

Artigos

Análise exploratória de heterogeneidade da condutividade hidráulica de um aquífero sedimentar costeiro, livre e raso, Florianópolis, Brasil

Exploratory analysis of hydraulic conductivity heterogeneity of a phreatic and shallow coastal sedimentary aquifer, Florianópolis, Brazil

Daniel Amgarten Simão¹; Cátia Regina Silva de Carvalho Pinto¹

¹ Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, SC

✉ dansimao1992@gmail.com, catia.carvalho@ufsc.br

Palavras-chave:

Heterogeneidade;
Condutividade hidráulica;
Análise exploratória.

Resumo

A condutividade hidráulica (K) tem sido atribuída como a propriedade mais significativa controlando o fluxo e o transporte em aquíferos. Enquanto sua distribuição espacial é naturalmente heterogênea nos meios geológicos, a sua homogeneização em volumes macroscópicos ainda é prática comum na representação matemática dos processos relevantes em aquíferos. Este estudo trata de uma análise exploratória de caracterizações de K para um aquífero sedimentar costeiro, livre e raso, tradicionalmente conceitualizado como homogêneo, avaliando a variabilidade dessa propriedade, os métodos de caracterização utilizados (ensaios em campo e em laboratório) e relações com propriedades dos sedimentos e a geologia local. As análises indicaram uma variabilidade de K associada a aquíferos extensivamente estudados que foram considerados de baixa heterogeneidade. A variabilidade de K nos ensaios em campo apontou para 3 ordens de magnitude, e mostrou-se associada às fácies sedimentares identificadas nos pontos caracterizados e, portanto, com heterogeneidade relevante na direção vertical. Isso demonstra que estruturas tridimensionais de aquíferos sempre devem ser levadas em consideração em modelos conceituais de aquíferos sedimentares, principalmente para problemas de contaminação de águas subterrâneas, mesmo em depósitos tradicionalmente caracterizados como homogêneos.

Abstract

Hydraulic conductivity (K) has been attributed as the most significant property controlling flow and transport in aquifers. While its spatial distribution is naturally heterogeneous in geological environments, its homogenization in macroscopic aquifer volumes is still common practice in the mathematical representation of relevant subsurface processes. This study is an exploratory analysis of the hydraulic conductivity characterizations for a phreatic and shallow coastal sedimentary aquifer, traditionally conceptualized as homogeneous, evaluating the variability of this property, the characterization methods (field and laboratory tests) and relationships of K with sediments properties and local geology. The analysis indicated a K variability associated with extensively characterized aquifers that were classified as of low heterogeneity. The variability of K in the field tests indicated a variation between 3 orders of magnitude, and it was associated with the sedimentary facies identified at the characterization points and, therefore, with relevant heterogeneity in the vertical direction. This demonstrates that the three-dimensional structure of aquifers must always be taken into account in the conceptual model of aquifers, mainly for problems of groundwater contamination, even in places traditionally characterized as homogeneous.

Keywords

Heterogeneity;
Hydraulic conductivity;
Exploratory analysis.

Revisão por pares.
Recebido em: 01/12/2022.
Aprovado em: 28/06/2023.

DOI: <http://doi.org/10.14295/ras.v37i3.30200>

1. INTRODUÇÃO

Representações acuradas e confiáveis dos processos responsáveis pelo fluxo das águas subterrâneas e o transporte de contaminantes dissolvidos em aquíferos são de grande relevância para o gerenciamento de risco e a avaliação de impactos. Esses processos são tradicionalmente representados por modelos matemáticos de fluxo e transporte de contaminantes baseados na Lei de Darcy e na equação de advecção-dispersão (ADE) (FETTER; BOVING; KREAMER, 2017).

Informações relativas à magnitude e distribuição espacial de

propriedades dos aquíferos investigados são necessárias para representar as dinâmicas de fluxo e transporte em subsuperfície a partir dessas equações. Entretanto, os complexos processos de erosão, transporte e deposição de sedimentos, que condicionam a arquitetura geológica dos aquíferos sedimentares, resultam quase sempre em uma distribuição espacial heterogênea em diversas escalas para os parâmetros hidrogeológicos (NICHOLS, 2009).

A condutividade hidráulica (K) tem sido atribuída como a propriedade mais significativa controlando o fluxo e o transporte em aquíferos (DAGAN, 1989; KOLTERMANN; GORELICK, 1996; SALAMON; FERNÁNDEZ-GARCIA; GÓMEZ-

HERNÁNDEZ, 2007; SUDICKY; ILLMAN *et al.*, 2011; MOLZ, 2015; LANGE, 2020; GUO *et al.*, 2021; REN *et al.*, 2022). Esse parâmetro pode variar em até 13 ordens de magnitude (FREEZE; CHERRY, 1979), e variações consideráveis podem ocorrer em uma escala espacial muito pequena (ALLEN-KING *et al.*, 1998; BOHLING *et al.*, 2012).

A condutividade hidráulica em meio poroso saturado pode ser caracterizada em campo através de ensaios de bombeamento, ou recuperação e infiltração (como *slug tests*); ou em laboratório, como através de permeâmetros a partir de amostras geralmente retiradas de sondagens (BUTLER, 2005). Caracterizar sua distribuição espacial, entretanto, não é trivial, pois na prática é extremamente difícil e custoso amostrar a totalidade de uma área investigada, assim como realizar medições representativas de sua magnitude, pois além de afetar a distribuição espacial, as heterogeneidades condicionam que a magnitude da propriedade depende da escala de medição (ROVEY; CHERKAUER, 1995).

Devido aos custos envolvidos, tradicionalmente as medições são realizadas para apenas alguns pontos do espaço, e a condutividade hidráulica de um aquífero é adotada como a média obtida nos ensaios realizados, ou seja, ocorre a homogeneização. Essa abordagem, além de não refletir as condições reais em relação ao fluxo das águas, pode ter um impacto ainda mais significativo no transporte de solutos. A variação espacial da distribuição de contaminantes causada pelas heterogeneidades tem um impacto significativo no controle de risco e na definição de estratégias de remediação (MAXWELL; CARLE; TOMPSON, 2008; GUO *et al.*, 2021).

Métodos de biorremediação, como a atenuação natural monitorada e a bioestimulação, têm recebido cada vez mais atenção como alternativas viáveis e com bom custo-benefício para remediação de aquíferos. O entendimento das heterogeneidades do meio subterrâneo é crítico para que essas alternativas sejam utilizadas com eficácia (PAYNE; QUINNAN; POTTER, 2008; DEVLIN, 2020).

Na Fazenda Experimental da Ressacada, em Florianópolis, pertencente à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), existe uma área experimental onde o laboratório do Núcleo Ressacada de Pesquisas em Meio Ambiente (REMA), em parceria com a Petrobrás, conduz experimentos em escala de campo desde 1998 para estudar o comportamento de

combustíveis orgânicos no meio subterrâneo, a remediação de solos e aquíferos, como também para auxiliar na elaboração de modelos matemáticos de fluxo e transporte que possam ser utilizados na tomada de decisão no contexto do gerenciamento de contaminações (CORSEUIL; SCHNEIDER *et al.*, 2006; CORSEUIL; MONIER *et al.*, 2011; RAMOS *et al.*, 2013; MÜLLER, 2017).

