through a pressure sensor. The results had more consistent values with the use of the pressure sensor, however the manual analyzes presented very close values, being considered a safe way of obtaining data. The methods used to determine the hydraulic conductivity were Hvorslev and Bouwer & Rice, where the second presented values 20% different in relation to the first, and a high correlation between the methods were observed ($R^2 = 0,97$). The methods presented similar standard deviations, with the Hvorslev method chosen as the most appropriate, thanks to its recommendation for confined aquifers, as is the case of the study area. The results for the hydraulic conductivity obtained by the slug tests presented values in an order of magnitude lower than the granulometric analyses, being around 10^{-3} , a phenomenon also observed in comparative studies. The slug tests, which take into account parameters such as the geometry of the well and the aquifer, presented more consistent and credible values compared to the granulometric analyses, since the granulometry uses only the particle diameter as parameter in the empirical formulas. With regard to the characterization of hydraulic conductivity in the Lagoa da Conceição, lower conductivity values (and consequently, lower groundwater flow) were observed at point 7, in the northern region of the watershed, where a silty soil was also found. The highest values were found at points 3 and 4, south of the basin, where there is possibly a high hydraulic potential due to the difference in hydraulic conductivity between this two nearby points.

Keywords: coastal aquifer; hydraulic conductivity; Lagoa da Conceição; slug test; granulometric analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação de lagunas costeiras.....	19
Figura 2 – Caracterização de perfil da província costeira brasileira.	20
Figura 3 - Esquema dos componentes de descarga de uma laguna costeira.	21
Figura 4– Esquema das águas subterrâneas em um aquífero livre.....	22
Figura 5 – Ilustração do <i>slug test</i>	26
Figura 6 – Esquema do teste slug com parâmetros geométricos necessários para estimativa da condutividade hidráulica pelo método de Hvorslev (1951).	27
Figura 7 – Esquema do teste slug com parâmetros geométricos necessários para estimativa da condutividade hidráulica pelo método de Bouwer e Rice (1976).	28
Figura 8 - Mapa de localização da área de estudo.....	32
Figura 9 – a) Distribuição espacial do solo na bacia; b) Fáceis texturais dos sedimentos da laguna.....	35
Figura 10 – Comparação do uso e ocupação do solo no Distrito da Lagoa da Conceição.	36
Figura 11 – Pontos amostrais de estudos de referência e pontos amostrais do estudo atual.	39
Figura 12 – Retirada de sedimentos através do core sampler.	41
Figura 13 – Mapa de pontos de coleta com trado e saca-areia.....	42
Figura 14 – Preparação dos sedimentos para introdução na estufa.	43
Figura 15 - Microtrac S3500, equipamento utilizado para análise granulométrica. ..	43
Figura 16 – a) Aplicação de slug test e monitoramento de recuperação de nível através de régua elétrica; b) Piezômetro utilizado para slug test.	45
Figura 17 – Ilustração do piezômetro utilizado neste estudo.	46
Figura 18 - Parâmetros utilizados no método de interpolação IDW.	48
Figura 19 - Gráfico de colunas da distribuição granulométrica das amostras.....	50
Figura 20 - Curva granulométrica dos pontos estudados.	50
Figura 21 - Curva granulométrica para diferentes profundidades do ponto 2.....	51
Figura 22 - Gráfico de resultados de condutividade hidráulica por análise granulométrica em função da profundidade	54
Figura 23 - Gráfico em colunas dos resultados de condutividade hidráulica por testes granulométricos pelos métodos de Hazen e Kozeny-Carman.	56

Figura 24 - Gráfico de distribuição de dados do ponto 2 obtidos por teste manual, pelo método de Hvorslev.....	58
Figura 25 - Gráfico de distribuição de dados do ponto 2 obtidos por teste com diver, pelo método de Hvorslev.....	59
Figura 26 - Gráfico de distribuição de dados do ponto 2 obtidos por teste com diver e inserção de 1 L de água, pelo método de Hvorslev.....	59
Figura 27 - Médias e desvio padrão dos resultados de condutividade hidráulica por slug test pelos métodos de Hvorslev e Bouwer & Rice.....	61
Figura 28 - Comparação em gráfico de colunas dos valores de condutividade hidráulica com os diferentes métodos de determinação.	63
Figura 29 - Gráfico de correlação dos métodos de Hazen e Kozeny-Carman para os testes granulométricos.	63
Figura 30 - Gráfico de correlação dos métodos de Hvorslev e Bouwer & Rice em cada piezômetro.	65
Figura 31 - Gráfico de correlação dos métodos de Hvorslev e Bouwer & Rice para os slug tests.	65
Figura 32 – Triângulo de Sheppard para análise das fácies texturais dos sedimentos de fundo da laguna.	67
Figura 33 - Mapa de fácies texturais com os pontos coletados dentro da laguna.	68
Figura 34 - Gráfico de comparação entre estudos dos resultados de condutividade hidráulica na URH Dunas.....	71
Figura 35 - Gráfico de comparação entre estudos dos resultados de condutividade hidráulica na URH Depósito Sedimentar.	72
Figura 36 - Gráfico de comparação entre estudos dos resultados de condutividade hidráulica na URH Maciço.....	73
Figura 37 - Interpolação dos dados de condutividade hidráulica na Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Faixa de valores de condutividade hidráulica para materiais não consolidados.	24
Tabela 2 - Estudos de condutividade hidráulica na região da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição.....	31
Tabela 3 – Comparação do uso e ocupação do solo no Distrito da Lagoa da Conceição.	37
Tabela 4 – Parâmetros de ensaios granulométricos e estimativas de condutividade hidráulica de Kern (2019) e Santos (2018).....	38
Tabela 5 - Dados dos pontos pesquisados neste estudo.	40
Tabela 6 – Caracterização granulométrica das amostras.....	49
Tabela 7 – Análise de parâmetros granulométricos das amostras.	52
Tabela 8 - Resultados de condutividade hidráulica por testes granulométricos através dos métodos de Hazen e Kozeny-Carman.	53
Tabela 9 - Resultados de condutividade hidráulica dos <i>slug tests</i> para os diferentes tipos de testes e métodos aplicados.	57
Tabela 10 - Estatísticas dos resultados de condutividade hidráulica por slug tests. Hv: Hvorslev; B&R: Bouwer & Rice.	60
Tabela 11 - Resultados da condutividade hidráulica das análises granulométricas e análises em campo (<i>slug test</i>).	62
Tabela 12 - Comparação de resultados de condutividade hidráulica com estudos de Kern (2022) e Santos (2018).	69
Tabela 13 - Valores de condutividade hidráulica para caracterização da BHLC.....	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BHLC	Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição
URH	Unidade de Resposta Hidrológica
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
LAHIMAR	Laboratório de Hidráulica Marinha

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	Objetivo geral.....	18
1.1.2	Objetivo específico	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	BACIAS HIDROGRÁFICAS COSTEIRASERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.	
2.2	FLUXOS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA E HIDROGEOLOGIA.....	21
2.2.1	Porosidade	23
2.2.2	Condutividade hidráulica	23
2.3	MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA	25
2.3.1	Método de campo - Slug test.....	26
2.3.2	Método laboratorial – análise granulométrica	28
2.4	ESTUDOS ANTERIORES DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA NA REGIÃO DA LAGOA DA CONCEIÇÃO	30
3	METODOLOGIA.....	32
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	32
3.1.1	Pedologia da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição.....	34
3.1.2	Uso e ocupação do solo	36
3.2	DETERMINAÇÃO DOS PONTOS DE AMOSTRAGEM.....	37
3.1	ESTIMATIVA DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM LABORATÓRIO - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	40
3.1.1	Coleta de amostras.....	41
3.1.2	Ensaio laboratoriais e fórmulas empíricas	42
3.2	ESTIMATIVA DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM CAMPO – SLUG TEST	44
3.3	MODELAGEM DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1	DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA	49
4.1.1	Caracterização física das amostras	49
4.1.2	Condutividade hidráulica por testes granulométricos.....	52
4.1.3	Condutividade hidráulica por slug test.....	56

4.2	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS EM CAMPO E EM LABORATÓRIO	62
4.2.1	Comparação entre os resultados obtidos em testes de granulometria e slug tests	62
4.2.2	Comparação com outros estudos.....	66
4.3	CARACTERIZAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA NA BACIA HIDROGRÁFICA DA LAGOA DA CONCEIÇÃO	73
5	CONCLUSÃO.....	77
	REFERÊNCIAS.....	79

1 INTRODUÇÃO

Aquíferos costeiros representam recursos importantes e são responsáveis por uma grande parte do setor econômico e social em muitos países (BOCANEGRA *et al.*, 2009). Apesar de representar apenas 5% da superfície terrestre, mais de 45% da população mundial reside a 100 km das áreas costeiras, e cerca de 80% de todo o turismo mundial se dá em zonas costeiras (BENOIT *et al.*, 2007; FERNANDINO *et al.*, 2018; PARIZI *et al.*, 2019).

Além da antropização e desenvolvimento econômico nas regiões costeiras causarem diversos problemas hidrogeológicos, ecológicos e construtivos, os aquíferos costeiros são também altamente sensíveis a perturbações antropogênicas, o que torna indispensável a preservação e controle das regiões costeiras a fim de manter suas características e singularidades (CHENG *et al.* 2003; TUONG *et al.*, 2003).

Sabendo disso, propriedades hidráulicas das zonas costeiras – como a condutividade hidráulica – representam ferramentas de controle e solução para os constantes impactos causados pela alta densidade populacional nessas áreas, tais como a intrusão de água salgada (WERNER *et al.*, 2013), migração de contaminantes e nutrientes e suas devidas remediações (UCHIYAMA *et al.*, 2000), além de definir a estabilidade de estruturas em áreas costeiras (FARRELL, 1994). A condutividade hidráulica mostra-se como um dos parâmetros hidráulicos mais importantes a serem obtidos, pois reflete a capacidade da água circular através de um meio. De acordo com Cleary (2007), a condutividade hidráulica é definida como uma medida da habilidade do aquífero de conduzir água sob a influência do gradiente de uma superfície potenciométrica, logo, quanto maior a condutividade hidráulica, melhor é a capacidade do aquífero de conduzir a água.

A condutividade hidráulica depende de várias características do meio físico, como a porosidade, tamanho, arranjo e forma das partículas, além das propriedades do fluido, como viscosidade e da massa específica (FEITOSA *et al.*, 2008). Caracterizar esse parâmetro é trabalhoso devido à variabilidade do solo, ao custo – em tempo e dinheiro – para as determinações, às incertezas encontradas nos métodos de medida, ao fenômeno de histerese envolvido nos processos e pelo fato de que até mesmo perturbações na superfície do solo podem influenciar nos resultados (SILVA; LIBARDI, 2000; MUBARAK *et al.*, 2010). Para sua determinação, são necessários ensaios que podem ser de campo ou laboratório. Não obstante ambos os métodos possuem adversidades e incertezas, mas quando bem executados, apresentam resultados que podem ser utilizados em tomadas de decisão (GONÇALVES; LIBARDI, 2013).

No contexto da Lagoa da Conceição, uma laguna costeira localizada em uma ilha, repleta por um mosaico de ecossistemas como estuários, lagoas, manguezais e praias, os estudos referentes ao comportamento da laguna foram explorados por diversos autores (BIER, 2018; ROCHA, 2007; GODOY, 2009; ODRESKI, 2012; SILVA, 2013; SILVA, 2016). Pesquisas sobre o fluxo de água subterrâneo, interações entre águas superficiais e subterrâneas e alterações nas características hidroquímicas e biológicas da laguna foram realizados nos últimos anos (ARCARI, 2018; FONSECA, 2006; SILVA, 2016, KERN, 2022; SANTOS, 2018), todavia, não existem registros de um mapeamento do parâmetro da condutividade hidráulica na região, o que é essencial para a modelagem do fluxo subterrâneo de um aquífero, auxiliando tanto os estudos da própria dinâmica da água, quanto do potencial de contaminação e exploração dos reservatórios subterrâneos.

Como a região da Lagoa da Conceição conhecida por ser uma das maiores atrações turísticas e de lazer de Florianópolis, e o estudo sobre o comportamento sazonal e espacial dos parâmetros hidrológicos e dos nutrientes da Lagoa da Conceição é essencial para a conservação do sistema estuarino, este estudo propõe a determinação da condutividade hidráulica em diferentes pontos da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição a partir de métodos de campo e laboratoriais a fim de caracterizá-la, comparar os resultados obtidos entre si e com os resultados de outros estudos e, desta forma, determinar o melhor método para obtenção de condutividade hidráulica na área de estudo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Analisar a variação do coeficiente de condutividade hidráulica em solos de uma bacia costeira a partir de diferentes métodos de determinação.

1.1.2 Objetivo específico

- Determinar a condutividade hidráulica em diferentes pontos de uma bacia costeira a partir de métodos de campo e laboratoriais.
- Comparar os resultados obtidos em campo e em laboratório com os resultados de outros estudos, e, determinar o melhor método para obtenção de condutividade hidráulica na bacia costeira de estudo.
- Caracterizar a condutividade hidráulica na bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

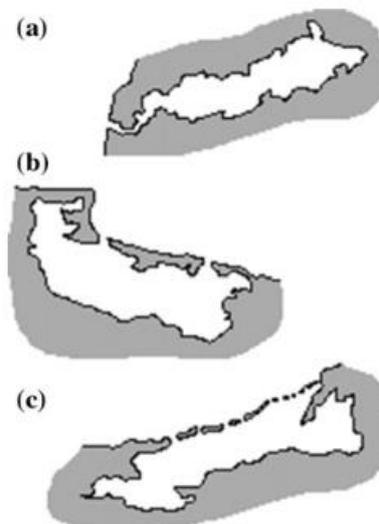
2.1 LAGUNAS COSTEIRAS

As lagunas costeiras são definidas como corpos d'água que geralmente são orientados em paralelo à costa e ligados ao oceano por uma ou mais enseadas restritas, que podem permanecer abertas sempre ou de forma intermitente. Elas formaram-se como um resultado do aumento do nível do mar majoritariamente durante o holoceno e pela formação de barreiras costeiras por processos marinhos (KJERFVE, 1994).

Elas estão presentes em mais de 32,000 km (ou 13%) das áreas costeiras do mundo, e são altamente sensíveis a impactos de origens naturais ou antropogênicas (KNOPPERS, 1994). Deste modo, parâmetros como o balanço hídrico e salino e a qualidade da água são diretamente influenciados por fatores como a circulação de água, condições climáticas, dispersão de sal, troca de água através do(s) canal(is) oceânico(s), além dos tempos de residência e descarga da laguna (MIRANDA et al., 2017).

Conforme Kjerfve (1986), as lagunas costeiras podem ser classificadas em três tipos geomorfológicos: As lagunas sufocadas, restritas e vazadas (Figura 1). Essa divisão se dá com base na interação realizada da laguna com o oceano através das aberturas de canais, já que a natureza desses canais demonstra, melhor do que qualquer outro parâmetro, o funcionamento do sistema.

Figura 1 - Classificação de lagunas costeiras.



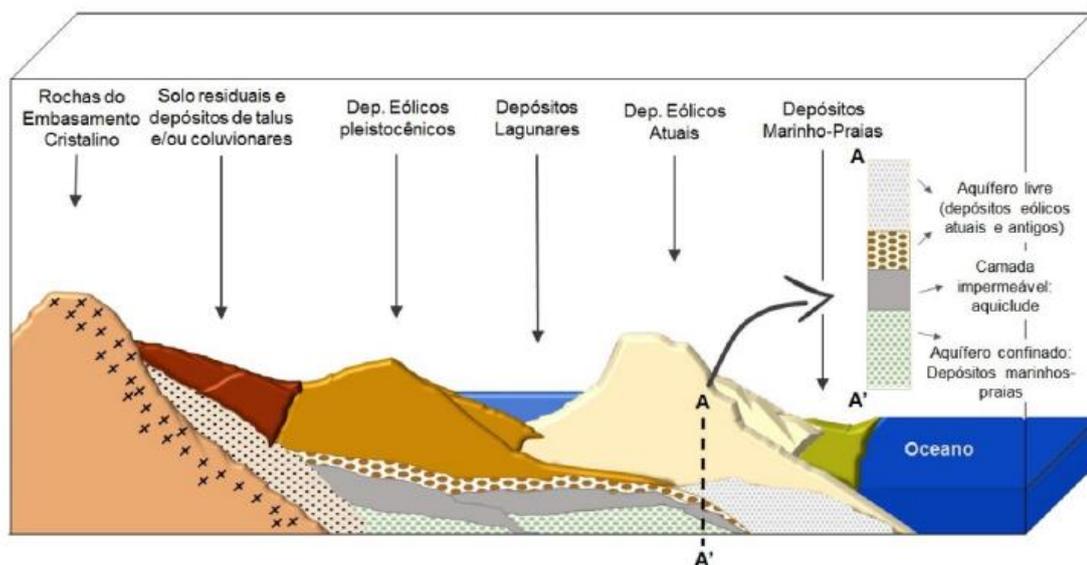
a) Lagunas Sufocadas **b)** Lagunas Restritas **c)** Lagunas Vazadas

Fonte: Modificado de Miranda et. al (2017)

As lagoas sufocadas são definidas por Miranda et. al (2017) como um ambiente costeiro formado por células elípticas, conectado ao mar por somente um canal estreito, sendo este o caso da Lagoa da Conceição, localizada em Florianópolis/SC e objeto deste estudo, tendo em vista o único canal de conexão com o oceano localizado na Barra da Lagoa (ARCARI, 2018).

De acordo com Guedes Junior (2002), a Ilha de Santa Catarina apresenta dois sistemas aquíferos no seu território: o Sistema Aquífero Cristalino Fraturado e o Sistema Aquífero Sedimentos Inconsolidados. É comum que as bacias hidrográficas das lagoas costeiras apresentem uma formação com a encosta formada por rochas (aquífero fraturado) e a planície costeira formada por sedimentos arenosos. Os depósitos eólicos (dunas) apresentam a composição mais homogênea, sendo compostos, majoritariamente, por quartzo e de tamanho areia fina. Mostram, tipicamente, estratificação cruzada, devido à alternância constante na direção dos ventos. Contudo, esta característica não impede que a água subterrânea se distribua de maneira homogênea no meio. Desta forma, os pacotes sedimentares que compõem o sistema aquífero formam um conjunto de aquíferos livres e/ou confinados, derivados das oscilações do nível do mar no quaternário (Figura 2).

Figura 2 – Caracterização de perfil da província costeira brasileira.

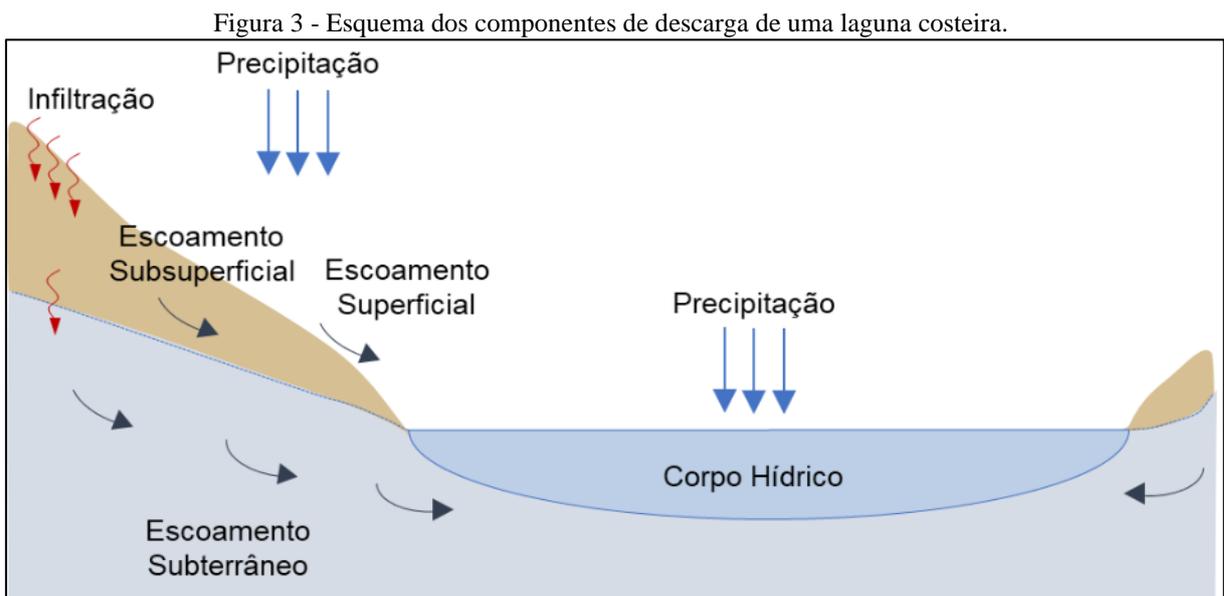


Fonte: Kern (2022).

2.2 FLUXOS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA E HIDROGEOLOGIA

O ciclo hidrológico é um termo que se refere ao constante movimento da água na atmosfera, na superfície da terra e no subsolo (HEATH, 2004). Este ciclo ocorre de forma contínua na hidrosfera, com seus componentes envolvendo principalmente a precipitação pluvial, evaporação, drenagem superficial e infiltração de água (CHOW, 1998; SPEIDAL, 1988).

A Figura 3 ilustra o esquema do ciclo hidrológico em uma laguna costeira. O ciclo conta com a evaporação originada do solo, vegetação ou oceano. O vapor forma nuvens que retornam à superfície na forma de precipitação, onde parte desta precipitação infiltra o solo e atua no abastecimento de aquíferos, e a outra parte realiza escoamento superficial, que é responsável pela formação de cursos d'água (HEATH, 2004).

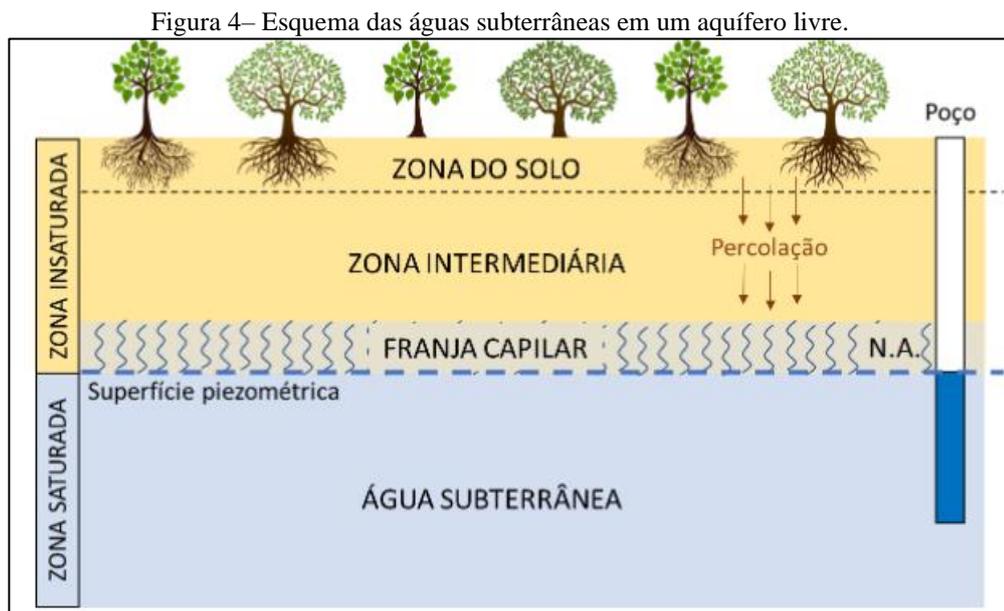


Fonte: Arcari, 2018.

