

SIMULAÇÃO GEOESTATÍSTICA APLICADA À AVALIAÇÃO DAS VARIAÇÕES DO NÍVEL POTENCIOMÉTRICO EM UM AQUÍFERO LIVRE: UMA ABORDAGEM POSSÍVEL PARA GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS

Helano Regis da Nóbrega Fonteles 

Agência Nacional de Mineração (ANM). E-mail: helano.fonteles@anm.gov.br

Resumo: A gestão dos recursos hídricos, especialmente dos subterrâneos, configura uma tarefa complexa que demanda rigor metodológico e clareza analítica. Esse desafio se intensifica diante da atual emergência climática, caracterizada por eventos de alta intensidade e pela imprevisibilidade. Nesse contexto, destacam-se os métodos geomatemáticos de estimação e simulação, com ênfase no modelamento geoestatístico aplicado aos fenômenos naturais. No presente estudo, foram analisados dados de nível potenciométrico estimados por cokrigagem em uma área de 44 km², abrangendo o setor nordeste da cidade de Fortaleza, Ceará. A análise foi conduzida por meio da Simulação Sequencial Direta (SSD), um método geoestatístico que possibilita a geração de cenários estocásticos para a variável cota potenciométrica no aquífero sedimentar livre (ou predominantemente livre). Esse sistema aquífero está litoestratigraficamente representado pelas dunas, paleodunas e sedimentos areno-argilosos do Grupo Barreiras. A partir da realização de 100 simulações, os resultados foram submetidos a um pós-processamento estatístico, permitindo a construção de cenários baseados nos quartis Q_{25} , Q_{50} e Q_{75} , bem como na análise de valores extremos (mínimos e máximos) das cotas potenciométricas. Esses cenários indicam a existência de setores na área de estudo com cotas potenciométricas relativamente elevadas ou reduzidas, fenômeno possivelmente associado às variações sazonais de recarga do aquífero, influenciadas pelo regime de chuvas e períodos de estiagem. Adicionalmente, a SSD viabilizou a obtenção de um mapa-imagem das incertezas espaciais, evidenciando que, no setor central da área de estudo, os valores de cota potenciométrica apresentam maior grau de imprevisibilidade. Esse comportamento está refletido na distribuição dos desvios-padrões, que se mostraram mais elevados nessa região. Atribui-se essa incerteza à possível heterogeneidade litológica em determinadas cotas da superfície potenciométrica.

Palavras-chave: Fortaleza, hidrogeologia, incerteza espacial, simulação sequencial direta

GEOSTATISTICAL SIMULATION APPLIED TO THE ASSESSMENT OF POTENTIOMETRIC LEVEL VARIATIONS IN AN UNCONFINED AQUIFER: A POSSIBLE APPROACH TO GROUNDWATER RESOURCE MANAGEMENT **Abstract:** Effective water resource management, particularly regarding groundwater systems, requires methodological rigor and analytical precision. This challenge is further intensified by the ongoing climate crisis, which is characterized by increasingly extreme hydrometeorological events and growing unpredictability. In this context, estimation and simulation techniques are essential whereas geostatistical modeling plays a crucial role in the analysis of natural phenomena. This study employs a geomathematical approach to assess potentiometric level based on pre-processed cokriging data within a 44 km² area in the northeastern sector of Fortaleza city, Northeastern Brazil. The analysis was conducted through Direct Sequential Simulation (DSS), a geostatistical method that enables the generation of stochastic realizations of the potentiometric surface in an unconfined (or predominantly unconfined) sedimentary aquifer. This aquifer system is lithostratigraphically composed of dunes, paleodunes, and sandy-clayey sediments from the Barreiras Group. A total of 100 simulations were performed, followed by statistical post-processing enabling the construction of probabilistic scenarios based on the Q_{25} , Q_{50} , and Q_{75} quartiles, as well as an assessment of extreme potentiometric values (minimum and maximum). These scenarios reveal the presence of distinct zones within the study area exhibiting relatively high or low potentiometric levels, likely influenced by seasonal variations in aquifer recharge driven by rainfall patterns and drought cycles. Furthermore, DSS method enabled the generation of a spatial uncertainty map, which highlights a central sector of the study area with a notably higher degree of unpredictability in potentiometric levels. This variability is reflected in the distribution of standard deviations, which were found to be high in this region. The observed uncertainty is presumably due to potential lithological heterogeneity affecting specific levels of the potentiometric surface.

Keywords: Fortaleza, hydrogeology, spatial uncertainty, direct sequential simulation

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o mundo de uma forma generalizada tem experienciado eventos climáticos extremos e quase imprevisíveis em diversas regiões em escala continental, inclusive. Dentre estes eventos, destacam-se picos pluviométricos que extrapolam as normais climatológicas históricas e, que provocam desastres e calamidades socioambientais tais como: enchentes urbanas, deslizamentos de massas em encostas, destruição de elementos de infraestruturas urbanas etc. Sem mencionar, os impactos diretos em populações socioeconomicamente mais frágeis, tais como escassez de água, diminuição da produção agrícola, enchentes e insegurança alimentar, exemplarmente observado por Tohan et al. (2024).

Não só as mudanças climáticas implicam a previsibilidade de variáveis climatológicas que propiciam eventos catastróficos, mas também repercutem em outros fenômenos naturais, tais como as variações espaço-temporais nos estoques de água subterrânea e os volumes de recarga e captação. Além destes aspectos, não se pode deixar de mencionar as taxas de evapotranspiração, o escoamento superficial e a disponibilidade de água superficial livre (Amanambu et al. 2020).

O delineamento de um cenário abrangente que envolvam os fatores de inter-relação entre as alterações climáticas e, como os recursos hídricos subterrâneos respondem a isto, pode ser considerada como uma tarefa complexa e desafiadora em razão da própria demanda humana por água subterrânea para realização das atividades agrícolas e de abastecimento urbano, em muitos casos (Amanambu et al. 2020).

Em razão das incertezas devidas às variáveis hidrogeológicas que tendem a aumentar devido às implicações das mudanças climáticas globais, dispor de ferramentas de gestão e de mapeamento espacial de características hidrogeológicas torna-se quase que mandatório para construção de cenários para tomadas de decisão.

Uma alternativa para incremento da gestão de recursos hídricos subterrâneos resulta da avaliação geoestatística que visa oferecer cenários mais realísticos através de modelos geomatemáticos que incorporam a variabilidade espacial do fenômeno em estudo (Matheron, 1963, 1965; Agoubi et al., 2010; Soares, 2014; Chihi et al., 2023).

Relativamente à área de estudo do presente trabalho, Vasconcelos (1999), Fonteles (2003) e Fonteles et al. (2006) realizaram avaliações geoestatísticas baseadas na análise variográfica e estimação por krigagem ordinária em áreas nos setores leste e norte-nordeste da cidade de Fortaleza. Vasconcelos (1999) apresentou um mapa potenciométrico do setor nordeste da cidade, ao considerar um semivariograma com modelo linear e a krigagem ordinária com a demonstração de que o contorno das curvas equipotenciais acompanha as curvas de nível topográfico, com indicação da direção do fluxo subterrâneo ao litoral em áreas específicas estudadas.

Fonteles (2003) e Fonteles et al. (2006) exploraram, inicialmente, a relação de dependência entre os valores de cota topográfica e de cota potenciométrica por análise de correlação. Com a determinação de um modelo de correlação linear baseada em regressão por mínimos quadrados, os referidos autores se utilizaram de ferramentas de modelamento de semivariogramas cruzados - validados pelo modelo de correção linear e, por fim, a interpolação por krigagem ordinária e cokrigagem (Wackernagel, 1998; Soares, 2014). Segundo Fonteles (2003) e Agoubi et al. (2010), a utilização dessa sequência de análise é justificada quando uma variável não é amostrada suficientemente e, por esta razão, as estimativas podem apresentar alguma imprecisão. A precisão da estimativa desta variável subamostrada - primária, neste caso a cota potenciométrica, pode ser melhorada considerando a correlação espacial entre essa variável e outra mais bem amostrada - secundária, ou seja, a cota topográfica do terreno (Sturaro, 1994).

Rocha et al. (2009) aplicaram a krigagem com modelo de deriva para o cálculo de cotas potenciométricas com o objetivo de comparar os resultados deste interpolador com os da cokrigagem. Com o estimador krigagem com deriva externa, a premissa de que a variável primária deva satisfazer a hipótese de estacionaridade de segunda ordem para variância especial não é necessária. A análise variográfica será realizada sobre os resíduos entre as variáveis primária e secundária. Porém, deverá subsistir a condição de dependência linear entre elas (como ocorre com a utilização da cokrigagem). Os autores mostraram que os resultados alcançados com o uso da krigagem com deriva externa aperfeiçoada pela correção do efeito de suavização foram superiores àqueles obtidos com a cokrigagem.

A utilização do estimador krigagem com deriva externa possibilitou um incremento real na estimação dos valores de cota potenciométrica, com a vantagem de a operação do estimador depender de um único variograma modelado a partir dos resíduos, após a remoção da deriva.

A correção do efeito de suavização foi decisiva para obtenção de um mapa de krigagem da

superfície potenciométrica, cujos valores estimados respeitam a amplitude original dos dados (Rocha et al., 2009).

