

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

BÁRBARA BARRETO VAZ

**GEOESTATÍSTICA APLICADA AO ESTUDO DA VARIABILIDADE ESPACIAL DA
CARGA HIDRÁULICA EM ÁREAS DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI NO
ESTADO DE SÃO PAULO**

São Paulo

2024

**GEOESTATÍSTICA APLICADA AO ESTUDO DA VARIABILIDADE ESPACIAL DA
CARGA HIDRÁULICA EM ÁREAS DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI NO
ESTADO DE SÃO PAULO**

Versão Original

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo como parte dos requisitos
para a obtenção do título de
Especialista em Gestão de Áreas
Contaminadas, Desenvolvimento
Urbano Sustentável e Revitalização
de Brownfields.

Orientador: Marcelo Monteiro da Rocha

São Paulo

2024

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.

Catálogo-na-publicação

Vaz, Barbara Barreto

Geoestatística Aplicada ao Estudo da Variabilidade Espacial da Carga
Hidráulica em áreas do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo. /
B. B. Vaz -- São Paulo, 2024.
38 p.

Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas. Desenvolvimento
Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) - Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo. Poli-Integra.

1.Hidrogeologia 3.Krigagem de resíduos 4.Sistema Aquífero Guarani
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Poli-Integra II.t.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho de conclusão de MBA é fruto não só de um esforço pessoal, mas também do apoio de diversas pessoas que me deram apoio emocional e intelectual, direta ou indiretamente, em um momento que exigiu muita dedicação e perseverança, afinal conciliar estudos e trabalho em um momento de extremo desafio na carreira não é uma coisa fácil.

Agradeço ao Professor Marcelo Monteiro Rocha por toda colaboração e paciência durante o processo de elaboração desse trabalho.

À empresa MDGEO, em especial meus chefes de trabalho, que autorizaram minha ausência em determinados dias para a produção desse documento.

Aos meus amigos, em especial, à Mariana Ferreira, minha querida Mari Bege, e à Amanda Trotta, por terem me ajudado imensamente na fase de processamento dos dados e geração dos mapas. Com certeza, sem vocês duas eu não teria tido tanta perseverança!

Por fim, dedico esse trabalho à minha família que, com todo apoio que me foi dado, foi fundamental para que eu concluísse esse ciclo por meio desse trabalho.

RESUMO

Vaz, Bárbara Barreto. Geoestatística Aplicada ao Estudo da Variabilidade Espacial da Carga Hidráulica em Áreas do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo. 2024. 37 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

A Carga hidráulica indica o nível de energia em que a água se encontra e está associado ao seu movimento em um sistema aquífero, sendo relacionada a dois componentes: carga de pressão e carga de elevação. Em aquíferos livres, a carga hidráulica na superfície freática corresponde ao próprio nível d'água, caso do Sistema Aquífero Guarani, na região do estudo. Esse trabalho tem como objetivo a estimativa dos valores de carga hidráulica para o Sistema Aquífero Guarani (SAG) presente no Município de São Carlos, por meio da análise geoestatística utilizando a técnica de krigagem de resíduos. Na fase de análise exploratória dos dados, a análise dos variogramas não possibilitou a identificação de anisotropias, o que se interpretou como resultado de uma insuficiência de dados com relação ao tamanho da área estudada e resultou na análise dos dados por meio de um variograma omnidirecional. As estimativas realizadas pelo método de krigagem de resíduos apresentaram resultados satisfatórios, mostrando que este método é adequado para a análise de carga hidráulica.

Palavras-chave: Hidrogeologia. Krigagem de resíduos. Geoestatística. Sistema Aquífero Guarani.

ABSTRACT

Vaz, Bárbara. Geostatistics Applied to the Study of the Spatial Variability of the Hydraulic Head in Areas of the Guarani Aquifer System in the State of São Paulo. 2024. 37f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

The hydraulic head indicates the energy level at which the water is found and is associated with its movement in an aquifer system. It is related to two components: pressure load and elevation load. In free aquifers, the hydraulic head on the phreatic surface corresponds to the water level itself, which is the case of the Guarani Aquifer System in the study region. This work aims to estimate the hydraulic head values for the Guarani Aquifer System (SAG) present in the municipality of São Carlos, by means of geostatistical analysis using the residual kriging technique. In the exploratory data analysis phase, the analysis of the variograms did not make it possible to identify anisotropies, which was interpreted as the result of insufficient data in relation to the size of the area studied and resulted in the data being analyzed using an omnidirectional variogram. The estimates made using the residual kriging method presented satisfactory results, showing that this method is suitable for hydraulic head analysis.

Keywords: Hydrogeology. Residual kriging, Geoestatistics. Guarani Aquifer System.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Mapa de Localização e Vias de Acessos. | 3 |
| Figura 2. Mapa Potenciométrico do SAG, mostrando as principais direções de fluxo das águas subterrâneas em seu interior. | 7 |
| Figura 3. Carga hidráulica em um ponto do aquífero (no fundo do poço) expressa pelo nível potenciométrico. | 9 |
| Figura 4. Mapa de distribuição dos pontos utilizados no estudo e suas respectivas cargas hidráulicas..... | 13 |
| Figura 5. Histograma de Frequência para a carga hidráulica na área em estudo. | 15 |
| Figura 6. Teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov para a carga hidráulica..... | 16 |
| Figura 7. Teste de normalidade de Shapiro-Wilk para o logaritmo a carga hidráulica. | 16 |
| Figura 8 - Variograma experimental da variável carga hidráulica. | 18 |
| Figura 9. Variograma experimental nas direções 0° e 90°..... | 19 |
| Figura 10 - Superfície polinomial de grau 1 ajustada aos dados de carga hidráulica..... | 20 |
| Figura 11 - Histograma e estatística descritiva dos resíduos..... | 21 |
| Figura 12. Variograma experimental dos resíduos calculados para as direções 0°, 45 ° 90 ° e 135°..... | 22 |
| Figura 13. Modelo Teórico de Variograma Tipo Esférico Ajustado ao Variograma Experimental Omnidirecional dos Resíduos. | 23 |
| Figura 14. Mapa de Resíduos. | 24 |
| Figura 15. Mapa com a diminuição da área estudada..... | 26 |
| Figura 16. Mapa Carga Hidráulica. | 27 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1. Principais parâmetros hidrodinâmicos do SAG..... | 8 |
| Tabela 2 - Estatísticas descritivas calculadas para a carga hidráulica da barragem em estudo. | 14 |
| Tabela 3. Parâmetros utilizados na construção do semivariograma. | 17 |
| Tabela 4 - Estatísticas descritivas calculadas para os resíduos da área em estudo..... | 21 |
| Tabela 5. Parâmetros utilizados na construção do semivariograma. | 22 |
| Tabela 6. Parâmetros utilizados no ajuste do modelo teórico esférico ao variograma experimental omnidirecional para análise da carga hidráulica. | 23 |