Em aquíferos costeiros, a descarga de água subterrânea ocorre das áreas de recarga no continente – onde a carga hidráulica possui maior potencial – em sentido às áreas de descarga costeira, onde os níveis de água subterrânea são mais baixos e possuem menores potenciais hidráulicos (BARLOW, 2003). Enquanto os cursos de água convergem e realizam o escoamento superficial para a laguna, o escoamento subsuperficial e subterrâneo é composto por águas infiltradas na bacia hidrográfica que também irão fluir no sentido da laguna (ARCARI, 2018).

Além do gradiente hidráulico, considerado a força regente das descargas de águas subterrâneas, o fluxo de água doce é também realizado através de outras forças nos limites costeiros. A água subterrânea doce entra em contato com a água subterrânea salina nas margens marítimas dos aquíferos costeiros, nas chamadas zonas de transição, onde o processo de mistura é realizado por dispersão e difusão molecular. O fluxo de água doce é controlado pela espessura e propriedades hidráulicas do aquífero, densidades relativas de água salgada e doce, influência da força da gravidade, entre outras variáveis (BARLOW, 2003; WANG et al., 2015).

Conforme Heath (1983), a hidrogeologia é o ramo da hidrologia que estuda as relações entre o material geológico e o fluxo d'água subterrâneo. A água subterrânea pode ser dividida em duas diferentes zonas, conforme observado na Figura 4. A zona insaturada, localizada imediatamente abaixo a superfície do solo, com poros parcialmente preenchidos por gases e água, e zona saturada, localizada abaixo da zona insaturada, com os poros preenchidos totalmente com água.



Fonte: Kern, 2022.

O movimento das águas subterrâneas se dá através da diferença de cargas hidráulicas, que representa o nível de energia que a água subterrânea se encontra, definida pela soma de duas componentes: a carga de elevação (altitude) e a carga de pressão. No caso de aquíferos não confinados, a carga hidráulica é igual ao nível da superfície piezométrica (zona saturada onde a pressão hidráulica é igual a pressão atmosférica), e a medição da carga é feita através de

poços ou piezômetros (HEATH, 1983). A seguir, são apresentadas características dos solos, fundamentais para o estudo do movimento das águas subterrâneas.

2.2.1 Porosidade

Os poros são definidos como os espaços entre os grãos de um depósito sedimentar, enquanto a porosidade total é o percentual de solo ocupado por vazios. Para o estudo do fluxo subterrâneo, o conceito de porosidade se dá como a porosidade disponível para o fluxo do fluido, excluindo assim os espaços que não comportam moléculas de água, já que nem todos os poros são interconectados ou suficientemente grandes para conter tais moléculas (FETTER, 2001).

A porosidade efetiva é calculada pela relação entre o volume de vazios e o volume total do material (Equação 1):

$$\eta = \frac{V}{V_t} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde,

η = porosidade efetiva;

V = volume liberado;

V_t = volume total.

A quantidade de água que um aquífero é capaz de armazenar é determinada pela porosidade, a qual depende do tamanho dos grãos, de sua forma, arranjo e distribuição (POEHLS & SMITH, 2009). Quanto maior a variabilidade de tamanho dos grãos, menor tende a ser a porosidade (BETIM, 2013).

2.2.2 Condutividade hidráulica

Dentre diversas variáveis que influenciam o fluxo de água no solo, a condutividade hidráulica (K) se destaca. Ela é definida como a medida da resistência da água ao movimento através de um meio poroso (POEHLS & SMITH, 2009), ou como a medida da facilidade com a qual um meio transmite água (FITTS, 2002). Ou seja, quanto maior a condutividade hidráulica, melhor a transmissão de água através do aquífero.

Este parâmetro possui utilidade em diversos estudos, como planejamento de uso do solo, estudo da velocidade de recarga dos aquíferos, controle de contaminação de aquífero, entre outros (LIMA; MORAES; PASCHOAL, 2017). A Tabela 1 mostra alguns exemplos de condutividade hidráulica para sedimentos:

Tabela 1 - Faixa de valores de condutividade hidráulica para materiais não consolidados.

Material	Condutividade Hidráulica (cm/s)
Argila	$10^{-9} - 10^{-6}$
Silte; Silte arenoso	$10^{-6} - 10^{-4}$
Areia argilosa	$10^{-6} - 10^{-4}$
Areia siltosa; Areia fina	$10^{-5} - 10^{-3}$
Areia bem distribuída	$10^{-3} - 10^{-1}$
Cascalho bem distribuído	$10^{-2} - 10^0$

Fonte: Adaptado de Fetter (1988) *apud* Feitosa et al. (2008)

A condutividade hidráulica é dependente dos atributos físicos dos solos, como porosidade, tamanho e arranjo de partículas, como também das características do fluido, da declividade do terreno, das condições atmosféricas e da ação antrópica (MORAIS, 2012; BETIM, 2013). Ainda, outros fatores secundários também estão relacionados a essas características, o que torna elevada a complexidade de estimativa dessa propriedade (BETIM, 2013).

Segundo Fetter (2001), em meios porosos saturados, o fluxo de um fluido é definido pela Equação de Darcy. A equação verifica que a vazão específica por unidade de área através de um meio poroso (q) é proporcional à diferença de carga de água existente entre dois pontos (dh) e inversamente proporcional à distância entre estes dois pontos (dl). Ainda, Darcy também determinou que essa quantidade de fluxo é proporcional à condutividade hidráulica (K), como mostra a Equação 2:

$$q = -K \frac{dh}{dl} \quad (\text{Eq. 2})$$

A condutividade hidráulica (K) é definida como a capacidade do meio poroso em transmitir o fluido, e este coeficiente tem como unidade metros por segundos [m/s], definido pela Equação 3:

$$K = - \frac{q}{A \left(\frac{dh}{dl} \right)} \quad (\text{Eq. 3})$$

A relação dh/dl é chamada de gradiente hidráulico. O componente q é chamado de vazão específica ou velocidade de Darcy, e é o resultado do quociente da vazão (Q) pela área da seção (A), conforme Equação 4:

$$q = \frac{Q}{A} \quad (\text{Eq. 4})$$

Todavia, q não representa a velocidade real do fluxo, pois considera os espaços sólidos não-porosos da seção A . Portanto, a velocidade real pode ser obtida através da Equação 5, baseada na porosidade efetiva (η):

$$qr = \frac{q}{\eta A} \quad (\text{Eq. 5})$$

2.3 MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

A caracterização físico-hídrica é um instrumento importante para os estudos que envolvem a dinâmica de água, nutrientes e contaminantes no solo (AMARAL et al., 2016). De tal modo, a determinação da condutividade hidráulica pode ocorrer tanto em laboratório como em campo. Entre as principais técnicas de campo utilizadas estão o *slug test*, o ensaio de bombeamento, o ensaio com traçador e o ensaio de tubo aberto. Já nos métodos laboratoriais, destacam-se os permeâmetros e as fórmulas empíricas de condutividade hidráulica a partir de ensaio granulométrico (ARCARI, 2018).

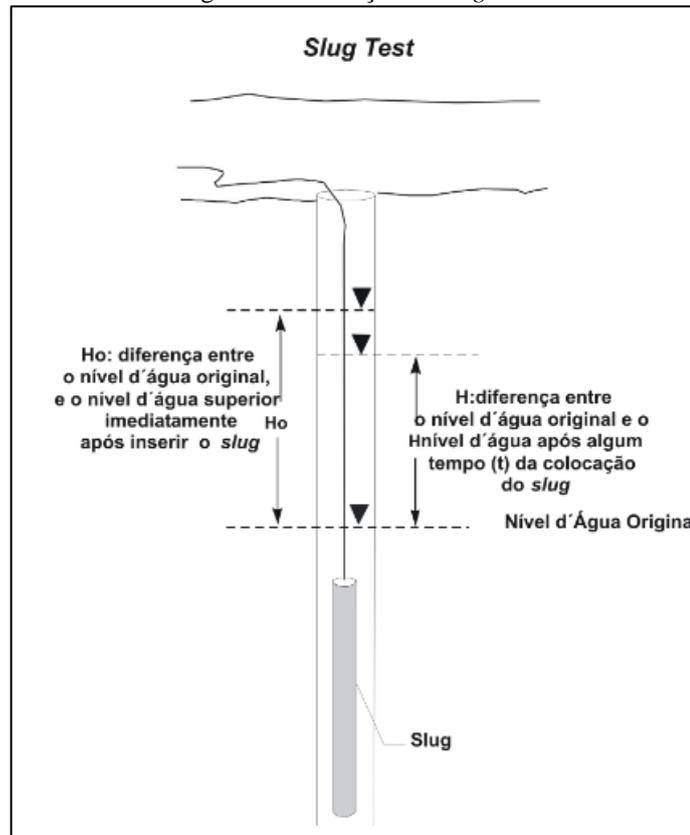
Essas fórmulas são normalmente utilizadas para uma primeira estimativa da ordem de grandeza da condutividade hidráulica, com vistas a futuras análises e aplicações. Entre as fórmulas empíricas pode-se citar Hazen (1892), Schlichter (1905), Terzhagi (1925), Breyer (1964), Shepherd (1989), Kozeny (1927)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

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

2.3.1 Método de campo - Slug test

O *slug test* é um ensaio de permeabilidade realizado em zona saturada, onde é aplicada uma carga ou descarga através da introdução ou remoção de um volume sólido cilíndrico conhecido dentro do poço, gerando uma elevação ou rebaixamento do nível d'água (Figura 5). Quando o volume é removido, o teste chama-se "*bail test*", e quando é adicionado, chama-se "*slug test*" (OLIVA et al., 2005).

Figura 5 – Ilustração do *slug test*.



Fonte: Adaptado de OLIVA, 2005.

A partir deste teste obtém-se como resultado uma curva de rebaixamento ou recuperação do nível d'água com o tempo. A partir desta curva e das características geométricas do poço, é possível obter o valor da condutividade hidráulica a partir dos métodos de Hvorslev e Bouwer & Rice (DAWSON; ISTOK, 1991).

O método de Hvorslev (Figura 6), aplicado para aquíferos confinados e livres, homogêneos, isotrópicos, de espessura uniforme e baixo gradiente hidráulico, utiliza para determinação do resultado a fórmula descrita abaixo (OLIVA, 2005):

$$K = \frac{r^2 \ln\left(\frac{L_e}{R}\right)}{2L_e T_0} \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde,

K = condutividade hidráulica [cm/s]

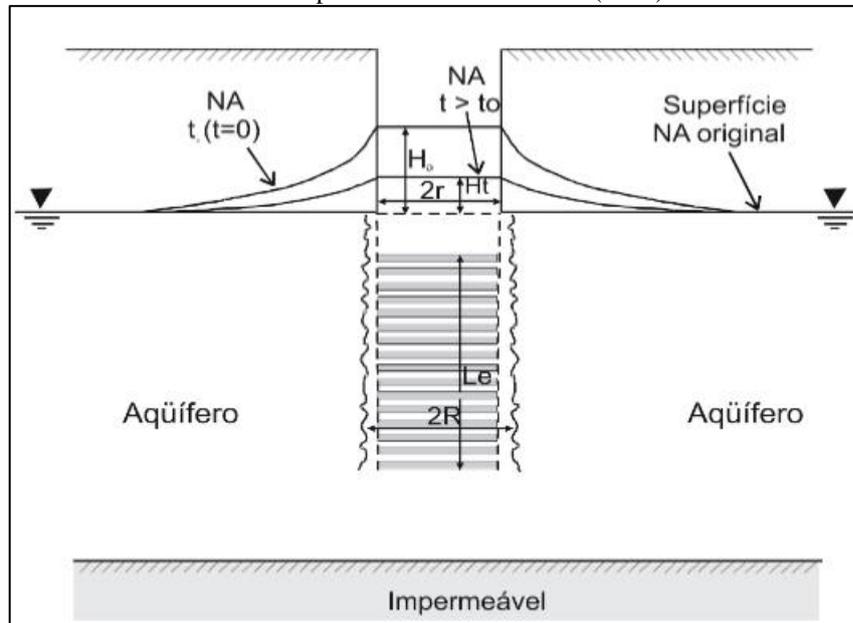
r = raio do revestimento [m];

L_e = comprimento da seção de filtro [m];

R = raio do poço de observação [cm];

T_0 = tempo que leva para água cair a 37% da posição inicial [s].

Figura 6 – Esquema do teste slug com parâmetros geométricos necessários para estimativa da condutividade hidráulica pelo método de Hvorslev (1951).



Fonte: OLIVA, 2005.

Já o método de Bouwer & Rice (Figura 7) é utilizado para aquíferos livres, mas pode também ser aplicado para aquíferos confinados, desde que a base da camada confinante fique consideravelmente acima do filtro do poço. Considera no cálculo a geometria de perfuração e do poço (comprimento da seção filtrante, raio da perfuração, raio do revestimento). A solução analítica proposta por Bouwer & Rice (1976) é descrita a seguir (FIORI, 2010):

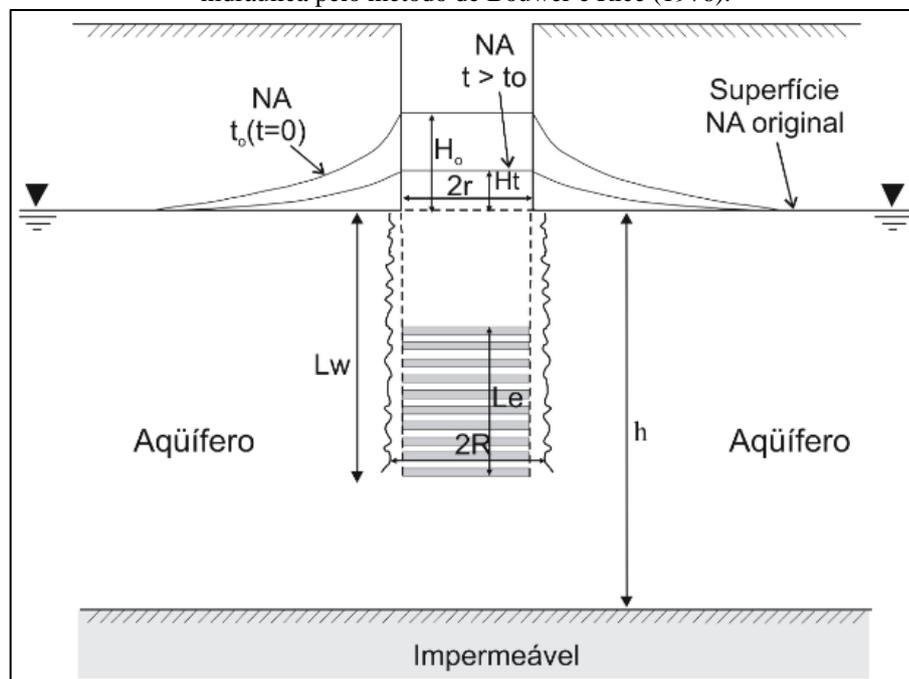
$$K = \frac{r^2 \ln(R_e/R)}{2L} \frac{1}{t} \ln\left(\frac{h}{h_0}\right) \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde,

K = condutividade hidráulica [cm/s]

- r = raio do revestimento [m];
 L = comprimento da seção de filtro [m];
 R = raio do poço de observação [cm];
 R_e = raio efetivo de dissipação da carga hidráulica [cm]
 h_0 = elevação no tempo $t=0$ [cm];
 h = elevação no tempo $t = t$ [cm];
 t = tempo [s];

Figura 7 – Esquema do teste slug com parâmetros geométricos necessários para estimativa da condutividade hidráulica pelo método de Bouwer e Rice (1976).



Fonte: OLIVA, 2005.

Os testes do tipo *slug* apresentam expressivas vantagens e vêm sendo utilizados em quantidades cada vez mais expressivas em diversos campos de estudo devido sua fácil realização em campo, baixo custo em relação a outros métodos, maior precisão comparado à métodos laboratoriais com fórmulas empíricas, além de versatilidade no tratamento de dados. Todavia, possuem também limitações, como a incerteza dos resultados obtidos nos casos em que os perfis construtivos dos poços são desconhecidos (BUTLER, 2019).

2.3.2 Método laboratorial – análise granulométrica

Hazen é uma das fórmulas empíricas mais conhecidas para estimativa de condutividade hidráulica em areias saturadas, levando em conta somente o diâmetro efetivo do material (d_{10}) e o fator empírico de Hazen (C_h). A equação de Hazen foi desenvolvida utilizando filtros de areia para purificação de água, onde eram utilizadas areias limpas com coeficiente de uniformidade menor que 2 (TERZAGHI; PECK, 1996). A fórmula tende a subestimar o valor da condutividade e deve ser limitado ao uso de areias e areias grossas, com diâmetro efetivo entre 0,1 e 3mm (ODONG, 2007).

A fórmula de Hazen é dada pela Equação 8:

$$K = C_h d_{10}^2 \quad (\text{Eq. 8})$$

Onde,

K = condutividade hidráulica [cm/s];

C_h = fator empírico de Hazen;

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

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

A equação de Kozeny-Carman é apresentada a seguir, (Equação 9) a qual é considerada adequada para solos com diâmetro efetivo menor que 3mm e não argilosos.

$$K = \left(\frac{\rho g}{\mu} \right) \left[\frac{n^3}{(1-n)^2} \right] \left(\frac{d_{10}^2}{180} \right) \quad (\text{Eq. 9})$$

Onde,

ρ = densidade da água [kg/m³];

g = aceleração da gravidade [m/s²];

μ = viscosidade dinâmica da água [kg/(m.s)];

n = porosidade [%];

d_{10} = diâmetro efetivo (10% das partículas são mais finas que o diâmetro efetivo) [cm].

Segundo Kozeny, para o cálculo da porosidade (n), deve ser utilizada a seguinte fórmula (Equação 10):

$$n = 0,255(1 + 0,83^U) \quad (\text{Eq. 10})$$

Sendo U o coeficiente de uniformidade dos grãos, definido como:

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (\text{Eq. 11})$$

Onde,

d_{60} = diâmetro em mm em que 60% da amostra é menor;

d_{10} = diâmetro em mm em que 10% da amostra é menor.

2.4 ESTUDOS ANTERIORES DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E POROSIDADE NA REGIÃO DA LAGOA DA CONCEIÇÃO

O Aquífero Conceição, localizado na Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição (BHLC), é caracterizado como um Sistema Aquífero Sedimentos Inconsolidados, agrupando depósitos compostos por acúmulo de material sedimentar, provenientes dos morros (embasamento cristalino), os quais foram retrabalhados pelo vento, ação fluvial e marinha. Os depósitos sedimentares da região da Lagoa da Conceição possuem origem continental, de leques aluviais, compostos por sedimentos mal classificados de cascalhos e areia fina, havendo uma menor contribuição de seixos, silte e argila. Possui um relevo em geral plano ou levemente ondulado, sendo caracterizado pela alta permeabilidade (JUNIOR, 1999).

Conforme Cleary (1989) *apud* Guedes (1999), a região das dunas (principal depósito de sedimentos inconsolidados) é composta quase que unicamente por partículas do tamanho areia finas, com textura uniforme, com grãos arredondados e valores de condutividade hidráulica moderada entre 0,1 e 0,0001 cm/s. Já Perroni *et al.* (1983) *apud* Borges (1996) adotaram, para as areias litorâneas de Santa Catarina, valor de condutividade hidráulica de 9,0m/d, equivalente a 0,01 cm/s. Através da realização de *slug test* na Bacia Hidrográfica do Rio Tavares, Pacheco (2015) encontrou resultado de condutividade hidráulica de 0,000518 cm/s. Já a porosidade adotada para areias por Suguio (1973) *apud* Borges (1996) foi de 40%. Valores de porosidade entre 30 e 45% foram apontados por Guedes (1999). Zanatta (2005) adotou como porosidade total e efetiva para a área de estudo 30 e 15%, respectivamente. Por

fim, Santos (2018) utilizou relatórios de sondagem realizados por peneiramento no ano de 1989 e disponibilizados pela CASAN de 5 pontos dispostos no sul da BHLC para cálculo da condutividade hidráulica, que obteve resultados na faixa de 0,01 a 0,03 cm/s por Hazen e 0,03 a 0,06 por Kozeny-Carman. A Tabela 2 resume as informações descritas neste parágrafo:

Tabela 2 - Estudos de condutividade hidráulica na região da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição.

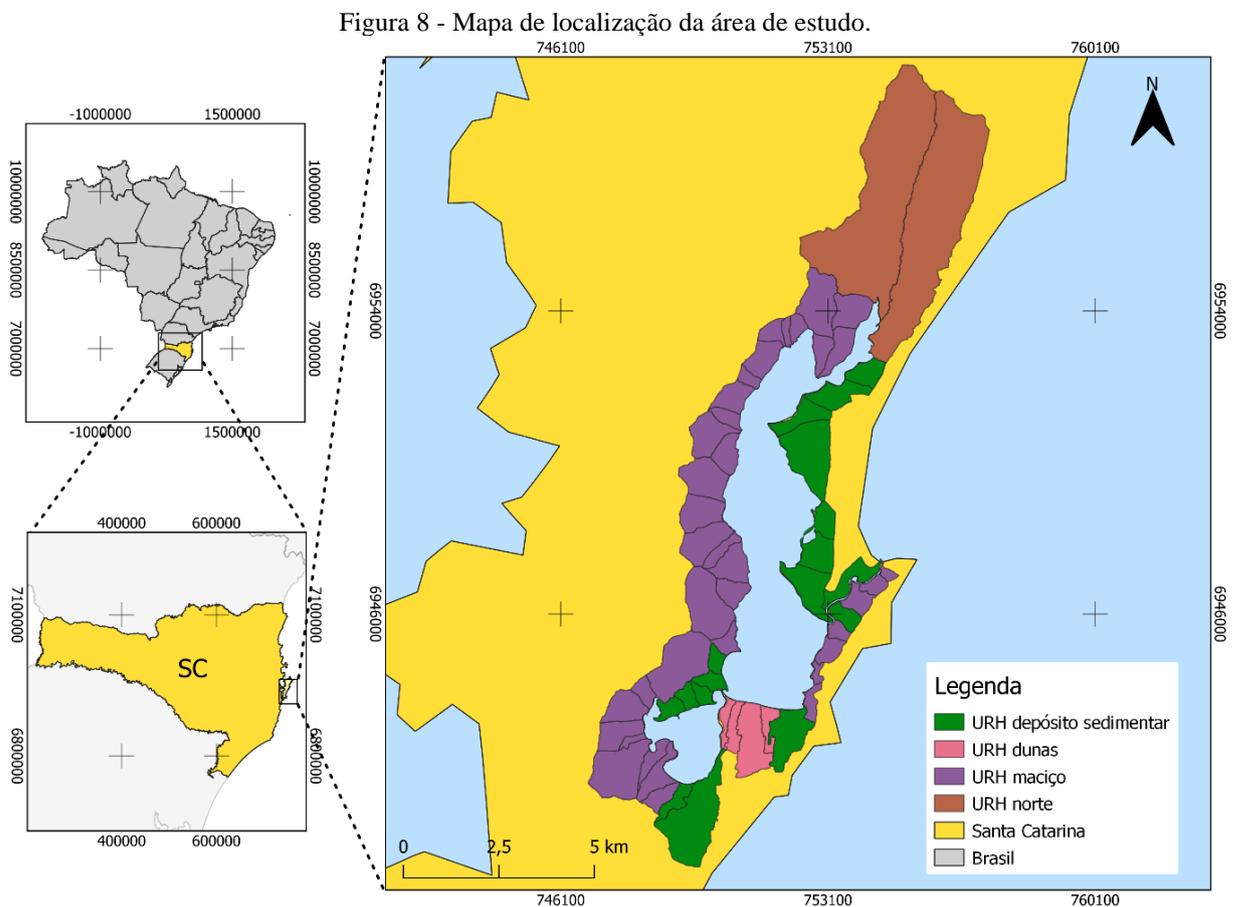
Autor	Condutividade Hidráulica (cm/s)	Porosidade (%)
Cleary (1989)	0,1 a 0,0001	-
Perroni <i>et al.</i> (1983)	0,01	-
Pacheco (2015)	0,000518	-
Suguio (1973)	-	40
Guedes (1999)	-	30 a 45
Zanatta (2005)	-	15 a 30
CASAN (1989)	0,01 a 0,06	-

Fonte: Elaboração própria.