Alternativamente, os métodos de simulação geoestatística evoluíram paralelamente aos métodos de estimação por krigagem e possuem o mesmo apelo, mas com finalidades diferentes. A simulação estocástica tem sido aplicada aos problemas de Geociências desde os anos de 1970, porém, a obtenção dos resultados sempre dependeu da capacidade computacional das máquinas daqueles tempos (Journel, 1974).

De modo similar ao conjunto de estimadores por krigagem, diversos algoritmos de simulação foram desenvolvidos e tornaram-se disponíveis aos usuários em programas de uso privado e em pacotes computacionais de livre acesso desde os anos de 1990. Como forma de resumir as principais características gerais destes dois conjuntos de métodos de modelamento geoestatístico, um quadro é apresentado na forma da Tabela 1 (Deutsch & Journel, 1992; Goovaerts, 1997; Yamamoto, 2008; Soares, 2014).

Tabela 1. Comparação das principais características dos dois conjuntos de métodos de análise geoestatística mais usuais.

Característica	Interpoladores por krigagem	Métodos de simulação
Precisão	Trabalham muito bem localmente, mas são susceptíveis à perda de acurácia global.	Os dados em suas posições são honrados, porém sofrem com perda de acurácia local.
Variância amostral e semivariogramas	Não reproduzem fidedignamente a variância amostral e nem o semivariograma.	O histograma dos valores simulados reproduz bem o histograma desagrupado amostral e os semivariogramas.
Modelo gerado	Apresentam somente uma única imagem espacial do fenômeno em estudo. A sua avaliação fica diretamente dependente de interpretação de uma medida de dispersão espacial.	Permitem a obtenção de múltiplas imagens espaciais equiprováveis do fenômeno que podem garantir a acurácia global ao modelo. A acurácia local pode ser aperfeiçoada com correções específicas.

Característica	Interpoladores por krigagem	Métodos de simulação
Pós-processamento	Carecem de técnicas de pós-processamento para correção do efeito de suavização.	As imagens simuladas, de modo geral, não sofrem com efeitos de suavização. Em situações específicas, outro método poderá ser utilizado para realce de uma feição própria da imagem simulada original

No presente trabalho, sob a premissa de que a superfície potenciométrica do aquífero livre em Fortaleza trata-se de um fenômeno regionalizado (Matheron, 1963; 1965), buscou-se a partir de múltiplas imagens equiprováveis e representativas geradas com uso de um método de simulação geoestatística, interpretá-las como cenários simulados dessa superfície na área de estudo.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área do presente estudo situa-se na porção norte-nordeste do município de Fortaleza, Ceará (Figura 1). A poligonal delimitada compreende uma área de aproximadamente 44 km², abrangendo os setores mais populosos e com maior infraestrutura da cidade. Ao norte e nordeste da poligonal encontra-se o oceano Atlântico, além do maior destaque fluvial da cidade, o rio Cocó que abriga a maior formação urbana de mangues da América do Sul.

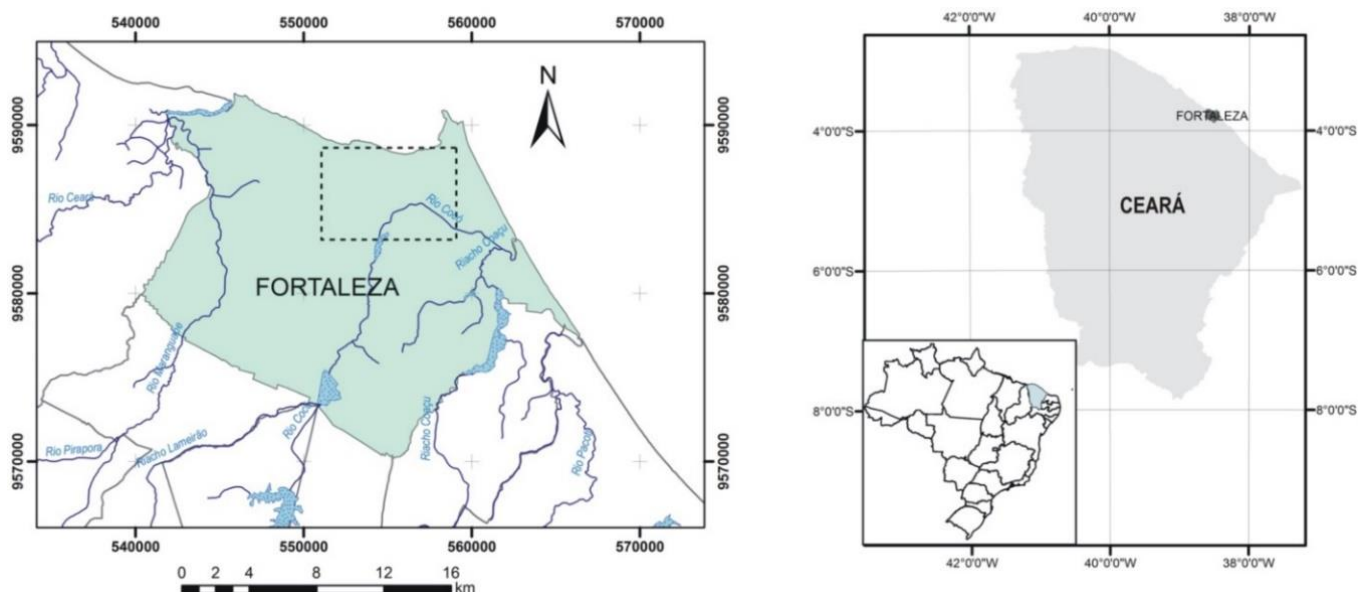


Figura 1. Mapa de situação da cidade de Fortaleza e localização da poligonal da área de estudo.

Do ponto de vista climático, o Estado do Ceará, como outros do Nordeste do Brasil, não apresenta as quatro estações definidas, mas somente duas estações pluviométricas. Na Região Metropolitana de Fortaleza, a estação chuvosa inicia-se no mês de janeiro estendendo-se até julho com pico em abril, enquanto em

agosto/dezembro é instalada a estação seca que se caracteriza por médias pluviométricas mensais quase nulas (Fonteles, 2003). A geomorfologia da área é predominantemente marcada por superfícies planas, conferidas pela existência dos Tabuleiros Pré-litorâneos que dá forma aos sedimentos areno-argilosos com níveis

lateríticos e conglomeráticos do Grupo Barreiras (ENb); às areias avermelhadas parcialmente consolidadas das paleodunas e; aos sedimentos aluvionares silto-argilosos predominantemente presentes na planície de inundação do rio Cocó (Qa). As dunas (Qd), formadas por areias quartzosas inconsolidadas e bem selecionadas, constituem a feição de maior expressão

topográfica na área, ocorrendo basicamente na porção central e nordeste da área de estudo. Litoestratigraficamente, os sedimentos do Grupo Barreiras apresentam-se sotopostos discordantemente às paleodunas, aos sedimentos aluvionares e às areias quartzosas dunares (Figura 2).

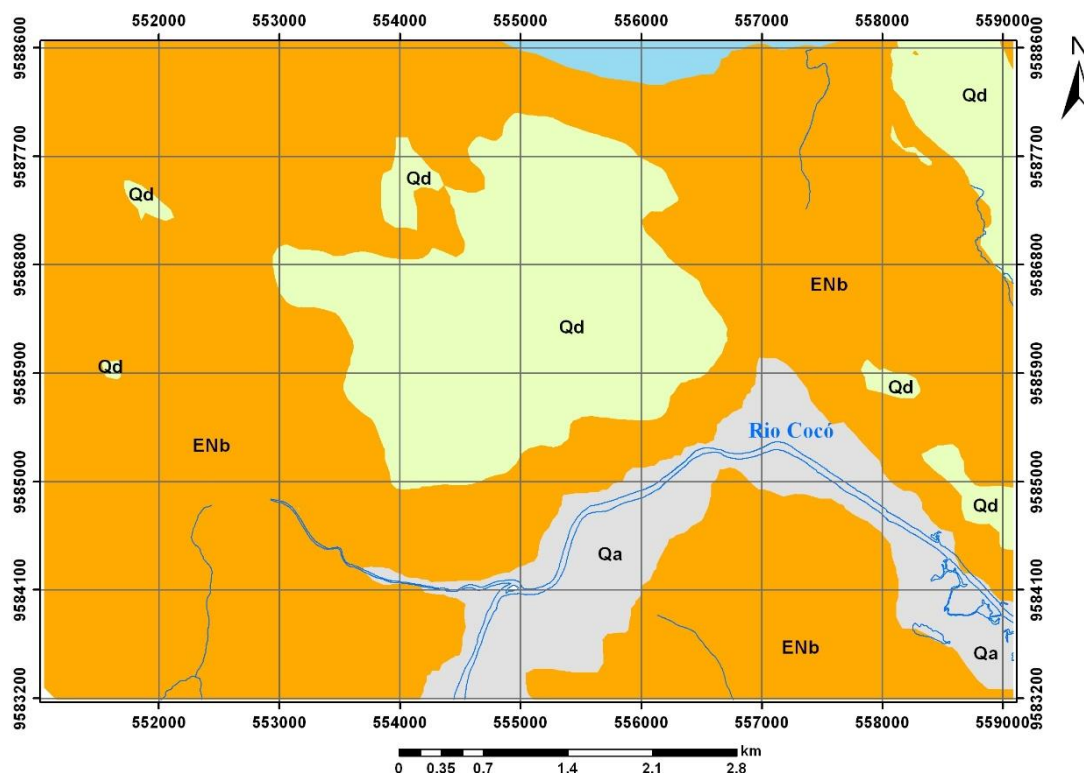


Figura 2. Mapa geológico da área de estudo. As unidades litoestratigráficas identificadas são: ENb - Grupo Barreiras; Qd – Dunas e; Qa – sedimentos aluvionares pertencentes ao Rio Cocó. Simplificado de Fonteles (2003).

