UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Geoestatística aplicada no mapeamento tridimensional de valores de
condutividade hidráulica estimados por sonda HPT**

CÉSAR RODRIGUES PETRONI

Dissertação apresentada ao
Programa Geociências Recursos
Minerais e Hidrogeologia para
obtenção do título de Mestre em
Ciências

Área de concentração: Hidrogeologia
e Meio Ambiente

Orientadora: Profa. Dra. Alexandra
Vieira Suhogusoff

São Paulo

2021

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Serviço de Biblioteca e Documentação do IGc/USP

Ficha catalográfica gerada automaticamente com dados fornecidos pelo(a) autor(a) via programa desenvolvido pela Seção Técnica de Informática do ICMC/USP

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de catalogação da publicação: Sonia Regina Yole Guerra - CRB-8/4208 | Anderson de Santana - CRB-8/6658

Petroni, César
Geoestatística aplicada no mapeamento
tridimensional de valores de condutividade
hidráulica estimados por sonda HPT / César Petroni;
orientadora Alexandra Suhogusoff. -- São Paulo,
2021.
98 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação
em Recursos Minerais e Hidrogeologia) -- Instituto
de Geociências, Universidade de São Paulo, 2021.

1. HIDROGEOLOGIA. 2. GEOESTATÍSTICA. 3.
CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO. 4. HPT. I.
Suhogusoff, Alexandra , orient. II. Título.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**"Geoestatística aplicada no mapeamento tridimensional de valores
de condutividade hidráulica estimados por sonda HPT"**

CESAR RODRIGUES PETRONI

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Alexandra Vieira Suhogusoff

Dissertação de Mestrado

Nº 877

COMISSÃO JULGADORA

Dr^a. Alexandra Vieira Suhogusoff

Dr. Marco Aurelio Zequim Pede

Dr. Alexandre Campana Vidal

SÃO PAULO
2021

AGRADECIMENTOS

À Prof^a. Dr^a. Alexandra Vieira Suhogusoff pela disposição em acolher meu projeto e compartilhar seu tempo e conhecimento para a elaboração desta dissertação.

Ao Dr. Luiz Ferrari pelas dicas, revisões, orientações e sugestões valiosas.

Ao Dr. Marco Pede e ao Prof. Dr. Alexandre Vidal por se disponibilizarem a avaliar e qualificar esse trabalho.

A todos os funcionários e professores do IGc que se desdobraram e se arriscaram para que a pandemia da COVID-19 não impedisse a conclusão dessa dissertação, especialmente ao Prof. Dr. Marcelo Monteiro da Rocha, Antonio Tadashi Kikuda e Prof. Dr. Paulo Cesar Boggiani.

Aos geólogos Alexandre Joly, Artur Iro, Gabriel Abilio e demais colegas da Arcadis, onde esse projeto se iniciou e que me ajudaram a transformá-lo em uma dissertação de mestrado.

À minha família pelo incentivo e valorização da educação e da ciência na minha formação, obrigado mãe, pai, Danilo e Marina.

Aos meus amigos e família paulistana, a história é carro alegre! Obrigado Chuco, Raíssa, Ricardo, Pepê, Laurinha, Liló, Viny, Fofo, Mari, Didi e Dija.

A minha companheira Thaís, por lutar e resistir em tempos sombrios, e por me ensinar que sonhar e amar é imperativo, obrigado!

RESUMO

Petroni, C.R., 2021, Geoestatística aplicada no mapeamento tridimensional de valores de condutividade hidráulica estimados por sonda HPT [Dissertação de Mestrado], São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 98 p.

Um dos maiores desafios em investigações de áreas contaminadas é o correto entendimento do arcabouço geológico do aquífero estudado. Dentre as diversas ferramentas disponíveis para auxiliar na caracterização de aquíferos inconsolidados, a geoestatística é indispensável para a compreensão da variabilidade espacial das propriedades hidrogeológicas. Neste trabalho, diferentes métodos de krigagem foram testados para a obtenção de mapas 3D de condutividade hidráulica (K) em um conjunto de amostras coletadas por sonda Hydraulic Profiling Tool (HPT). O conjunto de dados empregados neste trabalho consistiu em uma malha de 40 sondagens HPT realizadas no período entre novembro de 2016 e junho de 2017, em uma porção do Aquífero Boa Viagem, Região Metropolitana de Recife (RMR), com cerca de 21 mil amostras de K. Completam o banco de dados as descrições litológicas de 20 sondagens executadas por direct-push com amostradores macro core. Os valores obtidos de K foram tratados geostatisticamente e interpolados. Os dados de K também foram categorizados para a criação de mapas de probabilidade litológica, pelo uso da krigagem indicadora, avaliando-se a possibilidade da krigagem das descrições geológicas em conjunto com os dados de K obtidos pela sonda HPT. Os resultados avaliados sob o critério da validação cruzada e dos erros de estimativa indicaram que estes métodos de interpolação são adequados para dados de K HPT. Testes realizados com espaçamento da malha de amostragem indicaram que é possível utilizar ferramentas geoestatísticas, como os parâmetros de vizinhança, para planejamento de malhas mais espaçadas no mapeamento com sonda HPT. A krigagem indicadora apresentou mapas de probabilidade correlatos espacialmente aos mapas de K gerados pela krigagem ordinária, demonstrando que a transformação indicadora mantém a estrutura de K do aquífero. O uso das descrições geológicas em conjunto com os dados HPT para a construção de mapas litológicos probabilísticos mostrou-se um método hábil técnica e financeiramente no upscaling do mapeamento HPT.

Palavras-chave: hidrogeologia, geoestatística, condutividade hidráulica do solo, HPT.

ABSTRACT

Petroni, C.R., 2021, Geostatistics applied in the three-dimensional mapping of hydraulic conductivity values estimated by HPT probe [Master's Thesis], São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 98 p.

One of the challenges in contaminated site management is the correct understanding of the studied aquifer geological framework. Among the tools available to assist in the characterization of unconsolidated aquifers, geostatistics is indispensable to understanding the spatial variability of hydrogeological properties. In this work, different kriging methods were tested to obtain 3D maps of hydraulic conductivity (K) in a set of samples collected by a Hydraulic Profiling Tool (HPT) probe. The data set used in this work consisted of a grid of 40 HPT boring logs carried out in the period between November 2016 and June 2017, in a portion of the Boa Viagem Aquifer, Metropolitan Region of Recife (RMR), with about 21 thousand samples of K. The lithological descriptions of 20 boring logs performed by direct-push with macro core samplers complete the database. K values were treated geostatistically and interpolated for the elaboration of 3D maps. Indicator kriging was tested to create lithological probability maps and to evaluate the possibility of geological descriptions kriging along with K HPT data. Results evaluated by cross validation and estimative errors indicated that these interpolation methods are suitable for K HPT data. Tests performed with sampling grid spacing indicated that it is possible to use geostatistical tools, such as neighborhood parameters, for planning sampling grid in HPT mapping. Indicator kriging presented probability maps spatially correlated to K maps generated by ordinary kriging, demonstrating that indicator transformation maintains aquifer's K structure and that it is possible to lithologically map the aquifer from the HPT data. The use of geological descriptions along with HPT data for probabilistic lithological mapping proved to be a technically and financially fitted method in the HPT mapping upscaling.

Keywords: hydrogeology, geostatistics, hydraulic conductivity; HPT

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Uso de Krigagem na Obtenção de Mapas de Condutividade Hidráulica	3
2.2. Caracterização Hidrogeológica por Sondagens Direct-Push	5
3. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA	12
4. ÁREA DE ESTUDO – CARACTERÍSTICAS REGIONAIS.....	13
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	18
5.1. Investigação por Sonda HPT e Sondagens Descritivas	22
5.2. Obtenção de Valores de K.....	26
5.3. Dados Hard e Soft	27
5.4. Análise Geoestatística e Interpolação de Dados.....	28
5.4.1. Krigagem ordinária.....	32
5.4.2. Krigagem indicadora.....	34
5.4.3. Krigagem indicadora com variáveis categóricas descritivas.....	35
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
6.1. Caracterização Local da Área	43
6.2. Histogramas e Análise Exploratória	47
6.3. Variograma Experimental e Validação Cruzada	55
6.3.1. Base de dados <i>soft+hard</i>	55
6.3.2. Base de dados <i>hard</i>	57
6.4. Krigagem Ordinária.....	59
6.5. Análise da Malha de Amostragem.....	64
6.6. Krigagem Indicadora.....	76
6.7. Krigagem Indicadora com Dados de K HPT e Descrições Litológicas de Campo.....	83
7. CONCLUSÕES	92
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelo geral para estimativa de K a partir de Q/Pinj HPT (McCall, 2010).	8
Figura 2. Semivariogramas empíricos de $\ln K$ para dados de <i>flowmeter</i> (pontos em preto) e DPIL (pontos em vermelho), escalonados para as respectivas variâncias globais, com modelos ajustados (linhas descontínuas) (modificado de Bohling <i>et al.</i> , 2012).	9
Figura 3. Mapa geológico da Região Metropolitana do Recife (CPRM, 2003).	14
Figura 4. Mapa Hidrogeológico Simplificado com distinção dos Domínios Aquíferos da RMR (Modificado de Borba <i>et al.</i> , 2010).	17
Figura 5. Malha de amostragem HPT em planta	18
Figura 6. Malha de amostragem - cruces verdes: malha HPT, cruces vermelhas: sondagens descritivas.	19
Figura 7. Fluxograma das etapas desenvolvidas no trabalho.	21
Figura 8. Representação da sonda HPT e os principais elementos que a compõem (traduzido de Geoprobe, 2015).	23
Figura 9. Componentes e cravação do HPT (traduzido de Geoprobe, 2017).	23
Figura 10. Exemplo de relação entre descrição litológica e perfis de dados de condutividade elétrica (linha vermelha), fluxo (linha azul) e pressão de injeção (linha preta), obtidos na sondagem HPT-38.25	
Figura 11. Exemplo de relação entre descrição litológica e perfis de dados de condutividade elétrica (linha vermelha), fluxo (linha azul) e pressão de injeção (linha preta), obtidos na sondagem HPT-14.26	
Figura 12. Propriedades típicas de um variograma com patamar (Yamamoto & Landin, 2013).	30
Figura 13. Modelos de variograma exponencial, gaussiano e esférico (Yamamoto & Landin, 2013). .	31
Figura 14. Amostra do banco de dados com inclusão das amostras categóricas a partir do correlação de profundidades entre as sondagens descritivas e HPT.	36
Figura 15. Histogramas das distribuições de K (m/dia) dos litotipos descritos: (A) Areia fina, (B) Areia siltosa, (C) Areia mal selecionada, (D) Argila, (E) Argila arenosa e (F) Silte.	39
Figura 16. Amostra do banco de dados com a inclusão de amostras categóricas das sondagens descritivas e discretização dos valores de K.	41
Figura 17. Seção geológica esquemática X-X' da área de estudo apresentando intercalações e profundidades das camadas.	45
Figura 18. Seção geológica esquemática Y-Y' da área de estudo apresentando intercalações e profundidades das camadas.	46
Figura 19. Histogramas da variável K. (A) base de dados <i>soft+hard</i> ,. (B) base de dados <i>hard</i>	47
Figura 20. Histogramas da variável K_{log} . (A) base de dados <i>soft+hard</i> , incluindo tanto os dados <i>soft</i> como <i>hard</i> . (B) base de dados <i>hard</i> , que incluem apenas os dados <i>hard</i>	48
Figura 21. Análise exploratória da variável K_{log} no banco <i>soft+hard</i> , para quatro direções no plano horizontal (N0, N45, N90 e N135) e para a normal vertical (D-90).	49
Figura 22. Comparação entre variogramas da variável K_{log} no banco <i>soft+hard</i> para as quatro direções no plano horizontal (N0, N45, N90 e N135).	50
Figura 23. Mapa variograma – plano horizontal (UV), banco <i>soft+hard</i>	51
Figura 24. Análise exploratória da variável K_{log} no banco <i>hard</i> , para quatro direções no plano horizontal (N0, N45, N90 e N135) e para a normal vertical (D-90)	52

Figura 25. Comparação entre variogramas da variável K_{log} no banco <i>hard</i> para as quatro direções no plano horizontal (N0, N45, N90 e N135).....	53
Figura 26. Mapa variograma – plano horizontal (UV), banco <i>hard</i>	54
Figura 27. Variograma experimental de K_{log} para o plano horizontal omnidirecional (N0) e para a normal perpendicular (D-90) - base de dados <i>soft+hard</i>	56
Figura 28. Validação cruzada do modelo da variável K_{log} para a base de dados <i>soft+hard</i> . Pontos em cruz representam valores dentro do intervalo de confiança de 90% e pontos representados em gota valores fora do intervalo de confiança de 90%.	57
Figura 29. Variograma experimental da variável K_{log} para o plano horizontal omnidirecional (N0) e para a normal perpendicular (D-90) - base de dados <i>hard</i>	58
Figura 30. Validação cruzada do modelo da variável K_{log} para a base de dados <i>hard</i> . Pontos em cruz representam valores dentro do intervalo de confiança de 90% e pontos representados em gota valores fora do intervalo de confiança de 90%.	59
Figura 31. Grid utilizado para interpolação dos dados de K para ambos os bancos, <i>soft+hard</i> e <i>hard</i>	60
Figura 32. Interpolação da variável K em diagrama de cerca, considerando a superfície da cota topográfica de -7 m (abaixo do nível do mar) para: (A) banco <i>soft+hard</i> ; e (B) banco <i>hard</i> ; e superfície da cota de 5 m (acima do nível do mar) para (C) banco <i>soft+hard</i> ; e (D) banco <i>hard</i>	62
Figura 33. Resultado da krigagem ordinária da variável K: superfície da cota topográfica de -7 m (abaixo do nível do mar) do (A) banco <i>soft+hard</i> e (B) banco <i>hard</i> ; superfície da cota de 5 m (acima do nível do mar) do (C) banco <i>soft+hard</i> e (D) banco <i>hard</i>	63
Figura 34. Malhas de amostragem testadas: (A) Malha total, (B) Cenário 1, (C) Cenário 2 e (D) Cenário 3.	65
Figura 35. Histograma da variável K para o Cenário 2: (A) banco <i>soft+hard</i> , (B) banco <i>hard</i>	66
Figura 36. Histograma da variável K para o Cenário 3: (A) banco <i>soft+hard</i> , (B) banco <i>hard</i>	66
Figura 37. Variogramas experimentais da variável K apresentado as direções N0 e normal D-90, para o Cenário 2: (A) base <i>soft+hard</i> e (B) base <i>hard</i>	67
Figura 38. Variogramas experimentais da variável K apresentado as direções N0 e normal D-90, para o Cenário 3: (A) base <i>soft+hard</i> e (B) base <i>hard</i>	68
Figura 39. Validação cruzada, rho e erro padronizado, do modelo da variável K para a base de dados <i>soft+hard</i> – Cenário 2. (A) banco <i>soft+hard</i> e (B) banco <i>hard</i> . Pontos em cruz representam valores dentro do intervalo de confiança de 90% e pontos representados em gota valores fora do intervalo de confiança de 90%.	70
Figura 40. Validação cruzada, rho e erro padronizado, do modelo da variável K para a base de dados <i>soft+hard</i> – Cenário 3. (A) banco <i>soft+hard</i> e (B) banco <i>hard</i> . Pontos em cruz representam valores dentro do intervalo de confiança de 90% e pontos representados em gota valores fora do intervalo de confiança de 90%.	70
Figura 41. Comparação entre resultados da krigagem ordinária na cota de 5m da variável K nos três cenários para o banco <i>soft+hard</i> (A) Cenário 1, (B) Cenário 2 e (C) Cenário 3; linha cinza: perímetro de interpolação do Cenário 1.	72
Figura 42. Comparação entre resultados da krigagem ordinária na cota de 5m da variável K nos três cenários para o banco <i>hard</i> (A) Cenário 1, (B) Cenário 2 e (C) Cenário 3; linha cinza: perímetro de interpolação do cenário 1.	73
Figura 43. Mapas de diferenças de estimativas entre as malhas 1 e 2 (A) e 1 e 3 (B) para o banco <i>soft+hard</i> na cota de 5m. Pontos em cruz vermelhos representam sondagens subtraídas da malha 1 e pontos em cruz pretos sondagens utilizadas nas respectivas malhas.	74

Figura 44. Mapas de diferenças de estimativas entre as malhas 1 e 2 (A) e 1 e 3 (B) para o banco <i>hard</i> na cota de 5m. Pontos em cruz vermelhos representam sondagens subtraídas da malha 1 e pontos em cruz pretos sondagens utilizadas nas respectivas malhas.	75
Figura 45. Histogramas das variáveis indicadoras e de K para o banco <i>soft+hard</i> : (A) condutividade hidráulica, (B) indicadora K_{inf} , (C) indicadora K_{int} e (D) e indicadora K_{sup}	76
Figura 46. Análises exploratórias para as três variáveis indicadoras: (A) K_{sup} , (B) K_{inf} e (C) K_{int} , comparadas à análise exploratória da variável aleatória K para o banco <i>soft+hard</i> (D).....	77
Figura 47. Variogramas experimentais das variáveis indicadoras para o plano horizontal omnidirecional (N0) e a normal perpendicular (D-90) da variável K_{inf}	78
Figura 48. Variogramas experimentais das variáveis indicadoras para o plano horizontal omnidirecional (N0) e a normal perpendicular (D-90) da variável K_{int}	79
Figura 49. Variogramas experimentais das variáveis indicadoras para o plano horizontal omnidirecional (N0) e a normal perpendicular (D-90) da variável K_{sup}	79
Figura 50. Resultado da interpolação da variável K em comparação às variáveis indicadoras: (A) interpolação condutividade hidráulica por krigagem ordinária, (B) indicadora K_{inf} , (C) indicadora K_{int} e (D) indicadora K_{sup} . Cota topográfica -7 m (abaixo do nível do mar).	81
Figura 51. Resultado da interpolação da variável K em comparação às variáveis indicadoras: (A) interpolação condutividade hidráulica por krigagem ordinária, (B) indicadora K_{inf} , (C) indicadora K_{int} e (D) indicadora K_{sup} . Cota topográfica 5 m (acima do nível do mar).....	82
Figura 52. Histogramas dos grupos: (A) Areia fina, (B) Areia siltosa e (C) Areia mal selecionada.	83
Figura 53. Análise exploratória para as quatro variáveis indicadoras: (A) Areia fina, (B) Silte e (C) Areia mal selecionada.	84
Figura 54. Variogramas experimentais para o plano horizontal omnidirecional (N0) e a normal perpendicular (D-900) dos grupos: (A) Areia fina, (B) Areia siltosa e (C) Areia mal selecionada.....	86
Figura 55. Resultado da interpolação grupo Areia fina: (A) cota topográfica 20 m, (B) cota topográfica 3 m, (C) cota topográfica -7 m (abaixo do nível do mar).....	87
Figura 56. Resultado da interpolação do grupo Silte: (A) cota topográfica 20 m, (B) cota topográfica 3 m, (C) cota topográfica -7 m (abaixo do nível do mar).....	88
Figura 57. Resultado da interpolação do grupo Areia mal selecionada: (A) cota topográfica 20 m, (B) cota topográfica 3 m, (C) cota topográfica -7 m (abaixo do nível do mar).	89

1. INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios em investigações de áreas contaminadas é o correto entendimento do arcabouço geológico do aquífero estudado. As variações das características hidrogeológicas no espaço resultam frequentemente em ambientes hidroestratigráficos complexos (Koltermann & Gorelick, 1996), enquanto a dificuldade de acesso das técnicas investigativas ao meio dificulta sua caracterização ampla.