SUMÁRIO

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2 | OBJETIVOS | 1 |
| 3 | DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO..... | 2 |
| 3.1 | LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO | 2 |
| 3.2 | GEOLOGIA REGIONAL | 4 |
| 3.2.1 | Grupo São Bento | 4 |
| 3.2.2 | Grupo Bauru | 5 |
| 3.3 | SISTEMA AQUÍFERO GUARANI (SAG) | 6 |
| 3.4 | CARGA HIDRÁULICA..... | 9 |
| 3.5 | GEOESTATÍSTICA | 10 |
| 3.5.1 | Variáveis Regionalizadas (VR) | 10 |
| 3.5.2 | Variogramas..... | 11 |
| 3.5.3 | Krigagem | 11 |
| 4 | MATERIAS E MÉTODOS | 12 |
| 5 | RESULTADOS OBTIDOS | 14 |
| 5.1 | Estatística Descritiva..... | 14 |
| 5.2 | Método Geoestatístico | 17 |
| 5.2.1 | Análise Geoestatística Exploratória Inicial | 17 |
| 5.2.2 | Análise Geoestatística Exploratória – Após Cálculo dos Resíduos | 22 |
| 6 | INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS | 25 |
| 7 | CONCLUSÕES..... | 28 |
| 8 | REFERÊNCIAS | 29 |

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Feitosa *et al.* (2008), a hidrogeologia é a ciência que estuda a relação entre a rocha e a água e em que condições ela é armazenada e transmitida. As cargas hidráulicas e os tempos de chegada dos solutos em um determinado ponto dependem, principalmente, da condutividade e das condições de contorno da área em estudo. Neste contexto, a carga hidráulica é a principal variável que descreve o fluxo subterrâneo e coincide com a elevação piezométrica medida nos instrumentos de monitoramento, sendo um parâmetro essencial para a determinação da direção e da velocidade do fluxo da água subterrânea, segundo a Lei de Darcy (Chilès, 2001).

Nesse sentido, é importante destacar que, para estudos que pretendem compreender a dinâmica do fluxo de água subterrânea por meio da carga hidráulica, quanto maior a quantidade de informação disponível melhor (Rocha *et al.*, 2007). No entanto, geralmente, os dados coletados de carga hidráulica nos estudos hidrogeológicos são limitados, tanto com relação ao número de dados produzidos quanto com relação à distribuição geográfica desses dados.

Dessa forma, a Geoestatística pode contribuir de modo eficaz na análise da variabilidade espacial das cargas hidráulicas de um determinado aquífero uma vez que, no modelamento de fluxo e transporte em subsuperfície, a componente variabilidade espacial das variáveis é subdimensionada.

A geoestatística oferece um meio de estudar a heterogeneidade da distribuição espacial de uma variável de interesse. Existem diversos métodos geoestatísticos que podem ser aplicados para o estudo da variabilidade espacial da carga hidráulica em determinados aquíferos. Nesse contexto, este trabalho se propõe a utilizar a krigagem de resíduos para elaborar o mapa de curvas de isovalores da carga hidráulica em parte do município de São Carlos/SP.

2 OBJETIVOS

O principal objetivo desse trabalho é utilizar conceitos geoestatísticos para o estudo da variabilidade da carga hidráulica no Sistema Aquífero Guarani, no município de São Carlos, Estado de São Paulo.

O método geoestatístico escolhido foi a krigagem residual, técnica para estimar dados não estacionários e que consiste em assumir que há uma componente de deriva que pode ser representada por uma superfície polinomial de baixo grau (normalmente grau 1 ou 2). A partir desta superfície são calculados resíduos (diferença entre os valores amostrais e a superfície

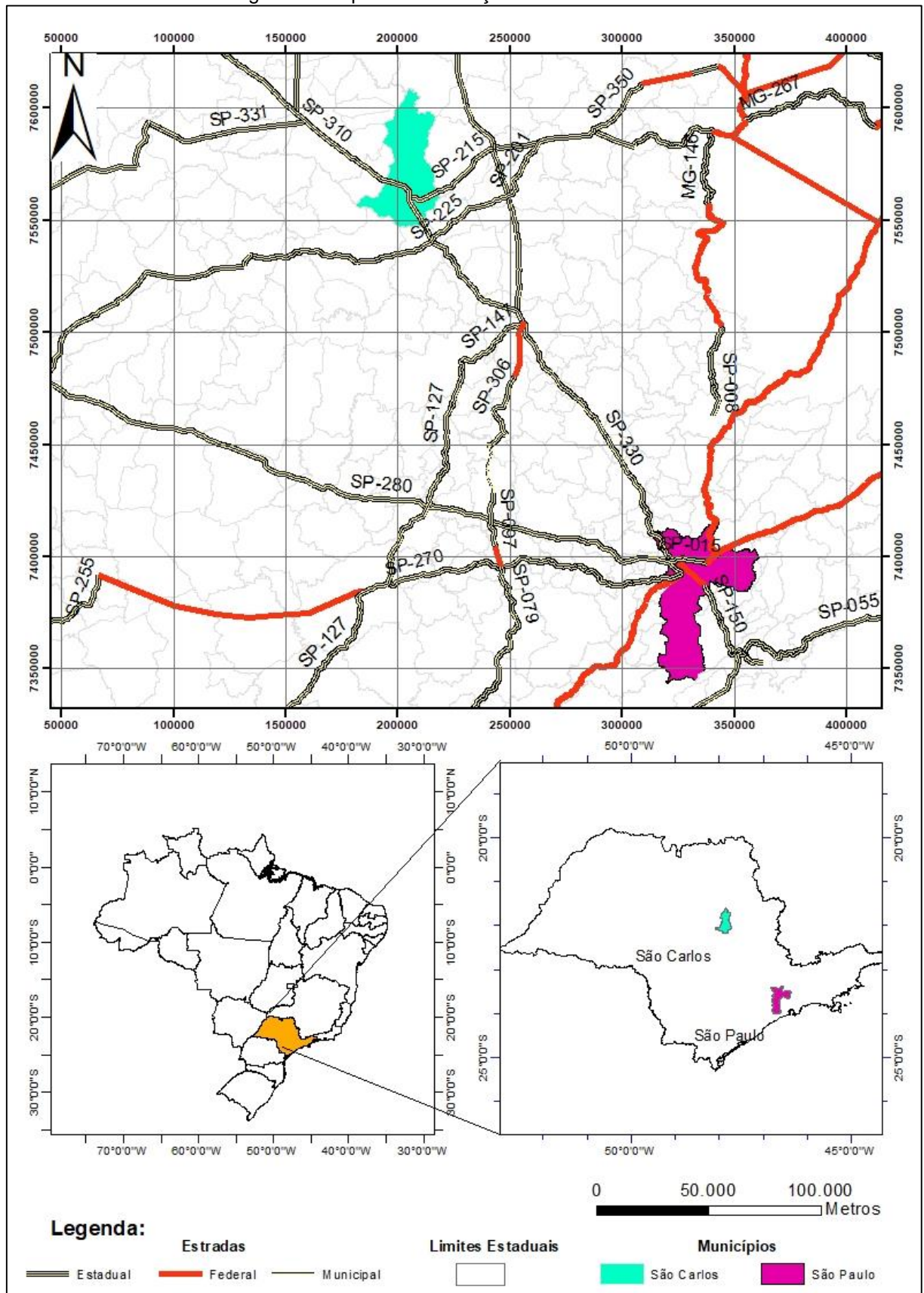
ajustada). Aos resíduos da análise de regressão polinomial, aplica-se a análise geoestatística e calcula-se a krigagem ordinária. Por fim, combina-se os resultados de ambas as análises para se obter o valor estimado em uma malha regular.