O contexto hidrogeológico da região de estudo abrange um sistema aquífero livre constituído pela cobertura de dunas quartzosas e paleodunas, bem como as camadas areno-argilosas de topo do Grupo Barreiras (Vasconcelos, 1999). Eventualmente e localmente, é esperado que o aquífero na área de estudo possa exibir o comportamento hidrogeológico como parcialmente confinado, em razão da heterogeneidade litológica retratada pela ocorrência de níveis lateríticos, formados geralmente por sesquióxidos de ferro e nódulos caoliníticos (Figura 2).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Base de dados

Fonteles (2003) e Fonteles *et al.* (2006) ao apresentarem os mapas da superfície potenciométrica do aquífero livre na área de estudo baseados na aplicação da krigagem ordinária e cokrigagem, utilizaram uma base de dados, originalmente, constituída por 110 observações da profundidade de ocorrência do nível potenciométrico durante a execução de sondagens de simples reconhecimento (sondagens SPT) para fins de execução de obras geotécnicas (Figura 3).

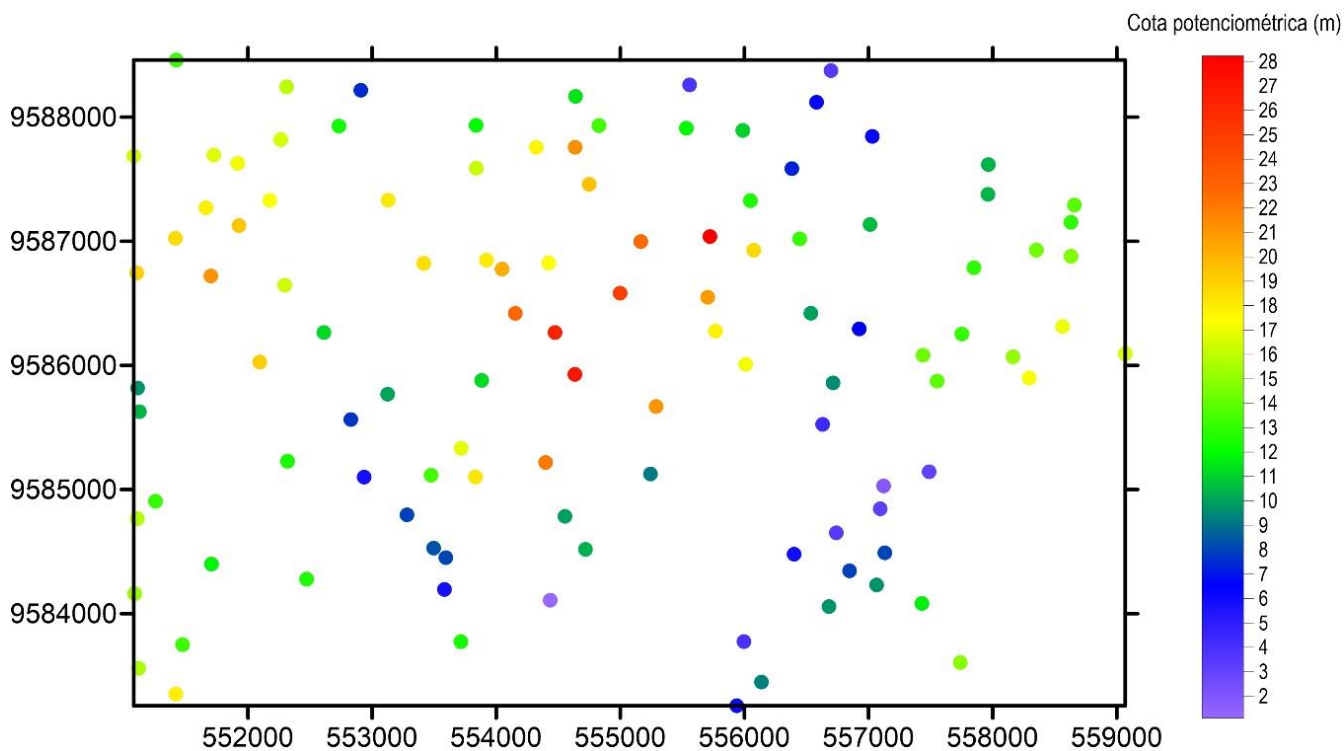


Figura 3. Mapa de pontos de dados originais da cota potenciométrica (m) na área de estudo.

Na avaliação geoestatística, a cota potenciométrica foi definida como a diferença entre a cota altimétrica do local onde foi executada a sondagem e a profundidade de ocorrência do nível potenciométrico registrada. No presente estudo, a base de dados é composta pelas coordenadas UTM (com referência ao fuso

24 e ao datum SIRGAS 2000) de cada ponto de sondagem com registro do nível potenciométrico e pelos valores estimados por cokrigagem com heterotopia parcial (Fonteles, 2003). Esta base de dados constitui a imagem-base para a investigação por simulação estocástica (Figura 4).

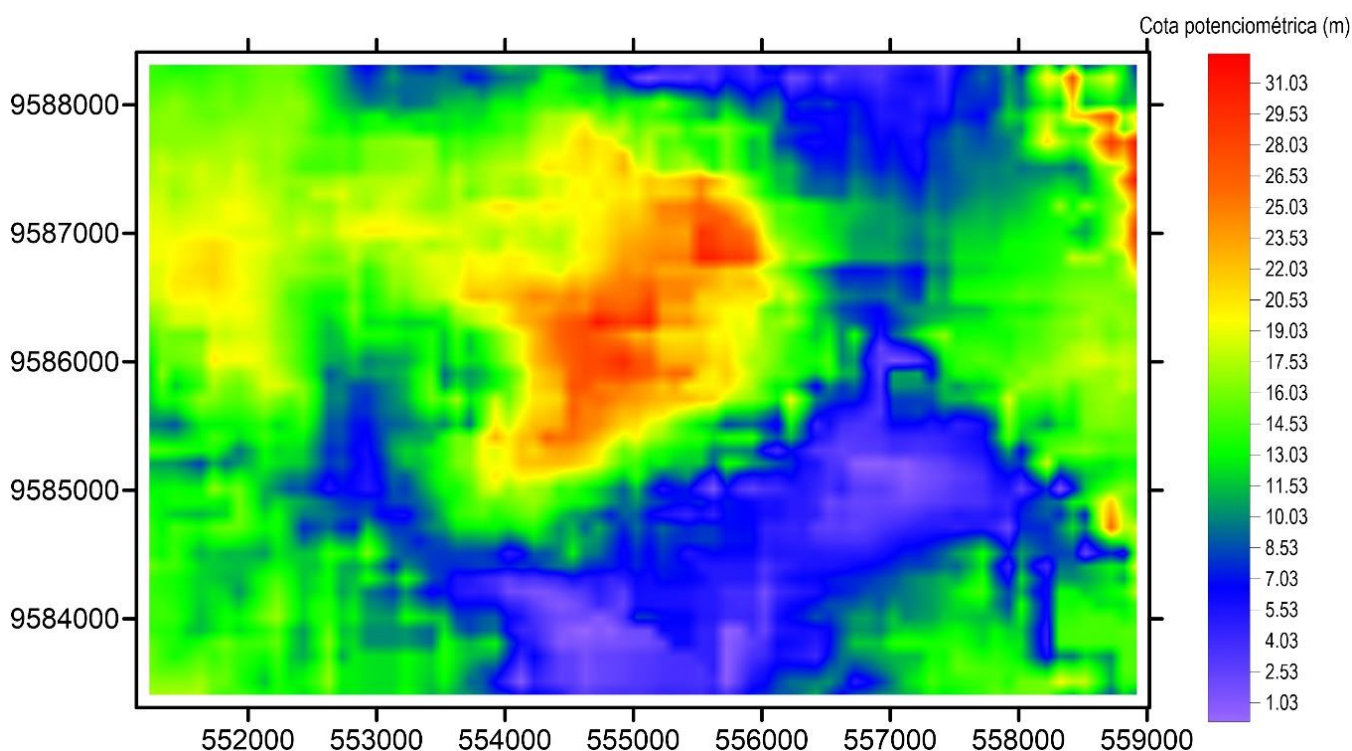


Figura 4. Mapa da imagem-base de cokrigagem da superfície potenciométrica (m).

3.2. Técnicas geoestatísticas empregadas

As técnicas geoestatísticas mais usuais foram desenvolvidas a partir dos trabalhos pioneiros de Krige (1951) e Matheron (1963, 1965) ao abordar o estudo da variabilidade espacial inerente à avaliação de recursos naturais, bem como a estimação de valores em locais não amostrados (Soares, 2014). No presente trabalho, em razão da extensa literatura científica disponível sobre o assunto, não será apresentada a teoria acerca da estimação geoestatística. Ademais, trabalhos anteriores realizados sobre a investigação da variabilidade espacial do nível estático na área estudada, como recurso de mapeamento geoestatístico, trazem a apresentação e discussão sobre as técnicas variográficas e de krigagem utilizadas (Fonteles et al., 2006; Rocha et al., 2009).