Dentre as diversas ferramentas disponíveis para auxiliar na caracterização de aquíferos inconsolidados, a geoestatística é indispensável para a compreensão da variabilidade espacial das propriedades hidrogeológicas. A geoestatística permite estimar espacialmente as propriedades hidráulicas de um aquífero a partir de um conjunto de dados representativo do todo e do conhecimento de sua variabilidade no espaço (Yamamoto & Landin, 2013). Este modelo de correlação espacial é calculado a partir da função variograma e usado para estimar (interpolarm) as variáveis em localizações espaço-temporais onde nenhuma medição está disponível (Varouchakis, 2019).

Através destas estimativas e das análises de incertezas associadas, é possível simular mapas de propriedades hidrogeológicas de um aquífero, viabilizando, por exemplo, a definição de horizontes mais produtivos de aquíferos para exploração, a identificação de zonas de transporte e armazenamento de contaminantes, ou mesmo a construção de modelos conceituais mais robustos empregados na modelagem matemática de fluxo de água subterrânea.

Inúmeras abordagens geoestatísticas propostas já reproduziram com sucesso a heterogeneidade de aquíferos em mapas hidrogeológicos. Entre os diversos métodos utilizados, citam-se como exemplos frequentes a krigagem simples, krigagem ordinária, krigagem indicadora e a cokrigagem (Delhome, 1978; Neumann, 1982; Ahmed & Marsily, 1987; Fabbri, 1997; Patriarche *et al*, 2005; Nowack & Cirpka, 2006).

Neste trabalho, diferentes métodos de krigagem foram testados para a obtenção de mapas 3D de condutividade hidráulica (K) em um conjunto de amostras coletadas por sonda *Hydraulic Profiling Tool* (HPT). K é provavelmente o parâmetro hidrogeológico mais importante, pois rege, junto com outros parâmetros, o fluxo de

fluidos e a migração de contaminantes em subsuperfície, especialmente em solos e aquíferos (Li, 2014).

A sonda HPT pertence a um grupo de métodos hidráulicos desenvolvidos para obtenção de dados hidrogeológicos em aquíferos não consolidados (Butler, 2005; Liu *et al.*, 2012; McCall, 2014; Suthersan *et al.*, 2015), que utiliza injeção ou extração de água e a medição da resposta da pressão induzida (Liu *et al.*, 2012). A HPT destaca-se por constituir um eficiente indicador da condutividade hidráulica da formação e possibilitar a obtenção de grande densidade de amostras de valores de K por meio de uma relação empírica entre vazão e pressão de injeção além de fornecer dados de condutividade elétrica (CE) por sensores dipolos presentes na sonda.

As limitações da HPT estão relacionadas ao possível enviesamento dos dados medidos devido à alteração do substrato causada pela própria operação da sonda, à precisão de estimativas de K e à influência dos limites de ordem de medida do método. Ressalta-se, ainda, que a grande maioria dos estudos publicados sobre a sonda HPT concentram-se em áreas da Europa e dos Estados Unidos (McCall, 2010; Bohling *et al.*, 2012; Vienkens *et al.*, 2012; Rogiers *et al.*, 2014), havendo, portanto, pouco conhecimento a respeito do comportamento dessas ferramentas em solos brasileiros, e do impacto de suas limitações nos resultados. Estas limitações intrínsecas da sonda, que incluem além da precisão e limitação quantitativa, os altos custos de execução e planejamento da malha de amostragem, foram avaliadas durante a geração dos mapas de K à luz do processo geoestatístico.

O conjunto de dados empregados neste trabalho consistiu de uma malha de 40 sondagens HPT realizadas no período entre novembro de 2016 e junho de 2017, em uma porção do Aquífero Boa Viagem, Região Metropolitana de Recife (RMR). Os valores obtidos de K foram tratados geostatisticamente e interpolados, com a elaboração de mapas 3D. Os dados de K também foram categorizados para a criação de mapas de probabilidade litológica, pelo uso da krigagem indicadora, avaliando-se a possibilidade da krigagem das descrições geológicas em conjunto com os dados de K obtidos pela sonda HPT.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Uso de Krigagem na Obtenção de Mapas de Condutividade Hidráulica

O estabelecimento da hidrogeologia como ciência quantitativa data da publicação do experimento de Darcy sobre fluxo de água através de areias em 1856, que resultou na lei empírica hoje conhecida como a Lei de Darcy (Freeze & Cherry, 1979). Esta lei estabelece que a quantidade de água que passa por unidade de tempo (Q , m³/s) e de área (A , m²) pelo meio poroso saturado é proporcional ao gradiente hidráulico (i , sem unidade) e a um fator de proporcionalidade, denominado condutividade hidráulica (K , m/s) (Freeze & Cherry, 1979):

$$Q = KiA \quad (\text{Equação 1})$$

A condutividade hidráulica, por sua vez, pode ser descrita por uma função que relaciona tanto a permeabilidade do meio poroso quanto as propriedades do fluido percolante (Equação 2) (Hubbert, 1956; Freeze & Cherry, 1979):

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} \quad (\text{Equação 2})$$

na qual k é a permeabilidade do meio (m²), g a aceleração da gravidade (m/s²), ρ a densidade (kg/m³) e μ a viscosidade do fluido (kg/m.s).

Desde a década de 1970, diversos estudos procuraram aplicar métodos geoestatísticos na tentativa de obtenção de estimativas de valores de K e propriedades hidrogeológicas correlatas como transmissividade e capacidade de campo (Delhome, 1978; Alemi *et al.*, 1988; Bissel & Aichele, 2004; Patriarche *et al.*, 2005; Idrysy & De Smedt, 2007).

Os primeiros métodos geoestatísticos baseados em modelos de correlação espacial foram desenvolvidos inicialmente na indústria de mineração (Matheron, 1970; Journel & Huijbregts, 1978). Delhome (1978) propôs os métodos geoestatísticos como uma solução viável para a escassez de dados típica dos estudos hidrogeológicos e, doravante, inúmeras abordagens foram testadas na estimativa de dados de propriedades hidráulicas, como as descritas a seguir.

Alemi *et al.* (1988) aplicaram, para um aquífero de 78 km² na região noroeste do Irã, krigagem na estimativa de valores de K e cokrigagem relacionando K e conteúdo de

argila. Valores de condutividade hidráulica e porcentagens de argila foram medidos em 315 locais em uma grade regular com espaçamento de 0,5 km. A condutividade hidráulica foi medida a uma profundidade de aproximadamente 1,2 m usando o método *auger hole* desenvolvido por van Beers (1958). Os resultados indicaram estimativas de variância elevadas devido ao espaçamento da amostragem, ao passo que confirmaram que a krigagem e cokrigagem poderiam ser usadas para estimar K, além de ajudarem a otimizar a malha de amostragem.

Em um relatório sobre a qualidade e a quantidade de recursos hídricos no Condado de Oakland (EUA), Bissel & Aichele (2004) descreveram procedimentos que foram usados para gerar estimativas de condutividade hidráulica vertical efetiva por meio de krigagem ordinária e mapas de probabilidades prevendo a existência de camadas confinantes por meio da krigagem indicadora. Os valores de condutividade hidráulica vertical de cada grupo foram transformados para a base logarítmica, resultando em uma distribuição de dados normal e variogramas mais interpretáveis. A qualidade e a incerteza das previsões foram avaliadas pelo coeficiente de correlação geral rho, obtido por meio da validação cruzada. Os mapas gerados forneceram uma indicação da suscetibilidade à contaminação das águas subterrâneas com base na condutividade hidráulica vertical efetiva prevista e na presença de camadas de argila, em todo o condado.

Patriarche *et al.* (2005) analisaram os métodos de krigagem ordinária, krigagem ordinária combinada com regressão linear, krigagem simples com médias locais variáveis, krigagem com desvio externo e cokrigagem ordinária na interpolação de dados de transmissividade e de K em um grande aquífero do Texas (EUA). Duas abordagens distintas foram utilizadas para a cokrigagem: a) abordagem indireta, usando transmissividade como variável primária; e b) abordagem direta, usando condutividade hidráulica como variável primária. A assertividade dos procedimentos geoestatísticos foram avaliados pela validação cruzada em ambas variáveis log-transformadas e retro-transformadas. Os autores concluíram que os diferentes métodos apresentaram previsões sistematicamente semelhantes, e enfatizaram a importância do uso da validação cruzada para comparar os desempenhos de abordagens alternativas.

Idrissy & De Smedt (2007) testaram três abordagens para estimar K do aquífero Trifa, em Marrocos: (1) krigagem dos valores de K obtidos em testes de

bombeamento; (2) cokrigagem dos dados de teste de bombeamento com dados de resistividade elétrica como variável secundária; e (3) cokrigagem dos dados do teste de bombeamento com a inclinação do lençol freático. A transformação gaussiana dos valores foi utilizada para fornecer variogramas mais robustos e maior correlação com as variáveis secundárias. A comparação das três abordagens foi baseada principalmente nos erros de estimativa e, em menor grau, nas validações cruzadas e considerações gerais, como a confiabilidade das medições e a composição do aquífero. Os autores consideraram que a cokrigagem com a inclinação do lençol freático resultaram nas melhores estimativas, mas que a resistividade elétrica também poderia ser usada como variável secundária para estimar K, especialmente em aquíferos heterogêneos com variações laterais na litologia, como é o caso do aquífero Trifa.

2.2. Caracterização Hidrogeológica por Sondagens Direct-Push

O uso de sondagens por *direct push* (DP) para caracterização hidrogeológica vertical data da década de 1930, com o advento do *Cone Penetration Test* (CPT) (McCall, 2014). O método DP consiste na cravação de um amostrador no solo que avança continuamente utilizando força hidráulica ou mecânica até a profundidade desejada (ASTM, 2007). Já a sonda CPT, ainda muito utilizada nos dias de hoje e em contínuo desenvolvimento, mede a resistência do solo na ponta cônica da sonda à medida que penetra o substrato para determinar um perfil da classe sedimentar ao longo da sondagem, sendo K localmente estimado a partir dessa perfilagem (Liu *et al.*, 2012; Suthersan *et al.*, 2015).

Em 1994, foi introduzida a primeira sonda com sistema de detecção de condutividade elétrica (CE), com o objetivo principal de inferir a litologia com base na condutividade elétrica do material penetrado não consolidado e fornecer informações qualitativas sobre condutividade hidráulica (Christy *et al.*, 1994; McCall, 2014).

Na década de 2000, Pitkin & Rossi apresentaram a primeira sonda com tecnologia de extração de água da formação geológica. A *Waterloo Profile* realiza medição contínua da vazão e pressão da água bombeada da formação durante o avanço em profundidade, fornecendo um indicador de zonas de maior e menor condutividade hidráulica em tempo real (Pitkin & Rossi, 2000; Suthersan *et al.*, 2015). Na mesma

década, outras sondas de perfilagem foram desenvolvidas com a introdução da tecnologia de injeção de água, permitindo a obtenção de K a partir da relação empírica entre pressão e vazão de injeção, como as sondas *Direct-Push Permeameter*, *Direct-Push Injection Logger*, *High Resolution K* e *Hydraulic Profiling Tool*.

As linhas de pesquisa realizadas a partir do uso das tecnologias de injeção/extração procuraram desenvolver o potencial de caracterização rápida de variações de K e evitar limitações dessas ferramentas, como a sensibilidade do equipamento à cravação mecânica, a interferência nas leituras de K devido a alterações no substrato promovidas pelo avanço da sonda/pressão de injeção de água e a precisão da estimativa quanto aos limites de ordem de medida do método.

Butler *et al.* (2007) testaram o potencial da técnica de injeção de água com a ferramenta *Direct-Push Permeameter* (DPP) em dois aquíferos extensivamente estudados nos Estados Unidos e Alemanha. A DPP é uma sonda de pequeno diâmetro com uma seção filtrante curta e um par de transdutores, cravada continuamente no subsolo até uma profundidade na qual uma estimativa de K é desejada. O teste hidráulico é realizado em profundidades pré-determinadas, com a injeção de água através do filtro a uma taxa constante menor que 4 L/min, enquanto as mudanças de pressão são monitoradas pelos transdutores. A condutividade hidráulica é calculada por meio do gradiente induzido pela injeção entre os dois transdutores em uma expressão baseada na Lei de Darcy.

Os autores (Butler *et al.*, 2007) sugeriram que a vazão de injeção durante o avanço da ferramenta deveria ser mantida abaixo de 1 L/min, minimizando assim a vulnerabilidade das estimativas de K devida aos efeitos da alteração do meio geológico provocados pelo avanço da sonda e pela pressão de injeção, além da realização de ao menos dois testes de injeção em cada nível com vazões significativamente diferentes e o ajuste das vazões com base no K esperado em cada intervalo.

Dietrich *et al.* (2008) introduziram o conceito de monitoramento constante de vazão de injeção e resposta de pressão durante o avanço da sonda com a ferramenta *Direct-Push Injection Logger* (DPIL). A principal vantagem da DPIL em relação à DPP, além da capacidade de realizar a perfilagem continuamente enquanto o

equipamento avança no substrato, é sua robustez mecânica, que permite que seja usada com a tecnologia de DP assistida por martelo para alcançar uma profundidade maior e com maior velocidade do que a possível com um avanço somente de impulso, como a cravação contínua necessária para a DPP. No entanto, a informação de K adquirida é qualitativa e estimada indiretamente por meio de regressões com valores de K obtidos com outras técnicas investigativas.

Posteriormente, a sonda *High Resolution K* (HRK) foi desenvolvida a partir da união dos dois conceitos anteriores, DPP e DPIL (Liu *et al.*, 2009). Nesta, as vazões de injeção e respostas de pressão são monitoradas continuamente durante o avanço da sonda (modo DPIL). Ao atingir uma profundidade de teste pré-estabelecida, o avanço cessa e os testes de injeção do DPP são realizados. Os dados do teste DPP são então usados para transformar as informações DPIL em estimativas de K. Dessa maneira, não são necessários ajustes devidos à comparação de dados de K obtidos em diferentes técnicas, já que os dados são coalocados na mesma sondagem.

Testes realizados em uma área de pesquisa na região central dos Estados Unidos indicaram que valores de K estimados pela sonda HRK são consistentes com as estimativas dos testes DPP em intervalos onde K é maior que $8,64 \times 10^{-4}$ m/dia e menor que 59,616 m/dia (Liu *et al.*, 2012). Em zonas mais permeáveis, as vazões de injeção usadas durante o avanço são muito pequenas para produzir respostas de pressão mensuráveis. Já em intervalos de baixo K, o controlador de fluxo não é estável e o medidor não é preciso em vazões de injeção muito baixas (<10 mL/min), necessárias para evitar alterações no substrato devido à pressão de injeção.

A sonda HPT foi concebida pela *Geoprobe Systems* em 2006, aos moldes das sondas DPIL e para operar com taxas de injeção de cerca de 0,3 L/min. Um modelo empírico para estimar K a partir da relação entre vazão (Q) e pressão de injeção (P_{inj}) dos dados HPT foi desenvolvido por McCall (2010) com base em múltiplos trabalhos de campo realizados em diversas localidades da região central dos EUA. Dados pareados de Q/P_{inj} e *slug tests* colocalizados em diferentes aquíferos foram utilizados para estabelecer uma curva de relação com múltiplas locações (**Figura 1**).

Figura 1. Modelo geral para estimativa de K a partir de Q/Pinj HPT (McCall, 2010).