3 METODOLOGIA

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Lagoa da Conceição está localizada na porção centro-leste da Ilha de Florianópolis, à latitude 27°34' S e longitude 48°27' W, conforme Figura 8. Constitui uma laguna com área total aproximada de 19,2 km², extensão de 13,5 km no sentido norte-sul, largura variável entre 0,15 e 2,5 km e volume d'água aproximado de 49.106m³. Compõe o corpo d'água de maior extensão de Florianópolis, e está inserida na Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição de 78,13 km² (MUEHE; CARUSO, 1999).



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 8 apresenta ainda a divisão da BHLC em Unidades de Resposta Hidrológica (URH), que representam zonas de mesmas características morfométricas e hidrológicas. A metodologia para a definição das URH é apresentada por Silva (2022).

Há quatro URHs, englobando sub-bacias de características e comportamentos semelhantes. Sendo elas:

- Norte: compreende as duas maiores sub-bacias (João Gualberto e Rio Vermelho). Não possuem altos valores de declividade e urbanização. Entretanto, a área superficial das duas sub-bacias corresponde a aproximadamente 35% da área total da bacia hidrográfica, o que faz com que a contribuição hidrológica deste setor tenha grande relevância;
- Deposito Sedimentar: sub-bacias com alta taxa de infiltração, devido ao tipo de solo presente (areias quartzóicas e marinhas) e baixa declividade. Devido a essas características, é elevada a infiltração no solo, com rara presença de córregos nas SBHs;
- Dunas: Apresenta características de solo com maior permeabilidade, com predomínio de dunas, areias marinhas e areias quartzóicas. Esta URH não apresenta urbanização expressiva.
- Maciço: setor com grande número de pequenas sub-bacias. Compreende as características geológicas do Granito Ilha, com vegetação bem preservada, baixa urbanização e alta declividade. Possui vegetação densa, o que proporciona grandes interceptações da chuva. A declividade e o tipo de solo proporcionam baixas infiltrações e, conseqüentemente um elevado escoamento superficial, apresentando diversos córregos e cachoeiras de pequeno porte. Este setor é responsável por grande parte da contribuição superficial que é descarregada no corpo hídrico da Lagoa da Conceição.

A laguna possui ligação ao mar através de um canal longo e estreito, na praia da Barra da Lagoa, onde os seis meandros de diferentes extensões se estendem pelo canal de 2,8 km que ligam o corpo lagunar à plataforma continental adjacente, com deságue no oceano Atlântico. O fluxo de água a caracteriza como um ambiente estuarino lagunar com mistura de água doce e salobra (PEREIRA, 2004).

Devido ao seu comprimento, este canal reduz o efeito das marés no interior da Lagoa. O fluxo no canal foi garantido em 1982, com a retilinização, dragagem e com a construção de molhes na sua desembocadura no mar (CECCA, 1997; GODOY, 2009).

Quanto às contribuições de água doce na bacia, conforme Barbosa (2003), existem aproximadamente 35 córregos e dois canais de drenagem afluentes no corpo lagunar, sendo o principal aporte de água doce o Rio João Gualberto Soares, ao norte. Existem, na borda Oeste,

pequenos córregos contribuintes, como o Rio Cachoeiras, porém estes com pequena vazão. Já na parte Sul, segundo Odebrecht e Caruso Jr. (1999), ocorre aporte de água doce através de infiltração pelo subsolo, além da precipitação pluvial direta.

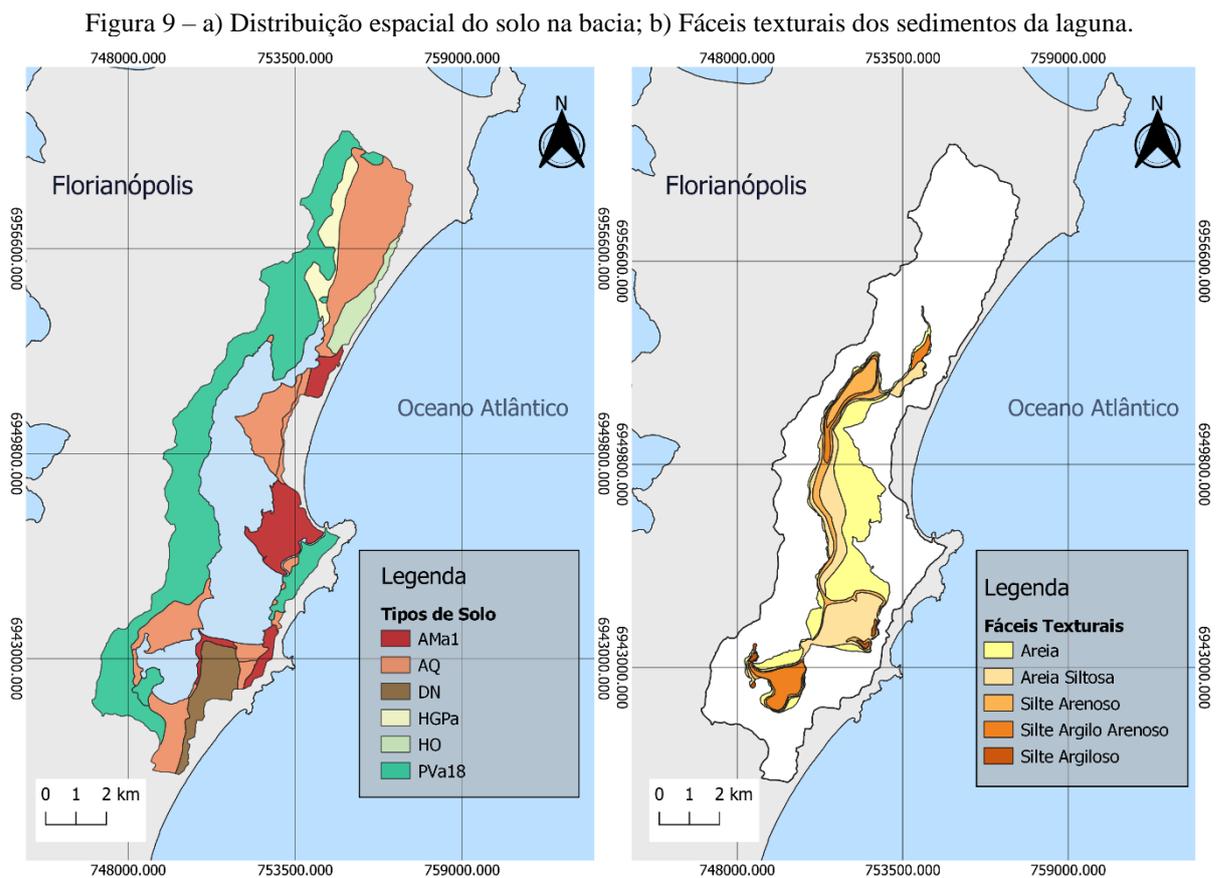
A laguna é envolvida a oeste por uma linha de morros alongados na direção norte-sul. Formam encostas altas e íngremes cobertas de vegetação primária e cujos solos, quando desnudos, são suscetíveis à erosão (MENEZES, 1985 *apud* FEITOSA, 2000; CARUSO, 1989).

3.1.1 Pedologia da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição

De acordo com Luiz (2004) e ilustrado na Figura 9a, os solos presentes na bacia da Lagoa da Conceição são:

- Areias quartzosas marinhas (AMa1): Compreendem solos minerais, não hidromórficos, profundos ou muito profundos, com textura areia ao longo do perfil. Ocorrem ao longo da orla marítima, em forma de dunas fixas, estando recobertos por vegetação arbustiva e graminóide.
- Argissolo (PVa18): Encontrados na porção oeste da bacia, são solos com profundidade média de 1,5 m. Costumam estar presentes em encostas e morros, com grande fragilidade à erosão quando não possuem cobertura vegetal. Apresentam uma textura areno-argilosa, e possuem horizonte A com 20 a 40 centímetros de espessura, textura argilosa e pequena granular.
- Dunas (DN): Extensos campos de dunas e praias encontrados na faixa costeira, que têm como principal agente de formação o vento, e são recobertas por uma flora paupérrima.
- Neossolos quartzarênicos (areias quartzosas álicas) (AQ): São solos arenosos e profundos (1,0 a 3,0 m), com baixa fertilidade natural e pouca capacidade de retenção de água. São encontrados em regiões não alagadas.
- Gleissolo háplicos (HGPa): Solo encharcado, encontrado apenas ao norte da bacia. Possui horizonte A com matéria orgânica, seguido em profundidade por um horizonte chamado glei, de cor acinzentada e textura geralmente argilosa. São em geral pouco profundos e com permeabilidade muito baixa. Na composição granulométrica dos gleissolos de textura média, a fração de areia é a mais importante.
- Organossolos (HO): São solos alagados e com muita matéria orgânica, de coloração escura e geralmente apresentam textura argilosa.

Já os sedimentos da laguna apresentam domínios arenosos e lamosos (GRÉ; HORN FILHO, 1999). Os setores mais rasos são constituídos de sedimentos arenosos e os mais profundos de sedimentos finos. A distribuição espacial dos sedimentos é influenciada pelas condições hidrodinâmicas da lagoa, pelas características do solo da bacia hidrográfica adjacente e principalmente, pela profundidade e morfologia do corpo laguna (PORTO FILHO, 1993). Os sedimentos depositados na margem oeste da laguna são caracterizados pela imaturidade mineralógica e textural por conta de a borda oeste receber sedimentos provenientes dos morros, sendo a ação gravitacional e os pequenos córregos, os principais agentes transportadores destes sedimentos. Já na borda leste, os sedimentos são maduros e provém dos cordões de dunas eólicas (CARUSO, 1989). A distribuição espacial das fácies texturais dos sedimentos é apresentada na Figura 9b.



Fonte: Elaboração própria.

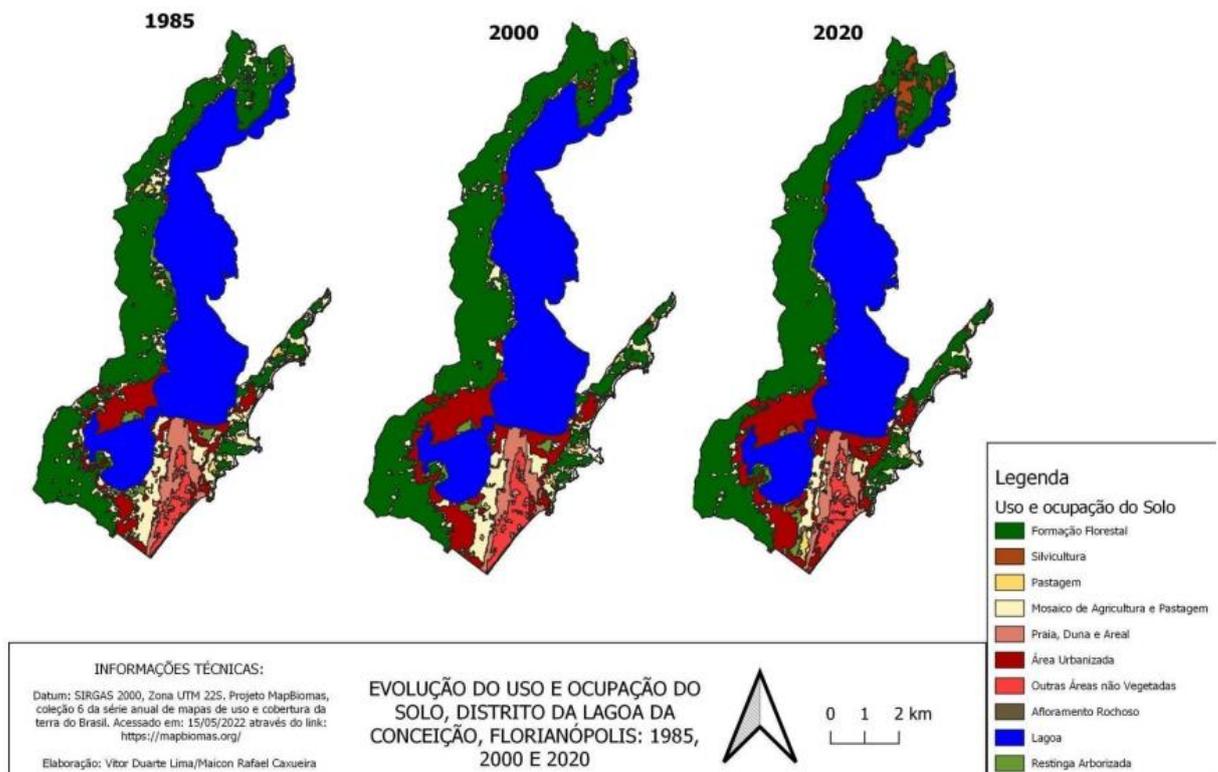
3.1.2 Uso e ocupação do solo

Os povos Carijós, por volta de 5.000 anos atrás, ocuparam densamente a ilha e a Lagoa da Conceição, onde praticaram a agricultura e caça (BARBOSA, 2003). Entre 1748 e 1756, chegaram à Lagoa inúmeros imigrantes da Ilha dos Açores e da Ilha da Madeira, os quais fixaram suas comunidades em torno da Igreja Nossa Senhora da Conceição, construída em 1751, intensificando a agricultura e o comércio (BARBOSA, 2003). Já em 1950, as áreas agrícolas deram espaço para a ocupação humana mais acentuada (HAUFF, 1996), e em 1753 foi registrado o primeiro censo demográfico, apresentando apenas 503 habitantes.

A partir do século XX, a pesca em Florianópolis passou a se destacar como uma atividade geradora de renda. Juntamente com atividades ligadas ao turismo, fizeram com que a capital de Santa Catarina ganhasse reconhecimento nacional (BARBOSA, 2003).

Conforme Duarte (2022), que realizou uma análise da expansão urbana da Lagoa da Conceição, entre os anos de 1985 e 2020 observa-se um aumento de 45,47% de ocupação urbana, de acordo com o ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Comparação do uso e ocupação do solo no Distrito da Lagoa da Conceição.



Fonte: DUARTE, 2022.

Ainda, observa-se a diminuição das áreas de agricultura e pastagem ao longo dos anos, além de um alastramento das manchas de urbanização saindo da região central em direção às regiões marginais da lagoa. Abaixo, observa-se as variações do uso do solo da região, de 1985 até 2020 (Tabela 3).

Tabela 3 – Comparação do uso e ocupação do solo no Distrito da Lagoa da Conceição.

Uso	Área (km ²)			Variação 1985/2020 (%)
	1985	2000	2020	
Floresta	17,500	18,353	18,243	4,24%
Restinga	1,565	1,293	1,353	-13,57%
Silvicultura	0,015	0,113	1,229	7871,95%
Agricultura e Pastagem	6,410	4,629	3,621	-43,51%
Praia e Duna	1,920	1,698	1,611	-16,10%
Urbanização	3,709	5,146	5,395	45,47%
Corpo d'água	20,805	20,534	20,422	-1,84%

Fonte: DUARTE, 2022.

Outro aspecto importante é a diminuição dos ecossistemas de restinga e praias/dunas, onde a primeira sofreu uma diminuição de 13,57%, enquanto a segunda teve uma redução de 16,10%. A partir disso, observa-se um aumento na vulnerabilidade maior à erosão costeira com o decorrer dos anos, sofrendo com marés altas e ressacas cada vez mais recorrentemente (VIANNA; ARAÚJO; VANS, 2022; *apud* DUARTE, 2022).

3.2 DETERMINAÇÃO DOS PONTOS DE AMOSTRAGEM

Os pontos de amostragem neste estudo foram elencados a fim de garantir uma representatividade espacial dos dados. Desta forma, as amostras foram coletadas em pontos complementares aos já estudados no LAHIMAR por Kern (2019) e Santos (2018), buscando uma amostragem que contemplasse integralmente as regiões e solos encontrados na BHLC.

Quanto aos pontos de estudo de Kern (2019) e Santos (2018), as amostras foram coletadas numa profundidade entre 0,7m a 1,0m e as fórmulas empíricas utilizadas para o cálculo da condutividade hidráulica foram as de Hazen e Kozen. Os resultados estão dispostos na Tabela 4:

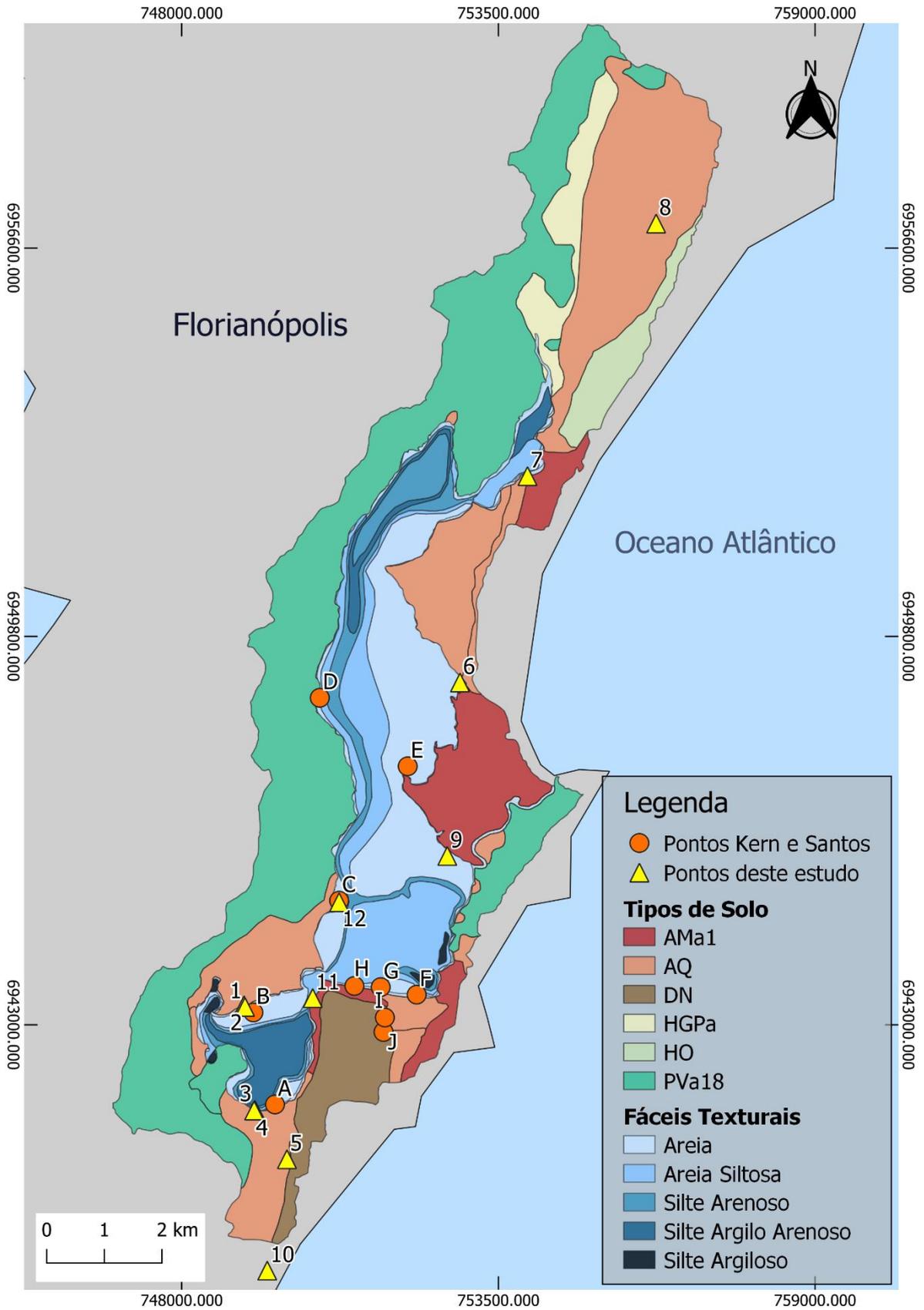
Tabela 4 – Parâmetros de ensaios granulométricos e estimativas de condutividade hidráulica de Kern (2019) e Santos (2018).

Estação/ Resultado	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
d₁₀ (mm)	0,09	0,08	0,08	0,16	0,08	0,18	0,16	0,17	0,14	0,14
Cu	3,30	2,94	3,44	3,68	2,92	1,61	1,64	1,55	1,61	1,61
Cc	1,73	1,58	1,60	1,03	1,50	0,99	1,02	0,99	1,03	1,02
n	0,40	0,40	0,39	0,38	0,40	0,44	0,44	0,45	0,44	0,44
Hazen (cm/s)	8,3E- 3	6,7E- 3	6,1E- -3	2,5E- 2	6,2E- -3	3,1E- 2	2,6E- -2	3,0E- -2	7,4E- -3	8,3E- -3
Kozeny (cm/s)	8,2E- 3	7,0E- 3	5,6E- -3	1,8E- 2	6,2E- -3	4,7E- 2	3,9E- -2	4,7E- -2	2,8E- -2	3,2E- -2

Fonte: Kern (2019) e Santos (2018). **d₁₀**: diâmetro efetivo; **Cu** = Coeficiente de Uniformidade; **Cc** = Coeficiente de Curvatura; **n** = Porosidade.

A Figura 11 ilustra os pontos escolhidos para amostragem neste estudo, juntamente com os pontos já estudados pelas autoras citadas. O ponto 10 encontra-se fora da BHLC, porém está situado dentro dos limites da bacia subterrânea do ecossistema, e por isso foi mantido neste local.