3 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município de São Carlos situa-se na porção central do Estado de São Paulo, e se localiza a aproximadamente 225 km da cidade de São Paulo. O município possui 1.138km² de extensão, sendo 672km² correspondentes à área urbana. As principais vias de acesso ao município são a Rodovia Washington Luiz (SP-310) e as rodovias: SP-215, SP-225 e SP-318/255, conforme pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Mapa de Localização e Vias de Acessos.



3.2 GEOLOGIA REGIONAL

O município de São Carlos está situado na Bacia Sedimentar do Paraná, que abrange boa parte dos estados de São Paulo, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás e Minas Gerais.

A geologia do município distribui-se em terrenos do Grupo São Bento, formados pelas Formações Piramboia, Botucatu e Serra Geral. As Formações Itaqueri, Corumbataí do Grupo Bauru e os Depósitos Aluvionares e Colúvios-eluvionares também estão presentes na área de estudo (CPRM, 2006; MURO, 2000; CPA, 2017).

3.2.1 Grupo São Bento

O Grupo São Bento abrange praticamente todo o município de São Carlos e é caracterizado pelas formações Serra Geral, Botucatu e Piramboia.

3.2.1.1 Formação Piramboia

De acordo com Gonçalves (1986), a exposição da Formação mencionada ocorre ao longo de toda a faixa de distribuição dos sedimentos mesozoicos, abrangendo a Depressão Periférica, estando ausente no Vale do Rio Grande.

A Formação Piramboia é composta predominantemente por arenitos, geralmente com granulação fina a média. A fração argilosa é mais proeminente na parte inferior da formação em comparação com a superior, onde, em algumas áreas, podem ocorrer arenitos grossos e conglomeráticos. A estratificação plano-paralela é predominante, evidenciada pela alternância de lâminas que variam em teor de argila e silte, ou exibem estratificação cruzada de dimensões médias a grandes, do tipo tangencial. Marcas de ondas ou correntes não são incomuns (Bistrichi e Almeida, 1981).

3.2.1.2 Formação Botucatu

Os arenitos da Formação Botucatu estão presentes em uma extensa área, desde a região de Itirapina, a leste, até as proximidades da Barragem de Ibitinga, a oeste. Em direção a oeste, esses arenitos são sobrepostos pelos basaltos da Formação Serra Geral e pelos sedimentos do Grupo Bauru (Rabelo, 2006).

A Formação Botucatu compreende predominantemente arenitos de granulação fina a média, uniformes e com uma seleção de grãos foscos de alta esfericidade. Apresentam coloração avermelhada e exibem estratificação cruzada tangencial de médio a grande porte, característica

típica de dunas móveis. Em algumas áreas, especialmente nas partes mais baixas da sequência, intercalam-se arenitos depositados subaquaticamente. Formam corpos lenticulares de arenitos heterogêneos, variando de granulação média a grossa e evoluindo para arenitos conglomeráticos, onde os seixos são predominantemente compostos por quartzo e quartzito (Bistrichi e Almeida, 1981).

3.2.1.3 Formação Serra Geral e Intrusivas Básicas Associadas

As Formações Botucatu e Piramboia estão distribuídas por toda a região do município de São Carlos e são confinadas pelos derrames basálticos da Formação Serra Geral, conforme descrito por Rabelo (2006).

A Formação Serra Geral compreende um conjunto de derrames basálticos toleíticos, aflorando, na região de São Paulo, na parte superior das escarpas das cuesta basálticas e de morros testemunhos. Em âmbito regional, os arenitos da Formação Botucatu interdigitam-se com os derrames da Formação Serra Geral, o que torna a delimitação de ambas as unidades bastante complexa.

É recoberta em discordância angular pelas várias formações que constituem o Grupo Bauru ou depósitos cenozoicos.

3.2.2 Grupo Bauru

3.2.2.1 Formação Itaqueri

A Formação Itaqueri compreende depósitos rudáceos de leques aluviais, sendo composta predominantemente por arenitos finos a conglomeráticos, imaturos, com espessura que raramente ultrapassa os 30 metros na região. Encontra-se assentada sobre superfície regular desenvolvida nos basaltos da Formação Serra Geral e, localmente, nos arenitos eólicos da Formação Botucatu (Riccomini, 1997).

3.2.2.2 Formação Corumbataí

A Formação Corumbataí aflora, no Estado de São Paulo, ao norte do rio Tietê, alcançando uma espessura máxima de 130 metros nas proximidades de Rio Claro. À medida que se estende para o norte, sua espessura diminui, não ultrapassando 60 metros nas regiões próximas a Leme e Pirassununga. Essa unidade não se estende até o Estado de Minas Gerais, conforme documentado por Landim (1970) e Soares e Landim (1973).