O modelo resultante forneceu estimativas de K correlacionadas aos dados de K obtidos por *slug tests*, dentro de um intervalo da ordem de $8,64 \times 10^{-3}$ e 8,64 m/dia. No limite inferior desse intervalo, fatores como vazão, densidade do solo e cimentação podem resultar em fluxos não lineares e fraturamento. No limite superior, a permeabilidade alta faz com que a pressão de injeção seja relativamente baixa, isto é, igual ou menor que a pressão que a água subterrânea exerce na sonda HPT, o que impossibilita a quantificação da pressão de injeção (McCall, 2011).

Outros estudos procuraram demonstrar a concordância entre estimativas de K obtidas por meio de ferramentas DPIL (K_{dpil}) e estimativas de K por técnicas convencionais. Bohling *et al.* (2012) compararam os resultados de 58 sondagens DPIL e HRK realizadas no site de experimento de macrodispersão (MADE) da Base da Força Aérea de Columbus, Mississippi (EUA). Foram estudados dados de *flowmeters* e testes de bombeamento conhecidos da área, através de distribuições univariadas, semivariogramas e valores interpolados. Os resultados obtidos indicaram que os dados DP e de *flowmeters* apresentavam resultados semelhantes sobre a estrutura geral do aquífero, tanto em termos de distribuição de K em larga escala como de características de autocorrelação (**Figura 2**), apesar de uma

variação de aproximadamente metade a uma ordem de magnitude entre as distribuições de K.

Figura 2. Semivariogramas empíricos de $\ln K$ para dados de *flowmeter* (pontos em preto) e DPIL (pontos em vermelho), escalonados para as respectivas variâncias globais, com modelos ajustados (linhas descontínuas) (modificado de Bohling *et al.*, 2012).

Os autores notaram que valores de K obtidos por DP subestimavam K em zonas altamente permeáveis na porção rasa do aquífero, ao passo que os *flowmeters* superestimavam K nas porções menos permeáveis do aquífero mais profundo. A

comparação com os testes de bombeamento apresentou consistência com os dados DP, fornecendo evidências de que as estimativas DP são de magnitude razoável.

Outro estudo comparativo entre diversas ferramentas de obtenção de K em alta resolução foi realizado por Vienkens *et al.* (2012) em um aquífero heterogêneo e inconsolidado na Alemanha, que incluiu testes de Penetração de Cone com Pressão de Poros e Medições de Condutividade Elétrica (rCPTu, uma modificação da sonda CPT original), DPIL, HPT, *slug tests* e extensas análises de tamanho de grão (K_{Hazen}). Esses testes foram então relacionados aos valores de K absolutos obtidos com *direct-push slug tests* (DPST). As maiores correlações foram observadas com os dados de raio de fricção (R_f) obtidos pela sonda rCPTu. Correlações entre DPST e HPT, DPIL e CE variaram entre -0,42 para a correlação DPST-CE e 0,73 para a correlação DPST-DPIL (**Tabela 1**).

Tabela 1 Estatísticas básicas e correlação entre os dados de DP e DPST relativas ao trabalho de Vienkens *et al.* (2012). Os coeficientes de correlação foram determinados usando $\ln(K_{DPST})$, $\ln(K_{Hazen})$, R_f , CE, $\ln(K_{HPT})$ e $\ln(K_{DPIL})$.

Parâmetro	K_{DPST} (m/S)	K_{HPT} (mL/min/kPa)	K_{DPIL} (L/h/bar)	K_{Hazen} (m/s)	R_f (%)	CE (mS/m)
População Amostral	27	25	24	19	19	18
Média Geométrica	$2,10 \times 10^{-4}$	10,01	7,28	$3,97 \times 10^{-5}$	0,57	7,74
Mínimo	$3,07 \times 10^{-6}$	2,14	0,04	$1,48 \times 10^{-8}$	0,26	3,62
Máximo	$1,67 \times 10^{-3}$	33,95	860,67	$1,54 \times 10^{-3}$	2,28	16,18
Variância (σ^2)	$2,90 \times 10^{-7}$	74,39	$2,90 \times 10^4$	$1,33 \times 10^{-7}$	0,19	19,96
Correlação (R)	-	0,63	0,73	0,81 (ln)	-0,92	-0,42

Os resultados alcançados por Vienkens *et al.* (2012) indicaram que os métodos de obtenção de K por DP são reprodutíveis e que todos os métodos são adequados para refletir a estrutura geral do aquífero. No entanto, heterogeneidades em pequena escala, como a presença de lentes de granulometria variadas e isoladas, não podem ser resolvidas por todos os métodos DP igualmente bem, o que pode introduzir incerteza na comparação dos resultados. Nesse contexto, o HPT é capaz de fornecer a mais alta resolução vertical no mapeamento da distribuição de K. Os autores ainda reforçam que as correlações estabelecidas entre DPST e os dados de

DP são específicas de local para local, devido a fatores condizentes à matriz do solo como tamanho e forma de poros e grãos, porosidade e superfície específica.

Em geral, os métodos de obtenção de K por DP foram considerados ferramentas confiáveis e eficientes para a caracterização da arquitetura sedimentar dos aquíferos (Vienkens *et al.* 2012; Bohling *et al.* 2012), mas não necessariamente precisos nos valores de K estimados, com variações de até uma ordem de grandeza em comparação com K absolutos.

Na tentativa de ampliar a escala de mapeamento de K a partir de ferramentas DP, Flach *et al.* (2005) analisaram dados litológicos de 139 sondagens CPT para prever variações de K em um aquífero na Carolina do Sul (EUA). O método utilizado categoriza em altos, médios e baixos os valores de K obtidos pelo CPT e então realiza um *upscaling* para a escala do modelo de fluxo em estudo. A arquitetura de K do modelo resultante forneceu uma representação realista da heterogeneidade do aquífero, aprimorando consideravelmente o modelo de fluxo e fornecendo previsões adequadas, provadas por monitoramentos subsequentes da contaminação na área de estudo.

Abordagem semelhante foi realizada por Rogiers *et al.* (2014) para testar como dados de ferramentas hidráulicas DP aperfeiçoam, em uma escala regional, o desempenho de um modelo numérico de fluxo de águas subterrâneas. No estudo seis sondagens HPT foram utilizadas em conjunto com 17 sondagens DPIL, 19 sondagens DPST e 265 sondagens CPT. Os dados relativos de K obtidos por meio das ferramentas DPIL e HPT foram calibrados por métodos geoestatísticos com os valores de K absolutos medidos por DPST. Após a calibração, estes foram interpolados utilizando as sondagens CPT como dados secundários, o que permitiu o *upscaling* do modelo hidrogeológico conceitual em 3D. Os resultados evidenciaram o impacto que a heterogeneidade de K, tridimensionalmente mapeada pelos dados DP de alta resolução, impõe sobre o fluxo de água subterrânea e transporte de solutos submetidos à modelagem numérica.

3. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA

O objetivo geral desse estudo consiste no mapeamento tridimensional de condutividades hidráulicas (K) a partir de dados obtidos por HPT para uma porção do Aquífero Boa Viagem, na Região Metropolitana de Recife (RMR).

Especificamente, os objetivos incluíram a elaboração dos mapas por meio dos métodos de krigagem ordinária e indicadora e a análise das limitações do método de amostragem sob a perspectiva geoestatística. Para tanto, foram avaliadas a confiabilidade das interpolações, os efeitos dos limites de quantificação do método, a malha de amostragem e o uso auxiliar de dados de descrição geológica.

A confiabilidade das interpolações foi avaliada por meio da validação cruzada e dos erros de estimativa.

Os efeitos do limite de quantificação da amostragem foram analisados por meio do tratamento dos dados *soft* na krigagem ordinária e da discretização dos dados HPT na krigagem indicadora.

O efeito da densidade da malha de amostragem nas estimativas foi avaliado por meio da comparação de mapas com malhas progressivamente espaçadas.

A krigagem conjunta de dados categóricos de descrição geológica com dados HPT discretizados foi testada como potencial otimização financeira e técnica do mapeamento de aquíferos inconsolidados com auxílio da sonda HPT.

Propõe-se, através dos resultados deste estudo, avaliar-se o potencial deste método de mapeamento como ferramenta auxiliar em estudos relacionados à proteção, exploração e remediação de aquíferos inconsolidados e colaborar com a discussão a respeito de suas limitações.

4. ÁREA DE ESTUDO – CARACTERÍSTICAS REGIONAIS

A área de estudo localiza-se em uma porção do Aquífero Boa Viagem, na Região Metropolitana de Recife (RMR). O clima da RMR é de monção tropical, com temperaturas e umidade relativa do ar elevadas. A temperatura média anual é de 25,5 °C, com média mínima de 21,9 °C e máxima de 29,1° (CPRM, 2003). A precipitação média é de 2.287 mm/ano (INMET, 2019) com a estação de chuvas começando em março e terminando no final de agosto (Rocha & Oliveira, 2003).

O principal rio que corta a região é o Capibaribe, que possui 260 km de comprimento, sendo 33,2 km dentro da RMR. A área total de sua bacia hidrográfica é da ordem de 8.000 km². A maior parte de seu curso é intermitente, tornando-se perene pouco antes de adentrar a RMR. Outros rios importantes na RMR correspondem ao Ipojuca, Botafogo, Pirapama e Jaboatão. Pequenas bacias litorâneas também são formadas pelos rios Igarassu, Paratibe, Beberibe, Tejipió (afluente do Capibaribe), Massangana, Merepe (afluente do Ipojuca) e Sibiró (afluente do Sirinhaém).

Segundo Rocha & Oliveira (2003), a geologia da RMR é caracterizada por rochas do embasamento cristalino proterozóico, como litotipos dos complexos Gnáissico-Migmatítico, Belém do São Francisco e Vertentes, além de granitóides diversos de idades meso e neo-proterozóicas. Os litotipos do embasamento encontram-se aflorantes ou recobertos por sedimentos meso-cenozóicos das bacias sedimentares costeiras Paraíba–Pernambuco e do Cabo, constituídas de intercalações de camadas de ambiente fluvial e marinho como as formações Cabo, Estiva, Beberibe e Gramame (**Figura 3**). A planície costeira de Recife situa-se no limite geográfico entre as duas bacias, separadas pelo Lineamento de Pernambuco.

Sedimentos quaternários estão concentrados principalmente na região costeira do estado, representados por depósitos de terraços marinhos pleistocênicos e holocênicos, sedimentos detríticos flúvio-lagunares quaternários, sedimentos de mangues, depósitos arenosos inconsolidados denominados sedimentos de praia e depósitos aluvionares, que se distribuem ao longo dos principais rios da RMR (Rocha & Oliveira, 2003).

Figura 3. Mapa geológico da Região Metropolitana do Recife (CPRM, 2003).

Segundo Borba *et al.* (2010), os principais aquíferos na RMR são (**Figura 4**):

- **Aquífero Boa Viagem**, nas formas livre e semi-confinada, constituído por um conjunto de depósitos recentes, incluindo aluviões, coluviões, terraços fluviais, terraços marinhos, areias de praia, paleomangues e dunas antigas. Localizado na atual Planície do Recife, região deltaica formada pelos rios Capibaribe, Beberibe e Tejiptó, possui uma espessura média de 50 m (CPRM, 2003). Os sedimentos recentes do Aquífero Boa Viagem ocorrem sobrepostos a outros aquíferos mais antigos, como o Beberibe e o Cabo, ou sobre o embasamento cristalino, na região mais oriental do Recife. Apresenta condutividade hidráulica média de 14,688 m/dia, e poços lá instalados possuem vazões superiores a 20 m³/h (Borba *et al.*, 2010). O sentido de fluxo principal é de oeste para leste; há recarga direta pela chuva e também pela rede pública de abastecimento (CPRM, 2003);
- **Aquífero Barreiras**, nas formas livre e semi-confinada, de constituição arenosa, argilosa ou siltosa e espessura média de 50 m. Tem idade Paleógena/Neógena, sobrepondo-se ao embasamento cristalino e a sedimentos da Bacia Sedimentar Paraíba-Pernambuco (CPRM, 2003). Apresenta condutividade hidráulica média de 2,937 m/dia, e vazões que variam de 3 a 13 m³/h, dependendo da localização do poço instalado (Borba *et al.*, 2010). O sentido de fluxo principal é de oeste para leste, e há recarga direta pela chuva;
- **Aquífero Beberibe**, nas formas livre, confinada e semi-confinada, com uma espessura média de 100 m de arenitos com intercalações de argilitos, é o principal aquífero da RMR. Do Cretáceo Superior, é limitado na base pelo embasamento cristalino e no topo pelas Formações Gramame, Maria Farinha e/ou Grupo Barreiras (CPRM, 2003). Apresenta condutividade hidráulica média de 19,008 m/dia, e os poços apresentam vazões de até 400 m³/h (Borba *et al.*, 2010). Possui fluxo geral de oeste para leste, e a recarga ocorre diretamente pela chuva em áreas de afloramento, pela infiltração descendente do aquífero Boa Viagem na região da Planície do Recife e do

aquífero Barreiras na região norte da RMR, e também pela rede abastecimento público nas zonas urbanas (CPRM, 2003);

- **Aquífero Cabo**, nas formas livre e confinada, compreende conglomerados, arenitos e siltitos de idade Cretáceo inferior, com espessura da ordem de dezenas de metros até 2.900 m. Esse aquífero é aflorante em sua porção meridional e sotaposto ao aquífero Boa Viagem na parte oriental, fazendo contato na base com a Formação Ipojuca (CPRM, 2003). Apresenta condutividade hidráulica média de 0,864 m/dia, e poços com vazões inferiores a 5 m³/h. O sentido de fluxo geral é semelhante ao do Aquífero Beberibe, de oeste para leste, e é recarregado por drenança vertical descendente a partir do Aquífero Boa Viagem (Borba *et al.*, 2010);
- **Aquífero fissural**, na forma livre e fraturada, composto por rochas cristalinas como granitóides e migmatitos do Complexo Gnáissico-Migmatítico, de idade Paleoproterozóica. Poços instalados neste aquífero possuem vazões inferiores a 10 m³/h (Borba *et al.*, 2010), sentido de fluxo principal vertical e profundidade total não delimitada (CPRM, 2003).

Figura 4. Mapa Hidrogeológico Simplificado com distinção dos Domínios Aquíferos da RMR (Modificado de Borba *et al.*, 2010).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

As atividades de campo para realização das sondagens descritivas e HPT ocorreram entre novembro de 2016 e maio de 2017 em uma porção do Aquífero Boa Viagem, Região Metropolitana de Recife (RMR). A malha de amostragem consistiu de 40 sondagens HPT e 20 sondagens executadas por *direct-push* com amostradores *macro core*. Os dados decorrem das descrições litológicas das perfurações e dos gerados pela sonda HPT durante sua cravação (pressão de injeção, vazão e K). Estas atividades fizeram parte de uma investigação de alta resolução conduzida pela empresa de engenharia e consultoria Arcadis Brasil LTDA., que teve o objetivo de avaliar em detalhes os impactos residuais e dissolvidos de contaminantes e a distribuição destes em sua área fonte.

A **Figura 5** apresenta a malha de amostragem HPT e a **Figura 6** apresenta a localização das sondagens descritivas em relação ao mapa de atividades das sondagens HPT.

Figura 5. Malha de amostragem HPT em planta

Figura 6. Malha de amostragem - cruces verdes: malha HPT, cruces vermelhas: sondagens descritivas.

As amostras HPT foram coletadas em uma malha irregular, com distanciamento médio entre as sondagens de 20m e espaçamento vertical entre amostras de 0,015 m.

A primeira etapa, iniciada após a obtenção dos dados de campo, consistiu no tratamento geoestatístico dos dados de K, que, por sua vez, foram calculados por uma relação empírica entre os dados de vazão e pressão. Os dados brutos foram tratados inicialmente pelo *software Direct Image Viewer*, desenvolvido pela fabricante da sonda (Geoprobe Systems®) para a obtenção dos valores de K e exportação do banco de dados. Os dados tratados totalizam cerca de 30 mil amostras de vazão, 30 mil amostras de condutividade elétrica e 30 mil amostras de pressão de injeção até uma profundidade de investigação de 30 m. Associados a testes de dissipação realizados nas sondagens HPT e após o tratamento dos dados de pressão e vazão, foi possível obter cerca de 21 mil amostras de K. Somam-se a este banco 20 sondagens DP com amostradores *macro core* que totalizam cerca de 480 metros de descrição litológica, distribuídos em uma malha irregular de amostragem (**Figura 6**).

Os valores de K foram avaliados pela construção de histogramas, variogramas, análise de anisotropia, do ajuste do variograma experimental e da análise da correlação dos dados por meio da validação cruzada considerando dois cenários distintos: um com o uso de toda base de dados de K, que incluiu tanto os dados medidos dentro do intervalo de detecção da sonda HPT (*i.e.* dados *soft*), quanto os dados estimados acima do limite de detecção da sonda, (*i.e.* dados *hard*), chamado aqui de banco *soft+hard*, e outro com apenas o uso de dados *hard*, chamado de banco *hard*.

Esse tratamento foi utilizado para a elaboração de mapas de K por krigagem ordinária, método comumente utilizado para a obtenção de mapas de teores por meio da interpolação de variáveis regionalizadas, utilizando e comparando os bancos *soft+hard* e *hard*.

O efeito da malha de amostragem no resultado da krigagem ordinária foi avaliado comparando-se os resultados obtidos na malha original com os resultados da validação cruzada e dos mapas de K gerados com malhas de amostragem progressivamente mais espaçadas, em ambos os bancos de dados, *soft+hard* e *hard*.

Posteriormente, os dados de K foram discretizados e tratados por meio do uso da krigagem indicadora, método adequado para conjuntos de dados que apresentam distribuição de frequência com assimetria positiva. Os resultados desse método foram comparados aos resultados da krigagem ordinária.