A simulação sequencial direta (SSD ou *Direct Sequential Simulation* – DSS, como é conhecida na literatura científica de língua inglesa) é um método de simulação sequencial desenvolvido para auxiliar o modelamento de recursos naturais sem a necessidade de proceder à anamorfose gaussiana dos dados originais quando a hipótese de gaussianidade não é confirmada (Soares, 2014). Journel (1994) demonstrou que valores simulados de uma distribuição condicional local podem ser obtidos por krigagem simples e, apesar da covariância da variável original poder ser replicada, o problema real era a inabilidade do algoritmo de reproduzir o histograma experimental. Caers (2000) e Soares (2001) apresentaram suas próprias soluções para superar esta limitação.

Caers (2000) propôs adicionar acurácia local à realização da variável ao condicionar os nós simulados ao histograma da variável. Soares (2001), em sua abordagem demonstrou uma melhoria ao aplicar uma correção, baseada na média e na variância da krigagem simples, às amostras a partir de uma função de distribuição condicional global ao usar a transformação gaussiana para criar subconjuntos com distribuição local dos intervalos do histograma-alvo.

No presente estudo, a solução adotada é aquela implementada por Soares (2001) disponível no *software Geostatistical Modelling Software* - GeoMS (CMRP-IST, 2000), com o qual também foram processadas as análises das estatísticas básicas e o modelamento dos semivariogramas experimentais, além da simulação estocástica em si.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise Estatística Preliminar

Precedendo a avaliação geoestatística em si, foi realizada uma análise estatística exploratória das bases de dados referenciadas no presente estudo. A Tabela 2 exhibe suas principais estatísticas descritivas, embora a base de dados original (Figura 3) não tenha sido utilizada.

Apesar de que qualquer teste de normalidade dos dados tenha sido realizado, o histograma mostrado na figura 5 revela uma leve assimetria à direita (assimetria positiva), como mostrado pelo coeficiente de variação (C.V.) de 45%.

Tabela 2. Estatísticas descritivas das bases de dados, original e a obtida na imagem-base de cokrigagem.

Estatísticas	Base original	Imagem cokrigagem
Número de amostras	120	4.144
Mínimo	0,20	0,10
Máximo	29,31	32,81
Média	13,30	12,74
Primeiro Quartil (Q ₂₅)	9,40	8,61
Mediana (Q ₅₀)	13,00	12,82
Terceiro Quartil (Q ₇₅)	17,60	16,55
Variância	37,61	32,81
Desvio Padrão	6,13	5,73
Coefficiente de Variação	0,46	0,45

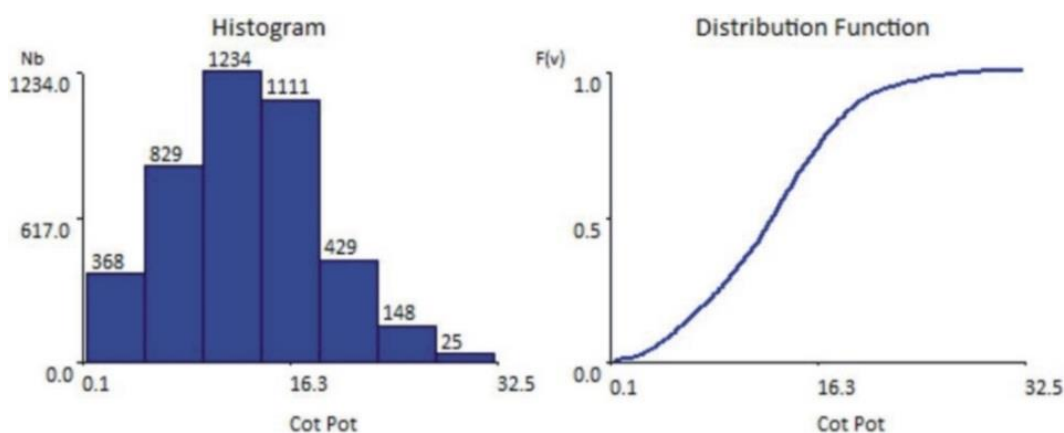


Figura 5. Histograma de frequência simples e a curva da a curva da função de distribuição de frequência acumulada para os dados de cota potenciométrica da área de estudo, a partir da imagem de cokrigagem.

4.2. Análise Variográfica Exploratória

A análise variográfica exploratória é a primeira tarefa a ser executada em qualquer investigação que tem por objetivo a estimação de dados espaciais em um espaço amostral, via estimador krigagem (Matheron, 1965; Yamamoto, 2008; Soares, 2014). Embora não seja o enfoque do presente estudo estimar a variável cota potenciométrica por krigagem, é necessário realizar a análise variográfica para o

modelamento dos semivariogramas experimentais que servirão de base para investigação da variável por simulação sequencial direta.

O procedimento da análise variográfica consistiu na definição de uma janela de pesquisa fundamentada nos seguintes parâmetros:

- nº de passos: 10
- Comprimento do passo: 500 m
- Ângulo de tolerância: 45°

▪ Distância de corte: 5.000 m.
Tendo sido estabelecida a janela de pesquisa, buscou-se o reconhecimento de um padrão de dependência espacial dos dados com uso de um par ortogonal de semivariogramas experimentais, o qual mostrará a eventual

dependência espacial dos dados. As direções 20°Az e 290°Az (-70° por *default* do programa) foram as que revelaram os padrões estruturados dos dados espaciais, como exibido na figura 6.

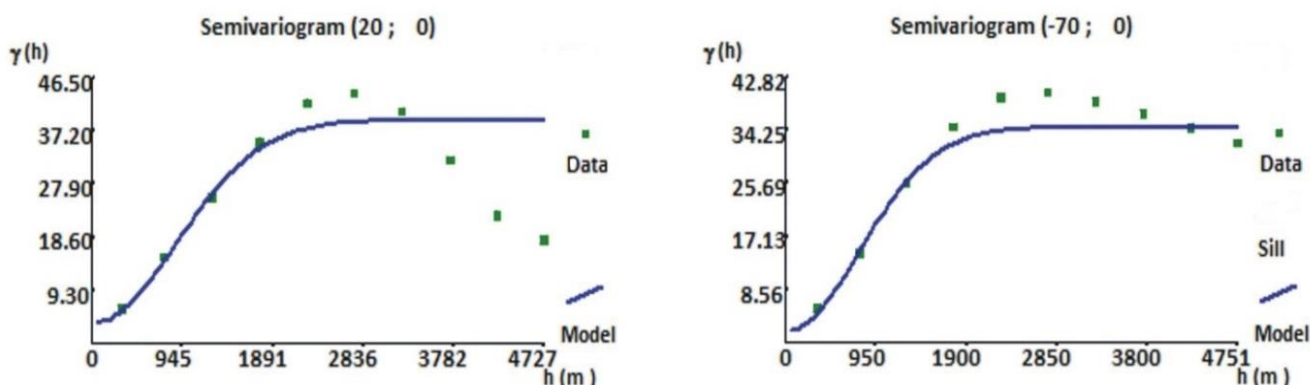


Figura 6. Semivariogramas experimentais modelados nas direções ortogonais indicadas (20°Az e 290°Az, ou -70 por *default* do software).

A análise variográfica caracteriza-se pela investigação por tentativas de ajuste dos modelos teóricos aos dados experimentais, mais comumente usados, neste caso o esférico, gaussiano ou exponencial (Soares, 2014). Nesta etapa da análise, percebeu-se que o modelo gaussiano é o que melhor ajusta-se aos semivariogramas experimentais, ainda assim, permitindo manter um efeito pepita mais discreto. Outra característica observada foi que a variável regionalizada cota potenciométrica apresenta baixa anisotropia zonal e, praticamente nenhuma anisotropia geométrica. Os semivariogramas modelados são representados pelas seguintes equações:

$$\gamma(h)_{20^\circ Az} = 3 + 35 \left[1 - e^{-3 \left(\frac{h}{2050} \right)^2} \right] \tag{1}$$

$$\gamma(h)_{290^\circ Az} = 2 + 33 \left[1 - e^{-3 \left(\frac{h}{1981} \right)^2} \right] \tag{2}$$

Estas equações serão diretamente aplicadas ao cálculo da variância espacial que descreve o

modelo de dispersão no espaço amostral, no qual baseia-se o algoritmo da simulação sequencial direta (SSD).

Os parâmetros estruturais fornecidos pelos modelos de semivariogramas ajustados revelam praticamente uma isotropia na variância espacial dos dados. O raio de busca para aplicação da krigagem simples (KS) como amostrador foi 2.000 m, sendo esta a distância *a* até onde os dados experimentais pertencem ao campo estruturado dos semivariogramas (Figura 6).

4.3. Simulação Sequencial Direta (SSD)

Para identificação das prováveis variações da cota potenciométrica na área de estudo, lançou-se mão dos recursos da simulação sequencial direta (SSD) sem a necessidade verificação da premissa de aderência à hipótese gaussianidade da função de distribuição dos dados ou de transformação deles por anamorfose gaussiana. Em razão disso, a base de dados processada no presente estudo por SSD resulta em imagens simuladas da superfície potenciométrica que podem ser interpretadas como cenários

possíveis do comportamento espacial da variável cota potenciométrica.