Figura 11 – Pontos amostrais de estudos de referência e pontos amostrais do estudo atual.



Fonte: Elaboração própria.

Os pontos do atual estudo estão enumerados de 1 a 12, enquanto os pontos estudados por Kern e Santos são dispostos em letras de A a J.

A seguir, a Tabela 5 dispõe das informações sobre os pontos amostrais desta pesquisa.

Tabela 5 - Dados dos pontos pesquisados neste estudo.

Teste realizado	Ponto	Profundidade (m)	Data de coleta do sedimento	Coordenada X (UTM – SIRGAS 2000)	Coordenada Y (UTM – SIRGAS 2000)
<i>Slug Test</i>	1	-	-	749099	6943314
<i>Slug Test/Laboratório</i>	2a	1,10	10/06/2022	749082	6943343
	2b	1,50	10/06/2022		
	2c	1,85	10/06/2022		
<i>Slug Test/Laboratório</i>	3a	0,21	17/06/2022	749271	6941513
	3b	2,50	17/06/2022		
<i>Slug Test/Laboratório</i>	4	0,20	17/06/2022	749258	6941499
Laboratório	5	1,37	16/06/2022	749828	6940647
Laboratório	6	1,20	03/10/2022	752832	6948993
Laboratório	7	0,25	14/10/2022	754005	6952606
Laboratório	8	0,64	14/10/2022	756239	6957028
Laboratório	9	0,52	14/10/2022	752612	6945955
Laboratório	10	0,30	14/10/2022	749485	693869
Laboratório	11	0,28	14/10/2022	750275	6943468
Laboratório	12	0,44	14/10/2022	750733	6945145

Fonte: Elaboração própria.

Nos pontos 1, 2, 3 e 4 foi realizado o *slug test* através de piezômetros instalados no local, enquanto nos pontos 2 a 12 foram retiradas amostras de sedimento para análise granulométrica em laboratório. No ponto 2 foram retiradas 3 amostras em profundidades diferentes, enquanto no ponto 3 foram retiradas em 2 profundidades diferentes. No restante dos pontos foi realizada amostragem em apenas uma profundidade.

3.1 ESTIMATIVA DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM LABORATÓRIO - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

3.1.1 Coleta de amostras

Para análise granulométrica dos sedimentos, foram retiradas amostras do solo da BHLC nos pontos descritos na Tabela 5. Para a retirada de sedimento, foram realizadas coletas com duas ferramentas distintas: um trado de rosca, e um *core sampler* de PVC (Figura 12), elaborado com diâmetro de 40 mm e comprimento de 1,3 m. O trado de rosca foi utilizado para instalação de piezômetros, onde os sedimentos também foram coletados. Já o *core sampler* foi utilizado para coletar sedimentos complementares ao longo da bacia.

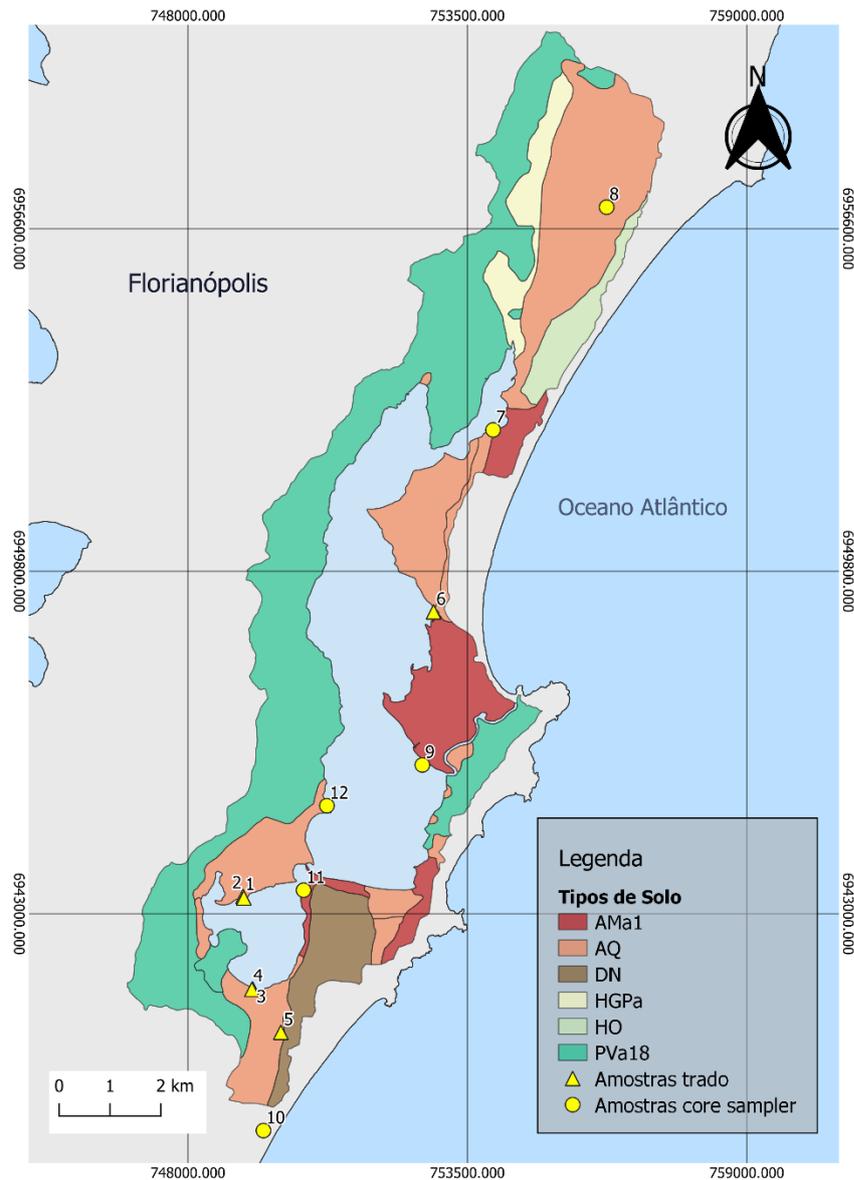
Os locais onde as amostras foram retiradas com o trado, e onde foram retiradas com o *core sampler*, encontram-se distinguidas e ilustradas na Figura 13.

Figura 12 – Retirada de sedimentos através do core sampler.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 13 – Mapa de pontos de coleta com trado e saca-areia.



Fonte: Elaboração própria.

3.1.2 Ensaios laboratoriais e fórmulas empíricas

As análises laboratoriais para determinação da granulometria dos sedimentos foram realizadas no Laboratório de Aplicações de Nanotecnologia em Construção Civil (NANOTEC) da UFSC. Inicialmente, as amostras foram secas em estufa a 109 °C, para então serem encaminhadas para o granulômetro. A Figura 14 mostra os diferentes sedimentos coletados sendo preparados para encaminhar para a estufa.

Figura 14 – Preparação dos sedimentos para introdução na estufa.



Fonte: Elaboração própria.

Após secagem, as amostras foram passadas por uma peneira de 1,2 mm para não haver interferência de resultados, pois o equipamento suporta amostras de até 1,4 mm. Nenhuma porção da amostra ficou retida na peneira, desta forma, os sedimentos foram encaminhados para o teste de granulometria.

Para isso, foi utilizado o equipamento Microtrac S3500 (Figura 15), um analisador de tamanho de partículas por difração a *laser*, permitindo uma análise detalhada dos sedimentos coletados.

Figura 15 - Microtrac S3500, equipamento utilizado para análise granulométrica.



Fonte: Elaboração própria.

A partir dos valores do diâmetro efetivo do material (d_{10}) e o coeficiente empírico de Hazen (C_h), obtém-se os valores para condutividade hidráulica pelo método de Hazen-Williams, através da Equação 6.

Já para o método de Kozeny-Carman, através do valor do diâmetro efetivo do material (d_{10}) e da porosidade (n), determina-se o valor da condutividade hidráulica, pela Equação 7.

3.2 ESTIMATIVA DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM CAMPO – SLUG TEST

O *slug test* foi o método utilizado para determinar a permeabilidade *in situ* da área de estudo. Através da introdução de um volume conhecido ocorre a variação instantânea do nível d'água, onde a estabilização do nível é monitorada.

O teste foi realizado no mês de setembro de 2022 em quatro diferentes piezômetros instalados pelo Laboratório de Hidráulica Marinha da UFSC. Utilizou-se, para monitorar a estabilização do nível, uma régua elétrica medidora de nível d'água elétrica e um sensor de pressão (*diver*). Nos quatro piezômetros (pontos 1, 2, 3 e 4 da Tabela 5) foi utilizado o método da inserção de um tarugo para monitorar a variação de nível, e em dois desses piezômetros (pontos 1 e 2 da Tabela 5) foi também realizada a inserção de 1 litro de água, a fim de realizar o teste com uma maior variação de coluna d'água. O volume utilizado foi arbitrário para obter-se uma coluna d'água maior no piezômetro utilizado.

Nas medições com a régua, utilizou-se um cronômetro e um intervalo de 30 segundos para cada medição de nível, com leituras e armazenamento de dados efetuados manualmente. Já para o sensor de pressão foi utilizado um intervalo de 10 segundos para cada medida, com dados armazenados diretamente no computador. Além disso, os testes de campo foram realizados em triplicatas, garantindo uma maior precisão e confiabilidade dos dados. Foi realizado um total de 28 testes, 12 manuais, 11 com uso do *diver*, e 5 com uso do *diver* e inserção de 1 litro de água. A Figura 16a ilustra a realização do *slug test*, enquanto a Figura 16b mostra um dos piezômetros instalados que foi utilizado para realização do teste.

Figura 16 – a) Aplicação de slug test e monitoramento de recuperação de nível através de régua elétrica; b) Piezômetro utilizado para slug test.



Fonte: Elaboração própria.

Os piezômetros utilizados para medição de nível foram elaborados a partir de tubos de PVC com diâmetro de 50mm. Estão enterrados em profundidades de 2 a 3 m, com a seção filtrante possuindo 30 cm, com 8 linhas de furos equidistantes, sem ranhuras. O filtro encontra-se em uma única porção do piezômetro (tipo simples). A Figura 17 ilustra um esquema do piezômetro utilizado no presente estudo.

Figura 17 – Ilustração do piezômetro utilizado neste estudo.



Fonte: SANTOS, 2018.

Para processamento dos dados obtidos no ensaio de campo, foram utilizados os métodos de Hvorslev e Bouwer and Rice, que são os métodos mais utilizados para determinação da condutividade hidráulica em *slug tests*, através do software Aqtesolv versão 4.5 para estudante.

O método de Hvorslev assume que o meio é homogêneo, isotrópico, infinito e que ambos (solo e água) são incompressíveis. Nos termos do teste, o gráfico com os dados de campo com razão de rebaixamento (H/H_0) é plotado em escala logarítmica e o tempo t (min) em escala normal. O método de Hvorslev (1951) é baseado no cálculo da inclinação da reta, observando-se o tempo quando $H/H_0 = 0,37$. Para Hvorslev (1951) este é definido como tempo de resposta básico, denominado T_0 . Como no início do ensaio $H/H_0 = 1$ ($\log 1 = 0$) e $t = 0$, a inclinação da reta é dada por $\log 0,37/T_0$ que, escrita em termos de logaritmo natural, torna-se $-1/T_0$. Sendo assim, na reta obtida pela interpolação dos pontos, deve-se ler no eixo x o tempo correspondente a 37 % do rebaixamento/recuperação, que corresponde ao T_0 , tempo de resposta básico. Após a leitura no gráfico, o valor deve ser substituído na Equação 6 (CARVALHO, 2013).

Já o método Bouwer & Rice pressupõe um aquífero drenante (com drenagem vertical de cima para baixo), com extensão infinita, homogêneo, isotrópico e de espessura uniforme. Para sua determinação, utiliza-se a Equação 7, além da Equação 12 a seguir, utilizada apenas se a distância entre o nível d'água e o fundo do poço é menor que h (camada saturada do aquífero):

$$\ln \frac{R_e}{R} = \left[\frac{1.1}{\ln\left(\frac{Lw}{R}\right)} \frac{A+B \ln\left[\frac{(h-Lw)}{R}\right]}{\frac{L_e}{R}} \right]^{-1} \quad (\text{Eq. 12})$$

Onde,

K = condutividade hidráulica [cm/s]

r = raio do revestimento [m];

L = comprimento da seção de filtro [m];

R = raio do poço de observação [cm];

R_e = raio efetivo de dissipação da carga hidráulica [cm]

h_0 = rebaixamento no tempo $t=0$ [cm];

h = rebaixamento no tempo $t = t$ [cm];

t = tempo [s];

Lw = distância da superfície da água à base do filtro (cm);

A , B e C = valores adimensionais, obtidos através da relação Le/R

O procedimento utilizado para o método de Bouwer e Rice é descrito por Kruseman e Ridder (2000). Primeiramente, deve-se plotar a carga H_t (recuperação) em um gráfico semi-log no eixo das ordenadas, com o tempo correspondente no eixo das abcissas. Em seguida, deve-se ajustar uma linha reta aos pontos plotados, e usando a linha, calcula-se $(1/t) \ln (H_0/H_t)$ para um valor de tempo t e o seu H_t correspondente. Sabendo o valor de Re/R , é possível determinar A e B pelo gráfico característico do método.

Se o poço é parcialmente penetrante, substitua os valores de A , B , h , Lw , Le e rw na Eq. 12 e calcule $\ln (Re/R)$. Conhecendo $\ln (Re/R)$, $(1/t) \ln (H_0/H_t)$, r e L , calcule a condutividade hidráulica a partir da Equação 7.

3.3 MODELAGEM DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Com a finalidade de apresentar uma modelagem dos resultados encontrados na Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição, optou-se por realizar uma análise espacial (interpolação), através do software Quantum GIS versão 3.22.13. Desta forma, é possível estimar valores de condutividade hidráulica para locais não amostrados, a partir de um determinado número de pontos observados em campo.

O método utilizado foi o de Ponderação pelo Inverso da Distância (IDW), onde as amostras de pontos são pesadas durante a interpolação conforme a influência de um ponto relativo a outro declina com a distância a partir de um ponto desconhecido que se queira criar.

É importante notar que o método de interpolação IDW também possui algumas desvantagens, já que a qualidade da interpolação pode diminuir caso a distribuição de pontos amostrais é irregular, como é o caso deste estudo.

Os parâmetros adotados para o método são apresentados na Figura 18.

Figura 18 - Parâmetros utilizados no método de interpolação IDW.

The screenshot shows a dialog box for IDW interpolation parameters. The sections and their values are as follows:

- Camada(s) de entrada:**
 - Camada vetorial: krig_final
 - Atributo de interpolação: 1.2 HAZEN
 - Usar Coordenada Z para interpolação
- Table:**

Camada vetorial	Atributo	Tipo
krig_final	HAZEN	Pontos
- Distância para coeficiente P:** 2,000000
- Extensão:** 746807.6305,757372.4142,6939158.7252,6960514.6985 [EPSG:31982]
- Tamanho do raster de saída:**
 - Linhas: 2576
 - Colunas: 1006
 - Tamanho do pixel X: 7,118658
 - Tamanho do pixel Y: 7,118658
- Interpolado:** [Salvar em arquivo temporário]
- Abrir arquivo de saída depois executar o algoritmo

Fonte: Elaboração própria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

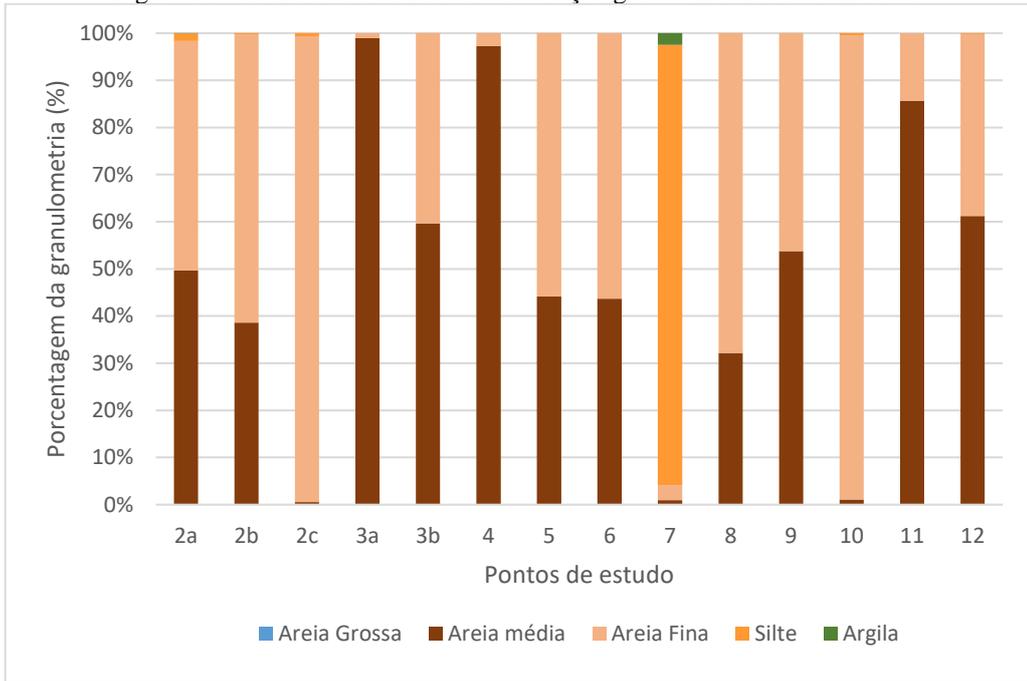
4.1.1 Caracterização física das amostras

Através das análises granulométricas do solo foi possível definir a análise textural das amostras, que foram classificadas na Tabela 6 de acordo com a ABNT 6502/95. Já a Figura 19 mostra as porcentagens granulométricas em um gráfico de colunas, e a Figura 20 apresenta as curvas granulométricas dos pontos estudados.

Tabela 6 – Caracterização granulométrica das amostras.

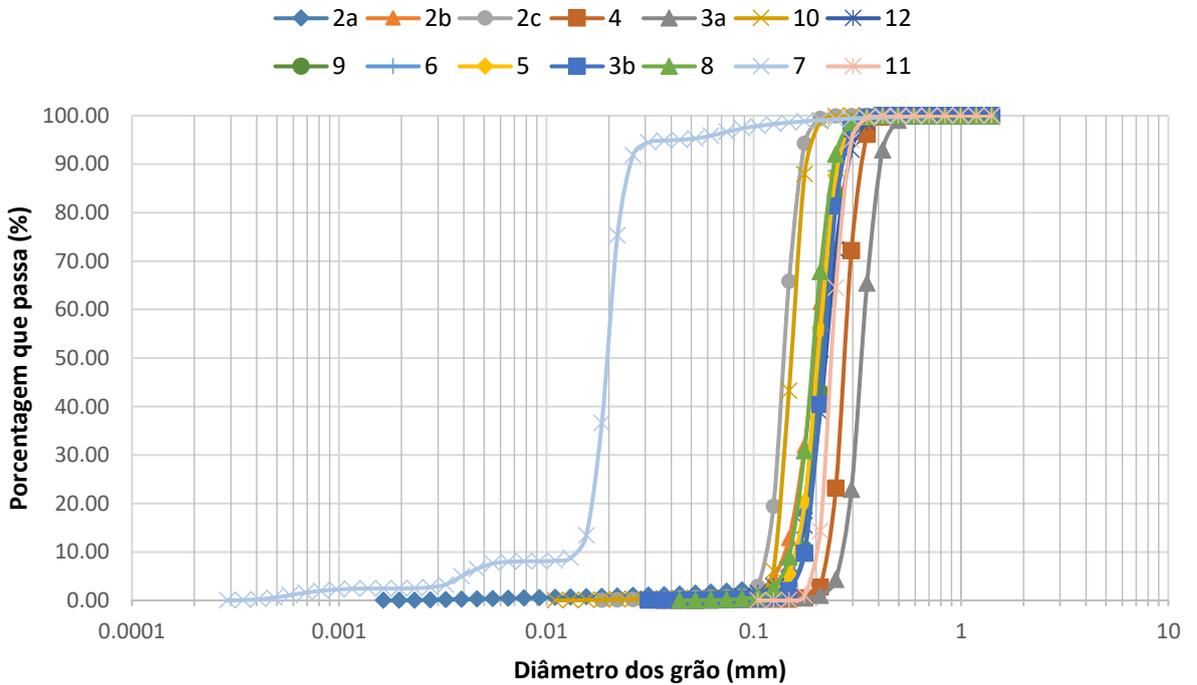
Ponto	Profundidade (m)	Areia Grossa (%)	Areia Média (%)	Areia Fina (%)	Silte (%)	Argila (%)
2a	1,10	0,00	49,69	48,67	1,64	0,05
2b	1,50	0,00	38,57	61,18	0,25	0,00
2c	1,85	0,00	0,57	98,80	0,63	0,00
3a	0,21	0,01	98,95	1,04	0,00	0,00
3b	2,50	0,00	59,63	40,30	0,07	0,00
4	0,20	0,00	97,27	2,67	0,06	0,00
5	1,37	0,00	44,17	55,77	0,06	0,00
6	1,20	0,00	43,67	56,33	0,00	0,00
7	0,25	0,08	0,86	3,20	93,34	2,52
8	0,64	0,00	32,20	67,74	0,06	0,00
9	0,52	0,00	57,03	48,89	0,08	0,00
10	0,30	0,00	1,08	98,45	0,47	0,00
11	0,28	0,00	85,66	14,34	0,00	0,00
12	0,44	0,00	61,25	38,58	0,17	0,00

Figura 19 - Gráfico de colunas da distribuição granulométrica das amostras.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 20 - Curva granulométrica dos pontos estudados.