Por fim, os dados de K foram novamente discretizados por meio da correlação destes com as sondagens descritivas. Esses dados foram então tratados pela krigagem indicadora. A **Figura 7** apresenta as atividades realizadas.

Figura 7. Fluxograma das etapas desenvolvidas no trabalho.

5.1. Investigação por Sonda HPT e Sondagens Descritivas

Tanto as sondagens descritivas quanto as sondagens HPT foram realizadas por equipe especializada contratada e equipamentos de perfuração mecanizados Geoprobe® com capacidade para cravação tipo DP. As sondagens cobriram uma área de aproximadamente 160.000 m², com profundidades médias de 30 m e amostragem/descrição a partir do nível do solo, incluindo dessa maneira, zona vadosa e zona saturada do aquífero.

As descrições geológicas foram levantadas do histórico de atividades realizadas na área pela empresa Arcadis. Ao todo, 20 sondagens realizadas entre os anos de 2012 2017, executadas por *direct-push* com amostradores *macro core* e descritas continuamente, por diferentes geólogos, foram catalogadas e adicionadas ao banco de dados. Com o objetivo de desenvolver uma correlação litológica com as sondagens HPT, 6 sondagens descritivas foram realizadas muito próximas (i.e. colocadas) a sondagens HPT, sendo estas as sondagens HPT-01, 06, 10, 11, 13 e 16.

Já os dados HPT incluem 40 sondagens com profundidades entre 28 e 32 m de profundidade com amostragem contínua. A tecnologia *Hydraulic Profiling Tool* (HPT) é uma ferramenta de perfilagem que mede a pressão necessária para injetar uma vazão de água no solo à medida que a sonda avança em subsuperfície. Com uma capacidade de coleta de 20 pontos de dados para cada 0,30 m sondados, uma única sondagem HPT de 30 m pode gerar até 2.000 dados de vazão e pressão de injeção.

Uma bomba no módulo de fluxo do HPT retira a água do tanque de abastecimento e a impele linha abaixo em direção ao filtro de injeção à uma vazão média de 300 mL/min, definida no Controlador HPT, enquanto a medição da pressão de injeção no sistema HPT é realizada por meio de um transdutor acoplado na parte superior da sonda (**Figura 8**). O uso de um transdutor na sonda permite a medição da pressão de injeção *in situ*, excluindo perdas de fricção através da linha do tubo de fluxo do HPT (Geoprobe 2015). A sonda é cravada no solo por um equipamento de perfuração DP (**Figura 9**).

Figura 8. Representação da sonda HPT e os principais elementos que a compõem (traduzido de Geoprobe, 2015).

Figura 9. Componentes e cravação do HPT (traduzido de Geoprobe, 2017).

A obtenção da condutividade elétrica (CE) é realizada pela indução de uma corrente entre os dipolos elétricos (matrizes CE, **Figura 8**) em contato com o solo, composição conhecida como *Werner Array*, localizada na lateral da sonda, abaixo da porta de injeção. O sistema mede a corrente e tensão elétrica e, a partir desses parâmetros, calcula CE. Partículas menores têm maior contato superficial entre si e por isso transmitem corrente melhor que partículas maiores. Portanto, valores de CE mais elevados são tipicamente representativos de sedimentos de grãos mais finos, tais como siltes e argilas, onde a pressão de injeção tende a ser mais alta, enquanto areias e cascalhos apresentam valores de CE distintamente mais baixos, onde a pressão de injeção tende a ser mais baixa (Geoprobe, 2015).

Os parâmetros de CE, pressão e vazão são registrados a cada 15 mm de avanço da sonda no subsolo e exibidos na tela do computador conectado ao Instrumento de Campo para Aquisição de Dados HPT. Esse registro é um indicador da condutividade hidráulica do solo ou da formação geológica (**Figuras 10 e 11**).

Dessa maneira, o principal uso do HPT é o de fornecer um perfil da condutividade hidráulica pela profundidade da sondagem, o que ajuda a determinar zonas permeáveis, caminhos preferenciais de contaminação e zonas de captação para poços de produção.

Figura 10. Exemplo de relação entre descrição litológica e perfis de dados de condutividade elétrica (linha vermelha), fluxo (linha azul) e pressão de injeção (linha preta), obtidos na sondagem HPT-38.

Figura 11. Exemplo de relação entre descrição litológica e perfis de dados de condutividade elétrica (linha vermelha), fluxo (linha azul) e pressão de injeção (linha preta), obtidos na sondagem HPT-14.

5.2. Obtenção de Valores de K

Conforme a sonda avança abaixo do nível d'água, a pressão hidrostática aumenta, sendo a medida direta da sonda a pressão total (P_{total}) correspondente à soma da pressão hidrostática (P_{hidro}), da pressão atmosférica (P_{atm}) e da pressão de injeção (P_{inj}). Na profundidade desejada, o avanço da sonda é interrompido para a realização de um teste de dissipação de pressão. Nesse teste, o fluxo de injeção é cessado para se observar a dissipação da pressão de injeção no tempo, até a pressão estabilizar. A pressão estabilizada é a $P_{hidro} + P_{atm}$ na profundidade do teste. A pressão de injeção corrigida (P_{inj}), que é a pressão real necessária para injetar água na formação geológica, é definida pela Equação 3 (McCall, 2011).

$$P_{inj} = P_{Total} - (P_{hidro} + P_{atm}) \quad (\text{Equação 3})$$

Por fim, os valores de K da formação geológica são estimados a partir de uma relação empírica entre vazão e a pressão de injeção corrigida, como se observa na Equação 4 (McCall *et al.*, 2014):

$$K = 21,14 \times \ln\left(\frac{Q}{P_{inj}}\right) - 41,7 \quad (\text{Equação 4})$$

na qual Q é a vazão HPT (ml/min) e P_{inj} a pressão de injeção corrigida (Psi).

Essa etapa de obtenção de valores de K foi realizada com o auxílio do *software Direct Image® Viewer*, criado pela Geoprobe Systems® para permitir visualização rápida, comparação, impressão e exportação dos dados HPT (Geoprobe, 2019).

Conforme descrito no **item 2**, a sonda HPT possui um limite de quantificação para solos com um intervalo de K entre 8,64 e $8,64 \times 10^{-3}$ m/dia. Para avaliar o impacto desse limite de detecção nos mapas de K a serem gerados, adotaram-se duas abordagens de tratamento para as amostras do banco de dados: amostras com variabilidade significativa foram tratadas como dados *soft*, e amostras com pouca ou nenhuma variabilidade como dados *hard*.

5.3. Dados Hard e Soft

Considera-se comumente que dados *hard* são valores baseados em medição e observação de fenômenos objetivos, e dados *soft* como dados estatísticos julgados subjetivamente ou vagamente por pessoas ou equipamentos (Du & Zhang, 2010). Por exemplo, na caracterização de aquíferos, além de dados *hard* de poços como valores de K obtidos por teste de bombeamento, outros tipos de dados *soft*, como dados geofísicos, são acessíveis. Dados *soft* normalmente oferecem uma cobertura extensa do campo em estudo, embora com baixa resolução. É necessário condicionar os modelos simulados a todos esses diferentes tipos de dados para melhorar a precisão (Zhang *et al.*, 2008; Lu *et al.*, 2009).

Segundo Serre (2007), dados *soft* podem ser divididos em dois tipos: dados *soft* probabilísticos e dados *soft* de intervalo. O primeiro consiste em dados que podem ser descritos por uma função que especifica os possíveis valores de uma variável

aleatória e suas probabilidades associadas. O segundo tipo integra dados que são intervalos de medidas com limites superiores e inferiores.

Avaliando-se a base de dados utilizada nesse estudo, esta é caracterizada por um intervalo de valores de K entre 0,03048 m/dia e 45,72 m/dia. Todas as amostras com valores de K dentro do intervalo de quantificação do HPT (*i.e.*, maiores que 0,03048 m/dia ou menores que 45,72 m/dia) foram consideradas como medidas exatas, sem variabilidade, e, portanto, dados *hard*.

Já amostras com valores iguais aos limites (*i.e.*, iguais a 0,03048 m/dia ou a 45,72 m/dia) foram consideradas como dados de considerável variabilidade. Devido aos limites de quantificação do equipamento, para qualquer K superior ou inferior aos limites, a sonda HPT atribui valores iguais a 0,03048 m/dia (no extremo inferior) ou 45,72 m/dia (no extremo superior). Em outras palavras, todos os valores de K iguais a 45,72 m/dia representam, além do próprio valor de 45,72 m/dia, todos os possíveis valores superiores a este, ao passo que os valores iguais a 0,03048 m/dia representam, além do próprio valor de 0,03048 m/dia, todos os possíveis valores inferiores a este.

Desta maneira, o banco de dados foi tratado em dois cenários distintos: um cenário com o uso de todos os dados, incluindo dados *hard* e *soft*, chamado aqui de *soft+hard*, e outro cenário com o uso apenas dos dados *hard*, chamado banco *hard*.

5.4. Análise Geoestatística e Interpolação de Dados

O estudo geoestatístico foi desenvolvido por meio do ISATIS, *software* referência em geoestatística que permite análises estatísticas, geomodelagem e mapeamento ambiental (Geovariances, 2021).

A geoestatística tem por objetivo a caracterização espacial de uma variável de interesse por meio do estudo de sua distribuição e variabilidade espaciais (Yamamoto & Landin, 2013). Em outras palavras, a geoestatística oferece uma maneira de descrever a continuidade espacial de fenômenos naturais (Isaaks & Srivastava, 1989).

Por ser impossível analisar todo o conjunto de valores de um fenômeno natural, um estudo geoestatístico é realizado por meio de uma amostragem e a interpolação das amostras, que é o processo de reprodução das características do fenômeno espacial

baseado em pontos amostrais (Yamamoto & Landin, 2013). A interpolação, por sua vez, é feita com auxílio do ajuste de funções matemáticas descritivas do fenômeno natural, ou seja, do modelo de correlação espacial, que é o variograma.

Variograma é uma função descritiva da relação entre valores e distâncias entre amostras que reflete características espaciais do fenômeno em estudo, como orientações preferenciais (Yamamoto & Landin, 2013). Mais especificamente, é definido como a média das diferenças ao quadrado esperada entre variáveis aleatórias separadas por uma distância específica e em uma certa direção, assumindo-se que o variograma depende apenas do vetor de separação h entre os pontos e não da localização deles. Essa suposição, conhecida como estacionariedade de segunda ordem (Journel e Huijbregts, 1978), permite estimar o variograma a partir da seguinte função:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N_h} \sum_h (y_i - y_j)^2 \quad (\text{Equação 5})$$

onde h indica uma distância e direção especificadas. Para cada h , buscam-se todos os pares possíveis de amostras, indicados por N_h , repetindo-se o cálculo para quantos valores de h a amostra suportar.

A função variograma é, portanto, uma função de variância espacial. Os valores tendem a ser mais semelhantes conforme menor a distância e a variância tende a aumentar com a distância entre os valores. Muitas vezes, a variância estabiliza-se em torno de uma variância máxima, denominada patamar (Yamamoto & Landin, 2013), como nos casos dos variogramas utilizados neste trabalho.

Um variograma com patamar (**Figura 12**) é constituído de um patamar (*sill*) e de uma amplitude (*range*), que é a distância na qual a variância atinge o patamar. Geralmente, o patamar é representado por $C_0 + C$ e amplitude por a . C é a variância espacial e C_0 o efeito pepita (*nugget effect*), que pode ser descrito como um salto vertical a partir do valor de variância 0 na origem do variograma em distâncias extremamente pequenas devido a erros de medida e/ou variabilidade da propriedade amostrada (Journel & Huijbregts, 1978).

Figura 12. Propriedades típicas de um variograma com patamar (Yamamoto & Landin, 2013).

Há uma grande variabilidade de modelos de variogramas teóricos com patamar, sendo os mais comuns, e utilizados neste trabalho, os modelos *Esférico*, *Exponencial* e *Gaussiano*, apresentados na **Tabela 2** e na **Figura 13**.

Tabela 2. Modelos teóricos de variograma esférico, exponencial e gaussiano (Yamamoto & Landin, 2013).

Modelo	Equação	
<i>Esférico</i>	$\begin{cases} \gamma(h) = C_0 + C \left[1,5 \frac{h}{a} - 0,5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \text{ para } h < a \\ \gamma(h) = C_0 + C \text{ para } h \geq a \end{cases}$	(Equação 6)
<i>Exponencial</i>	$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right]$	(Equação 7)
<i>Gaussiano</i>	$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{h}{a}\right)^2\right) \right]$	(Equação 8)

Figura 13. Modelos de variograma exponencial, gaussiano e esférico (Yamamoto & Landin, 2013).

Para que o variograma reflita as possíveis características espaciais do fenômeno em estudo, ele deve ser calculado em diversas direções e comparados, processo esse chamado de Análise Exploratória. Essa análise procura avaliar a relação entre os valores e a direção entre as localizações das amostras para um ajuste da função em um modelo teórico chamado variograma experimental (Yamamoto & Landin, 2013).

No caso em que os variogramas são semelhantes em todas as direções, a estrutura espacial é chamada isotrópica (Journel & Huijbregts, 1978), e o variograma omnidirecional. Alternativamente, as variáveis apresentam anisotropia quando em diferentes direções os variogramas apresentam diferentes propriedades. Como resultado, o ajuste do variograma experimental considera a variabilidade estrutural do variograma nas diferentes direções.

A construção de variogramas experimentais a partir de malhas de amostragem irregulares, como é o caso dessa pesquisa, também exige estabelecer parâmetros adicionais de busca de pontos de amostragem, definidos pela direção, tolerância angular e largura máxima da janela de busca, além do passo, definido pela distância média entre as amostras, e o número de passos, definido pela relação do domínio de amostragem e o tamanho do passo.

A partir do conhecimento sobre a continuidade espacial dos valores da variável, dado pelo variograma e das amostras de valor conhecido da proximidade, a

interpolação permite atribuir um valor (e.g. K) a um ponto de valor desconhecido no espaço. Esse procedimento de estimativa, de forma geral, baseia-se na combinação linear de amostras disponíveis, conforme a Equação 9 a seguir (Matheron, 1963):

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (\text{Equação 9})$$

onde λ_i e $z(x_i)$ são, respectivamente, ponderador e valor da amostra i , no local x_i , e $z^*(x_0)$ o valor estimado. Como se espera uma estimativa a mais correta possível, definem-se os valores dos ponderadores λ_i de tal forma que sejam cumpridas duas restrições: (i) o estimador deve prover uma estimativa sem viés global, e; (ii) erro quadrático médio do estimador (variância de erro de estimativa) deve ser mínimo (Matheron, 1963).

Existem diversos métodos de interpolação numérica, porém os métodos geoestatísticos são, em geral, superiores, por fazerem uso da função variograma. A krigagem é um processo geoestatístico de interpolação de variáveis distribuídas no espaço e/ou tempo, com base em valores adjacentes quando considerados interdependentes pela análise variográfica (Yamamoto & Landin, 2013). Esta abrange uma família de algoritmos que podem ser usados diretamente sobre os dados, como a krigagem ordinária, ou sobre os dados transformados, como a krigagem indicadora, que foram os dois métodos utilizados neste estudo.

5.4.1. Krigagem ordinária

O método da krigagem ordinária é uma técnica de estimativa local muito utilizada em avaliação de recursos naturais. Os valores estimados são combinações lineares ponderadas dos valores medidos na vizinhança próxima e os pesos ótimos são calculados sob as condições de não enviezamento e variância de erro mínimo por meio da técnica de multiplicação de Lagrange (Yamamoto & Landin, 2013). Esse processo é descrito pelo sistema de equações da krigagem ordinária em termos da função variograma (Journel & Huijbregts, 1978):

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma(x_i - x_j) + \mu = \gamma(x_0 - x_i) \text{ para } i = 1, n \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \end{cases} \quad (\text{Equação 10})$$

onde μ é o parâmetro de Lagrange. Neste caso, a variância do erro de estimativa em termos da função variograma é dada por (Yamamoto & Landin, 2013):

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_0 - x_i) + \mu \quad (\text{Equação 11})$$

A krigagem ordinária, no entanto, possui um efeito colateral conhecido como efeito de suavização, de tal modo que os valores mais altos são subestimados e os valores mais baixos, superestimados (Yamamoto & Landin, 2013). Diversos métodos de correção dessa suavização já foram propostos, desde a aplicação de algoritmos de pós-processamento a transformações reversas não lineares. Neste estudo, devido ao caráter assimétrico positivo da distribuição de frequência dos dados, o método utilizado foi a transformação lognormal.

A distribuição assimétrica positiva caracteriza-se por uma distribuição com grande quantidade de valores baixos e uns poucos valores altos. Essa transformação é utilizada para solucionar o problema de contaminação dos valores baixos pelos poucos valores altos na estimativa e é obtida extraíndo-se o logaritmo natural do valor da variável original (Yamamoto & Landin, 2013):

$$y = \ln(z) \quad (\text{Equação 12})$$

A krigagem ordinária pode ser utilizada como estimador, substituindo-se a variável de interesse pela variável transformada logarítmica:

$$Y_{KO}^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i y(x_i) \quad (\text{Equação 13})$$

Os resultados obtidos a partir desta estimativa podem ser transformados de volta para a escala original por meio da transformação reversa. Segundo Journel (1980), a fórmula para essa transformação utiliza a função exponencial (inversa da logarítmica) e um termo de não viés, de maneira a evitar incertezas derivadas da estimativa de $Y_{KO}^*(x_0)$:

$$Y_{KOL}^{**}(x_0) = \exp\left(Y_{KO}^*(x_0) + \frac{\sigma_{KO}^2}{2} - \mu\right) \quad (\text{Equação 14})$$

onde o termo de não viés é igual à metade da variância de krigagem menos o multiplicador de Lagrange.