De modo semelhante aos procedimentos de estimação por krigagem ordinária (KO) ou krigagem simples (KS), a SSD requer a definição de parâmetros geométricos e estocásticos antes das simulações propriamente ditas serem iniciadas.

Tomando por referência, a área de estudo (Figura 3) como espaço amostral, a malha da base de dados tem o espaçamento de 50 x 50 m que resulta em 57 blocos nas coordenadas E-W e 80 blocos nas coordenadas N-S. A janela de pesquisa parametrizada para realização das simulações considerou: 1) as amplitudes e as direções modeladas a partir dos semivariogramas ajustados para definição do elipsoide de busca; 2) o mínimo de 4 e o máximo de 8 pontos inscritos na área do elipsoide definido; 3) 4 simulações por nó da malha para eventual correção de viés e; 4) uso da KS com correções locais de desvios da média e variância (Soares, 2014).

No presente estudo foram realizadas 100 simulações e, conforme Soares (2014), cada simulação representa uma imagem equiprovável do fenômeno que está sendo investigado. Porém, analisar cada imagem como um cenário equiprovável apresenta-se como um procedimento em que se pode incorrer no risco da avaliação estática de cada imagem por vez e,

assim subaproveitando o potencial de análise que a SSD pode entregar.

Como abordagem - ao invés de analisar cada uma das 100 imagens geradas, imagens baseadas nas separatrizes da curva de uma função de distribuição acumulada foram geradas. Nesta abordagem, as construções estocásticas foram realizadas com a utilização dos quartis de 25%, 50% e 75% da curva da função de distribuição de frequência acumulada de todos os dados simulados em cada ponto da malha amostral (Tabela 3). Além do uso das separatrizes como percentuais de corte na referida curva (Figura 3), foram elaboradas imagens estocásticas que representam os resultados extremos (máximos e mínimos) simulados.

Ao se examinar as imagens geoestatísticas geradas por SSD ou as construções estocásticas, como referido anteriormente (Figuras 7, 8, 9, 10 e 11), mostram uma progressiva elevação dos valores das cotas potenciométricas por todo o espaço amostral. Embora não se tenha feito qualquer correlação ou inferência baseada em dados pluviométricos sistematicamente coletados para um modelamento espaço-temporal da variação do nível potenciométrico (Fistikoglu *et al.*, 2016; Khorasani *et al.*, 2016; Fontes Jr, *et al.*, 2017), é possível propor uma trajetória matemática de variações desse nível a partir da avaliação de estatísticas descritivas básicas, como ilustrado pela figura 12.

Tabela 3. Estatísticas descritivas das imagens geradas com referência aos quartis e aos valores mínimos e máximos simulados.

Estatísticas	Min.	Q ₂₅	Q ₅₀	Q ₇₅	Máx.
Número de amostras	4.240	4.240	4.240	4.240	4.240
Mínimo	-1,38	0,85	1,31	1,90	3,17
Máximo	28,71	26,84	27,91	28,84	32,50
Média	10,20	11,60	12,70	13,85	17,05
Primeiro Quartil (Q ₂₅)	5,76	7,54	8,74	10,06	13,25
Mediana (Q ₅₀)	10,14	11,76	12,83	13,94	16,91
Terceiro Quartil (Q ₇₅)	14,03	15,28	16,35	17,39	20,57
Variância	30,45	28,64	29,57	30,38	32,98
Desvio Padrão	5,52	5,35	5,44	5,51	5,74
Coeficiente de Variação	0,54	0,46	0,43	0,40	0,34

As figuras 7 e 11 demonstram os contrastes de valores simulados e que representam os cenários geoestatísticos do nível potenciométrico mais interessantes. A figura 7, por exemplo, pode demonstrar um cenário de baixa recarga hídrica. Os valores negativos (abaixo do nível médio do mar) observados estão relacionados com as áreas adjacentes ao curso do rio Cocó, na porção central da área de estudo (ver Figura 2). O cenário oposto, ou seja, o da imagem geoestatística que retrata os valores máximos simulados, pode ser atribuído a situações em que a recarga do aquífero poderá ser substancial,

considerando a amplitude de dados utilizada para a realização da simulação geoestatística. Entre esses cenários de contrastes, encontram-se imagens dos valores simulados referentes aos quartis. De igual modo, as imagens geoestatísticas que correspondem a cortes na curva de função de distribuição frequência acumulada, podem ser admitidas como oscilações possíveis da superfície potenciométrica, considerando a hipótese de que, na área de estudo investigada, o aquífero sedimentar pode adotar, predominantemente, o comportamento hidrodinâmico de um aquífero poroso livre.

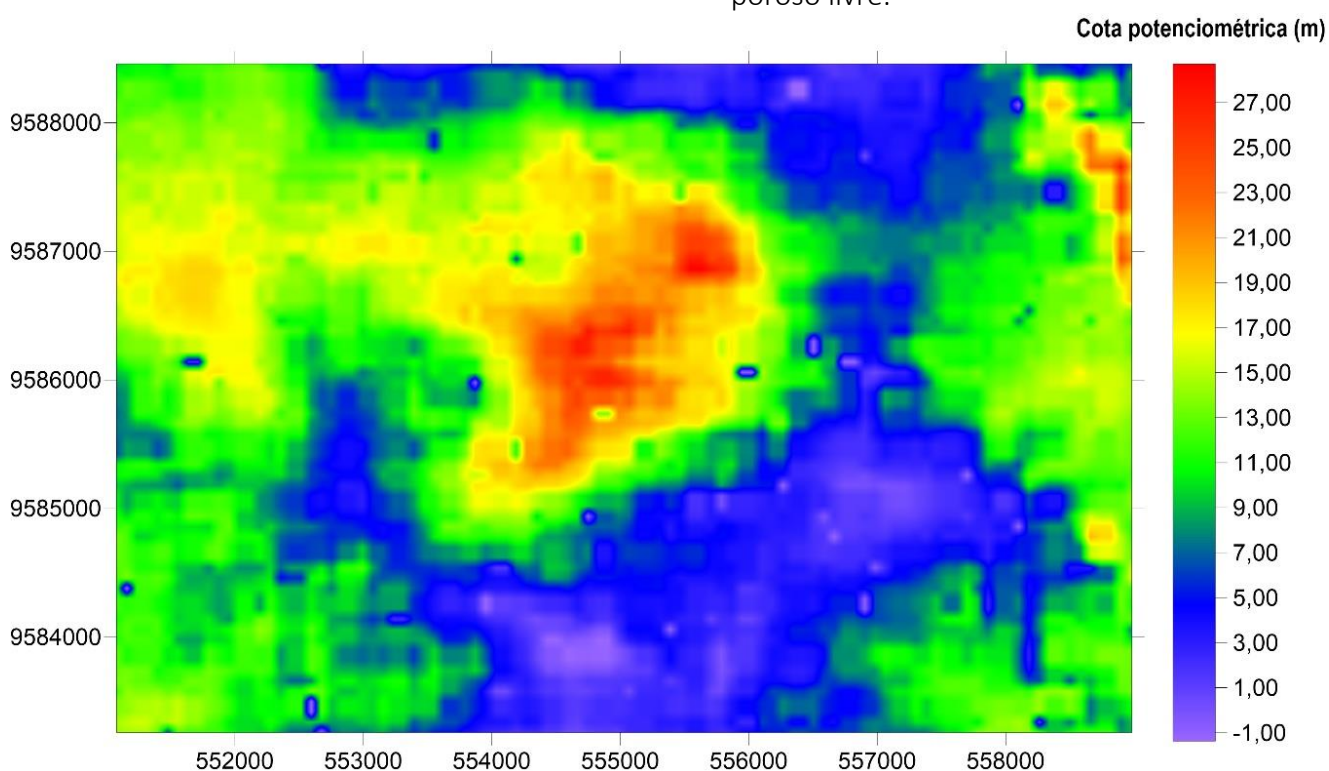


Figura 7. Mapa-imagem de valores mínimos simulados por SSD da área de estudo.