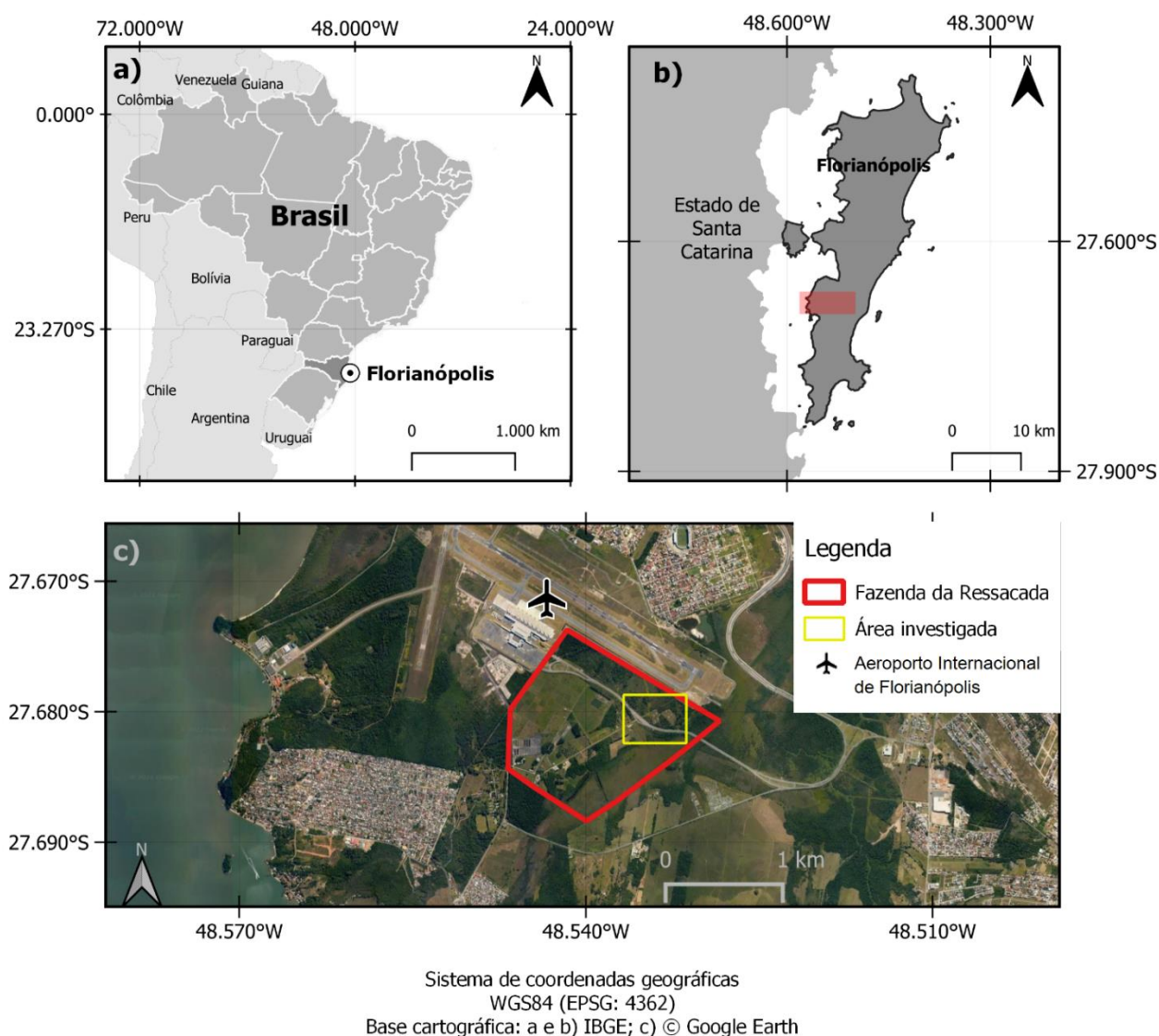
O aquífero local é sedimentar costeiro raso, e arenoso, caracterizado por um regime hidráulico variável, que afeta os processos hidrodinâmicos na área experimental. Tradicionalmente caracterizado como homogêneo, o depósito apresenta, no entanto, heterogeneidades geológicas que, em conjunto com o regime de fluxo instável, resulta em variabilidades no comportamento das plumas de contaminação e incertezas dos efeitos combinados das variabilidades espaciais e temporais dos processos hidrodinâmicos (RAMA, 2019).

Este estudo trata de uma análise exploratória das caracterizações de K para a área experimental do REMA, na Fazenda da Ressacada, a partir de dados publicados em estudos sobre a área, avaliando a variabilidade dessa propriedade, os métodos de caracterização utilizados e relações com propriedades dos sedimentos e a geologia local.

2. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Fazenda Experimental da Ressacada, de propriedade da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), está localizada em uma planície costeira na região sudoeste da Ilha de Santa Catarina, em Florianópolis - SC. A região experimental do REMA envolve uma área de aproximadamente 40.000 m² (**Figura 1**). O aquífero sedimentar é livre, costeiro e raso, apresenta uma espessura entre 30-40 m, e consiste de depósitos de fundo de baía e marinho. A deposição de fundo de baía é resultante de um processo de inundação e erosão em função de uma oscilação positiva do nível relativo do mar, que propiciou a entrada de águas provenientes da Baía Sul, erodindo parcialmente o depósito marinho praial. A área investigada tem predominância de areias finas quartzosas, mas apresenta lentes siltosas e argilosas intercaladas no pacote de sedimentos (LAGE, 2005). Dentro da fazenda o relevo é plano com declividades que variam de 0 a 3% (RAMA, 2019).

Figura 1 - Localização (a) da cidade de Florianópolis; (b) da área de estudo em Florianópolis; (c) e da Fazenda da Ressacada e da área experimental investigada



3. METODOLOGIA

Os dados analisados incluem caracterizações da condutividade hidráulica (K) realizadas a partir de dois métodos diferentes: a) ensaios em campo (*slug tests*); e b) ensaios em laboratório (permo-porosímetro), através de amostras coletadas de sondagens.

O método *slug test* é um ensaio em campo que consiste na rápida retirada ou inserção de um volume conhecido de água a um poço de monitoramento, que também pode ser realizado através da introdução de um objeto de volume conhecido (BUTLER, 2005). O método permite obter a magnitude de K da formação na vizinhança imediata ao filtro do poço. A taxa de rebaixamento (ou elevação) do nível d'água no poço é medida, e para sua interpretação aplica-se o método apropriado.

Já o permo-porosímetro é um equipamento de laboratório que envolve a combinação de um instrumento de medição de permeabilidade (permeômetro), um medidor de volume de

poros e uma câmara de compressão hidrostática. A partir da aplicação do fluxo de um gás a uma amostra de sedimentos, a permeabilidade ao ar é determinada a partir da equação de Darcy, utilizando a taxa de fluxo medida e as pressões de injeção e saída no permeômetro. Enquanto que medições a partir de ensaios de campo do tipo *slug test* avaliam K principalmente na direção horizontal, as realizadas a partir do permo-porosímetro medem a propriedade, em geral, na direção vertical da amostra retirada de testemunho de sondagem (BUTLER, 2005).

Entre 2004 e 2005, diversas investigações foram conduzidas na área investigada para dar suporte ao projeto que envolve os experimentos com combustíveis e biocombustíveis. Essas investigações incluíram a caracterização geológica da área e a determinação dos parâmetros do aquífero necessários ao planejamento dos novos experimentos que posteriormente seriam construídos na área experimental 2 (Figura 2). Maiores detalhes dessas investigações estão disponíveis em Lage (2005).

A caracterização geológica foi realizada a partir de diversas sondagens com diferentes objetivos de investigação. Duas das sondagens profundas realizadas, SD2 e SD3, possibilitaram coletar 31 amostras em intervalos contínuos até 5 m de profundidade, com intervalos de profundidade amostrados de 25 cm (até os 4 m de profundidade de SD2 e os 2 m de profundidade de SD3) e de 50 cm (em profundidades maiores). Essas amostras foram encapsuladas e submetidas aos ensaios para determinação da permeabilidade no permo-porosímetro a gás.

Medidas de permeabilidade absoluta foram obtidas através de métodos de variação de pressão em câmara confinante, utilizando amostras deformadas, e por medição direta no permo-porosímetro à pressão constante de 400 psi (CUPERTINO, 2005). Os valores de permeabilidade em miliDarcy (mD) foram convertidos para condutividade hidráulica em relação à água, em que $1 \text{ mD} \approx 980 \text{ cm.s}^{-1}$. Mais detalhes sobre os experimentos estão disponíveis em Lage (2005) e Cupertino (2005). Essas mesmas amostras também foram utilizadas para análises granulométricas, e apenas os teores de finos foram disponibilizados por Lage (2005), de onde os dados foram retirados.

No mesmo local de parte das sondagens realizadas, poços estratigráficos, de monitoramento e piezômetros foram

instalados, e onde os ensaios em campo com *slug tests* foram realizados. Os dados relativos aos *slug tests* foram obtidos a partir de três campanhas, em diferentes épocas, e em 19 poços diferentes. A 1ª campanha foi realizada em novembro de 2005 por Lage (2005) e Bielschowsky (2005). Já a 2ª campanha foi realizada em dezembro de 2016 e a 3ª em abril de 2017, as duas por Rama (2019). Maiores detalhes sobre a condução dos ensaios disponíveis encontram-se nas referências citadas.

A partir dos dados dos ensaios, os valores de K para as três campanhas foram calculados a partir dos métodos de Hvorslev (1951) e de Bouwer e Rice (1976). Para a presente análise foram adotados os obtidos pelo segundo método, pois é o mais indicado para interpretação de testes em aquíferos livres (BUTLER, 2005). Os valores foram todos retirados de forma compilada de Rama (2019).

A localização dos poços, piezômetros e sondagens com caracterizações de K associadas encontra-se na **Figura 2** e na **Tabela 1**. A Tabela 2 apresenta os poços da área em que os *slug tests* foram realizados em conjunto com as profundidades de suas seções filtrantes e seus respectivos comprimentos.