A qualidade essencial da krigagem ordinária é a possibilidade de se avaliar a qualidade da estimativa realizada, ou seja, a dimensão do erro existente (Andriotti, 2002). Neste estudo, foram utilizados como parâmetros principais o erro padrão, também conhecido como raiz do erro quadrático médio (σ), e a validação cruzada. A validação cruzada é o procedimento mediante o qual cada amostra é retirada do conjunto de dados e a krigagem é utilizada para estimar seu valor, assumindo-se que este não é conhecido. A medida da correlação entre os valores da variável estimada pelo modelo geoestatístico e os valores reais medidos em campo é conhecida como rho (ρ). Quanto mais próximo de 1 o valor de rho, mais correlatos os valores.

5.4.2. Krigagem indicadora

A krigagem indicadora trabalha com uma variável indicadora, transformada não-linearmente a partir dos dados originais, adequada para modelos com distribuições que apresentam assimetria positiva (Journel, 1983) por evitar o problema da contaminação pela presença de poucos valores altos na interpolação de regiões com valores baixos.

A ideia básica desse método é discretizar uma distribuição contínua em uma variável binária, por meio do conceito de teores de corte. Dada uma variável aleatória $z(x_i)$, pode-se definir um teor de corte z_c , de tal modo que este esteja no intervalo de amostragem da variável $z(x_i)$, obtendo-se N funções indicadoras e variogramas para N teores de cortes (Yamamoto & Landin, 2013). Neste caso, para um dado valor da variável original $z(x_i)$, localizado em um ponto amostrado x_i , a transformação binomial é feita de acordo com o seguinte critério (Souza & Costa, 2013):

$$I[z(x_i); z_c] = \begin{cases} 1 & \text{se } z(x_i) \leq z_c \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (\text{Equação 15})$$

Segundo Journel (1980), o estimador da krigagem indicadora é descrito como:

$$I_{KO}^*(x_0; z_c) = \sum_{i=1}^n \lambda_i I(x_i; z_c) \quad (\text{Equação 16})$$

onde os valores $I_{KO}^*(x_0; z_c)$ e λ_i são, respectivamente, os valores transformados/binários e os ponderadores associados aos mesmos, resultantes de uma krigagem ordinária ou simples.

Essa técnica resulta em um modelo probabilístico que determina qual teor de corte pode prevalecer em um local específico (Emery & Gonzáles, 2007), ou no caso deste trabalho, qual probabilidade de uma faixa de K, associada a um litotipo, estar presente em determinado local.

A krigagem indicadora, assim como a krigagem ordinária, permite a quantificação da variância do erro de estimativa, obtido pela seguinte relação (Yamamoto *et al.*, 2012):

$$\sigma^2(X_0; zc) = \sum_{i=1}^n \lambda_i [I(x_i; zc) - I_{KO}^*(X_0; zc)]^2 \quad (\text{Equação 17})$$

A krigagem indicadora foi testada neste trabalho como alternativa de tratamento dos dados HPT que incluía os dados *soft*, em comparação com os resultados da krigagem ordinária para o banco *soft+hard*.

Para a discretização do banco de dados em variáveis indicadoras, dividiram-se os valores de K em três categorias: valores inferiores a 8,64 m/dia foram considerados como uma faixa de K inferior (K_{inf}), valores entre 8,64 e 34,56 m/dia como uma faixa de K intermediário (K_{int}) e valores superiores a 34,56 m/dia como uma faixa de K superior (K_{sup}). Estabeleceu-se então três variáveis indicadoras, K_{inf} , K_{int} e K_{sup} .

Essas faixas foram determinadas tendo por base os intervalos de condutividade hidráulica de materiais geológicos definidos por Freeze & Cherry (1979), sendo K_{inf} estabelecido em uma faixa de K típica de sedimentos silto-arenosos a siltosos, K_{int} uma faixa silto-arenosa a arenosa e K_{sup} uma faixa arenosa.

Assim como no caso da krigagem ordinária, o erro padrão e a validação cruzada foram utilizados como indicativos da qualidade dos ajustes.

5.4.3. Krigagem indicadora com variáveis categóricas descritivas

Alternativamente, a krigagem indicadora também foi utilizada para interpolar os dados de descrições litológicas em conjunto aos dados de K HPT.

Como os perfis das sondagens foram descritos por diferentes geólogos, optou-se por realizar um agrupamento das descrições litológicas para homogeneização do banco. Um total de 18 descrições diferentes foram agrupadas em 6 grupos litológicos: areia siltosa, areia mal selecionada, areia fina, silte, argila arenosa e argila. A **Figura 14** apresenta uma amostra do banco de dados com a inclusão das amostras categóricas em um caso em que a sondagem descritiva foi realizada logo ao lado da sondagem HPT (i.e. coalocada). Nos casos em que a sondagem descritiva não foi coalocada ao HPT, as amostras categóricas foram inseridas no banco sem correlação com valores de K.

Figura 14. Amostra do banco de dados com inclusão das amostras categóricas a partir do correlação de profundidades entre as sondagens descritivas e HPT.

Para permitir que as sondagens HPT também fossem utilizadas nessa krigagem indicadora, utilizou-se a correlação entre K HPT e descrições litológicas em sondagens coalocadas para calcular a média geométrica de K das unidades descritas. A partir da média e do desvio padrão de cada litotipo, calculou-se um intervalo de confiança de 95% a partir do erro padrão, seguindo a seguinte fórmula (Morettin & Bussab. 2002):

$$CI = \tilde{x} \pm 1,96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (\text{Equação 18})$$

onde CI é o intervalo de confiança, $\tilde{x}$ a média da amostragem, σ o desvio padrão da amostragem e n o número de amostras. A **Tabela 3** apresenta uma relação das descrições agrupadas, o número de amostras adicionadas ao banco de dados, valores de K médios e intervalos de confiança de cada unidade. A **Figura 15** apresenta o histograma com as distribuições de K para cada um dos litotipos descritos.

Tabela 3. Relação das descrições agrupadas, número de amostras adicionadas ao banco de dados, valores de K médios e intervalos de confiança.

<i>Grupo</i>	<i>Litologias descritas</i>	<i>Total de intervalos descritos</i>	<i>Total de intervalos por grupo</i>	<i>Total de amostras categóricas</i>	<i>K (m/dia) média geométrica</i>	<i>Intervalo de confiança 95% (m/dia)</i>
Areia siltosa	Areia média	9	114	1677	0,8493	-0,257 - 1,955
	Areia siltosa	49				
	Areia argilosa	51				
	Areia com pouco silte	2				
	Areia com pouca argila	1				
	Areia com cascalho	2				
Areia fina	Areia fina	15	15	2208	6,7964	5,596 - 7,995
Areia mal selecionada	Areia mal selecionada	14	42	8809	0,0305	0,0300 - 0,0310
	Areia mal selecionada com pouco silte	18				
	Areia mal selecionada com cascalho	3				
	Areia mal selecionada com pouca argila	7				
Silte	Silte	1	64	2962	2,2077	1,265 - 3,1500
	Silte arenoso	41				
	Silte argiloso	22				
Argila arenosa	Argila arenosa	62	62	374	0,1786	-1,724 - 2,081
Argila	Argila	45	69	2773	0,3949	-0,333 - 1,122
	Argila siltosa	23				
	Argila com cascalho	1

Figura 15. Histogramas das distribuições de K (m/dia) dos litotipos descritos: (A) Areia fina, (B) Areia siltosa, (C) Areia mal selecionada, (D) Argila, (E) Argila arenosa e (F) Silte.

A partir da margem de confiança, todas as amostras de K HPT com valores compatíveis a algum grupo litotipo foram discretizadas e somadas ao banco de amostras categóricas. As amostras foram descartadas em casos em que os grupos apresentaram parâmetros incongruentes, como: erros padrões de ordem semelhantes as médias de K; intervalos de K sobrepostos; valores de K negativos e/ou em desacordo com o K típico esperado para determinada litologia.

Dentre os seis grupos litológicos, três apresentaram um intervalo de confiança com valores negativos no limite inferior (Argila arenosa, Areia siltosa e Argila), resultado de um erro padrão muito elevado em comparação com a média calculada (**Tabela 3**). Além disso, dentre esses três grupos, apenas "Areia siltosa" apresentou um valor de K, nos limites superiores, compatível com o material deposicional correspondente. Os demais grupos, "Argila arenosa" e "Argila", apresentaram valores de K nos limites superiores do intervalo muito divergentes do esperado para argilas em geral, abrangendo valores de K típicos de silte e areia.

Como discutido no **capítulo 2**, parâmetros elevados de densidade do solo e grau de cimentação, típicos de argilas em geral, em conjunto com a pressão de injeção exercida pelo teste HPT, podem gerar condições de fluxo não laminar e fraturamento, enviesando os resultados de K obtidos pela sonda HPT. Os elevados valores de K observados nos intervalos de confiança dos grupos "Argila arenosa" e "Argila" sugerem o distúrbio causado pela operação da sonda nesses materiais.

Entre os demais grupos, "Areia fina", "Silte" e "Areia mal selecionada" apresentaram os intervalos de confiança de K mais bem definidos e compatíveis com o esperado para os respectivos materiais. "Areia fina" e "Areia siltosa" apresentaram um intervalo de confiança de K bem definido dentro da faixa típica de depósitos inconsolidados arenosos a areno-siltosos (Freeze & Cherry, 1979).

O grupo "Areia mal selecionada" apresentou um intervalo de confiança de K bem definido, porém mais típico de materiais siltosos e argilosos. Essa discrepância entre a descrição de campo e os valores de K observados pode ser explicada pela dificuldade em se descrever precisamente materiais deposicionais desta natureza sem o auxílio de análises laboratoriais granulométricas.

Por fim, os grupos "Areia fina", "Silte" e "Areia mal selecionada" foram testados para a interpolação das variáveis categóricas correlacionadas aos dados HPT, ao passo que os grupos "Argila", "Argila arenosa" e "Areia siltosa" foram descartados pela inconsistência dos valores de K.

A **Figura 16** apresenta o resultado desse processo em uma amostra do banco de dados total, onde a sondagem WCSS-47 é um exemplo de amostra não colocada com HPT, e, portanto, sem valor de K associado, e a sondagem HPT-12 um exemplo de discretização dos valores de K HPT em amostra categórica a partir dos intervalos de confiança.

ID	Coordenada X	Coordenada Y	Coordenada Z	K HPT (m/dia)	Amostra categórica
WCSS-47	282368,337	9106778,317	19,33	n/a	Silte
WCSS-47	282368,337	9106778,317	17,83	n/a	Areia mal selecionada
WCSS-47	282368,337	9106778,317	13,33	n/a	Argila arenosa
WCSS-48	282397,084	9106768,733	22,25	n/a	Silte
WCSS-48	282397,084	9106768,733	18,05	n/a	Areia siltosa
WCSS-48	282397,084	9106768,733	17,25	n/a	Areia mal selecionada
WCSS-48	282397,084	9106768,733	12,25	n/a	Argila arenosa
WCSS-48	282397,084	9106768,733	11,85	n/a	Areia siltosa
WCSS-48	282397,084	9106768,733	11,55	n/a	Argila arenosa
WCSS-48	282397,084	9106768,733	10,75	n/a	Argila
HPT-12	282308,993	9106786,149	13,74	7,010399818	Areia Fina
HPT-12	282308,993	9106786,149	13,72	2,865119934	Silte
HPT-12	282308,993	9106786,149	13,71	7,924799919	Areia Fina
HPT-12	282308,993	9106786,149	13,69	9,144000053	n/a
HPT-12	282308,993	9106786,149	13,68	9,448800087	n/a
HPT-12	282308,993	9106786,149	13,66	9,448800087	n/a
HPT-12	282308,993	9106786,149	13,65	9,753600121	n/a
HPT-12	282308,993	9106786,149	13,63	7,619999886	Areia Fina
HPT-12	282308,993	9106786,149	13,62	2,194560051	Silte
HPT-12	282308,993	9106786,149	13,60	1,798320055	Silte

Figura 16. Amostra do banco de dados com a inclusão de amostras categóricas das sondagens descritivas e discretização dos valores de K.

Esse método permitiu ampliar a densidade horizontal da malha de amostragem com a inclusão das sondagens descritivas, que são mais acessíveis técnica e financeiramente em comparação às sondagens HPT. No entanto, esse processo também reduz a densidade vertical da amostragem devido à exclusão das amostras HPT que não se encaixam no intervalo de confiança de nenhum dos litotipos

definidos. Mapas probabilísticos de cada unidade litológica foram criados seguindo o método de krigagem indicadora descrito no item anterior para avaliação desse método.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Caracterização Local da Área

A geologia local é composta por um solo mais superficial de areia fina a média, espessura de cerca de 3 m, sotaposto a uma camada silto-argilosa, de cerca de 1 m de espessura. Abaixo dessas, há uma intercalação complexa de camadas de areia e argila, de 5 a 10 m de espessura, com presença de lentes descontínuas de espessuras e teores variados de argila, silte e areia (**Figuras 17 e 18**). Um perfil geológico típico da área pode ser observado na **Tabela 4**.

O aquífero predominante na área de estudo é o Aquífero Boa Viagem, com espessura local superior a 30 m, sendo esta a maior profundidade atingida pelas sondagens locais. Localmente, esse aquífero apresenta-se na forma livre, constituído por um conjunto de depósitos recentes e foi dividido entre aquíferos raso e intermediário, de acordo com a profundidade e litologia observada, conforme apresentado na **Tabela 4**.

Tabela 4. Descrição litológica e hidrogeológica ao longo da profundidade, representativa para a área de estudo

Profundidade (metros abaixo do solo)	Camada Geológica	Litologia/Observações	Hidrogeologia (Aqüífero Boa Viagem)
0 a 3 m	<i>Areia fina a média</i>	<i>Camada observada em todas as sondagens.</i>	<i>Zona Vadosa</i>
3 a 8 m	<i>Silte arenoso a areia fina a média</i>	<i>Geralmente friável, com grânulos angulares a subangulares, grãos de quartzo e feldspato.</i> <i>Observado em todo site.</i>	<i>Zona Vadosa (Zona Saturada na estação chuvosa)</i> <i>Nível raso</i>
8 a 18 m	<i>Argila</i>	<i>Argila arenosa a argila com lentes de areia argilosa.</i> <i>Localmente com lentes de areia fina a média.</i> <i>Espessura entre 4 e 10 m de espessura.</i> <i>Camada muito dura e compacta em alguns lugares (incluindo local próximo à zona de origem).</i>	<i>Nível d'água entre 9 e 11 m abaixo do nível do solo.</i> <i>Localmente seca em algumas sondagens.</i> <i>Camada de baixa K intercalada com lentes de alto K.</i> <i>Nível raso.</i>
16 a 22 m	<i>Areia</i>	<i>Areia fina a média compacta (levemente argilosa) com lentes argilosas em algumas sondagens.</i> <i>Ocasionalmente siltoso.</i> <i>Varia em espessura (de 4 a 6 m).</i> <i>Contém intercalações argilosas.</i>	<i>A camada de areia não é contínua, pode ser substituída por intercalações de argila e areia argilosa, causando alterações no gradiente hidráulico.</i> <i>Aqüífero intermediário.</i>
22 a 28 m	<i>Argila</i>	<i>Compacta, dura, menos espessa que a primeira camada.</i> <i>Espessura variada, descontínua ao longo do site.</i> <i>Mais homogêneo que a primeira camada de argila, mas localmente pode ter lentes de areia.</i>	<i>Aqüífero intermediário.</i>
27 a 32 m	<i>Areia</i>	<i>Areia fina a grossa.</i> <i>Maior % de areia média a grossa e areia mal selecionada.</i> <i>Grãos angulares e sub-retangulares de feldspato.</i> <i>Grânulos de quartzo até 4 cm.</i>	<i>Base do aqüífero.</i> <i>Pouca informação devido a dificuldade de sondagem.</i>
Topo Rochoso (a 35 m)	<i>Rocha sã</i>	<i>Gnaisses e migmatitos</i>	<i>Aqüífero fraturado.</i>

Figura 17. Seção geológica esquemática X-X' da área de estudo apresentando intercalações e profundidades das camadas.

Figura 18. Seção geológica esquemática Y-Y' da área de estudo apresentando intercalações e profundidades das camadas.

6.2. Histogramas e Análise Exploratória

Conforme descrito no **item 5.3**, o banco de dados foi tratado em dois cenários distintos: um cenário com o uso de todos os dados, incluindo dados *hard* e *soft*, chamado aqui de *soft+hard*, e outro cenário com o uso apenas dos dados *hard*, chamado banco *hard*.

Os dados *soft* correspondem a cerca de 80% do total de amostras do banco *soft+hard* (17.763 das 21.700 amostras totais), o que se reflete no histograma como uma alta frequência de valores de K nos extremos mínimo e máximo de limitação do método (**Figura 19A**).

Por desconsiderar as amostras *soft*, o banco *hard* apresenta uma quantidade de dados bastante inferior, com 3.937 dados (**Figura 19B**), e valores de K que variam de 0,033528 m/dia a 42,672 m/dia.

Os histogramas dos dois bancos apresentam média e desvio padrão bastante distintos, e distribuição de frequência com assimetria positiva que pode ser melhor observada no histograma do banco *hard*.

Figura 19. Histogramas da variável K. (A) base de dados *soft+hard*,. (B) base de dados *hard*.