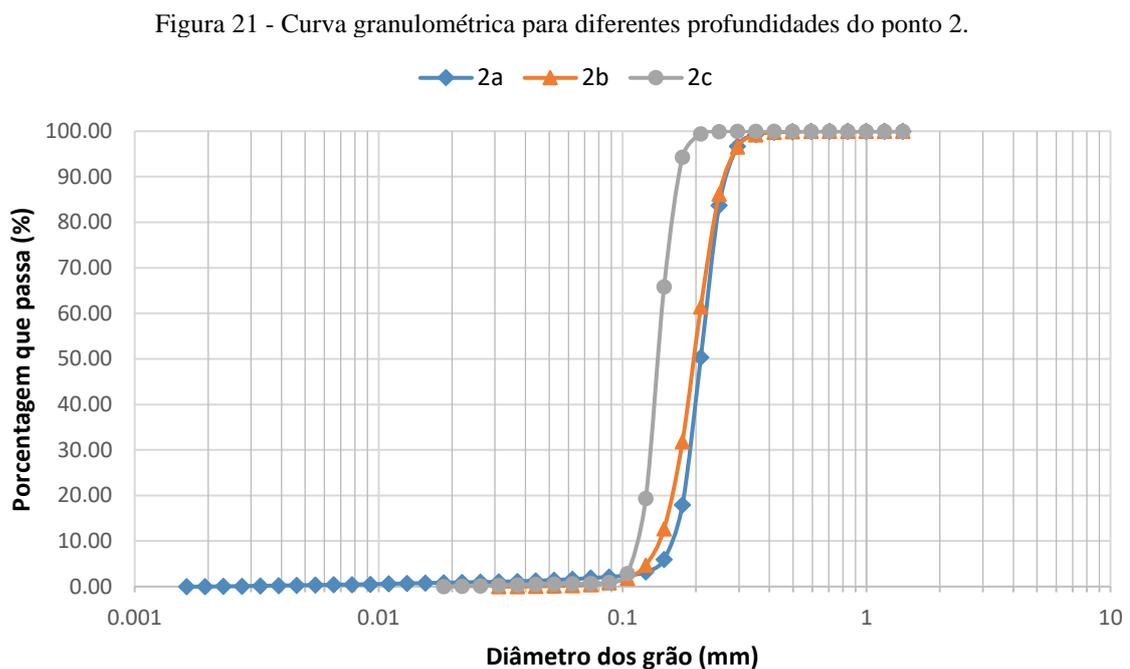


argila	silte	areia			pedregulho
		0,002	0,06	0,2	

Observa-se uma clara uniformidade nos resultados das curvas granulométricas, caracterizadas principalmente pela predominância de areia fina e areia média, com pequenas porcentagens de silte. Através da Figura 19, constata-se que pontos como o 3a e o 4 são formados quase que integralmente por areia média, ou seja, uma granulometria de maior diâmetro (0,2 a 0,6 mm), enquanto os pontos 10 e 2c são constituídos praticamente inteiramente por areia fina (que varia entre 0,06 e 0,2 mm).

A única exceção nos resultados apresentados é o ponto 7, ao norte da bacia. De fato, em campo foi observado uma textura mais fina e lodosa neste ponto em comparação com os outros sedimentos coletados na bacia. Sendo a única amostra que apresenta um maior teor de material fino, este ponto é formado por 93,34% de silte, com uma pequena parcela de argila (2,52%) e areia fina (3,20%),

Na Figura 21 são apresentadas as curvas granulométricas para as amostras de diferentes profundidades do ponto 2: 2a, 2b e 2c.



argila	Silte	areia			pedregulho
		fina	média	grossa	
0,002	0,06	0,2	0,6	2,0	

Como esperado, a amostra que apresenta uma maior granulometria é a camada mais superficial. As amostras 2a e 2b possuem valores semelhantes quanto ao diâmetro dos grãos, havendo uma diferenciação mais significativa na granulometria da amostra mais profunda, composta quase que unicamente por areia fina.

Para finalizar a caracterização física do solo, na Tabela 7 é apresentado o diâmetro efetivo das amostras, além dos resultados de coeficiente de uniformidade, coeficiente de curvatura e porosidade.

Tabela 7 – Análise de parâmetros granulométricos das amostras.

Ponto	Profundidade (m)	d ₁₀ (mm)	Cu	Cc	n (%)
2a	1,10	0,16	1,36	1,02	45,3
2b	1,50	0,14	1,46	1,02	44,9
2c	1,85	0,12	1,25	1,01	45,7
3a	0,21	0,27	1,28	1,01	45,6
3b	2,50	0,18	1,28	1,00	45,6
4	0,20	0,23	1,24	1,01	45,8
5	1,37	0,16	1,34	1,01	45,4
6	1,20	0,16	1,31	1,00	45,5
7	0,25	0,01	1,43	1,09	45,0
8	0,64	0,15	1,35	1,02	45,3
9	0,52	0,17	1,28	0,99	45,6
10	0,30	0,13	1,23	0,99	45,8
11	0,28	0,20	1,21	0,99	45,9
12	0,44	0,16	1,43	1,04	45,0

d₁₀: diâmetro efetivo; Cu = Coeficiente de Uniformidade; Cc = Coeficiente de Curvatura; n = Porosidade

Constata-se uma pequena variabilidade no diâmetro efetivo das amostras, com variação entre 0,1 a 0,3 mm. A exceção novamente é o ponto 7, que possui d₁₀ em uma ordem de grandeza menor, com valor de 0,01 mm.

Quanto mais uniforme a curva granulométrica, mais mal graduado será classificado o solo. A uniformidade do solo é classificada em: $Cu < 5$ = muito uniforme; $5 < Cu < 15$ = uniformidade média e $Cu > 15$ = não uniforme. Já para um coeficiente de curvatura de $1 < Cc < 3$, o solo é considerado bem graduado; Para $Cc < 1$ ou $Cc > 3$, o solo é mal graduado.

Desta forma, todas as amostras são consideradas muito uniformes, com solo classificado como bem graduado em todos os pontos, com exceção do 9, 10 e 11, que encontram-se na porção central e sul da bacia. Além disso, todas amostras tiveram porosidade similar, mantendo-se em valores na faixa de 45%.

4.1.2 Condutividade hidráulica por testes granulométricos

A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos nos testes granulométricos realizados em laboratório para cada ponto do estudo.

Tabela 8 - Resultados de condutividade hidráulica por testes granulométricos através dos métodos de Hazen e Kozeny-Carman.

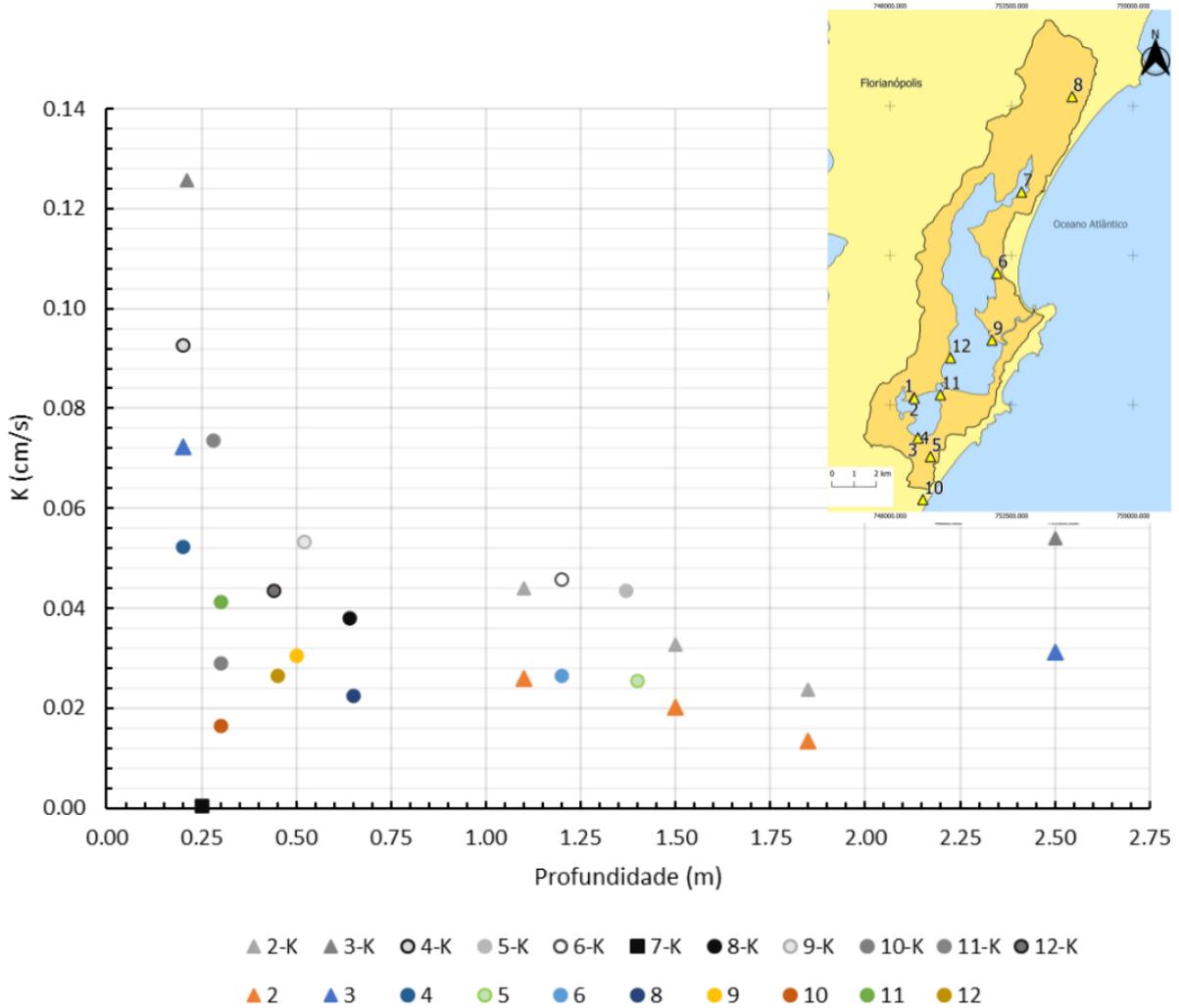
Ponto	Profundidade (m)	Hazen (cm/s)	Kozeny-Carman (cm/s)
2a	1,10	0.026	0.044
2b	1,50	0.020	0.033
2c	1,85	0.014	0.024
3a	0,21	0.072	0.126
3b	2,50	0.031	0.054
4	0,20	0.052	0.093
5	1,37	0.026	0.044
6	1,20	0.027	0.046
7	0,25	-	0.0003
8	0,64	0.022	0.038
9	0,52	0.031	0.053
10	0,30	0.016	0.029
11	0,28	0.041	0.074
12	0,44	0.026	0.043

Em uma análise preliminar, observa-se uma variação de condutividade hidráulica na ordem de 10^{-1} a 10^{-4} cm/s para os resultados dos testes granulométricos. Foram gerados 27 valores de condutividade hidráulica, 13 pela equação de Hazen, e 14 pela equação de Kozeny-Carman. Como o ponto 7 apresentou um valor de diâmetro efetivo (d_{10}) inferior à 0,1 mm, ele não foi calculado pelo método de Hazen, que limita o diâmetro ideal das partículas entre 0,1 a 3 mm.

A Figura 22 apresenta os resultados em formato de gráfico de dispersão, com os valores de condutividade hidráulica dos pontos em função da profundidade.

Ademais, apenas nos pontos 2 e 3 a condutividade hidráulica foi calculada em profundidades diferentes de um mesmo ponto, portanto, foram representados por triângulos para diferenciá-los e apresentar uma melhor visualização. Os resultados pelo método de Kozeny-Carman encontram-se em escala cinza, com a letra K na legenda dos pontos para diferenciá-los dos resultados pelo método de Hazen.

Figura 22 - Gráfico de resultados de condutividade hidráulica por análise granulométrica em função da profundidade



Fonte: Elaboração própria.

Observa-se também uma pequena variabilidade na condutividade hidráulica das amostras, com a maior faixa de valores variando entre 0,01 e 0,06 cm/s. Como exceções, têm-se os pontos 3a, 4 e 7. Os dois primeiros possuem os maiores valores entre as amostras para ambos os métodos, sendo 0,072 e 0,052 cm/s por Hazen, e 0,126 e 0,093 cm/s por Kozeny-Carman. Por outro lado, o ponto 7 representa o menor valor analisado, de 0,0003 cm/s, determinado apenas por Kozeny-Carman.

O ponto 7, coletado na região norte da BHLC, é o que mais destoa da faixa de valores encontrados, com valores de 10^{-4} cm/s enquanto a maioria dos valores situa-se na faixa de 10^{-2} cm/s. Contudo, este resultado já era esperado por conta da caracterização física do ponto 7 discutida no tópico anterior, que possui uma granulometria mais fina em comparação às outras amostras. Dessa forma, considerando-se o pequeno valor da condutividade hidráulica no local,

depreende-se que na região o fluxo de água subterrâneo é reduzido e inferior às outras localidades da bacia.

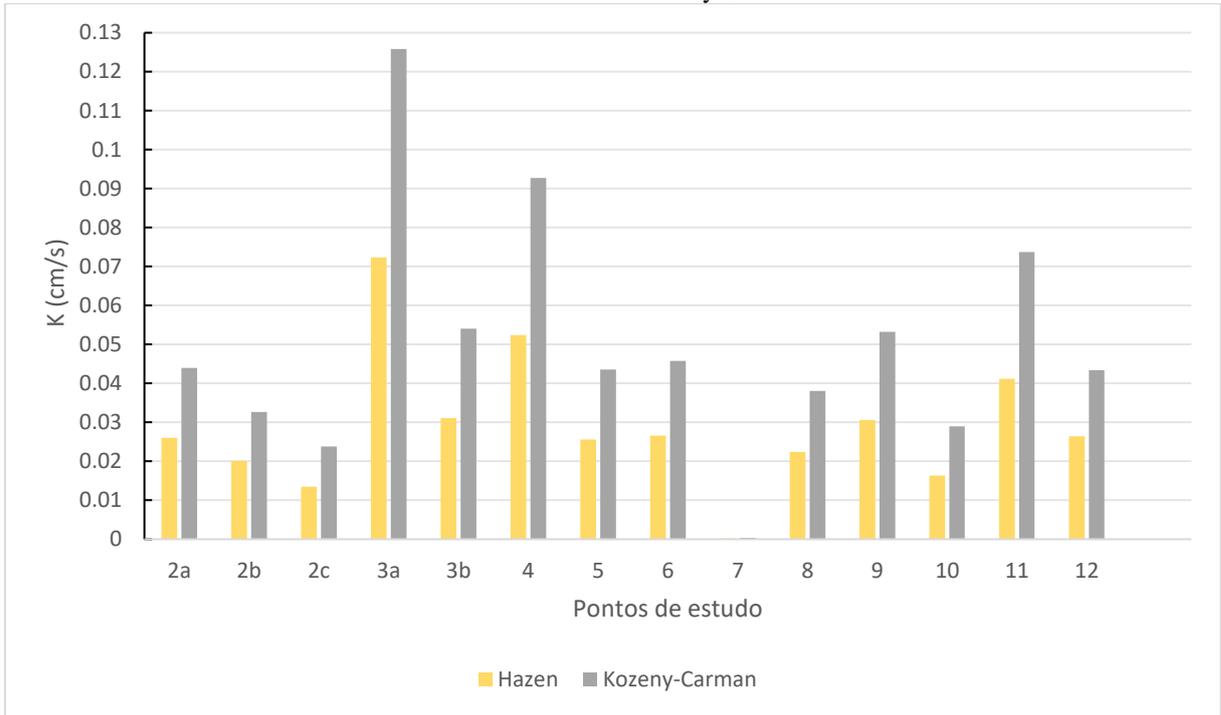
Os maiores valores foram observados nos pontos 3 e 4, que estão localizados próximos um ao outro (aproximadamente 20 metros de distância). Conforme a Figura 11, estão contidos em uma região com solo descrito como areais quartzosas (AQ), definido pela pouca capacidade de retenção de água e características arenosas.

Já os pontos 2 e 3 possibilitam aferir a influência da profundidade nos valores de condutividade hidráulica. No ponto 2, observa-se um declínio linear da condutividade hidráulica de acordo com o aumento da profundidade, com valores, pelo método de Hazen, de 0,026 cm/s para 1,10 m, 0,020 cm/s para 1,5 m e 0,013 cm/s para 1,85 m, sendo os últimos dois coletados em zona saturada. Desta forma, percebe-se um decréscimo médio de 0,0017 cm/s a cada 10 cm de profundidade da amostra no ponto 2.

Quanto ao ponto 3, o mesmo possui uma diferença de profundidade entre as duas amostras coletadas de 2,30 cm, com valores de condutividade hidráulica variando de 0,072 a 0,031 cm/s pelo método de Hazen. A amostra mais profunda do ponto 3 também foi coletada já em zona-saturada, enquanto a amostra mais superficial estava contida em zona não-saturada. Para este ponto, ocorre um decréscimo de 0,0018 cm/s a cada 10 cm, um valor muito semelhante ao observado no ponto 2. Isso se dá possivelmente por conta de os dois pontos estarem contidos em regiões que possuem o mesmo solo (AQ), por possuírem porosidades e diâmetros de partícula semelhantes (Tabela 7), além da localização próxima, ao sul da BHLC (Figura 11).

Pela Figura 23, que dispõe em colunas os resultados de Kozeny-Carman e Hazen, percebe-se mais evidentemente a superestimativa que ocorre no método de Kozeny-Carman, com os valores ocupando faixas ligeiramente maiores que os resultados pelo método de Hazen. Os resultados no ponto 7 são praticamente imperceptíveis por conta dos baixos valores de condutividade hidráulica encontrados no local.

Figura 23 - Gráfico em colunas dos resultados de condutividade hidráulica por testes granulométricos pelos métodos de Hazen e Kozeny-Carman.



Fonte: Elaboração própria.

4.1.3 Condutividade hidráulica por *slug test*

A Tabela 9 apresenta os resultados de condutividade hidráulica obtidos nos testes *slug* realizados em campo pelos métodos de Hvorslev e Bouwer & Rice. Os dados são também classificados pelas três metodologias de obtenção de dados: manual, com o uso do sensor de pressão (diver), e com o uso do sensor de pressão (diver) e aplicação de 1 litro d'água.

Tabela 9 - Resultados de condutividade hidráulica dos *slug tests* para os diferentes tipos de testes e métodos aplicados.

Ponto	Tipo de Teste	Nº do teste	Hvorslev (cm/s)	Bouwer & Rice (cm/s)	Média Hvorslev (cm/s)	Média Bouwer & Rice (cm/s)
1	Manual	1	0.0054	0.0042	0.0049	0.0038
	Manual	2	0.0044	0.0034		
	Manual	3	0.0050	0.0038		
	Diver	1	0.0048	0.0036	0.0062	0.0047
	Diver	2	0.0076	0.0059		
	Diver + 1L água	1	0.0055	0.0044	0.0057	0.0046
	Diver + 1L água	2	0.0060	0.0048		
2	Manual	1	0.0064	0.0051	0.0070	0.0055
	Manual	2	0.0066	0.0052		
	Manual	3	0.0080	0.0063		
	Diver	1	0.0057	0.0045	0.0052	0.0041
	Diver	2	0.0048	0.0038		
	Diver	3	0.0051	0.0042		
	Diver + 1L água	1	0.0055	0.0045	0.0056	0.0046
Diver + 1L água	2	0.0055	0.0047			
Diver + 1L água	3	0.0057	0.0046			
3	Manual	1	0.0039	0.0032	0.0041	0.0034
	Manual	2	0.0041	0.0034		
	Manual	3	0.0044	0.0036		
	Diver	1	0.0033	0.0026	0.0048	0.0037
	Diver	2	0.0072	0.0057		
	Diver	3	0.0038	0.0030		
4	Manual	1	0.0057	0.0057	0.0057	0.0057
	Manual	2	0.0057	0.0057		
	Manual	3	0.0057	0.0057		
	Diver	1	0.0181	0.0147	0.0144	0.0117
	Diver	2	0.0131	0.0106		
	Diver	3	0.0119	0.0097		

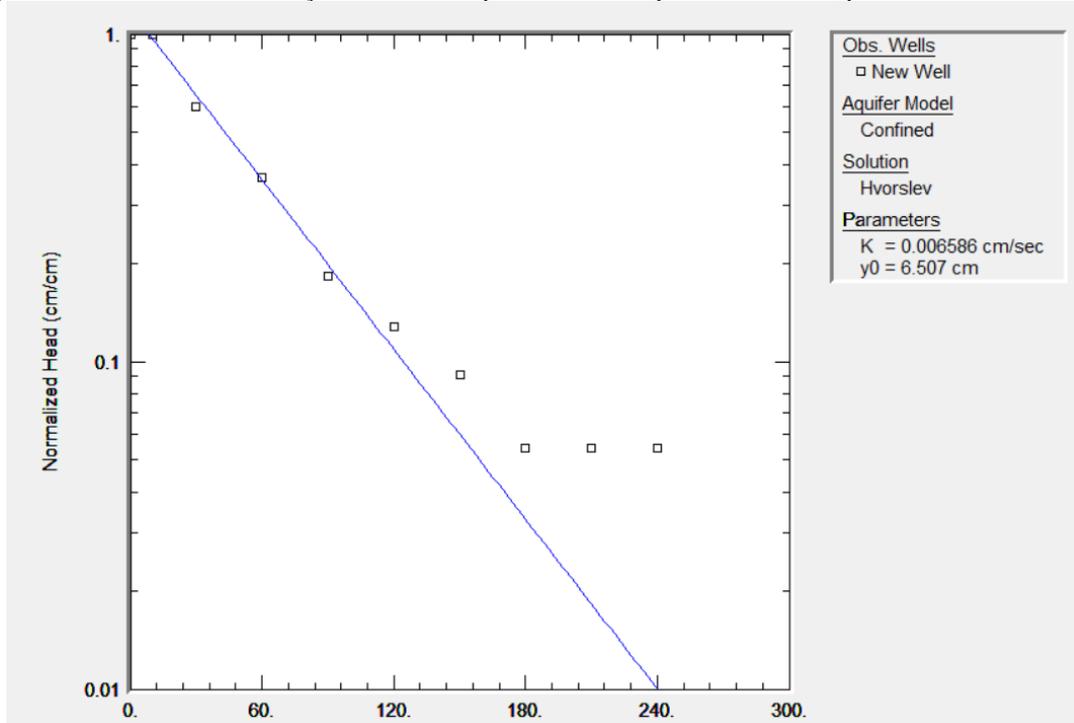
Os *slug test* realizados contaram com poucos minutos de duração por conta da alta permeabilidade observada nos piezômetros onde foram realizados os testes, variando entre 2 e 5 minutos. Foi realizado um total de 28 testes, 12 manuais, 11 com uso do *diver*, e 5 com uso do *diver* e inserção de 1 litro de água. Os testes com inserção de água foram realizados a fim de obter-se uma maior quantidade de medições e alongar o tempo do teste, com este procedimento sendo realizado apenas nos pontos 1 e 2.

No ponto 4 o teste ocorreu em um tempo particularmente menor que nos outros pontos, sendo concluído em aproximadamente um minuto. O tempo reduzido gerou uma quantidade muito pequena de medições pelo método manual, com apenas 3 medidas por teste (com aferição de nível ocorrendo a cada 30 segundos). Por conta disso, a curva de dados e os resultados obtidos foram considerados inconsistentes nas medições manuais, e desconsiderados nas

análises seguintes. Por outro lado, o sensor de pressão realiza a leitura de nível a cada 10 segundos, gerando uma maior quantidade de dados e um resultado mais acurado, sendo este o único tipo de teste considerado para o ponto 4.