3.3 SISTEMA AQUÍFERO GUARANI (SAG)

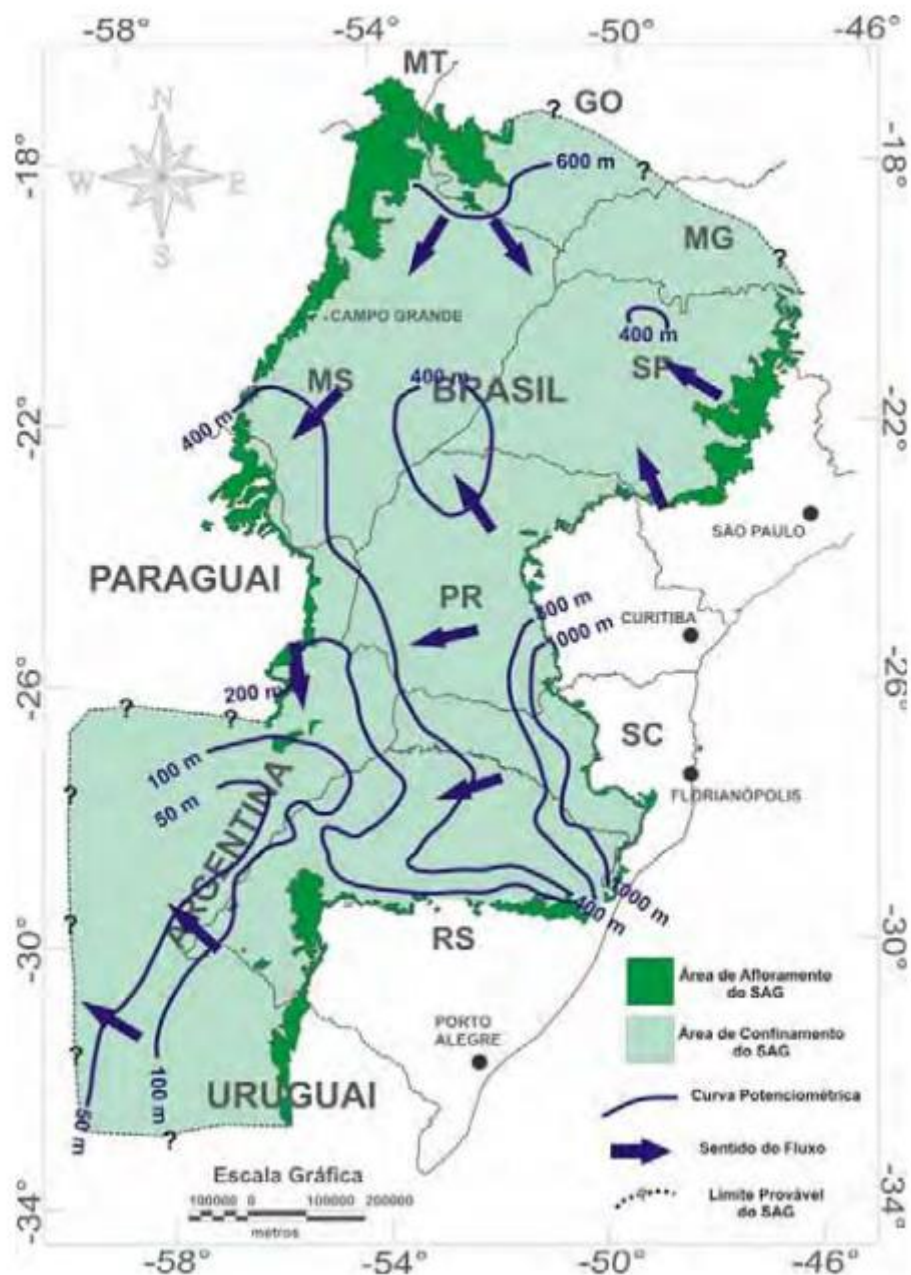
O Sistema Aquífero Guarani abrange quase toda extensão da Bacia Sedimentar do Paraná, estendendo por oito estados do Brasil: Minas Gerais, São Paulo, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande Sul, além de se estender pelos países vizinhos do cone sul. Esta bacia sedimentar está situada na porção centro-sul do continente sul-americano, ocupando uma área de aproximadamente 1.600.000 Km², dos quais 1.100.000 Km² em território brasileiro. As rochas reservatório, no lado brasileiro, compreendem arenitos do Grupo Rosário do Sul e das formações Piramboia e Botucatu.

Gastmans (2007, p. 34) afirma que

o registro estratigráfico que preenche a bacia sedimentar estende-se do Neo-Ordoviciano ao Neo-Cretáceo, compreendendo, segundo Milani (1997), seis supersequências: Rio Ivaí , depositada durante o período compreendido entre o Ordoviciano e o Siluriano; Paraná, de idade devoniana; Gondwana I , depositada durante o Carbonífero – Eo-Triássico; Gondwana II (GII), depositada entre o Meso e Neo-Triássico; Gondwana III (GIII), de idade neo-jurássica a eo-cretácea; e Bauru , de idade neo-cretácea.

Apresenta-se na Figura 2 a distribuição do SAG e suas curvas potenciométricas regionais.

Figura 2. Mapa Potenciométrico do SAG, mostrando as principais direções de fluxo das águas subterrâneas em seu interior.



Fonte: Gastmans (2007) modificada de Araújo *et al* (1999).

Segundo Araújo *et al.* (1995) apud Gastmans (2007), o arcabouço hidrogeológico do Sistema Aquífero Guarani começou a se desenvolver durante o Cretáceo, quando as bordas atuais foram elevadas, permitindo a erosão das camadas sedimentares sobrepostas. Isso possibilitou o surgimento das unidades hidroestratigráficas que compõem o SAG, com a recarga ocorrendo a partir das águas meteóricas nas regiões mais elevadas.

A existência significativa de vários diques de diabásio, relacionados ao Arco de Ponta Grossa, desempenha um papel crucial ao subdividir o Sistema Aquífero Guarani em dois domínios potenciométricos. O primeiro domínio, situado ao norte, apresenta zonas de recarga associadas aos afloramentos das formações Botucatu e Piramboia. O fluxo de água ocorre preferencialmente de maneira centrípeta, em direção ao centro da bacia, com gradientes hidráulicos variando de 5 a 3 m/km nas proximidades das zonas de afloramento, diminuindo para 0,2 m/km em direção ao centro da bacia. Já o segundo domínio localiza-se ao sul do Arco de Ponta Grossa e apresenta os maiores gradientes hidráulicos (5 a 0,3 m/km), com fluxo direcionado preferencialmente de leste para oeste. A zona de recarga principal do segundo domínio está localizada no Estado de Santa Catarina, e a principal zona de descarga do aquífero situada ao longo dos rios Paraná e Uruguai.

Dados levantados por Gastman, em 2007, indicam que poços tubulares que captam água no Sistema Aquífero Guarani apresentam vazões entre poucos m³/h a até 320 m³/h e vazões de até 40 m³/h são frequentes. Para estes mesmo poços os dados de vazão específica variam de 1 até 7 m³/h/m, e a transmissividade, calculada por meio da interpretação de ensaios de bombeamento, varia de 10 a 650 m²/dia.