Distribuições com assimetria positiva são definidas por uma curva onde a média da distribuição é maior que a mediana, ou seja, os dados apresentam uma frequência predominante abaixo da média. Este tipo de distribuição implica na necessidade de transformação dos dados para se evitar a contaminação na estimativa devido à

influência dos poucos valores altos em uma vizinhança com valores predominantemente baixos (Yamamoto & Landin, 2013). Optou-se, neste caso, pela transformação logarítmica, que é obtida extraíndo-se o logaritmo natural do valor variável original. A **Figura 20** apresenta os histogramas dos bancos *soft+hard* e *hard* após a transformação logarítmica:

Figura 20. Histogramas da variável K_{log} . (A) base de dados *soft+hard*, incluindo tanto os dados *soft* como *hard*. (B) base de dados *hard*, que incluem apenas os dados *hard*.

Para a avaliação de anisotropia dos dados, utilizando-se o banco *soft+hard*, foi realizada uma análise exploratória incluindo quatro direções no plano horizontal (N0, N45, N90 e N135) além da normal vertical (D-90).

Na construção dos variogramas nas direções N0, N45, N90 e N135 (**Figura 21**), foi utilizado um passo de 13 m, de acordo com a distância média entre as sondagens, e um número de passos de 7, com exceção da direção N135. Devido à distribuição aleatória da amostragem HPT, observa-se no eixo N135/N315 da malha uma densidade menor de amostras (**Figura 5**), fator este que resulta em um número inferior de pares de amostras na construção do variograma. Para melhor estruturação do variograma na direção N135, optou-se por utilizar passo de 2 m e número de passos de 20. Para a direção vertical (D-90), onde a densidade de amostras é muito superior, foi utilizado um passo de 0,04 m com um número de passos de 600 (**Figura 21**).

A comparação entre os variogramas experimentais para as quatro direções horizontais (**Figura 22**) indica que não há significativa diferença de amplitude e patamar entre as direções horizontais, considerando-se que a direção N135 apresenta números de pares inferiores na ordem de 10 a 100 vezes em relação às demais. Na **Tabela 5**, pode-se observar uma amplitude de 30 m em todas as direções e uma diferença de patamar de apenas 0.07 $[\log(\text{m/dia})]^2$ entre os pares de direção N0/N90 e N45/N135.

O mesmo pode ser observado no mapa variograma para o plano horizontal (UV) da **Figura 23**. Nesse plano, não se observam diferenças significativas na variância em nenhuma direção, apesar do maior número de pares observados no eixo N50/N230.

Figura 21. Análise exploratória da variável $K_{\log}$ no banco *soft+hard*, para quatro direções no plano horizontal (N0, N45, N90 e N135) e para a normal vertical (D-90).

Figura 22. Comparação entre variogramas da variável K_{log} no banco *soft+hard* para as quatro direções no plano horizontal (N0, N45, N90 e N135).

Tabela 5. Comparação entre propriedades do variograma da variável K_{log} no banco *soft+hard* para as quatro direções no plano horizontal (N0, N45, N90 e N135).

<i>Direção</i>	<i>Efeito Pepita (m)</i>	<i>Amplitude (m)</i>	<i>Patamar [log(m/dia)]²</i>
N0	1	30	0,88
N45	1	30	0,95
N90	1	30	0,88
N135	1	30	0,95

Figura 23. Mapa variograma – plano horizontal (UV), banco *soft+hard*.

Já a direção D-90 apresenta um patamar bem mais elevado e amplitude menor em relação às demais direções, como observado na **Figura 21**. Esta constatação é compatível à geologia da área, que é constituída de um depósito sedimentar costeiro, e onde se nota uma continuidade lateral das camadas (plano horizontal) e uma variação mais frequente de litologia na vertical, em direção ao fundo da bacia.

Apesar de não se esperarem comportamentos diferentes em termos de isotropia entre os dois bancos uma vez tratem-se do mesmo ambiente geológico, realizou-se o mesmo procedimento de análise exploratória para o banco *hard* de maneira a estabelecer uma correlação geoestatística.

Na construção dos variogramas do banco *hard* no plano horizontal (**Figura 24**), foi utilizado passo de 13 m e número de passos de 7, exceto para a direção N135, para

a qual optou-se por utilizar passo de 10 m e número de passos de 10. Para a direção vertical foi utilizado um passo de 0,02 m com um número de passos de 900 (**Figura 24**).

Assim como observado no banco *soft+hard*, os variogramas experimentais para as quatro direções horizontais mostrados na **Figura 25** não apresentam significativa diferença de amplitude e patamar entre si. Na **Tabela 6**, nota-se que as quatro direções apresentam o mesmo patamar e uma diferença de amplitude de 10 m entre os pares de direção N0/N90 e N45/N135. O mapa variograma para o plano horizontal (UV) do banco *hard* também indica não haver diferenças significativas na variância em nenhuma direção (**Figura 26**).

Figura 24. Análise exploratória da variável K_{log} no banco *hard*, para quatro direções no plano horizontal (N0, N45, N90 e N135) e para a normal vertical (D-90)

Figura 25. Comparação entre variogramas da variável K_{log} no banco *hard* para as quatro direções no plano horizontal (N0, N45, N90 e N135).

Tabela 6. Comparação entre propriedades do variograma da variável K_{log} no banco *hard* para as quatro direções no plano horizontal (N0, N45, N90 e N135).

Direção	Efeito Pepita (m)	Amplitude (m)	Patamar $[\log(m/dia)]^2$
N0	0,131	30	0,98
N45	0,131	30	0,98
N90	0,131	30	0,98
N135	0,131	30	0,98

Figura 26. Mapa variograma – plano horizontal (UV), banco *hard*

Com base nos resultados da análise exploratória considera-se que não há variações significativas entre as propriedades dos variogramas em diferentes direções do plano horizontal. No entanto, entende-se que há significativa variação de amplitude e patamar entre a direção vertical frente às direções horizontais. Assim, para as próximas etapas que envolvem a interpolação desses dados, ajustou-se um variograma experimental omnidirecional no plano horizontal, identificado como N0, com anisotropia no plano perpendicular vertical, identificado como D-90.

6.3. Variograma Experimental e Validação Cruzada

6.3.1. Base de dados *soft+hard*

Para o ajuste do modelo teórico do variograma experimental da base de dados *soft+hard* (**Figura 27**), foram utilizados três estruturas esféricas mais um efeito pepita de 0,002. A estrutura 1 possui uma amplitude de 2 m e patamar de 6 $[\log(\text{m/dia})]^2$, a estrutura 2 amplitude de 20 m e patamar de 5 $[\log(\text{m/dia})]^2$ e a estrutura 3 amplitude de 17 m e patamar de 7 $[\log(\text{m/dia})]^2$.

Mais de uma estrutura foi utilizada no ajuste do variograma devido à anisotropia vertical e ao modelo esférico observado nos dados. Variogramas que atingem o patamar exponencialmente tendem a se ajustar com apenas uma estrutura, ao passo que modelos esféricos e gaussianos têm estruturas diferentes entre o ponto zero e o patamar (além de um possível efeito pepita, também considerado uma estrutura). Já a anisotropia também exige diferentes estruturas para se estabelecerem diferentes patamares e amplitudes.

A partir desse modelo, os valores de vizinhança definidos para a interpolação foram de 20 m para as direções U e V (direções planares, X e Y) e 30 m para a direção W (horizontal, Z), com quatro setores angulares, número mínimo de duas amostras por setor e ótimo de oito.

Figura 27. Variograma experimental de K_{log} para o plano horizontal omnidirecional (N0) e para a normal perpendicular (D-90) - base de dados *soft+hard*.

A validação cruzada indicou um rho de 0,988, com erro padronizado de -0,01065 (**Figura 28**), o que atesta a qualidade do modelo geoestatístico empregado.

Figura 28. Validação cruzada do modelo da variável K_{log} para a base de dados *sof+hardt*. Pontos em cruz representam valores dentro do intervalo de confiança de 90% e pontos representados em gota valores fora do intervalo de confiança de 90%.

6.3.2. Base de dados *hard*

Para a base de dados *hard*, no ajuste do variograma (**Figura 29**), foram utilizados três estruturas esféricas mais um efeito pepita de 0,135. A estrutura 1 possui uma amplitude de 2,51 m e patamar de 0, $[\log(m/dia)]^2$, a estrutura 2 amplitude de 3,85 m e patamar de 0,4 $[\log(m/dia)]^2$ e a estrutura 3 amplitude de 7 m e patamar de 0,05

$[\log(m/dia)]^2$. A partir desse modelo, os valores de vizinhança estabelecidos para a interpolação foram os mesmos da base *soft+hard*, ou seja, 20 m para as direções U e V e 30 m para a direção W, porém, nesse caso, com quatro setores angulares, número mínimo de uma amostra por setor e ótimo de dois. Optou-se por um número menor de amostras mínima e ótima devido ao caráter reduzido de amostras desse banco em relação ao banco *soft+hard*, o que também refletiu em uma validação cruzada mais robusta, apresentada a seguir.

Figura 29. Variograma experimental da variável K_{log} para o plano horizontal omnidirecional (N0) e para a normal perpendicular (D-90) - base de dados *hard*.

A validação cruzada indicou um rho de 0,786, com erro padronizado de -0,06173 (**Figura 30**). Comparado ao resultado da validação cruzada do banco *soft+hard*, observa-se que o erro é superior e o rho inferior para o banco *hard*, no entanto, ainda robusto e confiável para a interpolação dos dados.

Figura 30. Validação cruzada do modelo da variável $K_{\log}$ para a base de dados *hard*. Pontos em cruz representam valores dentro do intervalo de confiança de 90% e pontos representados em gota valores fora do intervalo de confiança de 90%.

6.4. Krigagem Ordinária

Para a realização da estimativa de K , foi utilizada a krigagem ordinária sob a transformada logarítmica dos dados de K ($K_{\log}$) para ambos os bancos *soft+hard* e *hard*. A **Figura 31** apresenta o *grid* estabelecido para essa interpolação. Como observado no **item 6.1**, a média da distância entre amostras no plano horizontal é de 20 m. Porém, devido ao caráter aleatório da amostragem, algumas das sondagens encontram-se a distâncias superiores a 20 m das demais, amplitude estabelecida no

modelo e que indica a partir de onde as amostras entram no campo da aleatoriedade. Dessa maneira, ao se estabelecer o *grid* para a interpolação das amostras, optou-se por excluir as amostras que se encontravam a distâncias superiores a 20 m das demais (sondagens HPT-45, HPT-46 e HPT-49).

Figura 31. Grid utilizado para interpolação dos dados de K para ambos os bancos, *soft+hard* e *hard*.

A krigagem ordinária foi realizada partir dos variogramas modelados para a variável K_{log} , dos parâmetros de vizinhança verificados pela validação cruzada e do *grid* definido para o modelo. A **Tabela 7** apresenta um comparativo desses parâmetros para os dois bancos de dados.

Tabela 7. Parâmetros estabelecidos para a interpolação dos dados de K.

Base de dados		Soft+Hard	Hard
Variograma Modelado	Efeito pepita	0,002	0,135
	Estrutura 1	Amplitude (m)	2,51
		Patamar $[\log(m/dia)]^2$	0,5
	Estrutura 2	Amplitude (m)	3,85
		Patamar $[\log(m/dia)]^2$	0,4
	Estrutura 3	Amplitude (m)	7
		Patamar $[\log(m/dia)]^2$	0,05
Vizinhança	U (m)	20	20
	V (m)	20	20
	W (m)	30	30
	Setores Angulares	4	4
	Nº mínimo de amostras	2	1
	Nº ótimo de amostras	8	2
Validação Cruzada	rho	0,988	0,786
	Erro padronizado	-0,01065	-0,06173

Os resultados da interpolação são apresentados nas **Figuras 32 e 33**, nas quais se observam zonas de maiores e menores valores de K estimados em ambas as bases de dados analisadas, nas cotas topográficas de -7 m (abaixo do nível do mar), que representa a base do aquífero intermediário e 5 m (acima do nível do mar), que representa a base do aquífero raso.

O uso dos dados *soft* implica em uma escala de K maior nos resultados da base *soft+hard* comparado à base *hard* (**Figuras 32 e 33**), o que não reflete, no entanto, em discrepância relativa entre as zonas de maiores e menores condutividades hidráulicas entre as duas bases. É necessário considerar também que a imprecisão dos dados *soft* produz enviesamento nos valores de K observados no mapa, ao passo que as interpolações do banco *hard* tendem a apresentar maior precisão ao custo de uma densidade amostral bastante inferior.

Nota-se também que a base *hard* possui uma área não interpolada (área em cor preta identificada nos mapas como n/a) maior que a base *soft+hard*, devido à quantidade de amostras significativamente inferior, apesar do uso de uma vizinhança igual nas duas interpolações.

Figura 32. Interpolação da variável K em diagrama de cerca, considerando a superfície da cota topográfica de -7 m (abaixo do nível do mar) para: (A) banco *soft+hard*; e (B) banco *hard*; e superfície da cota de 5 m (acima do nível do mar) para (C) banco *soft+hard*; e (D) banco *hard*.

Figura 33. Resultado da krigagem ordinária da variável K: superfície da cota topográfica de -7 m (abaixo do nível do mar) do (A) banco *soft+hard* e (B) banco *hard*; superfície da cota de 5 m (acima do nível do mar) do (C) banco *soft+hard* e (D) banco *hard*.

6.5. Análise da Malha de Amostragem

Uma das limitações da sonda HPT diz respeito à sua alta densidade de amostragem na vertical, porém alto custo por sondagem, o que resulta comumente em malhas bastante espaçadas no plano horizontal. Procurando avaliar essa limitação, foram testadas malhas progressivamente mais espaçadas, em três cenários distintos.

O Cenário 1 corresponde a malha apresentada no **item 6.4**, com distância média entre sondagens de 20 m e exclusão das sondagens HPT-45, 46 e 49. No Cenário 2, para se estabelecer uma malha irregular com distância média entre sondagens de aproximadamente 30 m, foram excluídas algumas sondagens centrais, mais especificamente as HPT-11, HPT-20 e HPT-24, além das já excluídas no Cenário 1. No Cenário 3, foram excluídas as sondagens HPT-01, HPT-16 e HPT-18, além daquelas dos demais cenários, resultando em uma malha irregular com distância entre sondagens de aproximadamente 40 m. A **Tabela 8** apresenta um resumo desses cenários, e a **Figura 34** exibe em planta as malhas de cada um deles.

Tabela 8. Resumo das malhas de amostragem testadas.

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
<i>Distância média entre sondagens</i>	20 m	30 m	40 m
<i>Sondagens excluídas</i>	HPT-34, 46 e 49	HPT-34, 45, 46, 11, 24 e 20	HPT-34, 45, 46, 11, 24, 20, 01, 16 e 28

Figura 34. Malhas de amostragem testadas: (A) Malha total, (B) Cenário 1, (C) Cenário 2 e (D) Cenário 3.

A avaliação envolveu uma análise geoestatística de cada um dos cenários, com construção de variogramas, estabelecimento de vizinhança, análise da validação cruzada e comparação entre as interpolações. Optou-se por ajustar o variograma para cada caso empregando-se uma amplitude e vizinhança que fosse compatível com a distância média entre as amostras, de maneira que possibilitasse a interpolação das amostras. Os resultados obtidos foram comparados aos resultados já obtidos anteriormente para o Cenário 1.

A **Figura 35** apresenta os histogramas dos bancos *hard* e *soft+hard* do Cenário 2 e a **Figura 36** os histogramas dos bancos *hard* e *soft+hard* do Cenário 3. Comparados aos histogramas da malha original, as médias e desvios-padrão são semelhantes, apesar do número bastante inferior de amostras, e a assimetria positiva dos dados é mantida.

Figura 35. Histograma da variável K para o Cenário 2: (A) banco *soft+hard*, (B) banco *hard*.

Figura 36. Histograma da variável K para o Cenário 3: (A) banco *soft+hard*, (B) banco *hard*.

O ajuste do variograma experimental do Cenário 2 (**Figura 37**) no banco *soft+hard* utilizou três estruturas esféricas, com efeito pepita de 0,002, amplitude de 2 m e patamar de 6 $[\log(m/dia)]^2$ na estrutura 1, amplitude de 20 m e patamar de 5 $[\log(m/dia)]^2$ na estrutura 2 e amplitude de 15 m e patamar de 7 $[\log(m/dia)]^2$. Para o banco *hard*, o ajuste foi realizado com três estruturas esféricas, com efeito pepita de 0,12, amplitude de 1 m e patamar de 0,5 $[\log(m/dia)]^2$ na estrutura 1, amplitude de 9 m e patamar de 0,45 $[\log(m/dia)]^2$ na estrutura 2 e amplitude de 3,72 m e patamar de 0,6 $[\log(m/dia)]^2$.

Os valores de vizinhança estabelecidos para a interpolação do Cenário 2 foram os mesmos para ambas as bases, 30 m para as direções U, V e W, com quatro setores angulares, número mínimo de uma amostra por setor e ótimo de dois.

Figura 37. Variogramas experimentais da variável K apresentado as direções NO e normal D-90, para o Cenário 2: (A) base *soft+hard* e (B) base *hard*.

Para o Cenário 3, o ajuste do variograma experimental do banco *soft+hard* (**Figura 38**) utilizou três estruturas esféricas, com efeito pepita de 0,002, amplitude de 3 m e patamar de 6 $[\log(\text{m}/\text{dia})]^2$ na estrutura 1, amplitude de 11 m e patamar de 5 $[\log(\text{m}/\text{dia})]^2$ na estrutura 2 e amplitude de 15 m e patamar de 7 $[\log(\text{m}/\text{dia})]^2$. No banco *hard*, o ajuste foi realizado com três estruturas esféricas, com efeito pepita de 0,125, amplitude de 1 m e patamar de 0,5 $[\log(\text{m}/\text{dia})]^2$ na estrutura 1, amplitude de 9 m e patamar de 0,45 $[\log(\text{m}/\text{dia})]^2$ na estrutura 2 e amplitude de 3,7 m e patamar de 0,5 $[\log(\text{m}/\text{dia})]^2$.