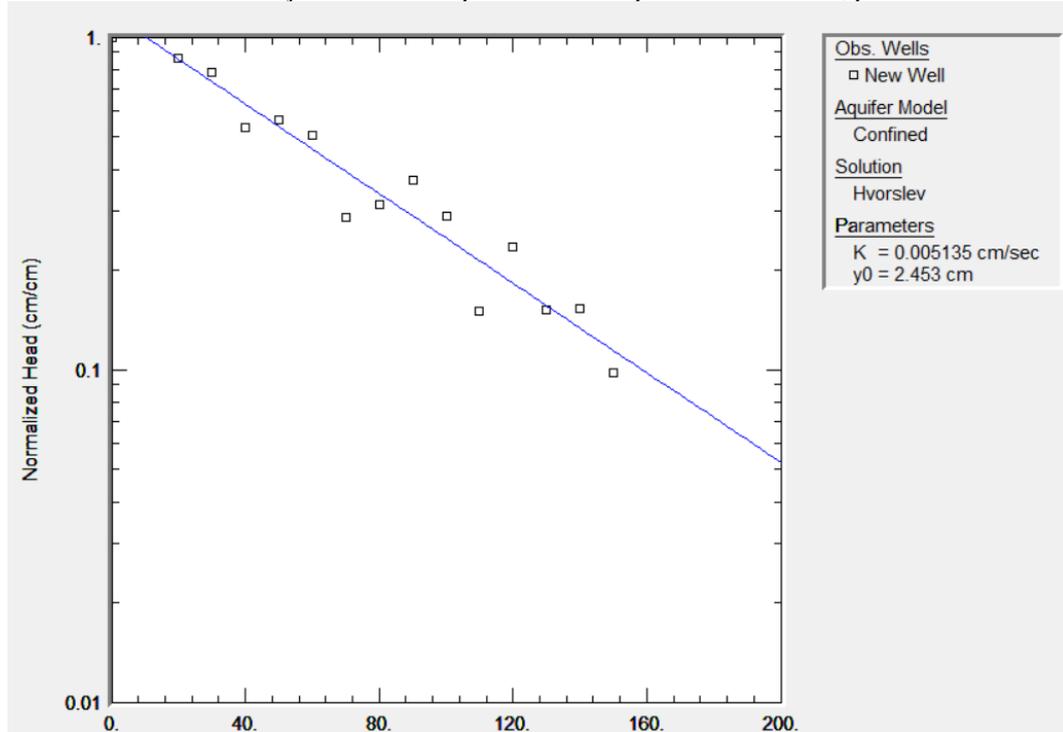
Para ilustrar a diferença observada nos dados gerados pelos três tipos diferentes de teste (manual, diver e diver com inserção de água), a Figura 24, Figura 25 e Figura 26 trazem gráficos gerados no software *Aqtesolv*, com os dados normalizados e em semi-log em função do tempo (segundos), com a linha de tendência do método Hvorslev gerada pelo próprio programa. Os dados apresentados são referentes aos testes realizados no ponto 2, onde foi aplicado os três tipos diferentes de obtenção de dados.

Figura 24 - Gráfico de distribuição de dados do ponto 2 obtidos por teste manual, pelo método de Hvorslev.



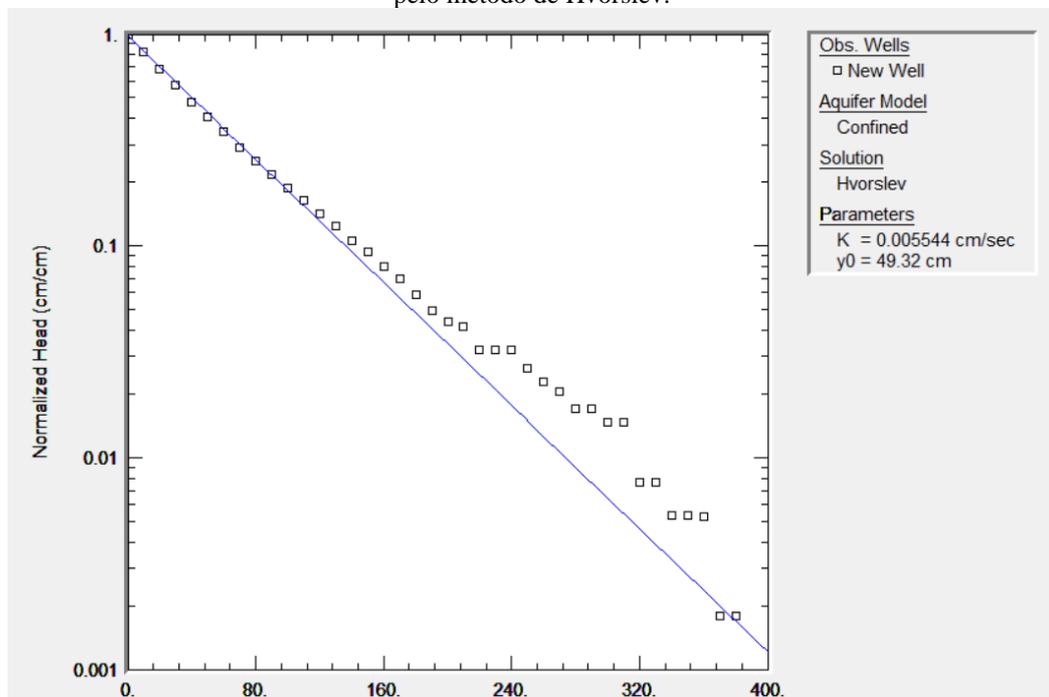
Fonte: Elaboração própria.

Figura 25 - Gráfico de distribuição de dados do ponto 2 obtidos por teste com diver, pelo método de Hvorslev.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 26 - Gráfico de distribuição de dados do ponto 2 obtidos por teste com diver e inserção de 1 L de água, pelo método de Hvorslev.



Fonte: Elaboração própria.

Nota-se que o teste que possui uma distribuição de dados que mais se aproxima de uma reta e com maior número de medidas, e por consequência, possui resultados mais robustos

e com maior confiabilidade é o *diver* com inserção de água. A coluna d'água formada apenas com a inserção do *diver* foi pequena, de aproximadamente 3 cm, e conseqüentemente, gerou testes mais rápidos que o *diver* com inserção de água (o qual formou uma coluna d'água de 50 cm).

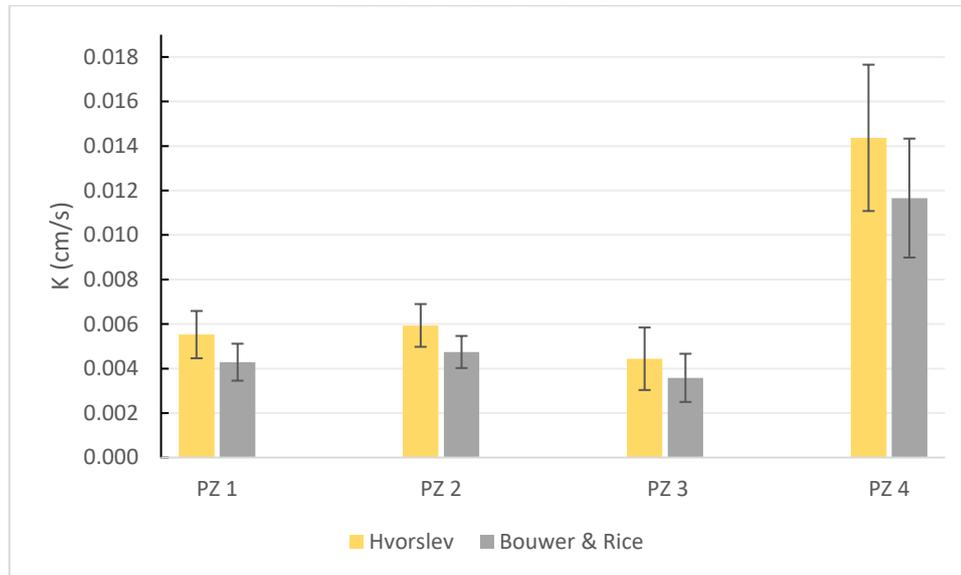
Já os testes realizados manualmente possuíram poucas medições comparado aos outros métodos, pois o intervalo de tempo para anotação do nível d'água era de 30 segundos, enquanto o sensor de pressão gerava medidas a cada 10 segundos. Todavia, em geral, os testes apresentaram valores e ordens de grandeza similares, com o resultado da condutividade hidráulica pelo método manual variando apenas 18% do valor encontrado pelo método do *diver* com inserção de água. Já o resultado de condutividade hidráulica no método do *diver* em relação ao do *diver* com inserção de água variou apenas 7%. Desta forma, pode-se afirmar que a medição com sensores de pressão é mais segura, mas no caso de ausência do aparelho, a medição manual é também uma forma confiável de obtenção de dados, desde que sejam obtidos dados suficientes para formação da reta de tendência. Assim, serão utilizados para caracterizar a BCLC neste estudo os valores determinados com o uso do *diver*.

A Tabela 10 apresenta cálculos estatísticos dos resultados obtidos para a condutividade hidráulica pelos *slug tests*. Para as estatísticas, uniu-se todos os testes realizados em cada piezômetro, com separação para os métodos de Hvorsev e Bouwer & Rice. Ainda, pela Figura 27, observa-se em um gráfico de colunas a média de condutividade hidráulica obtida para cada método, juntamente com o desvio padrão.

Tabela 10 - Estatísticas dos resultados de condutividade hidráulica por slug tests. **Hv**: Hvorslev; **B&R**: Bouwer & Rice.

	Hv (cm/s)	B&R (cm/s)	Hv (cm/s)	B&R (cm/s)	Hv (cm/s)	B&R (cm/s)	Hv (cm/s)	B&R (cm/s)
Ponto	1		2		3		4	
Nº de Amostras	7		9		6		3	
Mediana	0.0054	0.0042	0.0057	0.0046	0.0040	0.0033	0.0131	0.0106
Média ± Desvio Padrão	0.0055± 0.0011	0.0043± 0.0008	0.0059 ±0.001	0.0047± 0.0007	0.0044± 0.001	0.0036± 0.001	0.0144± 0.0033	0.0117± 0.0027
Mínimo	0.0044	0.0034	0.0048	0.0038	0.0033	0.0026	0.0119	0.0097
Máximo	0.0076	0.0059	0.0080	0.0063	0.0072	0.0057	0.0181	0.0147

Figura 27 - Médias e desvio padrão dos resultados de condutividade hidráulica por slug test pelos métodos de Hvorslev e Bouwer & Rice.



Fonte: Elaboração própria.

Constata-se assim uma pequena variabilidade nos resultados obtidos nos piezômetros 1, 2 e 3, e uma diferença significativa na faixa de valores encontrados no ponto 4 em relação aos outros resultados, que se mantiveram na casa de 10^{-3} cm/s, enquanto o ponto 4 manteve-se em 10^{-2} cm/s. Pela proximidade entre os pontos 3 e 4 e sua caracterização granulométrica, esperava-se que eles apresentassem valores semelhantes. A diferença da condutividade hidráulica nesse ponto pode ser ocasionada pela alteração do potencial hidráulico nesse ponto, devendo-se realizar um aprofundamento nos estudos da região, que destoa nos elevados valores de condutividade hidráulica encontrados, sendo uma região de possível fluxo intenso subterrâneo.

As medianas dos métodos de Hvorslev e Bouwer & Rice mantiveram-se similares para cada piezômetro, assim como as médias. Os pontos 1 e 2 possuem valores especialmente similares por conta de estarem próximos (aproximadamente 30 m de distância), concluindo-se que a região possui homogeneidade no solo e um baixo gradiente hidráulico entre os dois piezômetros.

O ponto que apresentou menores valores de desvio padrão, ou seja, uma menor variabilidade dentro da amostra, é o PZ 2. Por outro lado, o PZ 4 possui o maior desvio, já que sua amostragem é pequena em comparação aos outros pontos, além do seu comportamento discrepante, com velocidade muito superior em relação aos outros pontos. O desvio padrão de ambos os métodos foi muito similar.

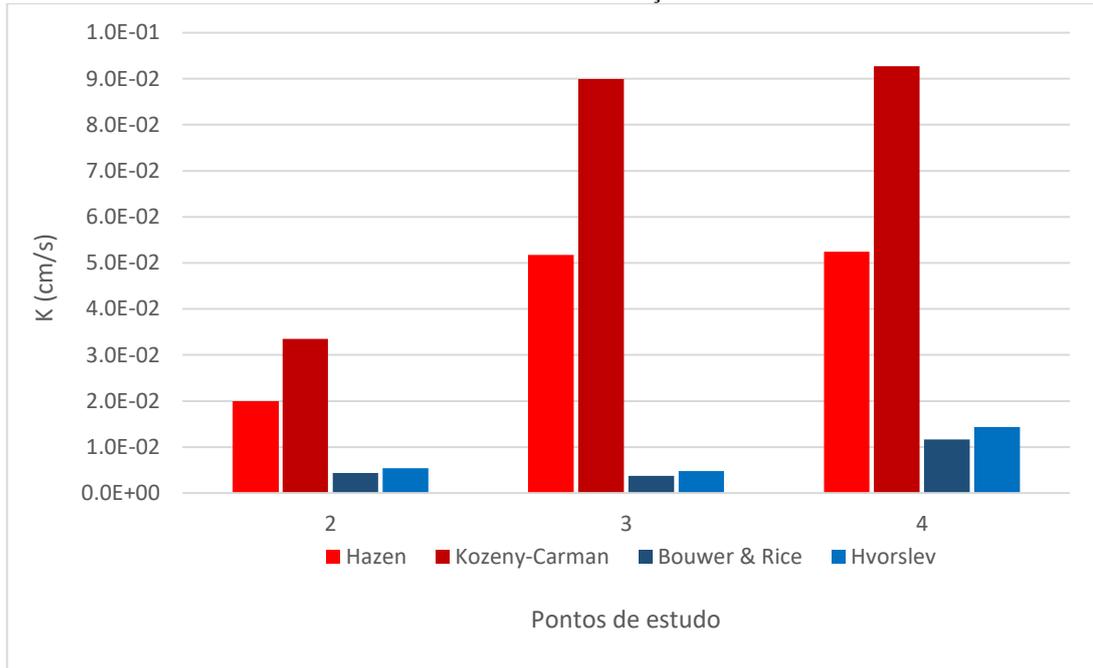
4.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS EM CAMPO E EM LABORATÓRIO

4.2.1 Comparação entre os resultados obtidos em testes de granulometria e slug tests

Tabela 11 - Resultados da condutividade hidráulica das análises granulométricas e análises em campo (*slug test*).

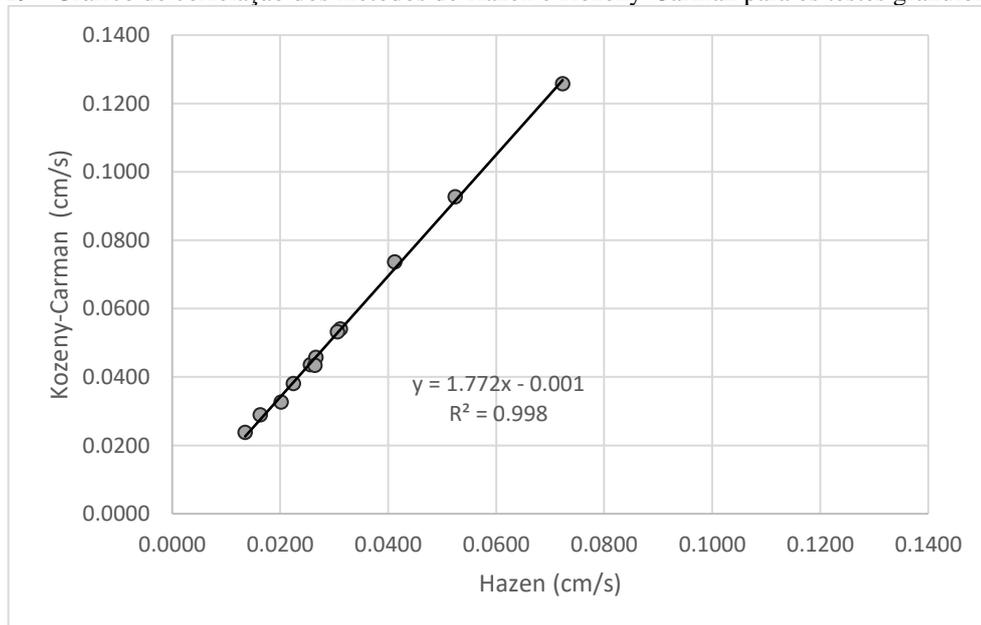
Ponto	Teste de granulometria			Slug Test			
	Profundidade (m)	Hazen-Williams (cm/s)	Kozeny-Carman (cm/s)	Hvorslev (cm/s)		Bouwer & Rice (cm/s)	
				Diver	Manual	Diver	Manual
1	-	-	-	0.0062	0.0049	0.0047	0.0038
2a	1,10	0.0260	0.0439	0.0054	0.0070	0.0044	0.0055
2b	1,50	0.0201	0.0327				
2c	1,85	0.0135	0.0238				
3a	0,21	0.0723	0.1258	0.0048	0.0041	0.0037	0.0034
3b	2,50	0.0311	0.0541				
4	0,20	0.0524	0.0927	0.0144	-	0.0117	-
5	1,37	0.0256	0.0436	-	-	-	-
6	1,20	0.0266	0.0458	-	-	-	-
7	0,25	*	0.0003	-	-	-	-
8	0,64	0.0224	0.0381	-	-	-	-
9	0,52	0.0306	0.0532	-	-	-	-
10	0,30	0.0163	0.0289	-	-	-	-
11	0,28	0.0412	0.0737	-	-	-	-
12	0,44	0.0264	0.0434	-	-	-	-

Figura 28 - Comparação em gráfico de colunas dos valores de condutividade hidráulica com os diferentes métodos de determinação.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 29 - Gráfico de correlação dos métodos de Hazen e Kozeny-Carman para os testes granulométricos.



Fonte: Elaboração própria.

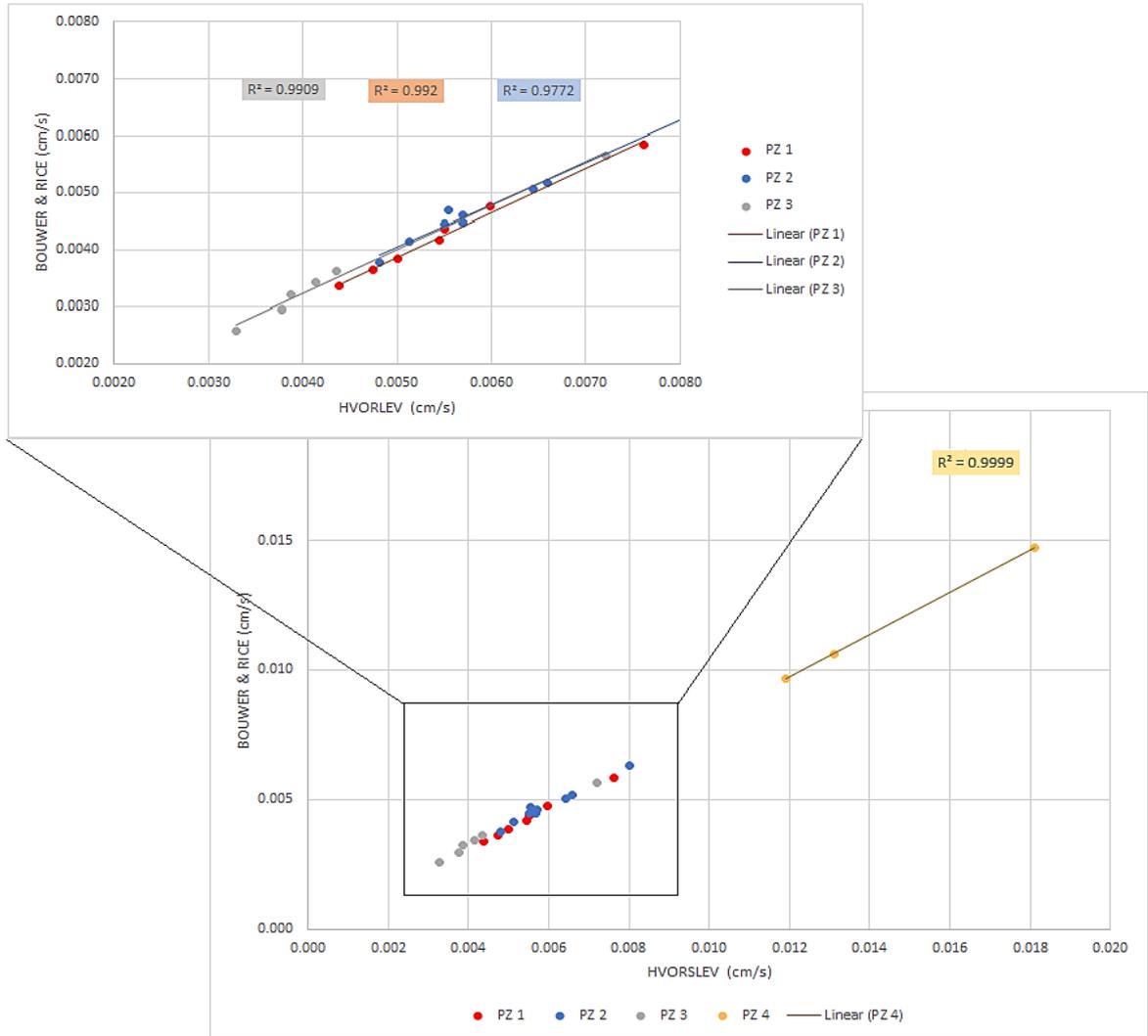
Primeiramente, observa-se uma superestimativa expressiva, de aproximadamente 10 vezes, dos valores obtidos pelas análises granulométricas em relação aos resultados obtidos em campo, nos *slug tests*. De fato, é recorrente em outros estudos que os valores de condutividade hidráulica por análises granulométricas determinadas através de fórmulas empíricas possuam

uma superestimativa e confiabilidade menor em comparação à testes realizados em campo (LANDON; RUS; HARVEY, 2005; OLIVA; KIANG; CAETANO-CHANG, 2005). De tal forma, os valores encontrados no *slug test* serão tidos como parâmetro neste estudo.

A correlação dos métodos de determinação granulométrica possui um alto coeficiente de determinação (R^2), no valor de 99,8%, e coeficiente de correlação de Pearson (R) no valor de 0.999, indicando uma correlação alta entre os dois. Weight (2008) reforça que, na hidráulica de aquíferos, um método pode apresentar um valor maior ou menor que outro, todavia, eles devem produzir tendências semelhantes, como é o caso. Portanto, os valores da granulometria escolhidos para representar a BHLC serão os do método de Hazen, já que são os que mais se aproximam dos valores dos *slug tests*.