As principais características hidrodinâmicas do aquífero são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Principais parâmetros hidrodinâmicos do SAG.

| Parâmetro | | SAG - São Paulo (Fonte: SRACEK & HIRATA, 2002) | SAG -Bacia do Paraná (Fonte: ARAÚJO et al., 1999) | |
|---|--------|---|--|---------------|
| | | | Fm. Botucatu | Fm. Pirambóia |
| Espessura (m) | Máxima | 550 | 4 – 484 | 25 – 770 |
| | Média | 268 | 138 | 139 |
| Porosidade | | 10 – 15% | 17 – 30% | 14 – 24% |
| Condutividade Hidráulica média (m/dia) | | 12,96 | 8,7 | 1,9 |
| Transmissividade (m ² /dia) | | 39 – 1035 Média 336 | 2,4 – 552 | - |
| Coeficiente de Armazenamento | | $4 \times 10^{-5} - 2 \times 10^{-4}$ | - | - |

3.4 CARGA HIDRÁULICA

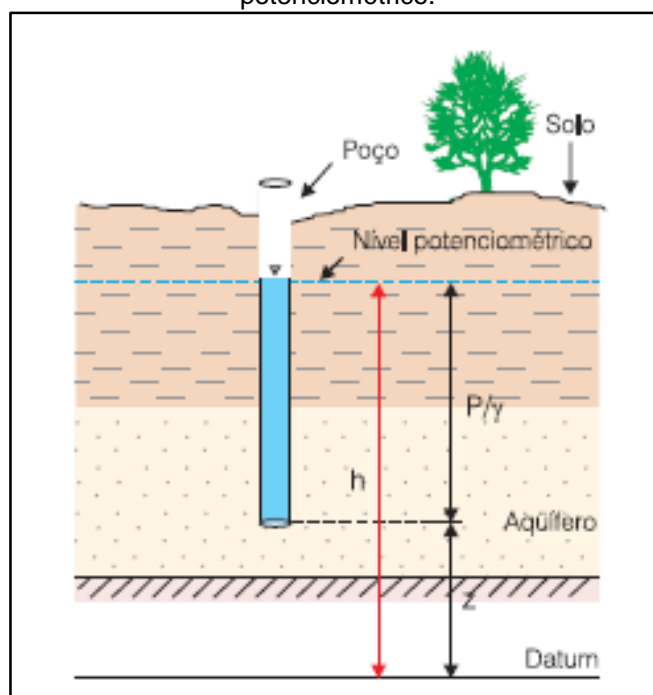
Cabral (2008) cita que a carga hidráulica (h) se relaciona com a energia envolvida no movimento da água em um sistema hidráulico, sendo produto de dois componentes: carga de elevação (z) e carga de pressão ($\frac{P}{\gamma}$). Dessa forma, tem-se:

$$h = z + \frac{P}{\gamma}$$

A carga de pressão pode ser caracterizada como a pressão exercida pela água em um ponto específico em um fluido devido à sua profundidade. Dessa forma, a carga de pressão será tanto maior, quanto maior for a profundidade do ponto em estudo. Em contraste, a carga de elevação está relacionada à altura do ponto em relação a um nível de referência, em geral a cota topográfica naquela região.

É importante ressaltar que, em aquíferos livres, caso que se aplica ao Sistema Aquífero Guarani, a carga de pressão é nula, por ter a pressão atmosférica de referência (Figura 3). Por conseguinte, a carga hidráulica na superfície livre corresponde ao próprio nível d'água ($h=z$).

Figura 3. Carga hidráulica em um ponto do aquífero (no fundo do poço) expressa pelo nível potenciométrico.



Fonte: Modificado de Feitosa *et al* (2008).

3.5 GEOESTATÍSTICA

Segundo Deutsch & Journel (1997), a geoestatística está relacionada com o estudo de fenômenos que variam no espaço e/ou tempo. Trata-se de um modelo probabilístico que busca avaliar a correlação espacial entre diferentes dados; partindo do princípio de que quanto mais próximas as amostras, mais parecidas entre si elas são (Oliveira & Grego, 2015). Nesse contexto, a geoestatística oferece um conjunto de ferramentas com o objetivo de compreender e modelar a variabilidade espacial do fenômeno estudado.

3.5.1 Variáveis Regionalizadas (VR)

Georges Matheron desenvolveu, na década de 60, a Teoria das Variáveis Regionalizadas cuja aplicação é comumente conhecida como Geoestatística. Segundo Matheron (1963), o desenvolvimento da geoestatística ocorreu devido à dificuldade da Estatística Clássica em considerar aspectos espaciais de algumas variáveis. Essa teoria tem aplicação ampla em várias áreas das geociências, já que inúmeras feições estudadas possuem sua variabilidade no espaço amplamente conhecida.

Uma variável pode ser considerada regionalizada quando “*apresenta um certo grau de correlação na distribuição espacial de seus valores*” (Oliveira & Grego, 2015). Ademais, as variáveis regionalizadas apresentam alguns aspectos que são importantes e não podem ser descartados no estudo da dependência espacial.

3.5.1.1 Localização e Continuidade

Segundo Oliveira (2003), “*a escolha do espaço geométrico não é arbitrária e deve ser definido de forma que atenda às condições de homogeneidade física*”, embora essa seja uma tarefa desafiadora na prática. Outra característica importante é a continuidade espacial, evidenciada pela tendência de os valores serem mais semelhantes quanto menor for a distância entre os pontos amostrados, refletindo o grau de dependência espacial (autocorrelação) entre eles.

3.5.1.2 Estacionariedade da Função Regionalizada

A função aleatória é considerada estacionária, de primeira ordem, quando seu valor esperado é invariante à translação. A hipótese de estacionariedade considera que os momentos estatísticos da variável devem ser invariantes à translação, permitindo que se façam inferências estatísticas. Como não se pode comprovar adequadamente a estacionariedade das variáveis, utiliza-se a Hipótese Intrínseca ou Hipótese de Quase-estacionariedade, onde assume-se que estacionariedade de primeira e segunda ordens podem ser assumidas localmente.