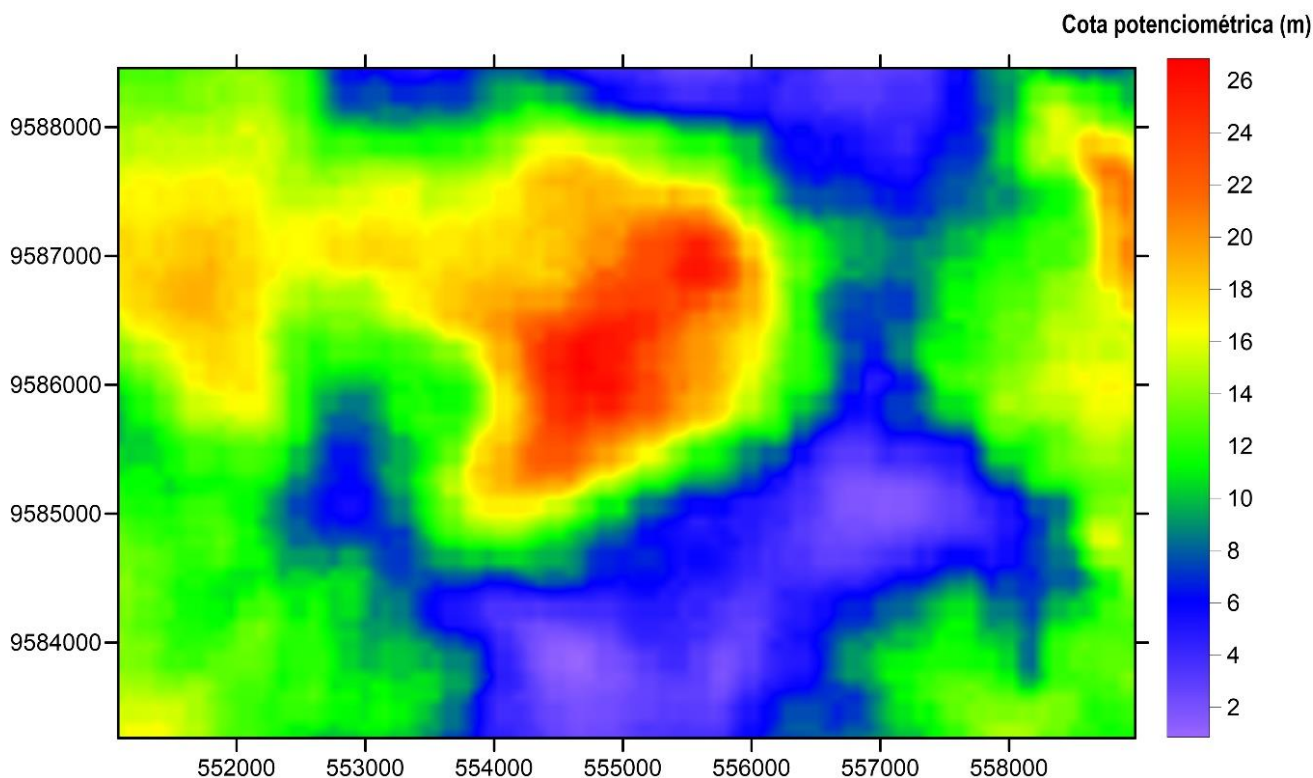


Figura 8. Mapa-imagem de valores de quartil de 25% (Q₂₅) simulados por SSD da área de estudo.

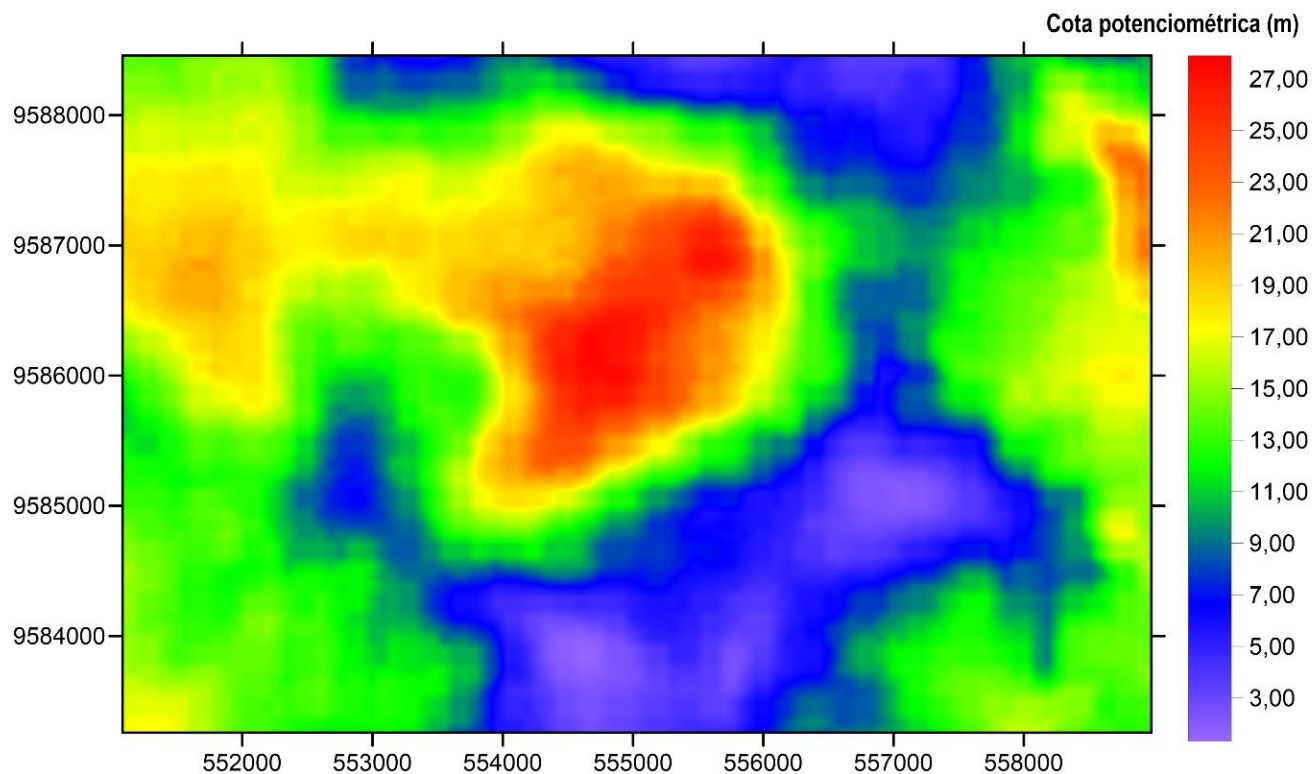


Figura 9. Mapa-imagem de valores de quartil de 50% (Q₅₀) ou de mediana simulados por SSD da área de estudo.

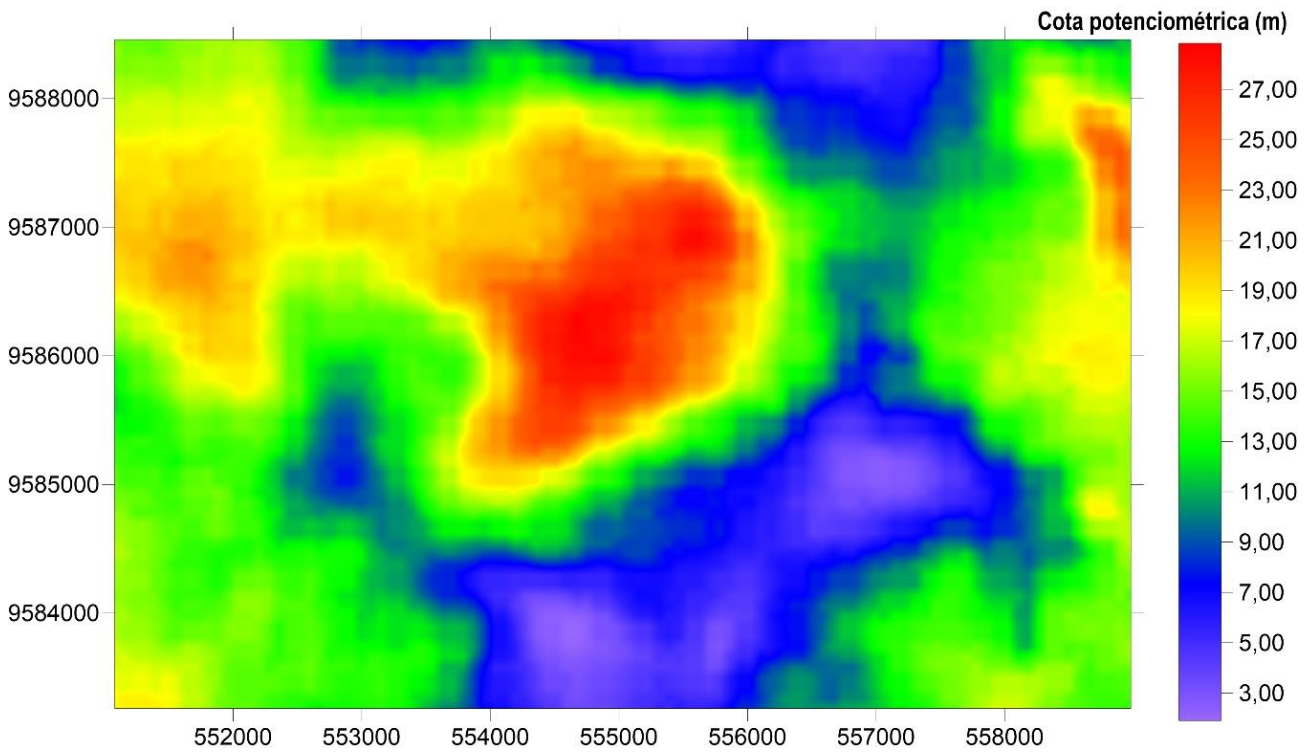


Figura 10. Mapa-imagem de valores de quartil de 75% (Q₇₅) simulados por SSD da área de estudo.