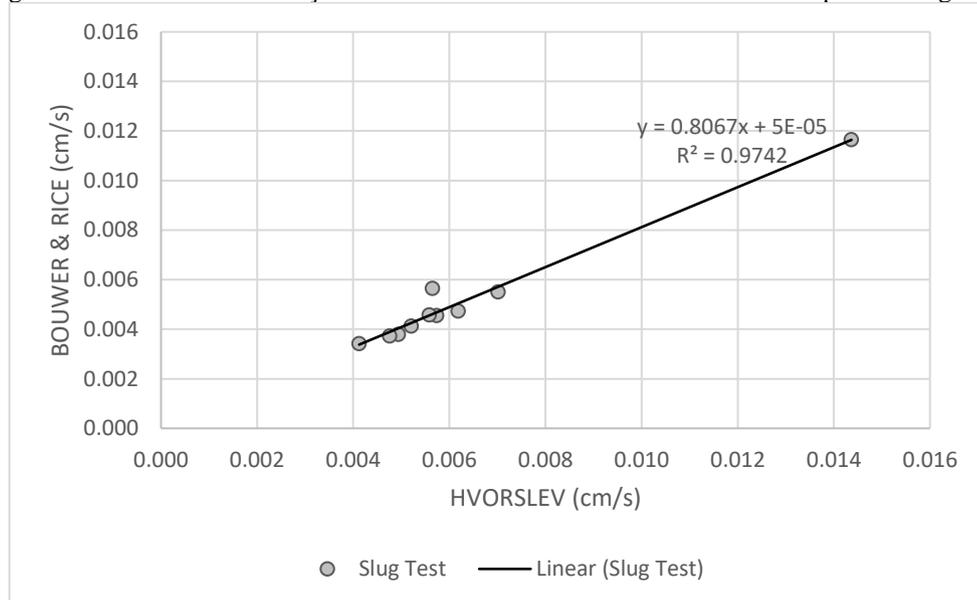
Na Figura 30 são apresentados os valores apenas dos testes com sensor de pressão (que, conforme discutido no tópico 4.1.3, serão os valores utilizados para caracterizar a bacia deste estudo). Já a Figura 31 apresenta a correlação dos métodos do *slug test* para cada piezômetro onde foram realizados os testes, com valores encontrados manualmente e através do uso do sensor de pressão.

Figura 30 - Gráfico de correlação dos métodos de Hvorslev e Bouwer & Rice em cada piezômetro.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 31 - Gráfico de correlação dos métodos de Hvorslev e Bouwer & Rice para os slug tests.



Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 30 nota-se uma forte correlação dos métodos para todos os piezômetros onde os testes foram realizados, confirmando a confiabilidade dos resultados.

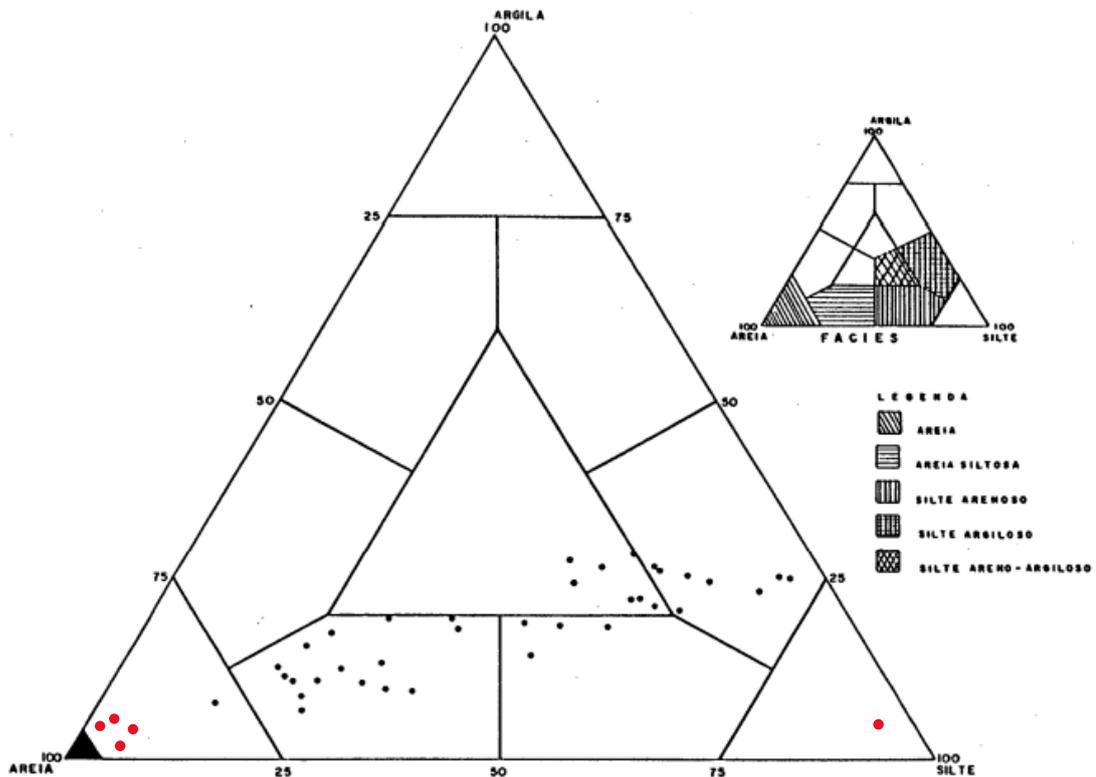
Apesar do método de Bouwer & Rice ser mais sofisticado por levar em conta, por exemplo, a geometria do filtro (se é total ou parcialmente penetrante) e a espessura saturada inicial, o método de Hvorslev apresentou valores muito semelhantes ao mesmo, havendo uma pequena superestimativa que foi também observada em outros estudos (ARRUDA, 2018; FABBRI; ORTOMBINA; PICCININI, 2012). Pode-se observar pela inclinação da reta (Figura 31) que os métodos de determinação de condutividade hidráulica utilizados no *slug test* possuem valores muito mais similares em comparação à reta gerada pela Figura 29 com os métodos de granulometria, onde o método de Kozeny-Carman possui uma superestimativa de aproximadamente 75% do valor de Hazen.

Os métodos de Bouwer & Rice e Hvorslev possuem uma forte correlação, já que apresentaram um coeficiente de determinação (R^2) no valor de 97,4%, e um coeficiente de correlação de Pearson (R) no valor de 0.999. Enquanto o método de Bouwer & Rice é mais comumente utilizado para aquíferos não-confinados, o método de Hvorslev é tipicamente utilizado para aquíferos confinados com baixo gradiente hidráulico (FABBRI; ORTOMBINA; PICCININI, 2012). Como o aquífero deste estudo se trata de um aquífero não-confinado, o método escolhido como ideal para o estudo é o de Bouwer & Rice.

4.2.2 Comparação com outros estudos

O estudo de Porto Filho (1993) traz a caracterização das fácies texturais dos sedimentos do fundo da Lagoa da Conceição. A Figura 32 mostra a classificação textural a partir do triângulo de Sheppard (1954) para os pontos estudados por Porto Filho (1993), em preto, e para os pontos deste estudo que foram coletados dentro da laguna, em vermelho.

Figura 32 – Triângulo de Sheppard para análise das fácies texturais dos sedimentos de fundo da laguna.

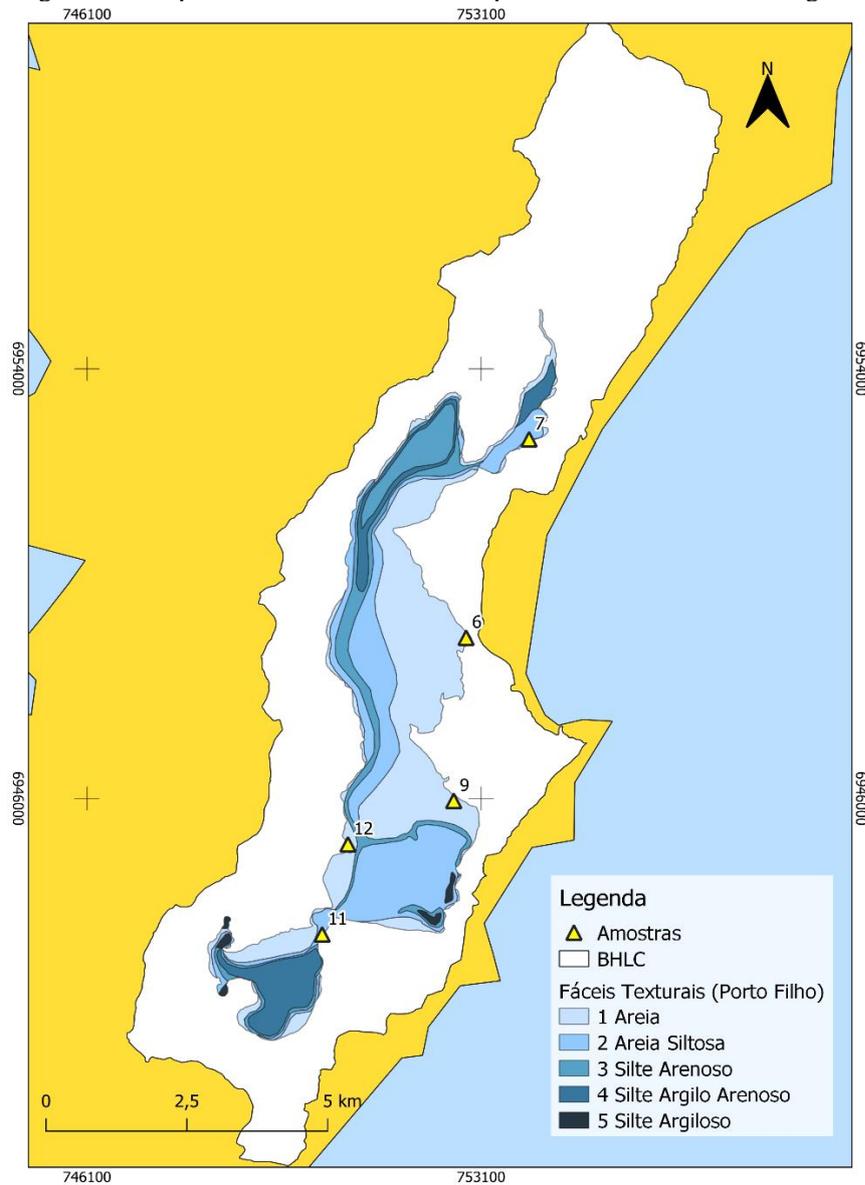


Pontos vermelhos: Pontos deste estudo que foram coletas dentro da laguna; Pontos pretos: Pontos do estudo de Porto Filho (1993). Adaptado de Porto Filho (1993).

Dessa forma, observa-se que os sedimentos estudados na pesquisa do autor referido se enquadram em areia, areia siltosa, silte arenoso, silte argiloso e silte areno-argiloso. Uma vez obtido os valores de porcentagem de silte, areia e argila para os pontos deste estudo, chegou-se ao resultado de que todos os pontos de estudo se enquadram como areia, exceto o ponto 7, que é enquadrado como silte.

Ao observar-se a Figura 33, na qual a divisão das fácies texturais é baseada no estudo de Porto Filho (1993), conclui-se que a espacialização das amostras que foram coletadas dentro da laguna por este estudo está de acordo com o apresentado por Porto Filho, exceto pelo ponto 7, que está situado em um local enquadrado como “areia”, apesar de apresentar textura siltosa, e o ponto 11, por estar situado no mapa em região de areia siltosa, mas na verdade apresentar composição apenas de areia, com predominância de areia média. O resultado pode ser explicado pela incerteza das análises granulométricas, e também pelo fato de que o autor, ao fazer esta análise, estudou especialmente pontos ao oeste da bacia, podendo haver diferença nos resultados por conta disso.

Figura 33 - Mapa de fácies texturais com os pontos coletados dentro da laguna.



Fonte: Elaboração própria.

Ainda, no estudo de Porto Filho, existe uma correlação entre o aumento da profundidade e o aumento da porcentagem de silte. De fato, no ponto 2 (onde foram coletadas 3 amostras em profundidades diferentes no mesmo ponto), verificou-se que, com o aumento da profundidade, ocorre uma diminuição no diâmetro das partículas. Todavia, no ponto onde o silte apresentou 90% da constituição do solo (ponto 7), a amostra foi coletada a apenas 25 cm de profundidade, não havendo uma correlação clara nesse caso.

A comparação com os resultados encontrados por Kern (2022) e Santos (2018) encontra-se disposta na Tabela 12, com divisão realizada pela URH em que os pontos estão inseridos, facilitando a análise comparativa. Os pontos representados por letras são referentes

ao estudo das autoras citadas, enquanto os pontos representados por números são referentes ao atual estudo.

Tabela 12 - Comparação de resultados de condutividade hidráulica com estudos de Kern (2022) e Santos (2018).

URH	Ponto	n (%)	Hazen (cm/s)	Kozeny-Carman (cm/s)	Hvorslev (cm/s)	Bouwer & Rice (cm/s)
Dunas	G	0,44	2,6E-02	3,9E-02	-	2,9E-03
	H	0,45	3,0E-02	4,7E-02	-	-
	I	0,44	7,4E-03	2,8E-02	-	-
	J	0,44	8,3E-03	3,2E-02	-	-
	F1	0,44	2,0E-02	3,0E-02	-	-
	F2	0,45	2,0E-02	4,0E-02	-	-
	F3	0,45	2,0E-02	4,0E-02	-	-
	F4	0,45	3,0E-02	6,0E-02	-	-
	F5	0,45	3,0E-02	6,0E-02	-	-
	11	0,46	4,1E-02	7,4E-02	-	-
Depósito Sedimentar	A	0,40	8,3E-03	8,2E-03	-	-
	B	0,40	6,7E-03	7,0E-03	-	-
	E	0,40	6,2E-03	6,2E-03	-	-
	F	0,44	3,1E-02	4,7E-02	-	4,4E-03
	1	-	-	-	6,2E-03	4,9E-03
	2a	0,45	2,6E-02	4,4E-02	-	-
	2b	0,45	2,0E-02	3,3E-02	5,4E-03	7,0E-03
	2c	0,46	1,4E-02	2,4E-02	-	-
	3a	0,46	7,2E-02	1,3E-01	4,8E-03	4,1E-03
	3b	0,46	3,1E-02	5,4E-02	-	-
Norte	4	0,46	5,2E-02	9,3E-02	1,4E-02	1,2E-02
	5	0,45	2,6E-02	4,4E-02	-	-
	6	0,45	2,7E-02	4,6E-02	-	-
	7	0,45	-	3,0E-04	-	-
	9	0,46	3,1E-02	5,3E-02	-	-
	8	0,45	2,2E-02	3,8E-02	-	-
	C	0,39	6,1E-03	5,6E-03	-	-
Maciço	D	0,38	2,5E-02	1,8E-02	-	-
	12	0,45	2,6E-02	4,3E-02	-	-
Campeche	10	0,46	1,6E-02	2,9E-02	-	-

Nota-se, em uma análise preliminar, uma faixa de valores similares tanto para porosidade quanto para condutividade hidráulica as análises granulométricas realizadas em todos os pontos. Observa-se também que nos pontos F e G, os únicos dos estudos anteriores nos quais foi realizado o slug test, os valores encontrados pelo método Bouwer & Rice são da mesma ordem de grandeza dos *slug tests* realizados neste estudo, confirmando a existência de uma superestimativa das análises granulométricas na bacia estudada.

Em comparação aos estudos dispostos na Tabela 2 de Suguio (1973), Guedes (1999) e Zanatta (2005), que apresentaram valores de porosidade entre 15 e 45%, os resultados encontrados neste estudo mantêm-se consoante a esta faixa de valores.

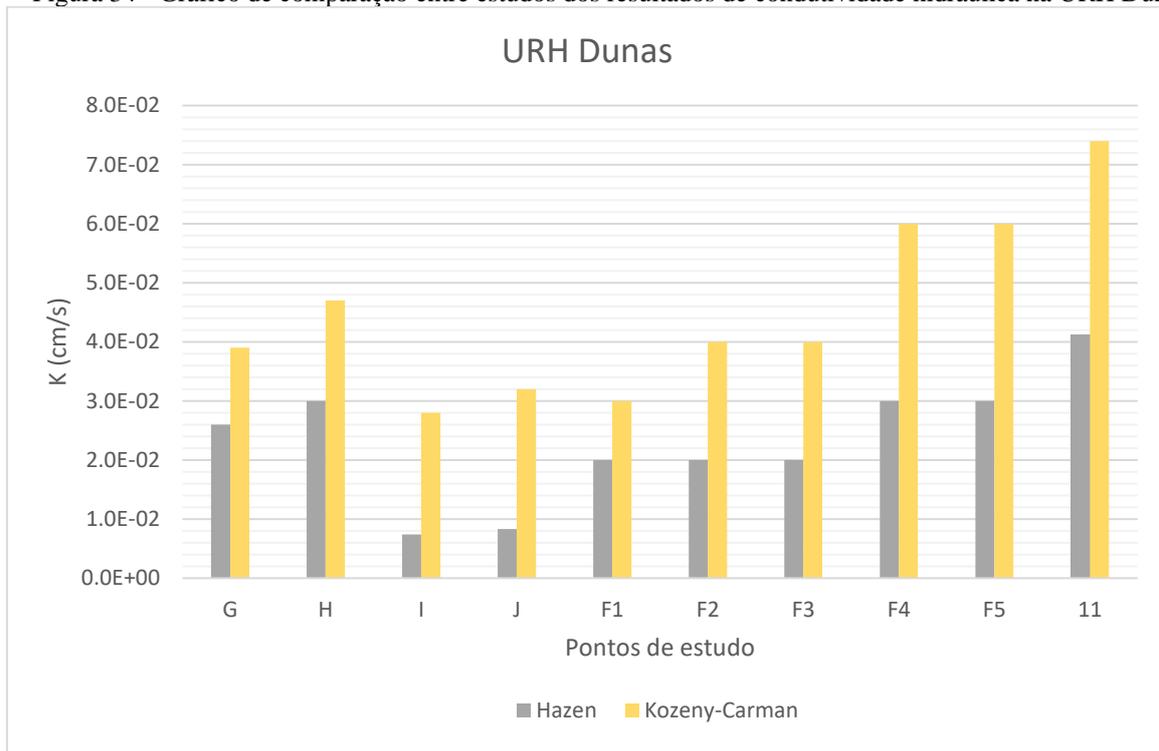
Para a URH Norte não foram encontrados estudos anteriores para comparação, mas os valores apresentados são similares aos encontrados em todos os pontos, não apresentando nenhuma característica específica de destaque.

Quanto ao ponto situado na Bacia Hidrográfica Campeche, o mesmo encontra-se na faixa de valores observadas nos demais pontos, e em comparação ao estudo de Pacheco (2015) realizado no Campeche e disposto na Tabela 2, o ponto 10 possui valores numa faixa de valores superior. Todavia, o estudo de Pacheco (2015) foi realizado através de *slug tests*, os quais, conforme visto no presente estudo, tendem a apresentar resultados de fato menores que as análises granulométricas.

Já na Figura 34 observa-se uma homogeneidade nos resultados. Para o ponto 11, o único desta pesquisa localizado na URH Dunas, verifica-se o maior valor, entretanto, possui pouca margem de diferença em comparação aos outros. É visível também a superestimativa observada pelo método Kozeny-Carman em relação ao método de Hazen, tanto nos estudos comparativos quanto no atual estudo.

Ainda, na URH Dunas esperava-se uma condutividade hidráulica superior por conta da predominância de areias quartzosas, contudo, em comparação aos outros valores encontrados, essa relação não foi confirmada, mantendo-se na faixa que as diversas URHs.

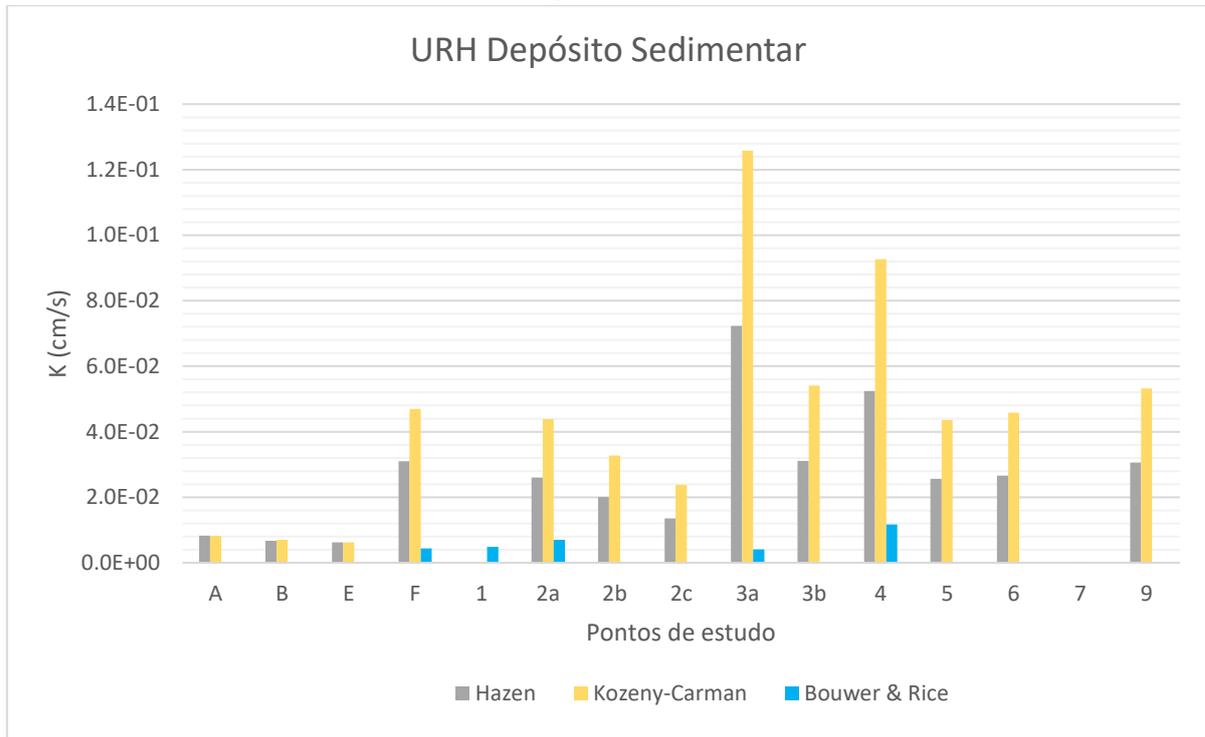
Figura 34 - Gráfico de comparação entre estudos dos resultados de condutividade hidráulica na URH Dunas.



Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 35, referente à URH de Depósito Sedimentar, observa-se que os *slug tests* mantêm-se na mesma faixa de valores. Conforme comentado anteriormente, nos pontos 3 e 4 são observados valores superiores de condutividade hidráulica em relação aos outros pontos deste estudo, o que também é verificado em análise aos estudos comparativos apresentados. Todavia, nos pontos A, B e E foram encontrados valores em ordens inferiores aos deste estudo, sendo o ponto A em uma localização muito próxima aos pontos 3 e 4. O fenômeno pode ter ocorrido em partes por conta da profundidade onde as amostras foram retiradas, que no ponto A estaria em torno de 0,7 a 1 m, e nos pontos 3a e 4 é de aproximadamente 0,20 m. Ainda, é esperado desta URH uma alta taxa de infiltração, todavia, com exceção dos pontos 3 e 4, os valores se mantêm similares aos das outras URHs.

Figura 35 - Gráfico de comparação entre estudos dos resultados de condutividade hidráulica na URH Depósito Sedimentar.