Figura 2 - Localização dos poços e sondagens na área experimental 2 (coordenadas UTM; datum SAD-69 zona 22S; EPSG: 29192)

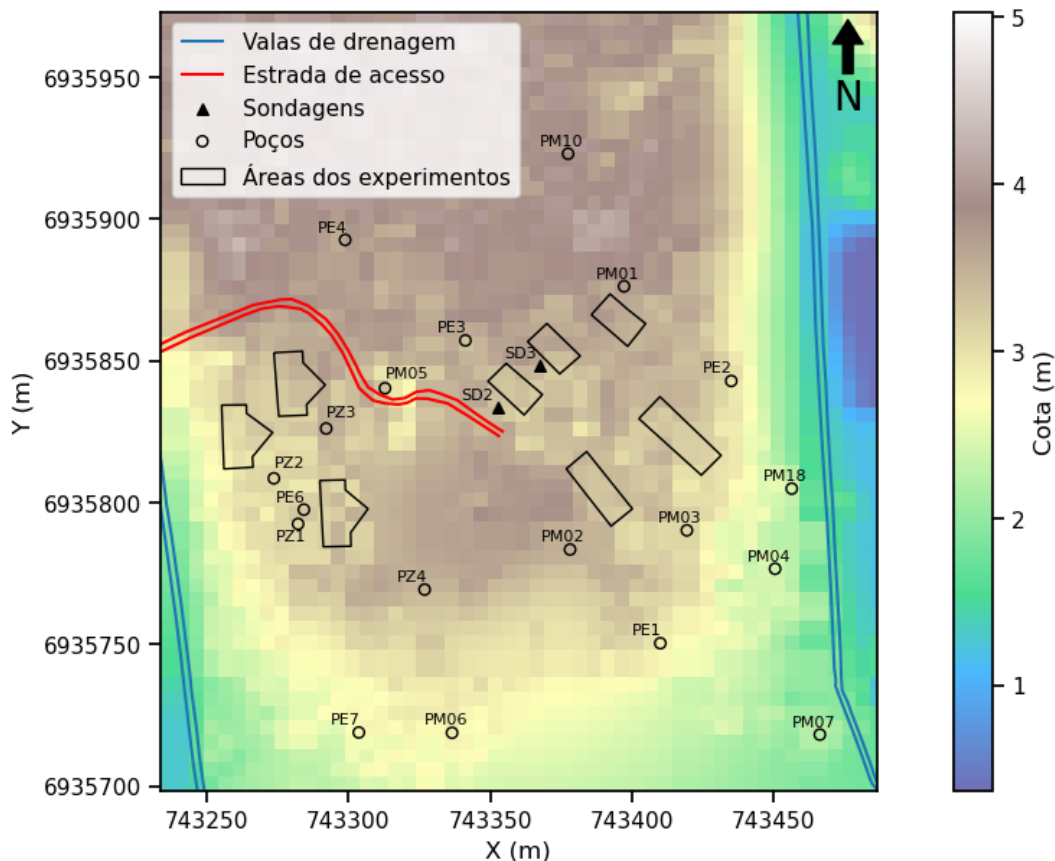


Tabela 1 - Localização (coordenadas UTM; datum: SAD-69 - EPSG: 29192) dos poços e sondagens com caracterizações da condutividade hidráulica (K)

Identificação	x (m)	y (m)
SD2	743352,76	6935833,49
SD3	743367,73	6935848,14
PE1	743410,02	6935750,37
PE2	743435,04	6935842,92
PE3	743341,24	6935857,20
PE4	743298,83	6935892,69
PE6	743284,26	6935797,51
PE7	743303,65	6935718,90
PM01	743397,22	6935876,31
PM02	743378,17	6935783,44
PM03	743419,38	6935790,21
PM04	743450,50	6935776,66
PM05	743312,88	6935840,34
PM06	743336,54	6935718,78
PM07	743466,30	6935718,14
PM10	743377,47	6935923,08
PM18	743456,38	6935804,92
PZ1	743282,21	6935792,47
PZ2	743273,68	6935808,56
PZ3	743292,13	6935826,13
PZ4	743326,85	6935769,32

Tabela 2 - Poços em que os slug tests foram realizados, com profundidades inicial (Zi) e final (Zf) das seções filtrantes, a partir da superfície, e seus comprimentos (L)

Poço	Zi (m)	Zf (m)	L (m)
PE1	2,50	4,50	2,00
PE2	2,50	4,50	2,00
PE3	2,50	4,50	2,00
PE4	12,00	14,00	2,00
PE6	21,00	31,00	10,00
PE7	11,00	13,00	2,00
PM01	2,50	4,50	2,00
PM02	2,50	4,50	2,00
PM03	2,50	4,50	2,00
PM04	2,50	4,50	2,00
PM05	2,50	4,50	2,00
PM06	2,00	4,00	2,00
PM07	1,00	3,00	2,00
PM10	1,00	3,00	2,00
PM18	1,00	3,00	2,00
PZ1	10,00	15,00	5,00
PZ2	5,00	10,00	5,00
PZ3	5,00	10,00	5,00
PZ4	10,00	15,00	5,00

Fonte: Rama (2019)

Os dados compilados foram investigados e analisados através de estatísticas descritivas e ferramentas gráficas como histogramas, gráficos de dispersão e gráficos de perfil vertical das propriedades. Estudos em diferentes localidades já demonstraram que K geralmente apresenta uma distribuição de probabilidades log-normal (DASSARGUES, 2018). Dessa forma, os valores das caracterizações foram analisados sem transformação (K) e com transformação para o logaritmo natural ($\ln K$).

A heterogeneidade de K é frequentemente analisada em função da variância de $\ln K$ ($\sigma^2_{\ln K}$) (FOGG; ZHANG, 2016). Segundo a literatura, para valores de $\sigma^2_{\ln K} \approx 2$ um aquífero já é considerado moderadamente heterogêneo, e o modelo conceitual de um volume macroscópico homogêneo equivalente já começa a divergir do comportamento real (pluma Gaussiana) do espalhamento de solutos (BOHLING *et al.*, 2012; FIORI; CVETKOVIC *et al.*, 2016).

A hipótese de normalidade para distribuição dos dados foi explorada a partir das estatísticas descritivas (assimetria e curtose) e de gráficos do tipo quantil-quantil (gráfico QQ). Esses são gráficos cartesianos cujos pontos representam os quantis de mesma ordem obtidos das distribuições amostral (empírica) e teórica; se os dados amostrais forem compatíveis com o modelo probabilístico proposto (nesse caso o normal), esses pontos devem estar sobre uma reta com inclinação unitária quando os quantis forem padronizados (MORETTIN; SINGER, 2022). O método de Shapiro-Wilk foi escolhido para validação da hipótese de normalidade para a distribuição dos dados, por ser considerado um dos mais poderosos testes estatísticos de normalidade de amostras (RAZALI; YAP, 2011). O nível de significância adotado previamente aos testes foi $\alpha = 5\%$.

Para as amostras retiradas das sondagens SD2 e SD3 foram realizadas análises bivariadas entre K e o teor de finos medidos, através de gráfico de dispersão e coeficientes de

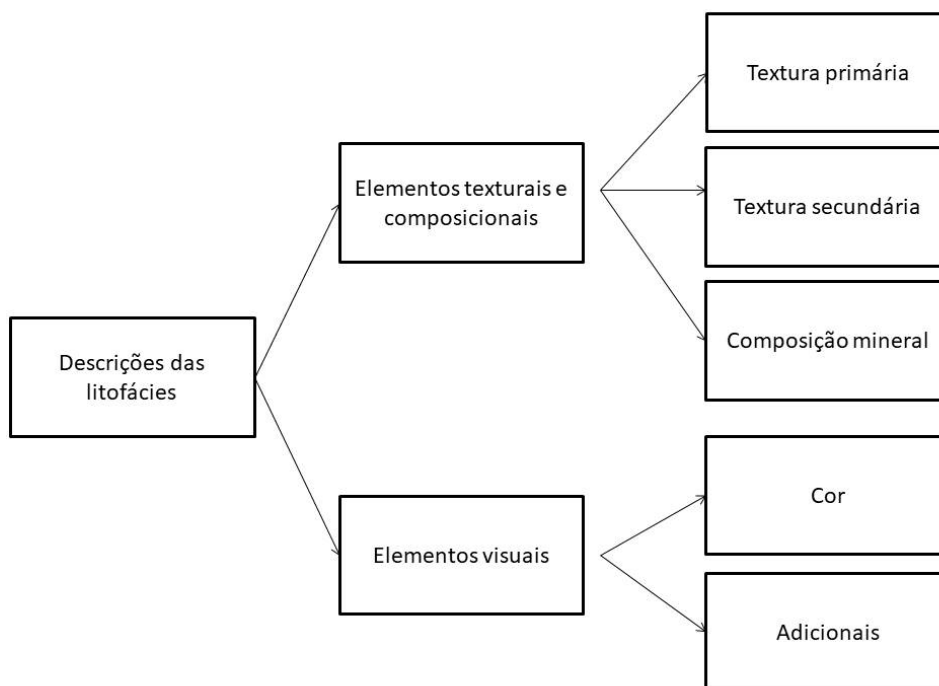
correlação. Os coeficientes utilizados foram o de Pearson, mais indicado para relações lineares, e o de Spearman, mais indicado para relações não-lineares (MORETTIN; SINGER, 2022).