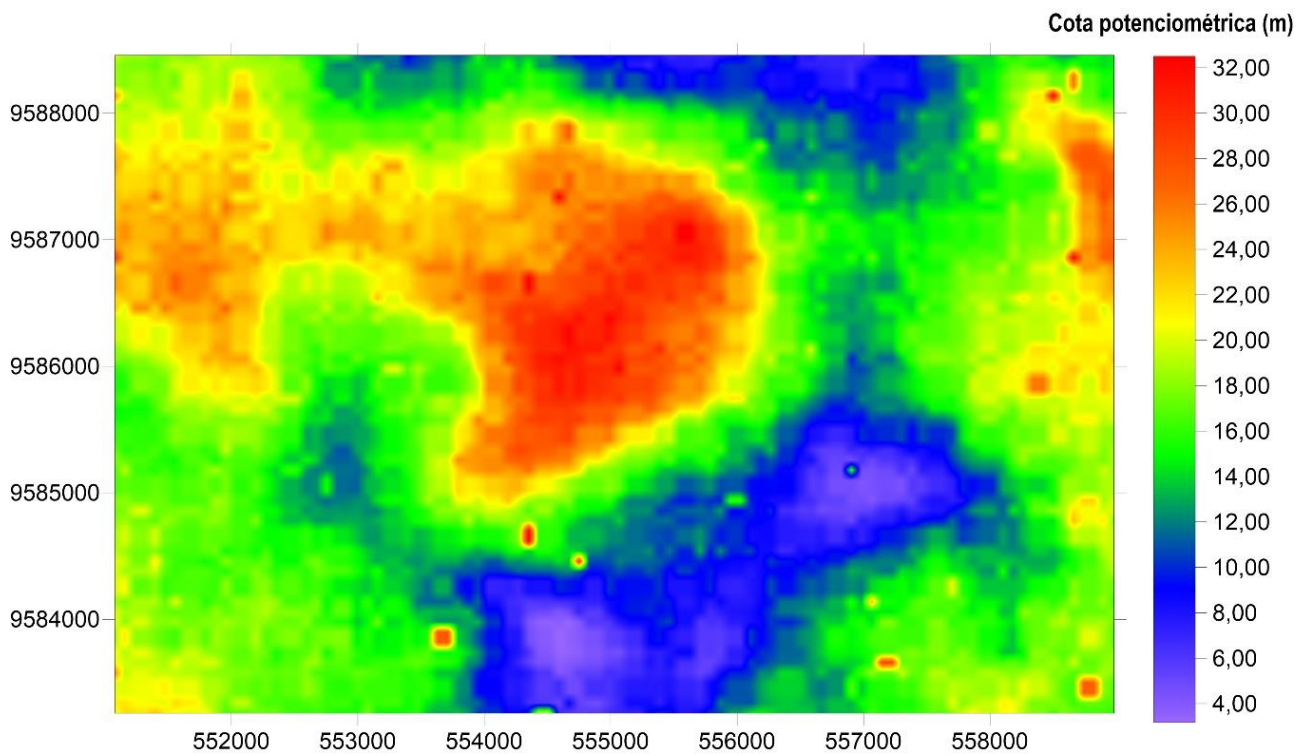


Figura 11. Mapa-imagem de valores máximos simulados por SSD da área de estudo.

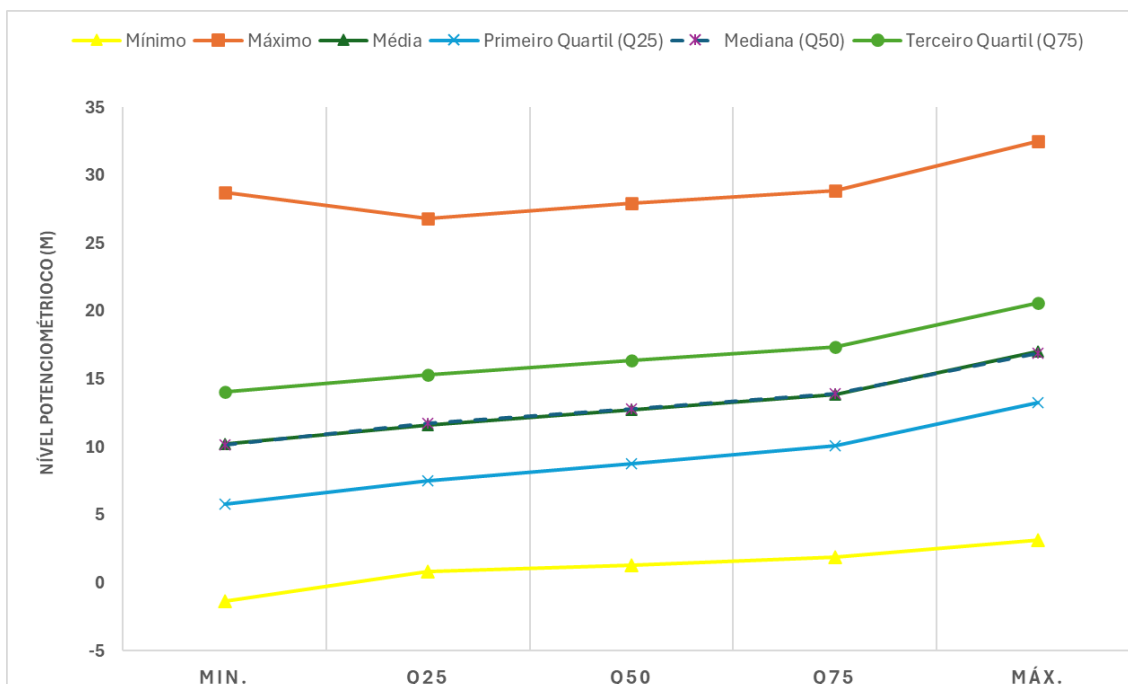


Figura 12. Variação dos valores de cota potenciométrica com base nas indicatrizes e de máximos e mínimos simulados. Observar que os valores das curvas de média e mediana tem diferenças muito pequenas considerando a escala do eixo dos valores de nível potenciométrico.

Considerando o valor do percentil de 95% (P_{95}) como um corte superior para estabelecimento de um intervalo de confiança cujo valor na curva da função de distribuição de frequência acumulada é 1,00 (Figura 13), foram identificados os pontos e áreas de maior incerteza espacial, como resultado do modelamento geoestatístico por SSD (Figura 14).

Tabela 4. Estatísticas descritivas dos dados de desvios-padrão dos resultados obtidos por SSD.

Estatísticas	Dados Desvios-padrão
Número de amostras	4.240
Mínimo	0,29
Máximo	1,36
Média	0,78
Primeiro Quartil (Q_{25})	0,71
Mediana (Q_{50})	0,78
Terceiro Quartil (Q_{75})	0,86
Variância	0,02
Desvio Padrão	0,14
Coefficiente de Variação	0,18

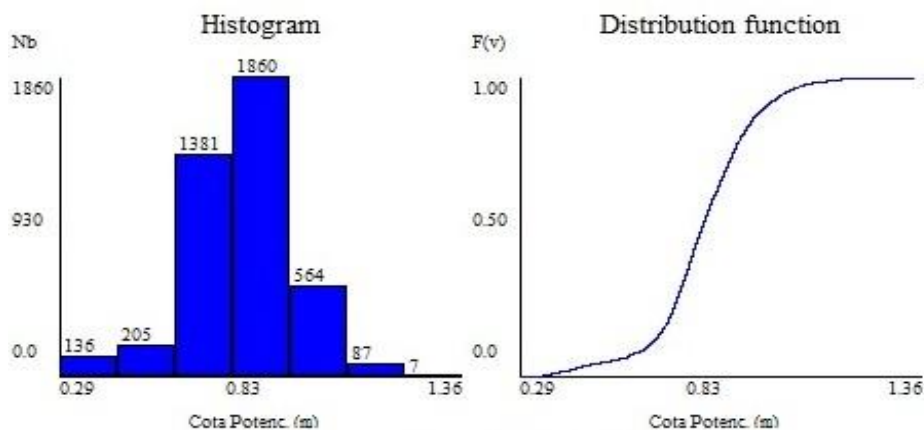


Figura 13. Histograma de frequência simples e a curva da função de distribuição de frequência acumulada para os dados de desvio-padrão dos resultados da SSD.

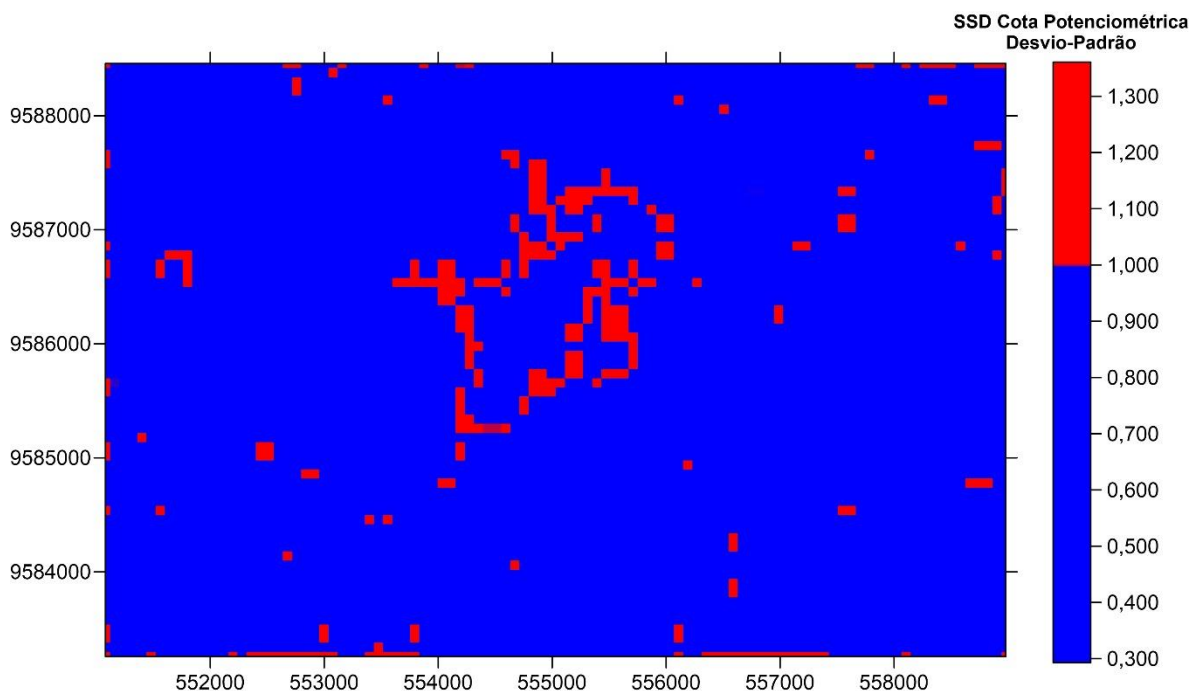


Figura 14. Mapa-imagem da quantificação da incerteza espacial da superfície potenciométrica baseada nos valores de desvios-padrão dos resultados da SSD.