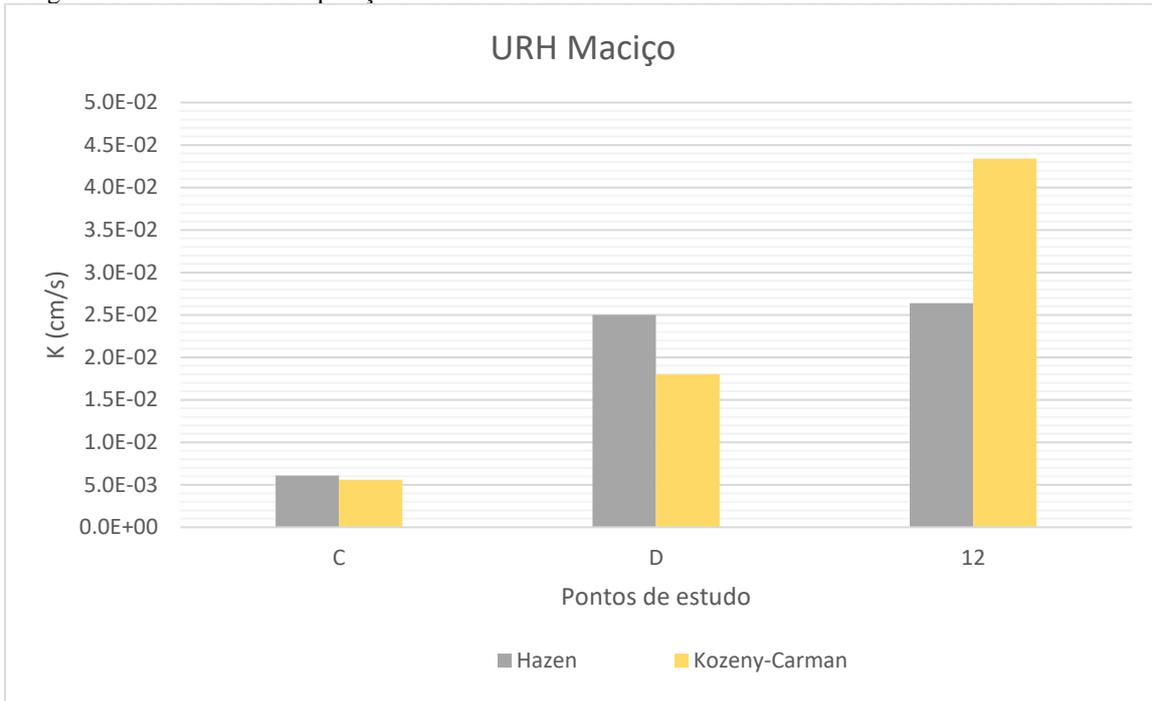


Fonte: Elaboração própria.

Por fim, na URH maciço, o ponto D dos estudos anteriores se manteve muito similar ao ponto 12 deste estudo, enquanto o ponto C apresentou valores aproximadamente 4 vezes menores. Nesta URH, por conta da alta declividade e formação geológica do tipo Granito Ilha, são proporcionadas baixas infiltrações e alta contribuição de escoamento superficial.

Entretanto, apenas o ponto C apresentou valores inferiores em comparação aos outros pontos da bacia. A porosidade, porém, foi inferior às outras observadas tanto no ponto C quanto no ponto D, de 39% e 38% respectivamente.

Figura 36 - Gráfico de comparação entre estudos dos resultados de condutividade hidráulica na URH Maciço.



Fonte: Elaboração própria.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA NA BACIA HIDROGRÁFICA DA LAGOA DA CONCEIÇÃO

Os métodos para condutividade hidráulica escolhidos para caracterização da BHLC foram os de Hazen (análises granulométricas) e Hvorslev (*slug tests*), conforme comentado no item 4.2. Desta forma, a Tabela 13 resume os valores finais adotados de condutividade hidráulica para os respectivos pontos de estudo. A única exceção é dada pelo ponto 7, que não pode ser calculado pelo método de Hazen devido à baixa granulometria, e está disposto com o valor encontrado pelo método de Kozeny-Carman.

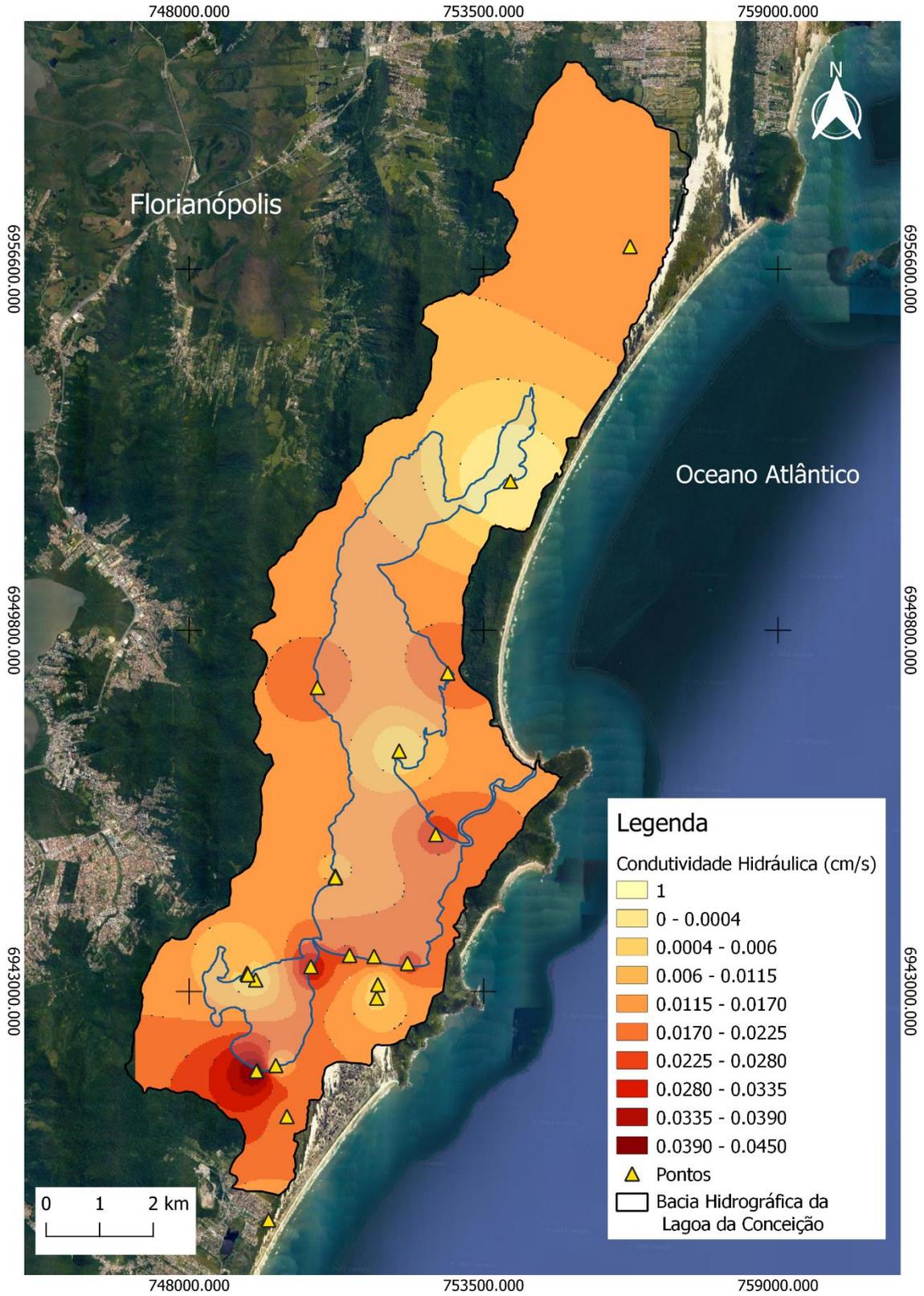
Tabela 13 - Valores de condutividade hidráulica para caracterização da BHLC.

Ponto	Granulometria	<i>Slug Test</i>
	Hazen (cm/s)	Hvorslev (cm/s)
1	-	0.0062
2a	0.0260	
2b	0.0201	0.0054
2c	0.0135	
3a	0.0723	
3b	0.0311	0.0048
4	0.0524	0.0144
5	0.0256	-

6	0.0266	-
7	0.0003*	-
8	0.0224	-
9	0.0306	-
10	0.0163	-
11	0.0412	-
12	0.0264	-

A Figura 37 apresenta o resultado da modelagem realizada pelo método IDW obtido pelos valores de condutividade hidráulica no método de Hazen.

Figura 37 - Interpolação dos dados de condutividade hidráulica na Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição.



Fonte: Elaboração própria.

Interpretando-se a modelagem obtida, percebe-se que a região sudeste da bacia apresenta claramente maiores valores de condutividade hidráulica, sendo no extremo sul o ponto onde se observa o maior valor, concluindo-se que esta região é a com maior fluxo de água subterrânea. Observa-se ainda uma pluma de valores reduzidos de condutividade hidráulica ao Norte, onde foi encontrado o solo siltoso, coletado de dentro da laguna (amostra saturada), onde o fluxo de água subterrâneo deve ocorrer em menores dimensões.

De toda forma, a condutividade hidráulica encontrada na Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição mostrou-se com variabilidade baixa ao longo de sua extensão, especialmente por conta de sua granulometria homogênea e predominantemente arenosa conforme abordado anteriormente.

Por conta da assimetria e baixa amostragem dos pontos estudados, o modelo da Figura 37 apresenta limitações. Todavia, o mesmo viabiliza uma visualização espacial dos valores de condutividade hidráulica da laguna, possibilitando uma estimativa dos valores de condutividade hidráulica nos locais não amostrados, e trazendo uma nova perspectiva quanto ao comportamento da laguna que ainda não havia sido explorada.

5 CONCLUSÃO

Primeiramente, no que diz respeito aos testes granulométricos, a utilização de dois métodos trouxe maior confiabilidade aos dados e os cálculos apresentaram valores consistentes em conjunto com uma grande praticidade, sendo uma ótima forma de determinação de condutividade hidráulica preliminar. Contudo, por se tratar de um método indireto e empírico, possui limitações quanto à precisão dos valores, apresentando valores muito distintos quando comparado à métodos de campo, não representado adequadamente esta área de estudo e não sendo recomendado para tal.

O sensor de pressão utilizado para a realização dos slug tests permitiu uma determinação de resultados precisa. Todavia, o método de medição manual apresentou valores com variação de apenas 18% em relação aos valores com o sensor, sendo considerado um método seguro no caso de ausência do aparelho. O *slug test* através do método de Bouwer & Rice, ideal para aquíferos livres, foi considerado neste estudo o melhor método para determinação da condutividade hidráulica na Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição. Todavia, apesar da simplicidade do teste e dos equipamentos necessários para realizá-lo, é necessária a instalação ou pré-existência de um poço ou piezômetro, além do teste demandar elevados períodos de tempo dependendo do solo no local.

Quanto à comparação aos estudos realizados anteriormente, os pontos apresentaram faixa de valores similares e consistência na espacialização, com a divisão por Unidades de Resposta Hidrológica mantendo-se com valores homogêneos apesar das diferentes características das regiões. Depreende-se pelo estudo que no Norte da bacia os valores de fluxo subterrâneo são menos intensos, enquanto no Sul encontram-se os maiores valores de condutividade hidráulica. O modelo final da distribuição da condutividade hidráulica na bacia representou bem os dados obtidos, todavia, uma maior variabilidade de pontos poderia gerar um mapa com informações mais refinadas.

Desta forma, recomenda-se uma maior amostragem através de métodos de campo, possibilitando uma melhor comparação entre a condutividade hidráulica das URHs da bacia, e também uma modelagem de caracterização utilizando apenas valores encontrados em *slug tests*. Sugere-se ainda um maior detalhamento e amostragem da região Norte, para determinar a extensão das fácies texturais de baixa granulometria encontradas na região, com amostras

coletadas em diferentes profundidades para melhor compreensão da divisão de horizontes do solo da região. Por fim, recomenda-se também um estudo mais aprofundado especialmente nos pontos 3 e 4 deste estudo, onde percebeu-se uma diferença de valores de condutividade hidráulica elevado entre dois pontos próximos, caracterizando-se como uma região com possível alteração do potencial hidráulico nesse ponto, e alto fluxo subterrâneo.

REFERÊNCIAS

- 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.
- ARRUDA, I. S. **Determinação da condutividade hidráulica no no aquífero aluvial do Rio Sucuru através do ensaio slug test**. UFCG, 2018.
- BARBOSA, T. C. P. **ECOLAGOA: um breve documento sobre a ecologia da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição**. Florianópolis, Agnes, 2003.
- BARLOW, P. M. **Ground Water in Freshwater-Saltwater Environments of the Atlantic Coast**. U S Geological Survey - Circular 1262, v. Circular 1, p. 121, 2003.
- BENOIT, J.; *et al.* **Mitigating shore erosion along sheltered coasts**. The National Academies Press, Washington, DC. 2007.
- BETIM, L. S. **Caracterização da condutividade hidráulica dos solos e estudo da vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos da sub-bacia do córrego Palmital**. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 2013.
- BIER, F. B. **Aspectos Hidrodinâmicos E Sedimentológicos Em Um Canal De Maré: Estudo De Caso Do Canal Da Barra Da Lagoa, Florianópolis - SC**. Dissertação de mestrado. UFSC. 2018.
- BOCANEGRA, E. et al. State of knowledge of coastal aquifer management in South America. **Hydrogeology Journal**, v. 18, n. 1, p. 261–267, 10 out. 2009.
- BUTLER, J. **The Design, Performance, and Analysis of Slug Tests**. 2. ed. [s.l: s.n.]. p. 280. 2019.

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

CARUSO Jr., F. **Geologia e características ambientais da Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina, SC**. Tese de Mestrado, UFRJ, 66p. 1989.

CARVALHO, A. M. DE et al. Determinação da condutividade hidráulica de uma área contaminada da grande são paulo utilizando-se método slug test. **Águas Subterrâneas**, v. 27, n. 3, 19 dez. 2013.

CECCA: Uma cidade numa ilha: relatório sobre problemas sócios-ambientais da Ilha de Santa Catarina/ Centro de Estudos Cultura e Cidadania- CECCA – Florianópolis, Insular, CECCA, 1997.

CHENG, A.H.D., OUAZAR, D., **Coastal aquifer management: monitoring, modeling, and case studies**. Boca Raton, USA: CRC Press; 2004.

CHOW, V. TE; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. *Applied Hidrology*. [s.l.] McGraw-Hill, 1988.

CLEARY, R. W. **Águas Subterrâneas**. Clean Environment Brasil, Princeton Groundwater Inc, ABRH, 2007.

DAWSON, K. J., ISTOK J. D. **Aquifer Testing: Design and Analysis of Pumping and Slug Tests**. Chelsea: Lewis, 1991

DUARTE, V. L. **Lagoa da Conceição: Análise integrativa da expansão urbana e seus impactos socioambientais**. UFSC, 11 jul. 2022.

FABBRI, P., ORTOMBINA, M.; PICCININI, L., 2012. Estimation of Hydraulic Conductivity Using the Slug Test Method in a Shallow Aquifer in the Venetian Plain (NE, Italy). **Aqua Mundi**, p. 125-133. 2012.

FARRELL, E. R. Analysis of groundwater flow through leaky marine retaining structures. **Geotechnique**, 44(2), 255–263. 1994.

FEITOSA, F.A.C., FILHO, J.M., FEITOSA, E.C., DEMETRIO, J.G. **Hidrogeologia Conceitos e Aplicações**. 3ª edição revisada e ampliada. Rio de Janeiro: CPRM- Serviço Geológico do Brasil: LABHID, 812p., 2008.

FEITOSA, F.F. **Paisagem Natural e Paisagem Construída. O Caso da Lagoa da Conceição na Ilha de Santa Catarina**. Relatório Final das Atividades Desenvolvidas. Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2000.

FERNANDINO, G.; ELLIFF, C. I.; SILVA, I. R. Ecosystem-based management of coastal zones in face of climate change impacts: Challenges and inequalities. **Journal of Environmental Management**, v. 215, p. 32–39, jun. 2018.

FETTER, C. W. **Applied Hydrogeology**. 4ª. ed. Pearson Education, Inc., 610p, 2001.

FIORI, Joyce Pinheiro de Oliveira. **Avaliação de métodos de campo para a determinação de condutividade hidráulica em meios saturados e não saturados**. 107 f. Dissertação (Mestrado em Geociências aplicadas)-Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

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

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

GRÉ, J. C. R.; HORN FILHO, N. O. **Caracterização textural dos sedimentos de fundo da Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina, SC, Brasil**. O Ecossistema da Lagoa da Conceição, NEMAR-CCB-UFSC/SDM-FEPEMA, Florianópolis, p. 25–34, 1999.

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

GONÇALVES, A. D. M. DE A.; LIBARDI, P. L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 5, p. 1174–1184, out. 2013.

GUEDES JR, A. **Mapeamento Hidrogeológico da Ilha de Santa Catarina, utilizando geoprocessamento**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.

HAUFF, N.S. **Diagnostico ambiental integrado da bacia hidrografica da Lagoa da Conceição - Florianópolis, SC**. UFSC, Dissertação de mestrado. 1996.

GUEDES JR, A. O Sistema Aquífero Janaína. **Águas Subterrâneas**, n. 1, 2002.

HEATH, R. C.; North carolina. Department of natural resources and community development.; geological survey (u.s.). **Basic ground-water hydrology**. [s.l.] U.S. Geological Survey, 2004.

KERN, P. **Relevância da componente subterrânea no equilíbrio de uma laguna costeira**. Florianópolis. Universidade Federal de Santa Catarina, Tese de doutorado. 2022.

KJERFVE, B. Coastal Lagoons. **Elsevier Oceanography Series**, v. 60, n. C, 1994

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

KRUSEMAN, G. P.; RIDDER, N.A. de. **Analysis and Evaluation of Pumping Test Data**. 2. ed. Wageningen, Netherlands: International Institute for Land Reclamation and Improvement, 2000.

LANDON, M. K.; RUS, D. L.; HARVEY, E. Comparison of Instream Methods for Measuring Hydraulic Conductivity in Sandy Streambeds. **Groundwater**, v. 39. 2005

LIMA, P. S.; MORAES, F.; PASCHOAL, L. G. Estudo da variabilidade espacial da condutividade hidráulica do entorno da Lagoa da Confusão – TO. Em: **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**. [s.l.] INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - UNICAMP, p. 22–30. 2017.

LUIZ, E. L. Tipos de solos do município de Florianópolis. In: BASTOS, M. D. A. (coord) **Atlas do município de Florianópolis**. Florianópolis. IPUF, 2004.

DE MIRANDA, L. B. et al. **Fundamentals of Estuarine Physical Oceanography**. [s.l: s.n.]. v. 8. 2017.

MORAIS, F. **Estudo dos fatores pedogeomorfológicos intervenientes na infiltração em zonas de recarga no complexo metamórfico bação**. Tese (Doutorado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) - Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2007.

MUBARAK, I.; ANGULO-JARMILLO, R.; MAILHOL, J.C.; RUELLE, P.; KHALEDIAN, M. & VAUCLIN, M. Spatial analysis of soil surface hydraulic properties: Is infiltration method dependent? **Agric. Water Manag.**, 97:1517-1526, 2010.

MUEHE, D., CARUSO Jr. Batimetria e Algumas Considerações Sobre a Evolução Geológica da Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina" In: Sierra de Ledo, B., SorianoSerra, E. J. (eds). **O Ecossistema da Lagoa da Conceição**, NEMAR/CCB/UFSC, SDM/FEPEMA, pp. 15-24. 1999.

ODEBRECHT, C., CARUSO Jr. Hidrografia e Matéria Particulada em Suspensão na Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina, SC, Brasil. In: Sierra de Ledo, B., SorianoSerra, E. J. (eds). **O Ecossistema da Lagoa da Conceição**, NEMAR/CCB/UFSC, SDM/FEPEMA, pp. 35-61. 1999.

ODONG, J. Evaluation of Empirical Formulae for Determination of Hydraulic Conductivity based on Grain-Size Analysis. *Journal of American Science*, v. 3, n. 3, p. 54–60, 2007.

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

OLIVA, A.; HUNG KIANG, C.; CAETANO-CHANG, M. R. Determinação da condutividade hidráulica da Formação Rio Claro: Análise comparativa através de análise granulométrica e ensaios com permeâmetro guelph e testes de slug. **Águas Subterrâneas**, v. 19, n. 2, 28 jun. 2005.

PACHECO, E.F. **Avaliação Quali-quantitativa de uma Vala de Infiltração Pluvial em Termos de Retenção de Contaminantes.** Santa Catarina. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. 170p. 2015

PARIZI, E. et al. Vulnerability mapping of coastal aquifers to seawater intrusion: Review, development and application. **Journal of Hydrology**, v. 570, p. 555–573, mar. 2019.

PEREIRA, M. L. M. Estudo da dinâmica das águas do canal da Barra – Barra da Lagoa – Florianópolis, SC. Dissertação (Mestrado em Geografia), UFSC, Florianópolis, Santa Catarina, 2004.

PORTO FILHO, É. **Sedimentometria e algumas considerações sobre a biogeoquímica dos sedimentos de fundo da Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina.** [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 1993.

POEHLS, D.; SMITH, G. *Encyclopedic Dictionary of Hydrogeology.* Boston: Academic Press/Elsevier, 528 p. 2009.

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

SANTOS, V. **Disposição de efluentes tratados em uma lagoa de evapoinfiltração.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.

SILVA, E.B. & LIBARDI, P.L. Propriedades hidráulicas de um solo não saturado utilizando-se o permeâmetro a disco. **Sci. Agric.**, 57:525-529, 2000

SILVA, J. C. **Análise numérica da influência dos aportes fluviais e antrópicos sobre a hidrodinâmica residual e a qualidade da água da Lagoa da Conceição - Florianópolis-SC.** [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2013

SILVA, V. E. C. **Análise hidrodinâmica e biogeoquímica de uma laguna costeira subtropical em bacia hidrográfica urbanizada: Lagoa Da Conceição, Florianópolis, Santa Catarina.** Tese de doutorado. UFSC, 2022.

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

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

TERZAGHI, K., PECK, R. B. & MESRI, G. **Soil Mechanics in Engineering Practice** 3rd edn (Wiley-Interscience, 1996).

TUONG, T. P. et al. Impact of seawater intrusion control on the environment, land use and household incomes in a coastal area. **Paddy and Water Environment**, v. 1, n. 2, p. 65–73, 1 jul. 2003.

UCHIYAMA, Y. et al. Submarine groundwater discharge into the sea and associated nutrient transport in a Sandy Beach. **Water Resources Research**, v. 36, n. 6, p. 1467–1479, fev. 2000.

WANG, X. et al. Submarine fresh groundwater discharge into Laizhou Bay comparable to the Yellow River flux. **Scientific Reports**, v. 5, p. 1–7, 2015.

WEIGHT, W. D. **Hydrogeology Field Manual.** 2. ed. Montana: McGrawHill, 2008.

WERNER, A. D. et al. Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges. **Advances in Water Resources**, v. 51, p. 3–26, 1 jan. 2013.

ZANATTA, L.C. **Riscos de poluição em lençol freático com infiltração de efluente tratado.** Dissertação (mestrado)- Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. 170p. 2005