3.5.2 Variogramas

O variograma desempenha um papel fundamental na geoestatística, pois proporciona uma representação quantitativa da variação de um fenômeno regionalizado no espaço, conforme descrito por Huijbregts em 1975 (Camara & Medeiros, 1998). Oliveira (2003) define um variograma como uma *“função matemática definida para representar o nível de autodependência entre duas realizações e uma variável regionalizada locais”*. A função variograma $2\gamma^1(h)$ é definida como sendo o quadrado da diferença entre os valores de pontos no espaço, separados por uma distância h , conforme:

$$2\gamma(h) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [z(x_i) - z(x_i + h)]^2$$

3.5.3 Krigagem

Ao final do estudo da geoestatística (análise geoestatística) realiza-se a estimativa de uma determinada VR, usualmente em uma malha regular, permitindo inferir valores em locais não amostrados na área de estudo. Essa estimativa pode ser realizada por meio da krigagem, que é um estimador linear não enviesado.

O estimador de krigagem opera sob a premissa de ausência de erros de medida e variogramas corretos. Essencialmente, é uma média móvel ponderada dos valores observados na vizinhança, onde os vizinhos mais próximos recebem pesos mais elevados, enquanto os mais distantes têm pesos progressivamente menores, podendo chegar a ser nulos ou até negativos (Oliveira, 2003).

¹ Destaca-se que γ desta função é diferente daquele apresentado como o denominador da carga de pressão.

A técnica de interpolação por krigagem abrange diversos métodos de estimativa, tais como krigagem simples, krigagem ordinária, krigagem universal, krigagem disjuntiva e cokrigagem, além de abordagens não lineares como krigagem indicativa e krigagem fractal (Santos, 2010).

3.5.3.1 Krigagem Residual

A krigagem residual é uma técnica utilizada para contornar a não estacionariedade de algumas variáveis. Os dados são ajustados a uma superfície polinomial (que pode ser de primeiro ou segundo grau), que busca representar a tendência dos dados. Já os resíduos são calculados como a diferença entre o ponto amostral e a superfície ajustada e representam o fenômeno espacial sem a tendência (Rocha & Russo, 2007). Dessa forma, a análise geoestatística e a krigagem são realizadas nos resíduos e posteriormente são adicionados à superfície de tendência (Rocha & Russo, op. cit.).

4 MATERIAS E MÉTODOS

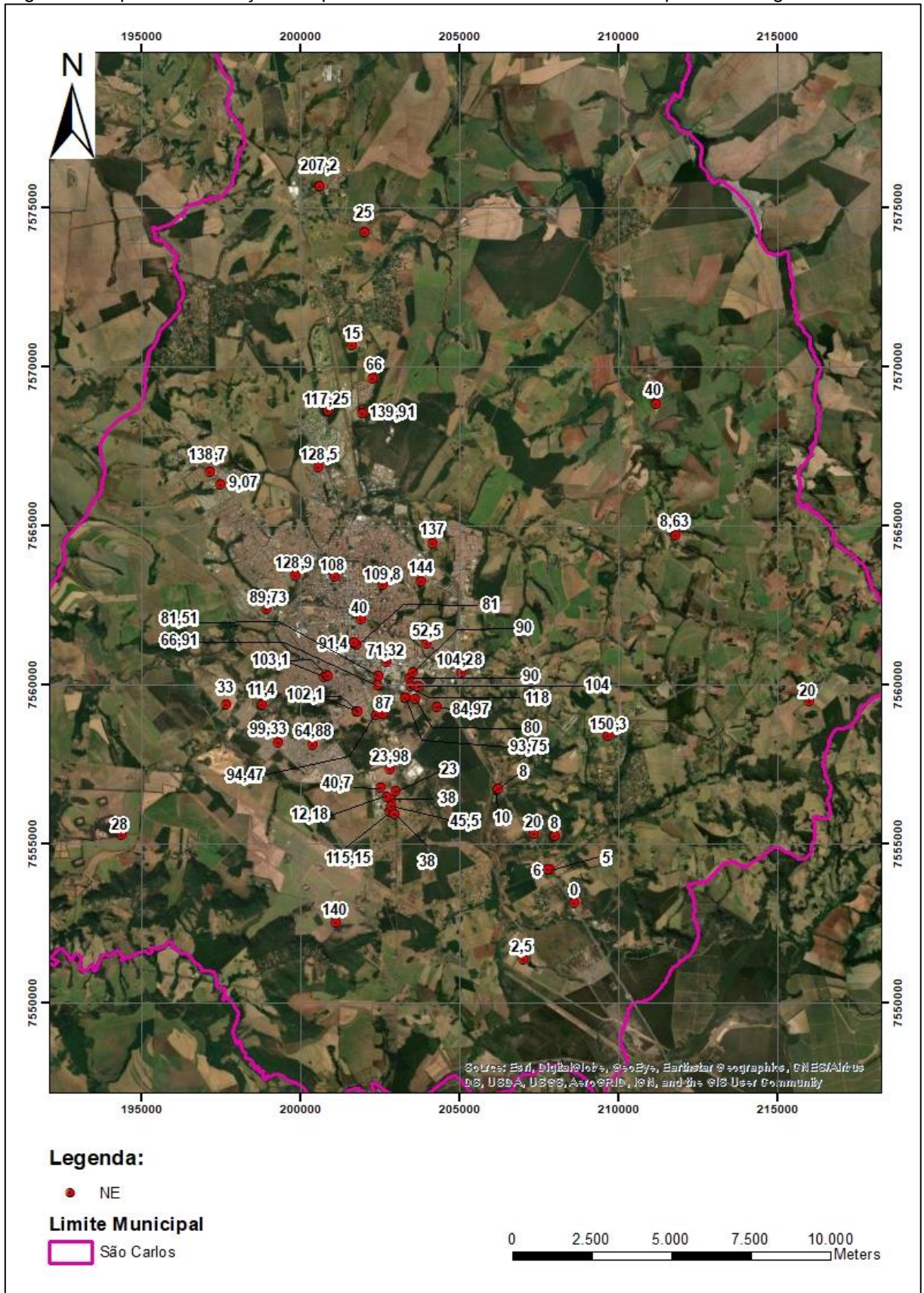
A metodologia utilizada no estudo envolverá duas etapas, com as seguintes atividades:

1. Levantamento de dados

Para atingir os objetivos propostos realizou-se o levantamento bibliográfico, incluindo-se a leitura criteriosa das publicações anteriores, a fim de aprimorar o conhecimento sobre os aspectos geológicos e hidrogeológicos de caráter regional e local, além da familiarização com as técnicas de inferência a serem aplicadas. A construção do banco de dados de carga hidráulica se deu por meio do levantamento de dados utilizados

No total, foram coletados 67 dados de carga hidráulica de poços tubulares utilizados em Sá (2016). Para a construção do banco de dados, coletaram-se as coordenadas UTM, a cota topográfica, a carga hidráulica, nível estático e condutividade hidráulica. Os pontos utilizados no estudo estão ilustrados no mapa da Figura 4.