Para todas as sondagens realizadas, inclusive no mesmo ponto de instalação dos poços e piezômetros em que foram realizados os ensaios de campo, foram disponibilizadas as descrições das litofácies identificadas, fornecidas pelos técnicos responsáveis pelas investigações (LAGE, 2005). Com o objetivo de analisar essas descrições fornecidas, assim como possibilitar analisar relações entre elementos destas descrições com as caracterizações do meio poroso, foi realizada uma avaliação das descrições com relação a identificar estruturas no texto, e posteriormente o processamento desses textos descritivos para padronizar termos semelhantes. A estrutura identificada está apresentada na **Figura 3**.

Elementos texturais e composicionais referem-se à descrição da textura e composição dos sedimentos para as litofácies identificadas nas sondagens em campo. Essa primeira componente foi dividida em descrição de textura primária, secundária e de composição mineral. A textura primária envolve a principal descrição textural dos sedimentos, como areia, podendo ser fina ou muito fina, ou argila. A secundária envolve a outra classe textural identificada nos sedimentos, por exemplo, para uma textura primária de areia fina pode estar associada à textura secundária argilosa ou pouco argilosa.

A descrição de composição mineral identificada é referência a litofácies descritas como quartzosas. Já elementos visuais referem-se a características de cor, incluindo tanto a matiz (e.g. rosa, marrom, cinza, ...) como tonalidade (claro, escuro) ou presença de outros materiais (ou características) nos sedimentos, como matéria orgânica, raízes, ou traços alaranjados nos sedimentos.

Figura 3 - Diagrama da estrutura identificada nas descrições de litofácies das sondagens



4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 3 apresenta as estatísticas descritivas para as campanhas de *slug tests* e para as medições realizadas pelo permo-porosímetro. Para os *slug tests* foi encontrada uma média de K de $3,7 \times 10^{-3}$ (cm.s⁻¹), com valor mínimo de 7×10^{-5} (cm.s⁻¹) e máximo de $3,3 \times 10^{-2}$ (cm.s⁻¹), uma amplitude considerável de 3 ordens de magnitude. Observa-se que a distribuição dos valores de K apresenta valores altos de assimetria e curtose e, portanto, os dados desviam significativamente da distribuição normal.

Tabela 3 - Estatística descritiva para os valores de K e de lnK caracterizados pelos *slug tests* e permo-porosímetro

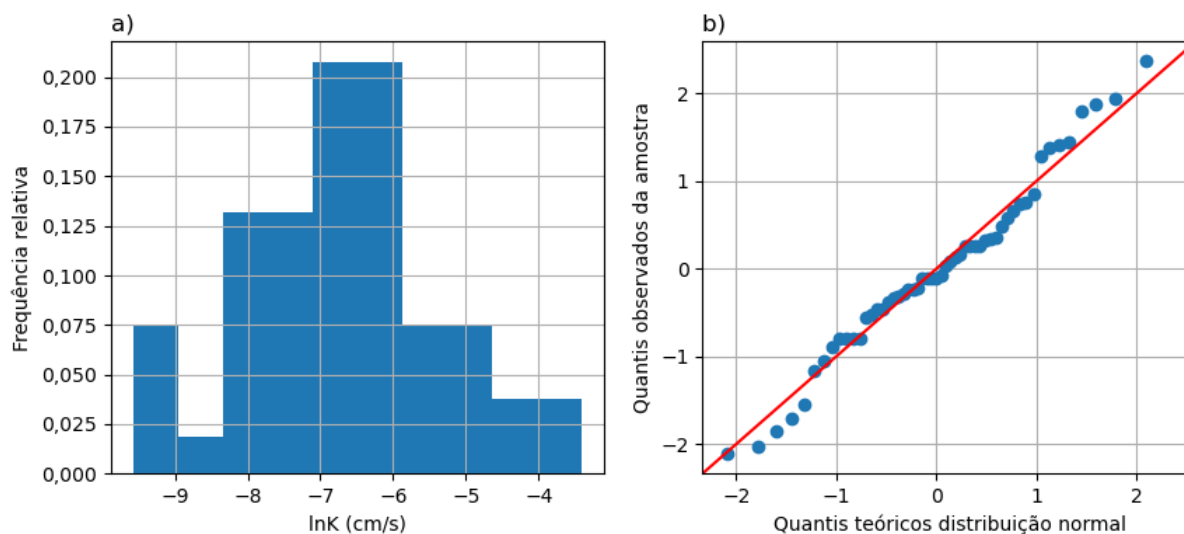
	K x 10 ⁻³ (cm.s ⁻¹)		lnK	
	Slug test	Permo-porosímetro	Slug test	Permo-porosímetro
N	44	31	44	31
μ	3,70	5,30	-6,61	-5,28
Q1	0,65	4,22	-7,33	-5,47
M	1,25	4,84	-6,69	-5,33
Q3	3,26	6,63	-5,73	-5,02
σ	6,30	1,56	1,48	0,31
σ²	39,73	2,42	2,20	0,09
CV	1,70	0,29	-0,22	-0,06
Mín	0,07	2,20	-9,58	-6,12
Máx	33,00	8,33	-3,41	-4,79
Ass	714,76	1,04	0,09	-0,01
Curt	18839,34	12,30	12,31	0,03

N: nº de observações, μ: média, Q1: 1º quartil, M: mediana, Q3: 3º quartil, σ: desvio padrão, σ²: variância, CV: coeficiente de variação, Mín: mínimo, Máx: máximo, Ass: assimetria, Curt: curtose, K: condutividade hidráulica.

Dessa forma, as posteriores análises para os valores dos *slug tests* foram realizadas a partir dos dados transformados para lnK. A **Figura 4** mostra o histograma e o gráfico QQ desses valores. A média encontrada foi de -6,61 e variância de 2,20, com valor mínimo de -9,58 e máximo de 3,41. Observa-se,

tanto pelos valores de assimetria e curtose como pelos gráficos, que a distribuição dos valores aproxima-se bastante da normal, e o teste de Shapiro-Wilk não apontou diferença estatística significativa entre essa distribuição e a distribuição normal (p-valor = 0,65).

Figura 4 - (a) Histograma com valores de $\ln K$ para as campanhas de slug tests; (b) gráfico quantil-quantil em relação à distribuição normal



A variância de $\ln K$ encontrada para os *slug tests* na área experimental da Ressacada ($\sigma^2_{\ln K} = 2,2$) é semelhante à encontrada a partir do mesmo método para o aquífero de Cape Cod (2,25), um aquífero arenoso que também apresentou plumas de traçadores com variações espaciais complexas e que é geralmente classificado como de heterogeneidade baixa (LEBLANC *et al.*, 1991). Essa variância também é próxima da encontrada para o aquífero de Columbus (experimento MADE), tradicionalmente considerado um aquífero heterogêneo, com dados de testes slug com $\sigma^2_{\ln K} = 1,8$ (REHFELDT; BOGGS; GELHAR, 1992). Rehfeldt, Boggs e Gelhar (1992) apontaram, no entanto, que, em comparação com outros testes realizados na área, essa variância é uma anomalia provavelmente causada pelo curto período de duração dos testes (menos de 5 minutos), amostrando apenas a região próxima ao piezômetro que pode ter sofrido deformações nos sedimentos na instalação dos piezômetros, e promovendo uma maior homogeneização no perfil amostrado.

A **Figura 5** apresenta um gráfico desses valores em relação a cada poço em que foram realizados os ensaios, assim como a média de cada. Houve variações significativas tanto entre

campanhas como também entre poços, como demonstra a média de cada poço e os valores encontrados para cada um desses.

Através da análise da estatística descritiva dos dados fornecidos pelos ensaios em laboratório com o permo-porosímetro (**Tabela 3**), observa-se que o valor médio de K é de $5,3 \times 10^{-3}$ cm.s⁻¹, e a variância encontrada é de 2,42. O valor máximo de K ($8,3 \times 10^{-3}$ cm.s⁻¹) é quase quatro vezes o valor mínimo ($2,2 \times 10^{-3}$ cm.s⁻¹). Observa-se que a assimetria e a curtose são baixas, e a distribuição dos valores sem transformação é bem próxima da normal.

Para os valores de K transformados ($\ln K$), a média é de -5,28 e variância de 0,09, e as estatísticas de assimetria e curtose indicam que é uma distribuição bem próxima da normal também. As duas distribuições (com e sem transformação) indicam semelhança com o modelo de distribuição normal, e o teste de Shapiro-Wilk não acusou diferença estatística significativa em relação à hipótese de normalidade para as duas distribuições, K (p-valor = 0,25) e $\ln K$ (p-valor = 0,28), para uma significância de 5%. A **Figura 6** apresenta o histograma e gráfico QQ dos valores de $\ln K$.