Os valores de vizinhança estabelecidos para a interpolação do Cenário 3 foram os mesmos para ambas as bases, 40 m para as direções U e V e 30 m para direção W, com quatro setores angulares, número mínimo de uma amostra por setor e ótimo de dois.

Figura 38. Variogramas experimentais da variável K apresentado as direções N0 e normal D-90, para o Cenário 3: (A) base *soft+hard* e (B) base *hard*.

As **Figuras 39** e **40** mostram os resultados da validação cruzada de cada cenário para os bancos *hard* e *soft+hard*. As validações cruzadas dos Cenários 2 apresentaram resultados com valores de rho de 0,988 para o banco *soft+hard* e de 0,810 para o banco *hard*, semelhante aos valores de rho do Cenário 1 (0,988 para o banco *soft+hard* e 0,786 para o banco *hard*). No Cenário 3 os resultados de rho apresentaram valores de 0,988 e 0,813 para os bancos *soft+hard* e *hard* respectivamente, também próximos ao Cenário 1.

O erro padronizado também apresenta valores semelhantes entre os cenários, sendo no banco *soft+hard*, de -0,01662 no Cenário 2 e de -0,01734 no Cenário 3, ao passo que é de -0,01065 no Cenário 1. No banco *hard*, os erros são de -0,06108 no Cenário 2 e de -0,05455 no Cenário 3, sendo de -0,06173 no Cenário 1. A **Tabela 9** apresenta um resumo de todos os dados, parâmetros e resultados da validação cruzada entre os cenários testados, nos dois bancos.

Os resultados de rho e de erro padronizado semelhantes entre cenários devem-se, aparentemente, à alta densidade de amostras por sondagem em profundidade. Este fator acaba por mascarar o espaçamento das sondagens e torna a validação cruzada uma ferramenta pouco útil de comparação entre cenários.

Tabela 9. Resumo comparativo entre dados, parâmetros e resultados de validação cruzadas das malhas testadas.

Malha		Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3		
Base de dados		Soft+Hard	Hard	Soft+Hard	Hard	Soft+Hard	Hard	
Histograma	Número de Amostras	21760	3935	16950	3094	14025	2757	
	Média	-0,30	1,83	-0,80	1,82	-0,42	1,80	
	Desvio padrão	1,43	1,01	3,27	1,02	3,33	1,01	
Variograma Modelado	Efeito pepita	0,002	0,135	0,002	0,12	0,002	0,125	
	Estrutura 1	Amplitude (m)	2	2,51	2	1	3	1
		Patamar	6	0,5	6	0,5	6	0,5
	Estrutura 2	Amplitude (m)	20	3,85	20	9	11	9
		Patamar	5	0,4	5	0,45	5	0,45
	Estrutura 3	Amplitude (m)	17	7	15	3,72	15	3,7
		Patamar	7	0,05	7	0,6	7	0,5
	Vizinhança	U (m)	20	20	30	30	40	40
V (m)		20	20	30	30	40	40	
W (m)		30	30	30	30	30	30	
Setores Angulares		4	4	4	4	4	4	
Nº mínimo de amostras		2	1	1	1	1	1	
Nº ótimo de amostras		8	2	2	2	2	2	
Validação Cruzada	rho	0,988	0,786	0,988	0,810	0,988	0,813	
	Erro padronizado	-0,01065	-0,06173	-0,01662	-0,06108	-0,01734	-0,05455

Figura 39. Validação cruzada, rho e erro padronizado, do modelo da variável K para a base de dados *soft+hard* – Cenário 2. (A) banco *soft+hard* e (B) banco *hard*. Pontos em cruz representam valores dentro do intervalo de confiança de 90% e pontos representados em gota valores fora do intervalo de confiança de 90%.

Figura 40. Validação cruzada, rho e erro padronizado, do modelo da variável K para a base de dados *soft+hard* – Cenário 3. (A) banco *soft+hard* e (B) banco *hard*. Pontos em cruz representam valores dentro do intervalo de confiança de 90% e pontos representados em gota valores fora do intervalo de confiança de 90%.

As **Figuras 41 e 42** ilustram os resultados da krigagem ordinária dos três cenários considerando-se a cota topográfica de 5 m acima do nível do mar, respectivamente para o banco *soft+hard* e para *hard*. Observa-se que em geral os cenários mantêm uma estrutura de K semelhante em ambos os bancos, porém com perda progressiva de detalhe conforme se aumenta o espaçamento entre as sondagens.

Como optou-se por utilizar vizinhanças proporcionalmente maiores ao espaçamento da malha, o Cenário 1 também apresenta uma área não interpolada maior que as demais, tanto na base *soft+hard* quanto na base *hard*. Comparando-se os Cenários 2 e 3 ao Cenário 1, observa-se em algumas regiões um aumento de K nas bordas da interpolação, especialmente no banco *soft+hard*. Nota-se também que o uso do banco *hard* suaviza esse efeito nas bordas em comparação ao banco *soft+hard*.

As **Figuras 43 e 44** apresentam mapas das diferenças de estimativas entre os Cenários 1 e 2 e entre os Cenários 1 e 3, para os bancos *soft+hard* e *hard*, respectivamente. Nesses mapas, os resultados mais próximos de 0 indicam estimativas semelhantes de K em m/dia entre as malhas.

Observa-se nos mapas do banco *soft+hard* (**Figura 43**) que as estimativas nas regiões mais centrais apresentam valores, em geral, semelhantes entre as malhas. Algumas áreas específicas, como a região sudoeste e centro oeste, apresentaram significativa variância de estimativa, com diferenças de K de até ± 50 m/dia. Não se observa, no entanto, grandes diferenças entre as variâncias ao se comparar os resultados de variância do Cenário 2 (**Figura 43A**) e Cenário 3 (**Figura 43B**).

Devido a diferença de escala, as variâncias são mais claras na comparação entre o Cenário 1 e 3 para o banco *hard* (**Figura 44**). As regiões centrais também apresentam uma variância menos significativa em comparação com as regiões sudoeste e centro oeste e as variâncias máximas de K observadas no banco *hard* são de cerca de ± 14 m/dia, inferiores as observadas no banco *soft+hard*. Neste caso, fica mais claro também que a variância espacial do Cenários 2, em relação ao Cenário 1 (**Figura 44A**) e menor que a observada no Cenário 3 (**Figura 44B**).

Figura 41. Comparação entre resultados da krigagem ordinária na cota de 5m da variável K nos três cenários para o banco *soft+hard* (A) Cenário 1, (B) Cenário 2 e (C) Cenário 3; linha cinza: perímetro de interpolação do Cenário 1.

Figura 42. Comparação entre resultados da krigagem ordinária na cota de 5m da variável K nos três cenários para o banco *hard* (A) Cenário 1, (B) Cenário 2 e (C) Cenário 3; linha cinza: perímetro de interpolação do cenário 1.

Figura 43. Mapas de diferenças de estimativas entre as malhas 1 e 2 (A) e 1 e 3 (B) para o banco *soft+hard* na cota de 5m. Pontos em cruz vermelhos representam sondagens subtraídas da malha 1 e pontos em cruz pretos sondagens utilizadas nas respectivas malhas.

Figura 44. Mapas de diferenças de estimativas entre as malhas 1 e 2 (A) e 1 e 3 (B) para o banco *hard* na cota de 5m. Pontos em cruz vermelhos representam sondagens subtraídas da malha 1 e pontos em cruz pretos sondagens utilizadas nas respectivas malhas.

6.6. Krigagem Indicadora

Como detalhado no **item 5.4.2**, a krigagem indicadora é uma opção de método de interpolação não linear adequada para distribuições que apresentam assimetria positiva, testado aqui como alternativa de tratamento dos dados HPT que inclua os dados *soft*, em comparação com os resultados da krigagem ordinária para o banco *soft+hard*. Esse método, no entanto, não é capaz de apresentar mapas de teores, e dessa maneira, os resultados da krigagem ordinária com a distribuição de K serão comparados aos mapas de probabilidade das faixas de K discretizadas. A **Figura 45** apresenta os histogramas dessas variáveis em comparação ao histograma de K da malha original.

Figura 45. Histogramas das variáveis indicadoras e de K para o banco *soft+hard*: (A) condutividade hidráulica, (B) indicadora K_{inf}, (C) indicadora K_{int} e (D) e indicadora K_{sup}.

A análise exploratória para as três variáveis indicadoras também incluiu quatro direções no plano horizontal (N0, N45, N90 e N135) e a normal vertical (D-90). Para a construção dos variogramas, foram utilizados os mesmos valores de passos da krigagem ordinária: para as direções do plano horizontal, passo de 20 m e número de passos de 6 e, para a direção vertical, passo de 0,02 m e número de passos de 1.200. A **Figura 46** apresenta os variogramas construídos.

Figura 46. Análises exploratórias para as três variáveis indicadoras: (A) K_{sup} , (B) K_{inf} e (C) K_{int} , comparadas à análise exploratória da variável aleatória K para o banco *soft+hard* (D).

A análise exploratória indicou uma diferença de patamares menor que 0,05 entre as diferentes direções horizontais, assim como amplitudes bastante semelhantes, apesar de inferida pela falta de estrutura. Como na avaliação da krigagem ordinária, os resultados indicam não haver anisotropia no plano horizontal, mas as diferenças de patamar e amplitude indicam anisotropia na direção vertical, nas três variáveis indicadoras. As **Figuras 47 a 49** apresentam os variogramas experimentais para as

três variáveis indicadoras (K_{inf} , K_{int} e K_{sup}) no plano horizontal omnidirecional (N0) e para a normal perpendicular vertical (D-90).

Para a construção do variogramas de K_{inf} foram utilizadas três estruturas esféricas mais um efeito pepita, e para K_{int} e K_{sup} , foram utilizadas duas estruturas esféricas e mais um efeito pepita.

Os valores de vizinhança para a interpolação de cada uma das variáveis foram estabelecidos a partir do ajuste de cada um dos variogramas. Para todas as variáveis, empregaram-se quatro setores angulares, número mínimo de duas amostras por setor e ótimo de oito. A **Tabela 10** apresenta um resumo desses parâmetros e das estimativas de erro.

Figura 47. Variogramas experimentais das variáveis indicadoras para o plano horizontal omnidirecional (N0) e a normal perpendicular (D-90) da variável K_{inf} .

Figura 48. Variogramas experimentais das variáveis indicadoras para o plano horizontal omnidirecional (N0) e a normal perpendicular (D-90) da variável K_{int} .

Figura 49. Variogramas experimentais das variáveis indicadoras para o plano horizontal omnidirecional (N0) e a normal perpendicular (D-90) da variável K_{sup} .

Tabela 10. Parâmetros de vizinhança das variáveis indicadoras K_{inf} , K_{int} e K_{sup} .

<i>Variável</i>		<i>K_{inf}</i>	<i>K_{int}</i>	<i>K_{sup}</i>
Histograma	Número de Amostras	21760	21760	21760
	Média	0,57	0,18	0,25
	Desvio padrão	0,50	0,38	0,43
Variograma Modelado	Efeito pepita	0,028	0,046	0,022
	Estrutura 1	Amplitude (m)	4	4
		Patamar	0,095	0,095
	Estrutura 2	Amplitude (m)	9	25
		Patamar	0,01	0,16
	Estrutura 3	Amplitude (m)	-	-
		Patamar	-	-
Vizinhança	U (m)	21	20	20
	V (m)	21	20	20
	W (m)	10	3,5	3
	Setores Angulares	4	4	4
	Nº mínimo de amostras	2	1	1
	Nº ótimo de amostras	8	2	2
Validação Cruzada	rho	0.972	0.677	0.973
	Erro padronizado	0,01348	0,13376	-0,01164

As **Figuras 50** e **51** apresentam os mapas de probabilidade gerados a partir da interpolação de cada uma das variáveis indicadoras, comparados aos mapas de K interpolados por krigagem ordinária. Os mapas apresentam correlação entre as regiões de maiores condutividades hidráulicas com as probabilidades mais altas da variável K_{sup} e nas regiões de condutividades hidráulicas mais baixas, probabilidades maiores da variável K_{inf} .

Em geral observam-se regiões bastante delimitadas e distintas para cada categoria de K , havendo apenas uma região (centro-oeste, cota 5 m) onde a probabilidade está dividida em cerca de 50% para K_{int} e 50% para K_{sup} (**Figura 50**). Essa região foi estimada com alto valor de K pela krigagem ordinária do banco *soft+hard*.

A correlação dos mapas gerados pelas krigagens ordinária e indicadora apontam, por um lado, que a transformação logarítmica cumpre adequadamente a função de suavizar a contaminação causada pela distribuição normal dos dados, não havendo necessidade da transformação indicadora. Por outro lado, essa similaridade também aponta que a transformação indicadora mantém a estrutura de K do aquífero apesar da discretização das amostras, e que, portanto, é possível mapear litologicamente o aquífero a partir dos resultados da sonda HPT.

Figura 50. Resultado da interpolação da variável K em comparação às variáveis indicadoras: (A) interpolação condutividade hidráulica por krigagem ordinária, (B) indicadora Kinf, (C) indicadora Kint e (D) indicadora Ksup. Cota topográfica -7 m (abaixo do nível do mar).

Figura 51. Resultado da interpolação da variável K em comparação às variáveis indicadoras: (A) interpolação condutividade hidráulica por krigagem ordinária, (B) indicadora K_{inf} , (C) indicadora K_{int} e (D) indicadora K_{sup} . Cota topográfica 5 m (acima do nível do mar).

6.7. Krigagem Indicadora com Dados de K HPT e Descrições Litológicas de Campo

Nessa etapa, foram utilizadas 20 sondagens descritivas realizadas na área em conjunto com o banco de dados HPT *soft+hard*, seguindo o método descrito no item 5.4.3 para a construção do banco de dados.

A Figura 52 apresenta os histogramas de cada grupo discretizado, onde se observa um número total de 29.414 amostras, referente à soma das 21.760 amostras do banco HPT *soft+hard* e 10.274 amostras categóricas das sondagens descritivas menos 2.620 amostras descartadas para evitar duplicidade no banco. A duplicidade ocorreu nestes casos devido à colocação de algumas sondagens HPT e descritivas que geraram amostras com coordenadas espaciais muito semelhantes.

Figura 52. Histogramas dos grupos: (A) Areia fina, (B) Areia sitlosa e (C) Areia mal selecionada.

A análise exploratória não indicou anisotropia no plano horizontal, mas diferenças de patamar e amplitude para a direção vertical, nos três grupos litológicos, apresentando anisotropia na direção vertical. A **Figura 53** apresenta a análise exploratória dos três grupos litológicos e a **Tabela 11** os parâmetros utilizados para a construção destas análises, assim como os parâmetros utilizados para a definição dos variogramas experimentais e definição de vizinhança.

Figura 53. Análise exploratória para as quatro variáveis indicadoras: (A) Areia fina, (B) Silte e (C) Areia mal selecionada.

Tabela 11. Parâmetros das análises exploratórias, variogramas experimentais e vizinhança para os grupos Areia fina, Silte e Areia mal selecionada.

<i>Variável</i>		<i>Areia fina</i>	<i>Silte</i>	<i>Areia mal selecionada</i>
Análise Exploratória	Direções	Passos	15	5
	Horizontais	Nº de passos	5	4
	Direção	Passos	1	0,02
	Vertical	Nº de passos	30	900
Variograma Modelado	Efeito pepita		0,01	0,009
	Estrutura 1	Amplitude (m)	7	8
		Patamar	0,02	0,07
	Estrutura 2	Amplitude (m)	10	10
		Patamar	0,03	0,005
	Estrutura 3	Amplitude (m)	15	-
		Patamar	0,02	-
Vizinhança	U (m)	20	20	20
	V (m)	20	20	20
	W (m)	30	30	30
	Setores Angulares	4	4	4
	Nº mínimo de amostras	2	2	2
	Nº ótimo de amostras	8	8	8
	rho	0,933	0,942	0,975
	Erro padronizado	-0,01367	0,00019	-0,0025

Apenas o grupo "Areia fina" utilizou três estruturas além do efeito pepita para a construção do variograma experimental. Os grupos "Silte" e "Areia mal selecionada" empregaram duas estruturas mais o efeito pepita, conforme observado na **Tabela 11** acima. A **Figura 54** apresenta os variogramas ajustados para os três grupos litológicos.

Figura 54. Variogramas experimentais para o plano horizontal omnidirecional (N0) e a normal perpendicular (D-900) dos grupos: (A) Areia fina, (B) Areia siltosa e (C) Areia mal selecionada.

Optou-se por manter os valores de vizinhança utilizados na krigagem ordinária para todas as variáveis indicadoras desse tratamento, isto é, de 20 m nas direções do plano horizontal e 30 m na direção vertical de forma a facilitar a comparação dos mapas. Em todas as variáveis foram utilizados quatro setores angulares de busca, número mínimo de duas amostras por setor e ótimo de oito. As **Figuras 55 a 57** apresentam os mapas de probabilidade gerados.

Figura 55. Resultado da interpolação grupo Areia fina: (A) cota topográfica 20 m, (B) cota topográfica 3 m, (C) cota topográfica -7 m (abaixo do nível do mar).