Figura 4. Mapa de distribuição dos pontos utilizados no estudo e suas respectivas cargas hidráulicas.



2. Análise Estatística e Geoestatística

Os dados de carga hidráulica disponibilizados foram organizados em um banco de dados que permitiu facilmente a migração dos dados nos formatos adequados para os softwares de geoestatística e avaliação dos resultados obtidos. O banco de dados foi importado para o software Minitab, onde foram realizadas as análises de estatísticas descritivas e SGeMS®, onde foram realizadas a análise Geoestatística e as inferências. Além disso, utilizou-se o Software Arcgis versão 10.8 para a produção dos mapas.

5 RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados são divididos em duas partes:

1. Tratamento estatístico dos dados;
2. Aplicação dos métodos geoestatísticos;

5.1 Estatística Descritiva

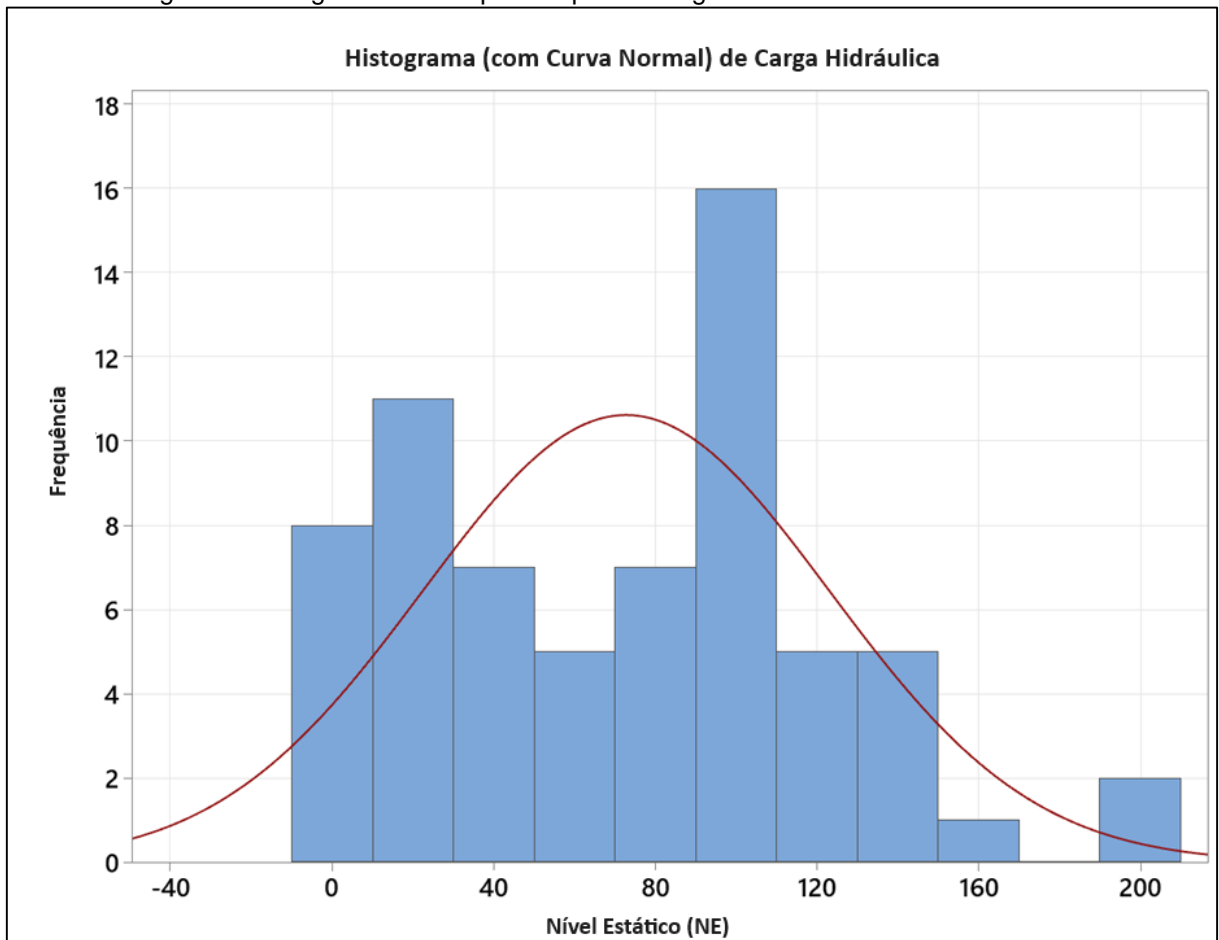
A análise estatística parte do estudo da estatística descritiva do parâmetro de interesse que, nesse estudo refere-se à carga hidráulica. Apresentam-se na Tabela 2 as estatísticas descritivas, calculadas com o software Minitab, para os poços utilizados no estudo. As estatísticas calculadas foram: mínimo, máximo, média, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação, coeficiente de curtose, coeficiente de assimetria, primeiro e terceiro quartis.

Tabela 2 - Estatísticas descritivas calculadas para a carga hidráulica da barragem em estudo.

| Mínimo | Máximo | Média | Mediana | Desvio Padrão |
|--------------------------------|----------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|
| 0,00 | 207,20 | 72,74 | 81,00 | 50,33 |
| Coeficiente de Variação | Curtose | Assimetria | Primeiro Quartil | Terceiro Quartil |
| 69,19 | -0,28 | 0,41 | 23,98 | 104,28 |

Com base nos resultados apresentados na Tabela 2, a carga hidráulica apresenta média e mediana de 72,74 m e 81,00 m, respectivamente. Para o auxílio da interpretação estatística dos dados, apresenta-se o histograma na Figura 5, em que se constata que as distribuições dos valores de carga hidráulica apresentam uma distribuição de assimetria positiva.

Figura 5. Histograma de Frequência para a carga hidráulica na área em estudo.



A normalidade da variável estudada foi testada através do software Minitab, por meio do teste KS proposto por Kolmogorov-Smirnov e do teste W por Shapiro-Wilk. Dessa forma, entende-se que a distribuição da carga hidráulica é não-normal, conforme estabelecido pelos dois testes retrocitados, cujos resultados apresentaram valores menores que 0,05 para p.

Figura 6. Teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov para a carga hidráulica.