Figura 5 - Gráfico com os valores medidos de $\ln K$ através das campanhas de slug tests para os diferentes poços

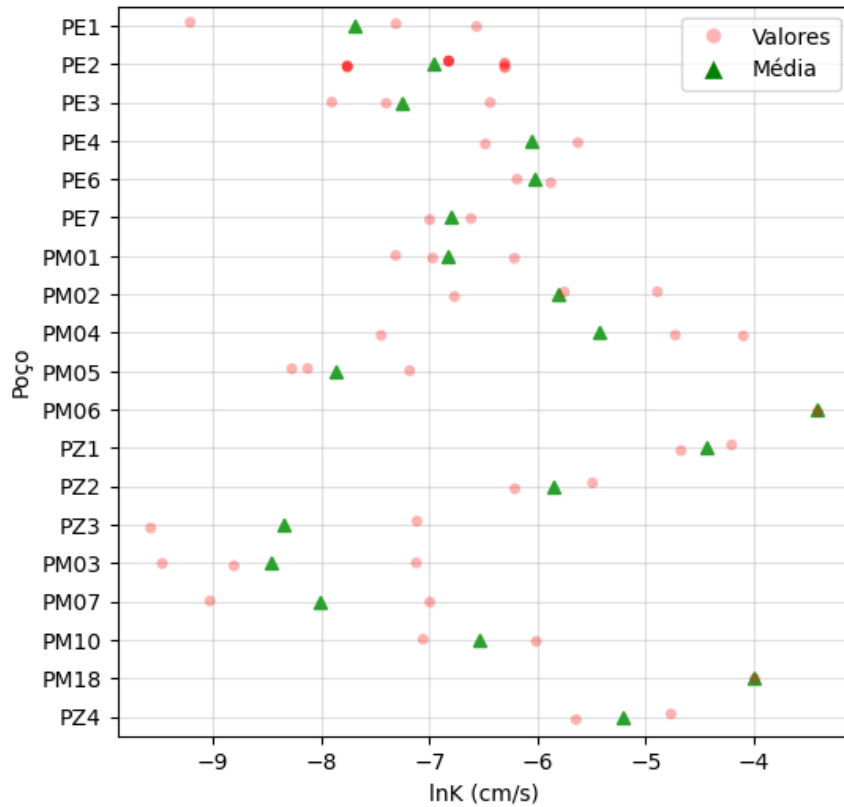
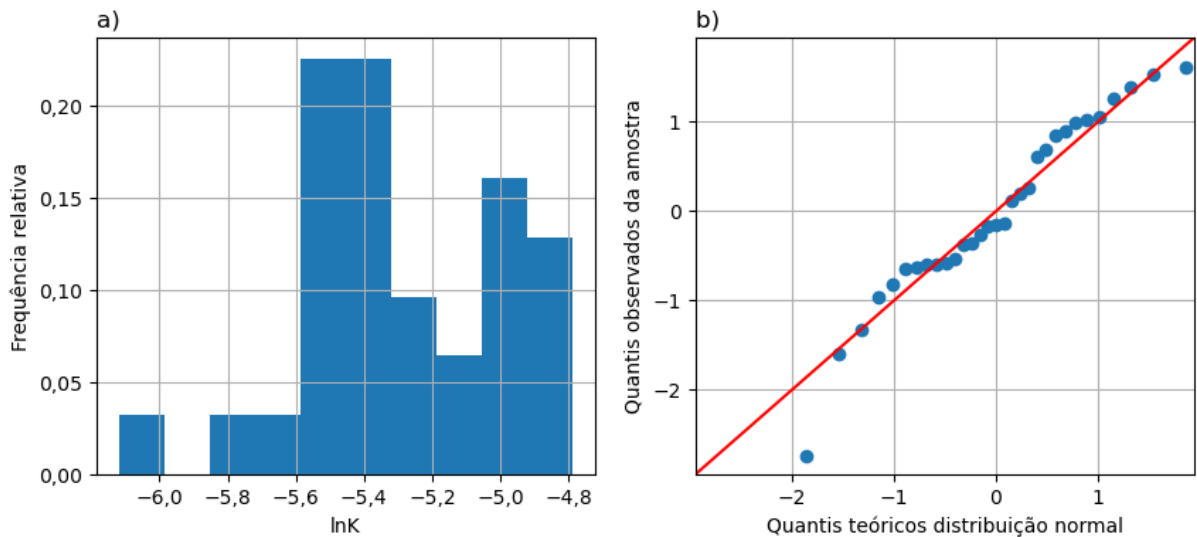


Figura 6 - (a) Histograma dos valores de $\ln K$ medidos a partir do permo-porosímetro; e (b) gráfico quantil-quantil em relação à distribuição normal



Nota-se que para as caracterizações de K a partir do permo-porosímetro tem-se uma média maior que nos dados dos *slug tests*, além de uma menor variância. Em geral é esperado que amostras em escala menor tenham em média valores menores que em escalas maiores, como no caso dessas amostras analisadas em comparação com os ensaios de campo, pois existe menor probabilidade de parcelas mais permeáveis dos sedimentos serem amostradas (ROVEY; CHERKAUER, 1995; ZLOTNIK *et al.*, 2000). No entanto, é importante ressaltar que, considerando que as medições foram obtidas a partir de amostras deformadas, essas tendem

a fornecer valores médios de K maiores que os obtidos em amostras intactas, devido à perda de estrutura da amostra (BUTLER, 2005).

Em relação à variância, em geral, assume-se que maiores volumes amostrados implicam maior homogeneização espacial das propriedades, pois variações em menor escala dos materiais afetam menos suas magnitudes, e portanto, a variância diminuiria com o aumento do suporte das medições (DAGAN, 1989). Outros autores, no entanto, ressaltam que a variância de $\ln K$ não apresenta dependência sistemática com

a escala (GELHAR, 1993), ou então que a variância aumenta em função da escala a partir de uma lei de potência (NEUMAN, 1994).

Para o aquífero de Borden, um depósito arenoso considerado na literatura como de baixa heterogeneidade, medições com permeâmetro (que têm suporte de medição semelhante ao permo-porosímetro) indicaram $\sigma^2_{\ln K} = 0,29$, e a variância aumentou com a escala de medição em uma faixa investigada de 10 m, enquanto que a média não aumentou com o suporte (SUDICKY, 1986; ROVEY; CHERKAUER, 1995).

Para o aquífero de Cape Cod foi encontrada uma variância mais próxima (0,14) para medições realizadas com permeâmetro, e os dados também indicam um aumento da variância com a escala de medição (para testes slug $\sigma^2_{\ln K} = 2,25$) (HESS; WOLF; CELIA, 1992). Neste caso, entretanto, as medições em menor escala foram obtidas em um transecto de 45 m, enquanto que as medições com *slug tests* em uma área de 30 km². Isso significa que uma amostragem espacial muito maior para os últimos resultou em uma variância maior do que para as medições em menor escala.

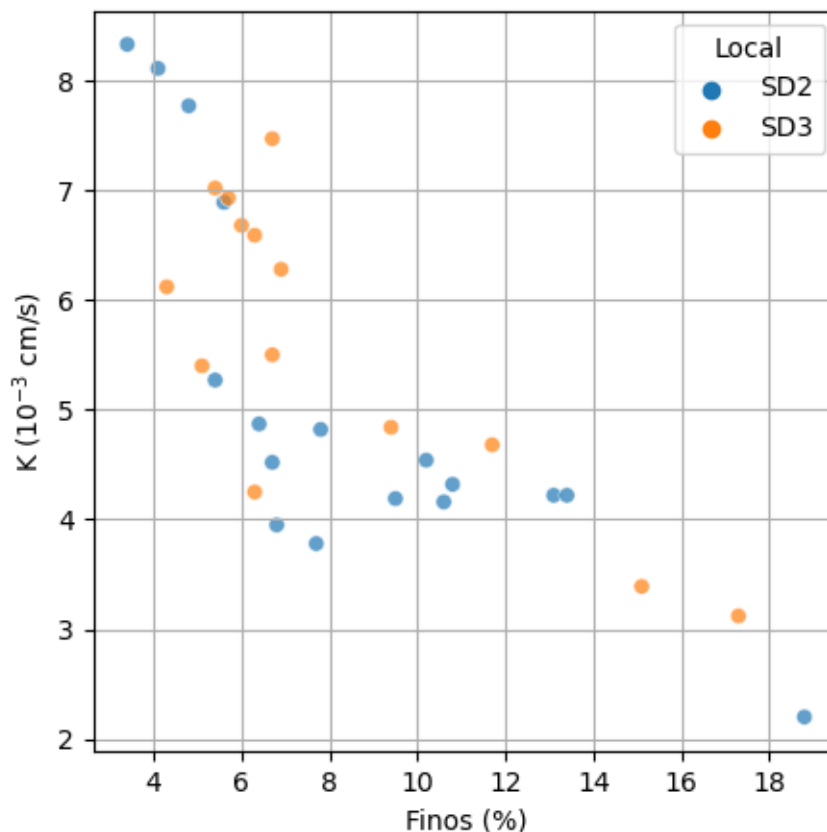
No caso das caracterizações analisadas nesse trabalho, esse também provavelmente é o caso, pois os dados do permo-porosímetro foram obtidos a partir de amostras em apenas duas sondagens em uma profundidade de no máximo 5 m, com distância entre as duas de 21 m, o que aumenta a probabilidade de correlação entre os valores e, portanto, redução da variância.