Figura 56. Resultado da interpolação do grupo Silte: (A) cota topográfica 20 m, (B) cota topográfica 3 m, (C) cota topográfica -7 m (abaixo do nível do mar).

Figura 57. Resultado da interpolação do grupo Areia mal selecionada: (A) cota topográfica 20 m, (B) cota topográfica 3 m, (C) cota topográfica -7 m (abaixo do nível do mar).

Os resultados indicam que é possível realizar interpolação indicadora baseada na correlação entre as amostras categóricas de descrição litológica e as amostras quantitativas de K HPT.

Observa-se que o grupo Areia fina possui uma presença mais marcante e provável na porção mais superficial do aquífero, na região norte da área interpolada (**Figura 55**). Conforme avançamos em profundidade, os resultados indicam que a presença de Areia fina na formação é cada vez menos provável.

O grupo Silte também apresenta uma probabilidade maior de presença na porção mais rasa do aquífero, com probabilidade entre 20 e 70% nas regiões leste e centro oeste (**Figura 56**). Nos cortes mais profundos as regiões de maiores probabilidades de presença de Silte se tornam progressivamente mais pontuais, restritas a amostras isoladas.

Já o grupo Areia mal selecionada apresenta maiores probabilidades de presença nas porções intermediárias e profundas do aquífero, apresentado resultados de 100% nas regiões norte, sudeste e centro oeste (**Figura 57**).

Comparando-se os mapas de probabilidade dos grupos "Areia fina", "Silte" e "Areia mal selecionada" aos mapas de K gerados pela krigagem ordinária, observa-se um aumento em escala da área mapeada devido à inclusão das sondagens descritivas, mais acessíveis técnica e financeiramente do que as sondagens HPT. Com planejamento adequado da malha de amostragem, esse método demonstra potencial para otimização do mapeamento de aquíferos inconsolidados, promovendo *upscaling* dos resultados do HPT.

No entanto, ressalta-se novamente que esse método também reduz a densidade vertical da amostragem devido à exclusão das amostras HPT que não se encaixam no intervalo de confiança de nenhum dos litotipos definidos.

Além disso, a definição das amostras categóricas precisa ser avaliada frente aos dados de K, observando-se possíveis enviesamentos causados pelas limitações de operação da sonda. Agrupamentos diferentes de descrições litológicas podem ser testados buscando-se intervalos de K coerentes, ou mesmo o não agrupamento. Análises granulométricas e ensaios de permeabilidade podem auxiliar na calibração dessa correlação entre descrições de campo e os valores de K HPT, aumentando a confiabilidade do mapeamento.

Realizando uma avaliação prévia dos valores de K frente ao conhecimento geológico da área, foi possível excluir das estimativas os valores pouco condizentes com a realidade, fruto possivelmente das limitações intrínsecas da ferramenta, como a alta pressão de injeção que pode incorrer em fraturamentos e enviezamentos de valores de K em litologias pouco permeáveis.

Materiais argilosos apresentaram, nesses resultados, valores de K incoerentes para o tipo de material, indicando possível alteração do substrato durante a operação da sonda e impossibilitando o mapeamento de argilas através desse método. Essa hipótese precisa de novos testes em diferentes aquíferos para confirmação.

7. CONCLUSÕES

A análise geoestatística dos bancos de dados *soft* e *soft+hard* provou-se adequada no mapeamento tridimensional de valores de K estimados por sonda HPT. Através da geoestatística aplicada foi possível elaborar mapas de K por meio dos métodos de krigagem ordinária e indicadora e analisar as limitações do método de amostragem, a confiabilidade das interpolações, os efeitos dos limites de quantificação do método, a malha de amostragem e o uso auxiliar de dados de descrição geológica.

A validação cruzada e os erros de estimativa calculados durante o procedimento de krigagem ordinária em ambos os bancos apresentam resultados geoestatisticamente confiáveis, indicando que este método de interpolação é adequado para dados de K HPT para a área de estudo.

O uso dos dados *soft* resultou em uma escala de K maior nos resultados da base *soft+hard* comparado à base *hard*. A estrutura relativa entre as zonas de maiores e menores condutividades hidráulicas se manteve entre as duas bases, o que indica que o uso de dados *soft* não enviesava significativamente a arquitetura do aquífero. É necessário, no entanto, considerar que a imprecisão dos dados *soft* produz enviesamento nos valores de K estimados, ao passo que as interpolações do banco *hard* devem apresentar maior precisão ao custo de uma densidade amostral bastante inferior.

Os testes realizados com espaçamento da malha de amostragem indicaram que é possível utilizar ferramentas geoestatísticas, como os parâmetros de vizinhança, para planejamento de malhas mais espaçadas no mapeamento com sonda HPT. É necessário, no entanto, um correto entendimento do detalhamento necessário para o mapeamento, devido à perda de resolução nos resultados.

Vizinhanças progressivamente maiores refletem em áreas com interpolação pouco confiáveis nas malhas progressivamente mais espaçadas, como áreas extrapoladas de alto K que não correspondem à realidade quando comparadas à malha original. O uso do banco *hard* suaviza a extrapolação das bordas e mantém uma distribuição de K mais semelhante à malha original nas malhas mais espaçadas, porém, à exemplo do banco *soft+hard*, com uma grande perda no detalhamento da distribuição de valores.

A krigagem indicadora apresentou mapas de probabilidade correlatos espacialmente aos mapas de K gerados pela krigagem ordinária. Esta correlação indica, por um lado, que a transformação logarítmica cumpre adequadamente a função de suavizar a contaminação causada pela distribuição normal dos dados, não havendo necessidade da transformação indicadora. Por outro lado, esta similaridade também indica que a transformação indicadora mantém a estrutura de K do aquífero apesar da discretização das amostras, e que, portanto, é possível mapear litologicamente o aquífero a partir dos resultados da sonda HPT.

O mapeamento litológico em alternativa ao mapeamento de K é uma ferramenta interessante para a construção de modelos matemáticos de fluxo, diminuindo a necessidade de interpretações pessoais no mapeamento e auxiliando na calibração de K das camadas a partir das faixas estabelecidas pelo HPT. Medições de K realizadas *in situ* por meio de *slug tests* podem auxiliar na calibração da krigagem indicadora, aumentando a confiabilidade nos valores de K obtidos por HPT e relacionando-os de maneira direta às descrições geológicas realizadas no site.

Neste sentido, o uso das descrições geológicas em conjunto com os dados HPT para a construção de mapas litológicos probabilísticos mostrou-se um método hábil técnica e financeiramente no *upscaling* do mapeamento HPT. Relacionando os dados HPT com descrições geológicas e, com auxílio de análises granulométricas e ensaios de permeabilidade, é possível discretizar o banco HPT em grupos litológico condizentes com a geologia local. Isso permite o mapeamento de unidades geológicas correspondentes a faixas de K bem definidas e a construção de modelos numéricos de fluxo de água subterrânea baseados em dados diretos e interpolados geoestatisticamente.

Em relação as limitações do método ressaltam-se que a definição das amostras categóricas deve ser avaliada frente aos dados de K HPT, observando-se possíveis enviesamentos causados pelas limitações de operação da sonda. Agrupamentos diferentes de descrições litológicas podem ser testados buscando-se intervalos de K coerentes. O mapeamento de materiais argilosos sofre, aparentemente, mais com o enviesamento causado pela alteração do substrato durante a operação da sonda.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, S. & Marsily, G. Comparison of Geostatistical Methods for Estimating Transmissivity Using Data on Transmissivity and Specific Capacity. *Water Resources Research*, 1987.
- Alemi, M. H., Azari, A. S., Nielsen, D. R. Kriging and univariate modeling of a spatially correlated data. *Soil Technology*. V. 1, 1988.
- Andriotti, J.L.S. Notas de Geoestatística. In *Acta Geológica Leopoldensia*, XXV (55) 3-14, 2002.
- Alemi, M.H.; Shahriari, M.R.; Nielsen, D.R. Kriging and cokriging of soil water properties, *Soil Technology* Volume 1, Issue 2, June 1988, Pages 117-132.
- ASTM D6282. Standard guide for direct push soil sampling for environmental site characterization. In *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.09 Soil and Rock (II). West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International, 2007.
- Bissell, E. G. & Aichele, S. S. Geostatistical Analysis of Effective Vertical Hydraulic Conductivity and Presence of Confining Layers in the Shallow Glacial Drift Aquifer, Oakland County, *Michigan. Scientific Investigations Report*, 2004.
- Borba, A. L. S., Costa Filho, W. D., Mascarenhas, J. C.O. Configuração geométrica dos aquíferos da região metropolitana do Recife. In: *Anais*, 2010, p. 1-14.
- Bohling, G.C., Liu, G, Knobbe, S.J., Reboulet, E.C., Hyndman, D.W., Dietrich, P. and Butler, Jr J.J. Geostatistical analysis of centimeter-scale hydraulic conductivity variations at the MADE site. *Water Resources Research*, 2012, 48: 15.
- Butler, J. J., Jr., Hydrogeological methods for estimation of spatial variations in hydraulic conductivity, in *Hydrogeophysics*, edited by Y. Rubin and S. Hubbard. Springer, The Netherlands, 2005, pp. 23–58.
- Butler, J. J., Jr., Dietrich, P., Wittig, V. and Christy, T. Characterizing hydraulic conductivity with the direct-push permeameter, *Ground Water*, 2007, 45(4), 409–419,
- CPRM – Serviço geológico do Brasil. *Sistema de Informações Geoambientais da região Metropolitana do Recife*, Recife/PE, 2003.

- Christy, C.D., Christy, T.M., Witting, V. A percussion probing tool for the direct sensing of soil conductivity. *Proceedings of the 8th National Outdoor Action Conference*. 1994, 381 – 394.
- Delhomme, J.P. Kriging in the hydrosociences. *Advances in Water Resources*, v. 1, 1978.
- Dietrich, P., Butler, J. J. Jr., and K. Faiß , A rapid method for hydraulic profiling in unconsolidated formations, *Ground Water*, 2008, 46(2), 323–328,
- Du, Y. & Zhang, T. A Novel Interpolation Method Using Soft Data and Hard Data, *International Journal of Computer Theory and Engineering*, v. 2, 2010.
- Emery, X. & González, K. E. Incorporating the uncertainty in geological boundaries into mineral resources evaluation, *Journal of the Geological Society of India*, 2007.
- Fabbri, P. Transmissivity in the Geothermal Euganean Basin: A Geostatistical Analysis. *Groundwater*, v. 35, 1997.
- Flach, G.P., Harris, M.K., Smits, A.D., Syms, F.H., Modeling aquifer heterogeneity using cone penetration testing data and stochastic upscaling methods. *Environmental Geosciences* 12(1): 2005, 1–15.
- Freeze, R.A., Cherry, J.A. *Groundwater*: Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1979, 604 p.
- Geoprobe. Hydrostratigraphic characterization using the hydraulic profiling tool (HPT), In: *Technical Bulletin MK3099*. Salina, Kansas, 2006.
- Geoprobe. Hydraulic Profiling Tool (HPT) System Standard Operating Procedure, In: *Technical Bulletin No. MK3137*, Prepared: January 2015.
- Geoprobe Systems. Disponível em: <https://geoprobe.com/direct-image-viewer>, Acesso em: 18fev, 2019.
- Geovariances. Disponível em: <https://www.geovariances.com/en/software/isatis-geostatistics-software/>, Acesso em: 12jul, 2021.

- Gomes, H. A. Geologia e recursos minerais do estado de Pernambuco. Texto explicativo dos mapas geológicos e de recursos minerais do estado de Pernambuco. *Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Projeto de Mapeamento Geológico/Metalogenético Sistemático*. Brasília: CPRM/DIEDIG/DEPAT, 2001. 198p. 2 mapas 1:500.000, 2001.
- Hubbert, K. Darcys law and the field equation of the flow of underground fluids. *Soc. Petrol. Eng. Journal*, 1956, 222 – 239.
- Idrissy, E. H. E & De Smedt, F. A comparative study of hydraulic conductivity estimations using geostatistics, *Hydrogeology Journal*, 2007.
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: < <http://www.inmet.gov.brhttps://www.ctech.com/>>. Acesso em: 03fev. 2019.
- Isaaks, E.H. & Srivastava, R.M. An Introduction to Applied Geostatistics, *Oxford University Press*, 1989, 561p.
- Journal, A. G. & Huijbregts, Ch. J. Mining geostatistics. *New York: Academic Press*, 1978.
- Journal, A.G. The lognormal approach to predicting local distributions of selective mining unit grades. *J. Math. Geol.*, 1980.
- Journal, A. G. Non-parametric estimation of spatial distribution. *Math. Geology*, v. 15, 1983.
- Koltermann, C. E. & Gorelick, S. M. Heterogeneity in sedimentary deposits: A review of structure-imitating, process-imitating, and descriptive approaches. *Water Resources Research*, v. 32, 1996
- Li, P. Book Review: “Hydraulic Conductivity—Issues, Determination and Applications”, L. Elango (ed.), InTech, Croatia. *Springer International Publishing*, 2014
- Liu, G., Butler Jr., J. J., Bohling, G. C., Reboulet, E., Knobbe, S. and. Hyndman D. W. A new method for high-resolution characterization of hydraulic conductivity, *Water Resour. Res.*, v. 45, 2009.
- Liu, G., Butler Jr. J. J., Reboulet, E. C. and Knobbe, S. Hydraulic conductivity profiling with direct-push methods, *Grundwasser*, 2012.

- Lu, D. T., Zhang, T., Yang, J. Q., Li, D. L., Kong, X. Y., A reconstruction method of porous media integrating soft data with hard data, *Chinese Science Bulletin*, 2009.
- Matheron, G. Principles of Geostatistics. *Economic Geology*, 1963.
- Matheron, G. Random Functions and their Application in Geology. Plenum Press, 1970.
- McCall, W. Tech guide for calculation of estimated hydraulic conductivity (Est. K) log from HPT data. Salina, Kansas: Kejr Inc. www.geoprobe.com. 2010.
- McCall, W. Application of the Geoprobe HPT Logging System for Geo-Environmental Investigations. In: *Technical Bulletin No. MK3184*, Prepared: February 2011.
- McCall, W., Christy, T.M., Pipp, D., Terkelsen, M., Chistenensen, A., Weber, K., Engelsen, P. Field Application of the Combined Membrane-Interface Probe and Hydraulic Profiling Tool (MiHpt). *Groundwater Monitoring & Remediation* 34, n. 2, p. 85-95, 2014.
- Morettin, P.A., Bussab, W. Estatística Básica, Editora Saraiva, São Paulo – Brasil – Cap 11 pgs 303-310, 2002.
- Nowak, W. & Cirpka, O. Geostatistical inference of hydraulic conductivity and dispersivities from hydraulic heads and tracer data. *Water Resources Research*, 2006.
- Neuman, S.P. Statistical Characterization of Aquifer Heterogeneities: An Overview. *Geological Society of America Special Paper* 189, 1982.
- Patriarche, D., Castro, M.C., Goovaerts, P. Estimating Regional Hydraulic Conductivity Fields—A Comparative Study of Geostatistical Methods. *Mathematical Geology*, v. 37, 2005.
- Pitkin, S.E., and M.D. Rossi, A real time indicator of hydraulic conductivity distribution used to select groundwater sampling depths (abstract), *Eos*, 81(19), S239, 2000.
- Rocha, D. E. G. A. & Oliveira, R. G. Geologia e Geofísica. In: Pfaltzgraff, P. A.S. Sistema de Informações Geoambientais da Região Metropolitana do Recife. *Ministério de Minas e Energia Secretaria de Minas e Metalurgia CPRM – Serviço Geológico do Brasil Superintendência Regional do Recife*, 2003. 137p.

- Rogiers, B, Vienken, T., Gedeon, M., Batelaan, O. Mallants, D., Huysmans, M., Dassargues, A. Multi-scale aquifer characterization and groundwater flow model parameterization using direct push technologies. *Environmental Earth Sciences*, 2014.
- Serre, M.L. Introduction to Bayesian maximum entropy. *Workshop BME, Department of Statistics, University of Nebraska-Lincoln*, 2007.
- Souza, L. E., Costa, J. F. C. L. Sample weighted variograms on the sequential indicator simulation of coal deposits. *International Journal of Coal Geology*, v. 112, 2013,
- Suthersan, S., Quinnan, J., Welty, N. The New ROI: Return on Investigation by Utilizing Smart Characterization Methods. *Ground Water Monitoring and remediation*, 2015.
- van Beers, W. F. J. The Auger Hole Method - A field measurement of the hydraulic conductivity of soil below the water table. *International Institute for Land Reclamation and Improvement ILRI*, Wageningen. The Netherlands, 1958.
- Varouchakis, A. E. Geostatistics: Mathematical and Statistical Basis. *Spatiotemporal Analysis of Extreme Hydrological Events*, Elsevier, 2019.
- Vienken, T., Leven, C., Dietrich, P. Use of CPT and other direct push methods for (hydro-) stratigraphic aquifer characterization — a field study. *Canadian Geotechnical Journal*, 2012, 49:197-206
- Yamamoto, J. K., Mao, X. M., Koike, K. A., Crosta, P., Landim, P. M. B., Hu, H. Z., Wang, C. Y., Yao, L. Q. Mapping an uncertainty zone between interpolated types of a categorical variable, *Computers & Geosciences*. V. 40, 2012.
- Yamamoto, J. K. & Landim, P. M. B. *Geoestatística: conceitos e aplicações*. São Paulo, Oficina de Texto, 2013. 215 p.
- Zhang, T., Lu, D. T., Li, D. L. A statistical information reconstruction method of images based on multiple-point geostatistics integrating soft data with hard data”, *Proceedings of ISCSCT*, 2008.