O mapa dos desvios-padrões (Figura 14) de todos os pontos amostrais simulados representa uma síntese das incertezas espaciais obtidas como um pós-processamento dos resultados da SSD. A região com maiores incertezas apontadas pelos resultados da SSD concentra-se na porção central da área de estudo como um halo grosseiramente elipsoidal.

5. CONCLUSÕES

As análises por SSD foram realizadas a partir de uma base de dados pós-processada por cokrigagem heterotópica, representando uma imagem-média dos valores de cota

potenciométrica estimados. Entretanto, tal base de dados foi considerada relevante em vista da sua abrangência espacial suportada por um modelo de correionalização linear validado, quando comparada com resultados obtidos por krigagem ordinária (Fonteles, 2003, 2006) e krigagem com deriva (Rocha et al., 2009). A abordagem de investigação da variação do nível da superfície potenciométrica por SSD apresenta a principal vantagem de não apenas obter um único cenário geoestatístico do fenômeno, mas vários e todos equiprováveis; ou seja, possuem a mesma probabilidade de ocorrência. Outra característica dos resultados obtidos com a SSD é que o efeito de suavização

das estimativas por krigagem pode ser minimizado sem depender do suporte de um procedimento mais sofisticado de pós-processamento (Yamamoto, 2008; Soares, 2014).

O modelamento geoestatístico por SSD permitiu o acesso e conhecimento das incertezas espaciais inerentes ao processamento estocástico como um todo. O mapa-imagem das incertezas espaciais (Figura 14) mostra que após as 100 simulações processadas os pontos e áreas em vermelho denotam locais de difícil previsibilidade geoestatística. Hipoteticamente, tais incertezas podem estar relacionadas à heterogeneidade litológica local que pode se correlacionar com o valor da cota potenciométrica. Tal hipótese, porém, só poderá ser confirmada com estudos adicionais mais aprofundados.

No presente trabalho não se buscou correlacionar os dados de cota potenciométrica com dados pluviométricos das

datas de realização das sondagens. Entretanto, como demonstrado por Fistikoglu et al. (2016), Khorasani et al. (2016) e Fontes Jr, et al. (2017), uma sistemática amostral adequada poderá fornecer os parâmetros necessários para o modelamento geoestatístico de cenários incrementados a partir de poços e estações meteorológicas acessíveis para monitoramento e, especialmente bem distribuídos para coleta de dados climatológicos, geológicos e hidrogeológicos, considerando as estações chuvosas e secas.

Em face dos desafios complexos impostos pelas mudanças climáticas - e ainda não plenamente compreendidos, a ciência de dados geoespaciais baseada em modelos de aprendizagem de máquina (*machine learning*) com algoritmos de simulação geoestatística acoplados (Chihi et al., 2023) deverá ser objeto de intenso esforço científico para o alcance de soluções práticas para problemas reais.

6. REFERÊNCIAS

- AGOUBI, B.; KHARROUBI, A.; BOURI, S.; ABIDA, H.** Contribution of geostatistical modelling to mapping groundwater level aquifer geometry, case study of Sfax's deep aquifer, Tunisia. *Middle-East Journal of Scientific Research*, v. 6, n. 3, p. 305-316, 2020. Disponível em: [https://idosi.org/mejsr/mejsr6\(3\)/18.pdf](https://idosi.org/mejsr/mejsr6(3)/18.pdf). Acesso em: 2 dez. 2024.
- CAERS, J.** Adding local accuracy to direct sequential simulation. *Mathematical Geology*, v. 32, n. 7, p. 815-850, 2000. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1023/a:1007596423578>. Acesso em: 5 maio 2023.
- CHIH, H.; BEN CHEIKH LARBI, I.** Spatial prediction of groundwater levels using machine learning and geostatistical models: a case study of coastal faulted aquifer systems in southeastern Tunisia. *Hydrogeology Journal*, v. 31, p. 1387-1404, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10040-023-02686-7>. Acesso em: 5 nov. 2024.
- CMRP-IST.** Geostatistical Modelling Software - GeoMS. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2000. CD-ROM.
- DEUTSCH, C. V.; JOURNEL, A. G.** GSLIB: Geostatistical software library and user's guide. Oxford University Press, 1992. 352 p.
- FISTIKOGLU, O.; GUNDUZ, O.; SIMSEK, C.** The correlation between statistically downscaled precipitation data and groundwater level records in North-Western Turkey. *Water Resources Management*, v. 30, n. 5, p. 625-663, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1313-y>. Acesso em: 2 nov. 2024.
- FONTES JR., R. V. P.; MONTENEGRO, A. A. A.** Temporal dependence of potentiometric levels and groundwater salinity in alluvial aquifer upon rainfall and evapotranspiration. *Brazilian Journal of Water Resources*, v. 22, n. e54, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0005-8221.20170001>. Acesso em: 3 jul. 2024.
- FONTELES, H. R. N.** Caracterização geotécnica do subsolo da porção nordeste do município de Fortaleza (CE) com base em geoestatística. 2003. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 135 p.
- FONTELES, H. R. N.; YAMAMOTO, J. K.; ROCHA, M. M.; GANDOLFI, N.** Geoestatística aplicada à modelagem da superfície potenciométrica a partir de dados do nível estático: o caso da porção nordeste de Fortaleza (CE). *Solos & Rochas*, v. 29, n. 3, p. 331-339, 2006. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/510d26b2-fc74-4543-80eb-ef475ebc20e4/1574105.pdf>. Acesso em: 18 abr. 2022.
- GOOVAERTS, P.** Geostatistics for natural resources. New York: Oxford University Press, 1997. 496 p.
- JOURNEL, A. G.** Geostatistics for conditional simulation of ore bodies. *Economic Geology*, v. 69, n. 5, p. 673-687, 1974. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.69.5.673>. Acesso em: 24 nov. 2023.
- KHORASANI, M.; EHTESHAMI, M.; GHADIMI, H.; SALARI, M.** Simulation and analysis of temporal changes of groundwater depth using time series modeling. *Modeling Earth Systems and Environment*, v. 90, n. 2, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0164-0>. Acesso em: 14 out. 2024.
- KRIGE, D. G.** A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *Journal of Chemical Metallurgy and Mineralogical Society of South Africa*, v. 52, n. 6, p. 119-139, 1951.

MATHERON, G. Traité de géostatistique appliquée. Tome II: Le Krigeage. Editions Technip, 1963. 380 p.

MATHERON, G. Les variables régionalisées et leur estimation. Masson et Cie Éditeurs, 1965. 306 p.

ROCHA, M. M.; YAMAMOTO, J. K.; FONTELES, H. R. N. Cokrigagem ordinária versus krigagem com deriva externa: Aplicações para a avaliação do nível potenciométrico em um aquífero livre. *Geologia USP – Série Científica*, v. 9, n. 1, p. 73-84, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X2009000100005>. Acesso em: 9 jun. 2023.

SOARES, A. Direct sequential simulation and cosimulation. *Mathematical Geology*, v. 33, n. 8, p. 911-926, 2001. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1023/a:1012246006212>. Acesso em: 8 jul. 2023.

SOARES, A. Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente. 3. ed. Lisboa: IST Press, 2014. 214 p.

STURARO, J. R. Mapeamento geoestatístico de propriedades geológico-geotécnicas obtidas de sondagens de simples reconhecimento. 1994. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 181 p.

TOHAN, M. M. et al. Linking climate change perceptions, adaptive strategies, and food insecurity: evidence from southwest coastal Bangladesh. *Environmental Hazards*, v. 24, n. 1, p. 1-25, 2024. Disponível em: <https://doi.org.ez11.periodicos.capes.gov.br/10.1080/17477891.2024.2441799>. Acesso em: 5 jan. 2025.

VASCONCELOS, S. M. S. Recarga do aquífero dunas/paleodunas, Fortaleza-CE. 1999. Tese (Doutorado em Geologia Econômica e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 122 p.

WACKERNAGEL, H. Multivariate Geostatistics: An introduction with examples. 2nd ed. Springer-Verlag, 1998. 257 p.

YAMAMOTO, J. K. Estimation or simulation? That is the question. *Computational Geosciences*, v. 12, n. 4, p. 573-591, 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10596-008-9096-8>. Acesso em: 21 jan. 2023.

Editado por Camila Pimentel de Carvalho (PET-GEOLOGIA/UFP

R)