Os *slug tests* cobriram uma região maior tanto na horizontal, com uma área de até 30.000 m², como na vertical, com seções filtrantes englobando quase toda a profundidade do aquífero. Em Columbus, as heterogeneidades do aquífero local resultaram em valores de K obtidos através de medições com permeâmetro com $\sigma^2_{\ln K}$ igual a 5,5, e uma variância diminuindo com o aumento da escala de medição (REHFELDT; BOGGS; GELHAR, 1992).

A **Figura 7** mostra o gráfico de dispersão entre o teor de finos e K para as amostras retiradas das sondagens. Nota-se que há uma associação significativa entre essas duas propriedades, inversa e não linear. Observa-se que existem faixas de teores de finos que implicam comportamentos diferentes na variação de K.

Para baixos teores de finos (de 3% a 7%), K varia linearmente até metade de sua magnitude, de aproximadamente $8 \cdot 10^{-3}$ cm.s⁻¹ para $4 \cdot 10^{-3}$ cm.s⁻¹. Entre 7% e 14% os valores de K mantêm-se constantes nessa faixa, e para teores de 14% de finos para mais a magnitude de K volta a decair linearmente, reduzindo pela metade novamente ($2 \cdot 10^{-3}$ cm.s⁻¹) para os teores máximos de finos para as amostras, de aproximadamente 19%. O coeficiente de correlação de Pearson entre as duas variáveis é de -0,78, e o de Spearman, -0,82.

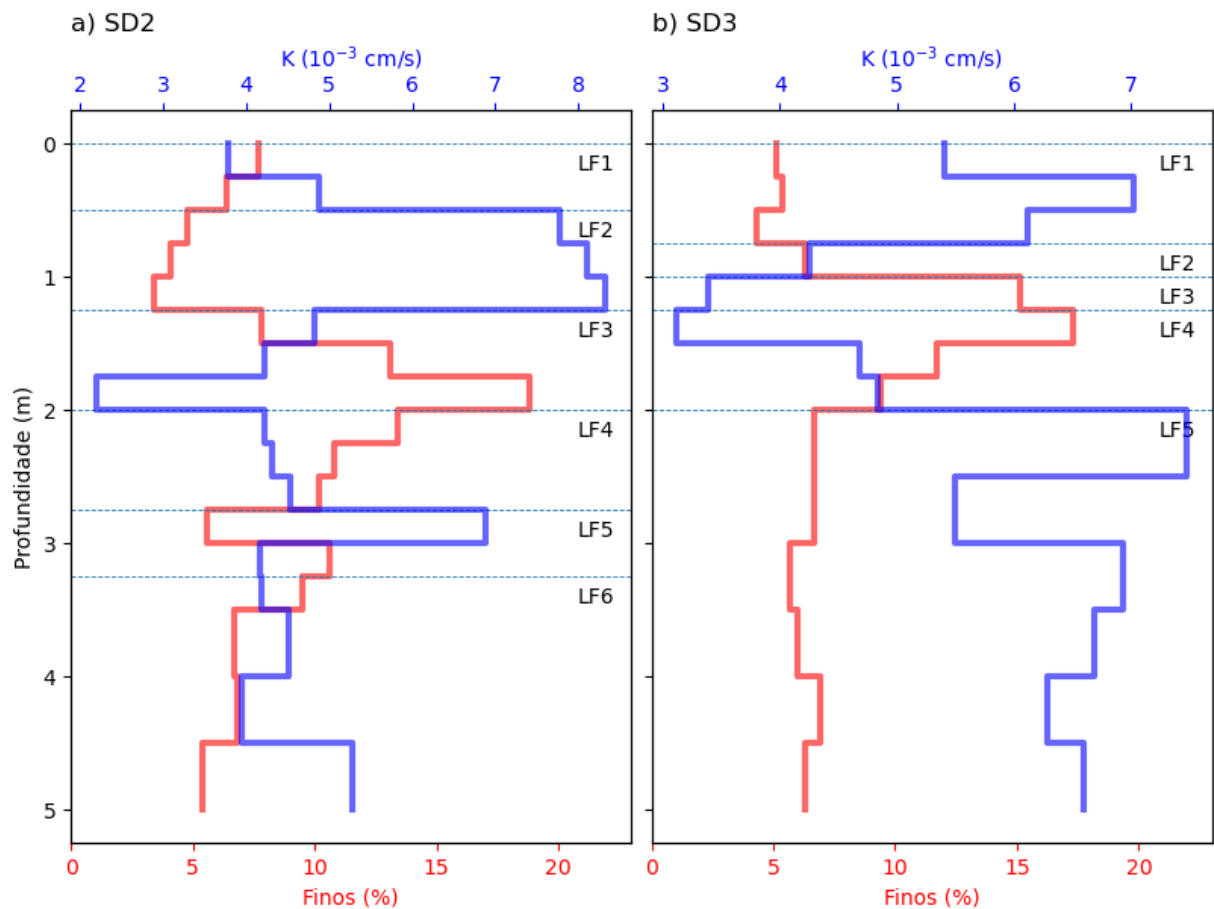
Figura 7 - Gráfico de dispersão da relação entre o teor de finos e K para as amostras



Na **Figura 8** é possível visualizar o perfil vertical para as duas propriedades. Nota-se como a variação da granulometria fina afeta inversamente a condutividade. Os limites entre as litofácies identificadas nas sondagens, em função da profundidade, também foram incluídos nos gráficos, de forma a avaliar relação entre essas propriedades e as camadas sedimentares presentes no aquífero. Os perfis de profundidade para as duas propriedades indicam que grandes variações dessas propriedades ocorrem exatamente na transição entre fácies.

Dessa forma, caracterizar a heterogeneidade local a partir do conceito de hidrofácies torna-se plausível. Hidrofácies são litofácies de ambientes sedimentares com propriedades hidrogeológicas relativamente homogêneas. Allen-King *et al.* (1998) também observou uma variação semelhante utilizando amostras de K em escala menor que a espessura das fácies para o aquífero de Borden, e concluiu que a representação das heterogeneidades locais pelo conceito de hidrofácies seria viável tanto para K como para o coeficiente de sorção.

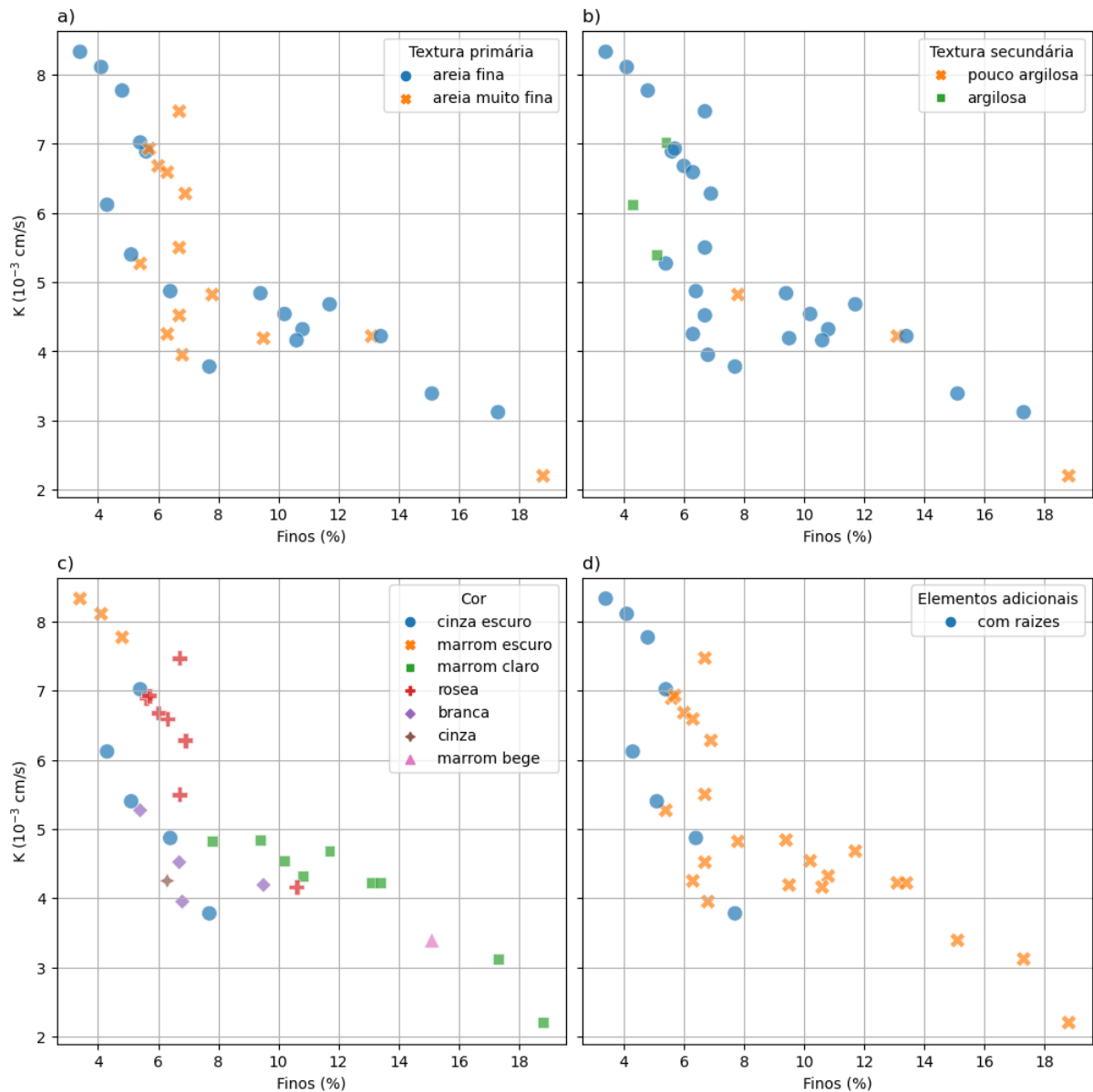
Figura 8 - Perfil de profundidade para o teor de finos (%) e valores de K para as amostras das sondagens SD2 e SD3



A **Figura 9** apresenta a relação entre K e finos, com adição da dimensão de cada elemento descritivo identificado para as litofácies, de acordo com os grupos descritivos identificados na **Figura 2**. Observa-se que amostras retiradas de fácies descritas como areia muito fina têm uma pequena tendência a terem maiores valores de finos e menores valores de K. Em

relação à textura secundária, amostras em fácies descritas como argilosa não apresentaram teor alto de finos, como seria o esperado, mas sim o contrário, enquanto que as em fácies descritas como pouco argilosas apresentam tendência a teor maior de finos e magnitudes menores de K.

Figura 9 - Relação entre teor de finos, condutividade hidráulica, e elementos descritivos das litofácies associadas as amostras retiradas das sondagens SD2 e SD3: (a) textura primária; (b) textura secundária; (c) cor; (d) elementos adicionais

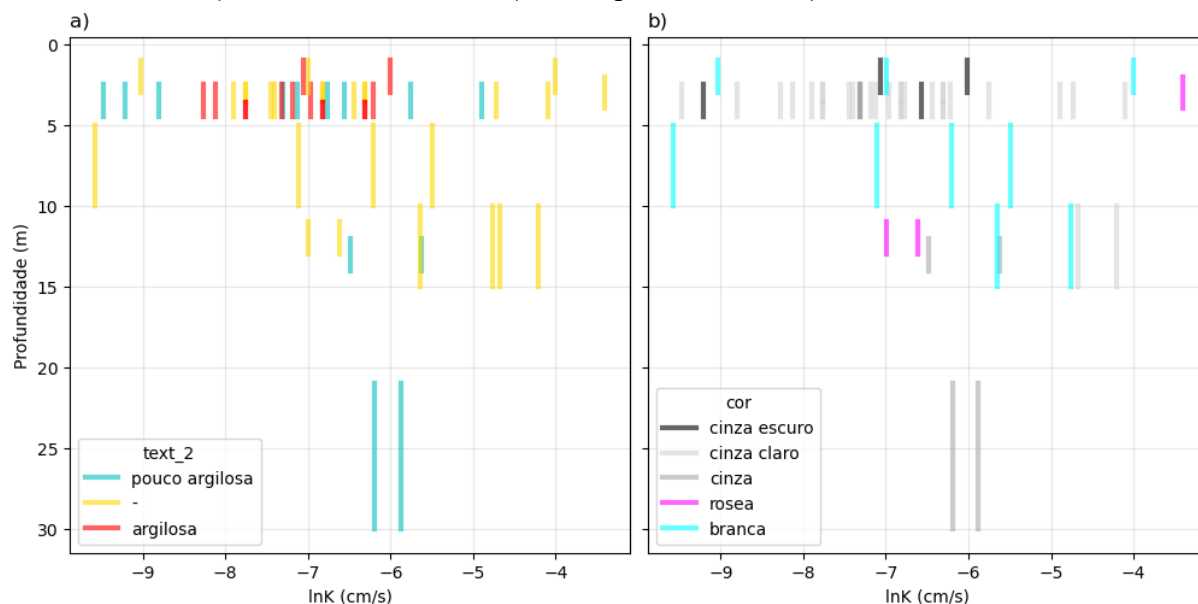


Para as cores descritas, observa-se associações entre as diferentes cores e a relação entre as propriedades. A cor marrom-escuro está associada às amostras com baixo teor de finos e alta condutividade. Fácies de cor cinza escuro estão associadas a amostras com baixo teor de finos, mas com uma variação considerável em K , semelhante à existente para amostras de sedimentos de cor rósea, que em geral têm uma leve tendência a maior teor de finos. Fácies descritas como marrom claro e marrom bege estão associadas às amostras com maiores teores de finos e menores magnitudes de K . Em relação aos elementos adicionais presentes nas litofácies, as que incluíram presença de raízes estão associadas às que foram descritas como cinza escuro ou marrom escuro e, portanto, apresentam amostras com baixo teor de finos (até 8%). No entanto, a diferença entre o valor mínimo e máximo de K para essas amostras é de até duas vezes.

Os *slug tests* também tiveram os intervalos de profundidade amostrados, as seções filtrantes dos poços em que foram realizados, associados às litofácies e a seus elementos descritivos.

A **Figura 10** apresenta o perfil vertical em profundidade dos valores de $\ln K$ para todos os testes interpretados pelo método de Bouwer e Rice (1976), e categorizados em função da textura secundária e da cor. Verifica-se que fácies descritas como argilosas ou pouco argilosas tendem a menores valores de condutividade hidráulica, e estão muitas vezes associadas a fácies de cor cinza, podendo ser claro ou escuro. Observam-se alguns valores muito baixos de K para fácies descritas como de cor branca, mesmo que essas não foram descritas como argilosas (ou pouco argilosas). A cor rósea está associada a valores médios a maiores de $\ln K$.

Figura 10 - Perfil vertical em profundidade dos valores de lnK para os slug tests discriminados pelos elementos descritivos das fácies



5. CONCLUSÕES

A análise exploratória realizada indica que o aquífero na área investigada da Fazenda da Ressacada, conceitualizado tradicionalmente como homogêneo, apresenta uma variabilidade associada a aquíferos extensivamente estudados que foram considerados de baixa heterogeneidade em relação à condutividade hidráulica.

Em relação às caracterizações, medições realizadas em escalas menores (ensaios em laboratório) apresentaram menor média e variância que as conduzidas em escala maior (ensaios em campo). Entretanto, não é possível extrair muitas conclusões desses resultados específicos, pois existem incertezas em relação à representatividade das amostras coletadas que foram deformadas para ensaio em laboratório à menor cobertura espacial dessa amostragem em relação aos ensaios em campo, assim como das metodologias de execução dos ensaios.

A variação da condutividade hidráulica e de propriedades correlacionadas, como o teor de finos, mostrou-se bastante associada às fácies sedimentares identificadas nos locais em que as caracterizações foram realizadas. Isso indica a necessidade de representação da heterogeneidade a partir da incorporação dessas informações geológicas. Considerando uma variação que envolve três ordens de magnitude para os valores de K encontrados nos ensaios em campo, podem ocorrer velocidades muito discrepantes em diferentes camadas do aquífero, o que pode ter efeitos significantes na dispersão de contaminantes dissolvidos, dependendo da estrutura espacial de conectividade dessas camadas.

Essa variabilidade ocorre na vertical, enquanto que os modelos produzidos na área são bidimensionais e admitem variação apenas na horizontal (CORSEUIL; SCHNEIDER *et al.*, 2006). Isso demonstra que a estrutura tridimensional de aquíferos deve sempre ser levada em consideração no modelo conceitual de aquíferos, principalmente para problemas de

contaminação de águas subterrâneas, mesmo em locais tradicionalmente caracterizados como homogêneos.

REFERÊNCIAS

- ALLEN-KING, R. M. *et al.* Characterizing the heterogeneity and correlation of perchloroethene sorption and hydraulic conductivity using a facies-based approach. *Water Resources Research*, v. 34, n. 3, p. 385–396, 1998. <https://doi.org/10.1029/97WR03496>
- BIELSCHOWSKY, C. *Aplicação e comparação de métodos de campo para estimativa da condutividade hidráulica do solo*. 2005. Monografia de Graduação em Geologia - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Rio de Janeiro.
- BOHLING, G. C. *et al.* Geostatistical analysis of centimeter-scale hydraulic conductivity variations at the MADE site. *Water Resources Research*, v. 48, n. 2, 2012. <https://doi.org/10.1029/2011WRO10791>
- BOUWER, H.; RICE, R. C. A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. *Water Resources Research*, v. 12, n. 3, p. 423–428, 1976. <https://doi.org/10.1029/WRO12i003p00423>
- BUTLER, James J. Hydrogeological Methods for Estimation of Spatial Variations in Hydraulic Conductivity. In: *Hydrogeophysics*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2005. p. 23–58. https://doi.org/10.1007/1-4020-3102-5_2
- CORSEUIL, H. X.; SCHNEIDER, M. R. *et al.* Solução Corretiva baseada no Risco (SCBR): Modelo Matemático de Tomada de Decisão para o Gerenciamento Ambiental de Águas Subterrâneas Contaminadas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 14., 2006, Curitiba. *Anais [...]*. São Paulo, 2006. <https://doi.org/10.1021/es104055q>
- CORSEUIL, H. X.; MONIER, A. L. *et al.* BTEX Plume Dynamics Following an Ethanol Blend Release: Geochemical Footprint and Thermodynamic Constraints on Natural Attenuation.

- Environmental Science & Technology*, v. 45, n. 8, p. 3422–3429, 2011.
- CUPERTINO, D. F. *Caracterização de propriedades do meio poroso em solo arenoso através do permo-porosímetro a gás*. 2005. Monografia de Graduação em Geologia - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Rio de Janeiro.
- DAGAN, G. *Flow and Transport in Porous Formations*. Springer-Verlag, 1989. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-75015-1>
- DEVLIN, J. F. *Groundwater Velocity*. Guelph, Ontario: The Groundwater Project, 2020. 64 p. <https://doi.org/10.21083/978-1-77470-000-6>
- FETTER, C.W.; BOVING, T.; KREAMER, D. *Contaminant Hydrogeology*. Waveland Press, 2017.
- FIORI, A.; DAGAN, G. *et al.* The plume spreading in the MADE transport experiment: Could it be predicted by stochastic models? *Water Resources Research*, v. 49, n. 5, p. 2497–2507, 2013. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20128>
- FOGG, G. E.; ZHANG, Y. Debates—Stochastic subsurface hydrology from theory to practice: A geologic perspective. *Water Resources Research*, v. 52, n. 12, p. 9235–9245, 2016. <https://doi.org/10.1002/2016WR019699>
- FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. *Groundwater*. Prentice-Hall, 1979.
- GELHAR, L. W. *Stochastic subsurface hydrology*. Prentice-Hall, 1993.
- GUO, Z. *et al.* Contaminant transport in heterogeneous aquifers: A critical review of mechanisms and numerical methods of non-Fickian dispersion. *Science China Earth Sciences*, n. 64, p. 1224–1241, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9755-y>
- HESS, K. M.; WOLF, S. H.; CELIA, M. A. Large-scale natural gradient tracer test in sand and gravel, Cape Cod, Massachusetts: 3. Hydraulic conductivity variability and calculated macrodispersivities. *Water Resources Research*, v. 28, n. 8, p. 2011–2027, 1992. <https://doi.org/10.1029/92WR00668>
- HVORSLEV, M.J. *Time Lag and Soil Permeability in Ground-water Observations*. Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, U.S. Army, 1951. (Bulletin Waterways Experiment Station U.S.).
- KOLTERMANN, C. E.; GORELICK, S. M. Heterogeneity in Sedimentar Deposits: Review of Structure-Imitating, Process-Imitating, and Descriptive Approaches. *Water Resources Research*, v. 32, n. 9, p. 2617–2658, 1996. <https://doi.org/10.1029/96WR00025>
- LAGE, I. C. *Determinação da permeabilidade em diagnósticos geoambientais: a área experimental da Fazenda Ressacada, SC*. 2005. Dissertação de Mestrado em Geologia - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- LANGE, W. J. Advective Transport Phenomena to Better Understand Dispersion in Field and Modeling Practice. *Groundwater*, v. 58, n. 1, p. 46–55, 2020. <https://doi.org/10.1111/gwat.12883>
- LEBLANC, D. R. *et al.* Large-scale natural gradient tracer test in sand and gravel, Cape Cod, Massachusetts: 1. Experimental design and observed tracer movement. *Water Resources Research*, v. 27, n. 5, p. 895–910, 1991. <https://doi.org/10.1029/91WR00241>
- MAXWELL, R.; CARLE, S.; TOMPSON, A. Contamination, risk, and heterogeneity: On the effectiveness of aquifer remediation. *Environmental Geology*, v. 54, p. 1771–1786, jun. 2008. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0955-8>
- MOLZ, F. Advection, Dispersion, and Confusion. *Groundwater*, v. 53, n. 3, p. 348–353, 2015. <https://doi.org/10.1111/gwat.12338>
- MORETTIN, P. A.; SINGER, J. M. *Estatística e ciência de dados*. Rio de Janeiro: LTC, 2022. 454 p.
- MÜLLER, J. B. *Bioestimulação combinada de ferro e sulfatorredução utilizando óxidos de ferro recuperados do tratamento da drenagem ácida de mina e acetato de amônio em águas subterrâneas impactadas com diesel B20*. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis.
- NICHOLS, G. *Sedimentology and stratigraphy*. Wiley, 2009. 419 p.
- NEUMAN, S. P. Generalized scaling of permeabilities: Validation and effect of support scale. *Geophysical Research Letters*, v. 21, n. 5, p. 349–352, 1994. <https://doi.org/10.1029/94GL00308>
- PAYNE, F.C.; QUINNAN, J.A.; POTTER, S.T. *Remediation hydraulics*. CRC Press, 2008. <https://doi.org/10.1201/9781420006841>
- RAMA, F. *Modelo conceitual da hidrodinâmica do transporte de gasolina e etanol em um aquífero costeiro raso*. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis.
- RAMOS, D. T. *et al.* Biostimulation of anaerobic BTEX biodegradation under fermentative methanogenic conditions at source-zone groundwater contaminated with a biodiesel blend (B20). *Biodegradation*, v. 24, p. 333–341, 2013. <https://doi.org/10.1007/s10532-012-9589-y>
- RAZALI, M. N.; YAP, B. Power Comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling Tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, v. 2, jan. 2011.
- REHFELDT, K. R.; BOGGS, J. M.; GELHAR, L. W. Field study of dispersion in a heterogeneous aquifer: 3. Geostatistical analysis of hydraulic conductivity. *Water Resources Research*, v. 28, n. 12, p. 3309–3324, 1992. <https://doi.org/10.1029/92WR01758>
- REN, W. *et al.* Evaluating the Effects of Multiscale Heterogeneous Sediments on Solute Mixing and Effective Dispersion. *Water Resources Research*, v. 58, n. 9, 2022. <https://doi.org/10.1029/2021WR031886>
- ROVEY, C. W.; CHERKAUER, D. S. Scale Dependency of Hydraulic Conductivity Measurements. *Groundwater*, v. 33, n. 5, p. 769–780, 1995. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1995.tb00023.x>

SALAMON, P.; FERNÁNDEZ-GARCIA, D.; GÓMEZ-HERNÁNDEZ, J. J. Modeling tracer transport at the MADE site: The importance of heterogeneity. *Water Resources Research*, v. 43, n. 8, 2007. <https://doi.org/10.1029/2006WR005522>

SUDICKY, E. A. A natural gradient experiment on solute transport in a sand aquifer: Spatial variability of hydraulic conductivity and its role in the dispersion process. *Water Resources Research*, v. 22, n. 13, p. 2069–2082, 1986. <https://doi.org/10.1029/WR022i013p02069>

SUDICKY, E. A.; ILLMAN, W. A. Lessons Learned from a Suite of CFB Borden Experiments. *Groundwater*, v. 49, n. 5, p. 630–648, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2011.00843.x>

ZLOTNIK, V. *et al.* Support volume and scale effect in hydraulic conductivity: Experimental aspects. In: Theory, modeling, and field investigation in hydrogeology. *Geologic Society of America*, v. 348, p. 215–231, jan. 2000. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2348-5.215>