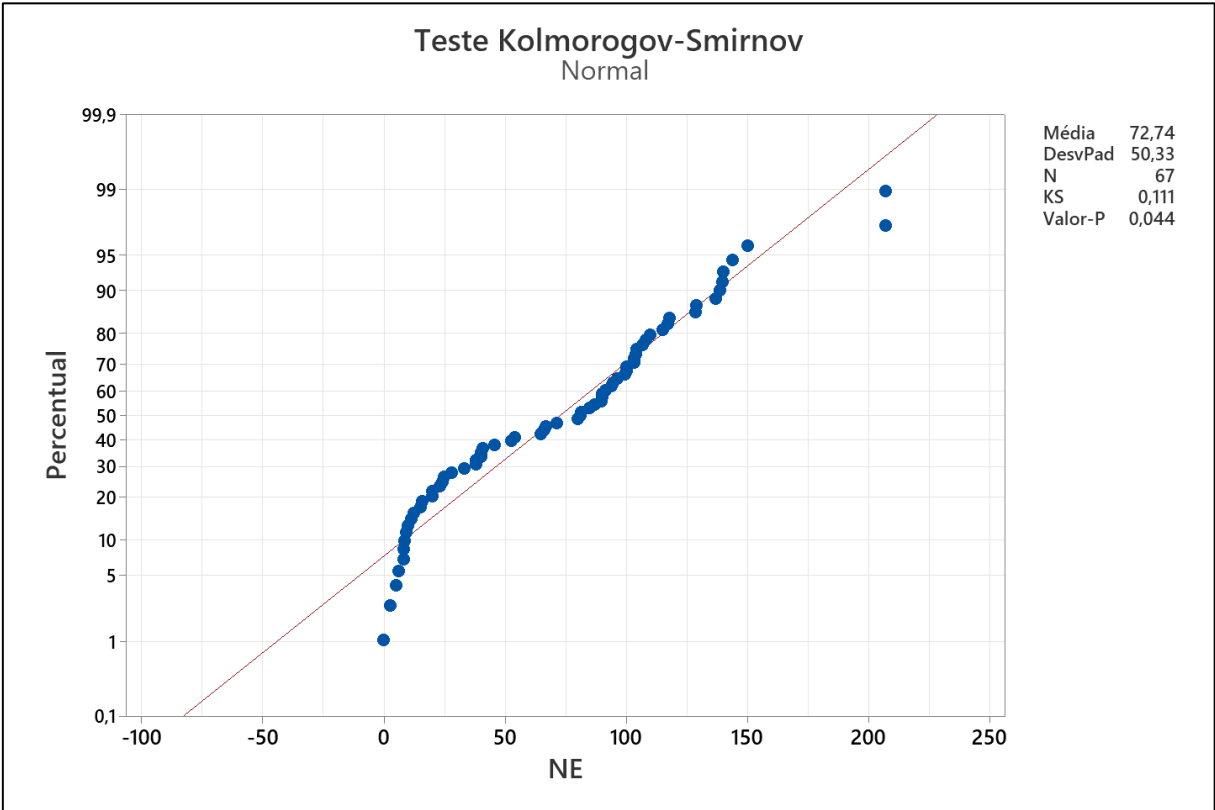
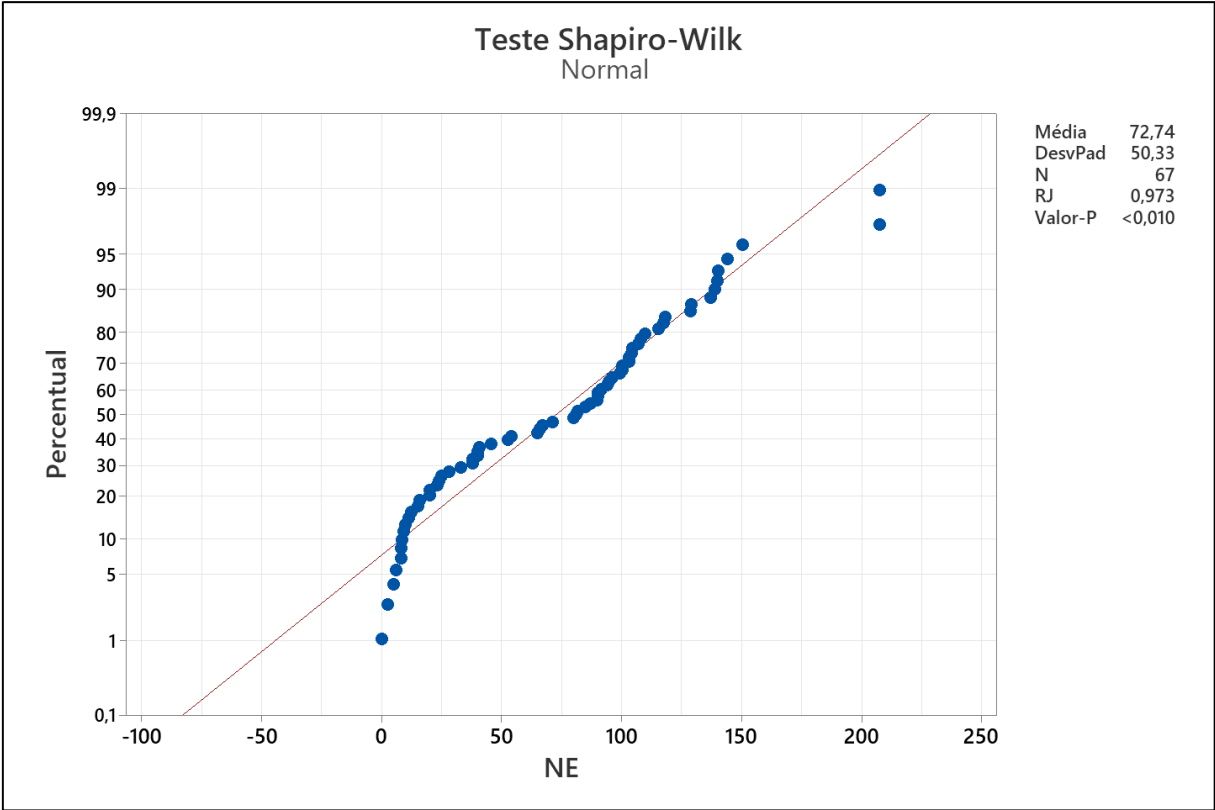


Figura 7. Teste de normalidade de Shapiro-Wilk para o logaritmo a carga hidráulica.



5.2 Método Geoestatístico

Os resultados e discussões dos métodos geoestatísticos aplicados nesse trabalho de conclusão são apresentados nesse capítulo. Para a análise dos dados optou-se por utilizar o software SGEMS, que possui os recursos necessários para a análise dos dados a que esse estudo se propôs.

5.2.1 Análise Geoestatística Exploratória Inicial

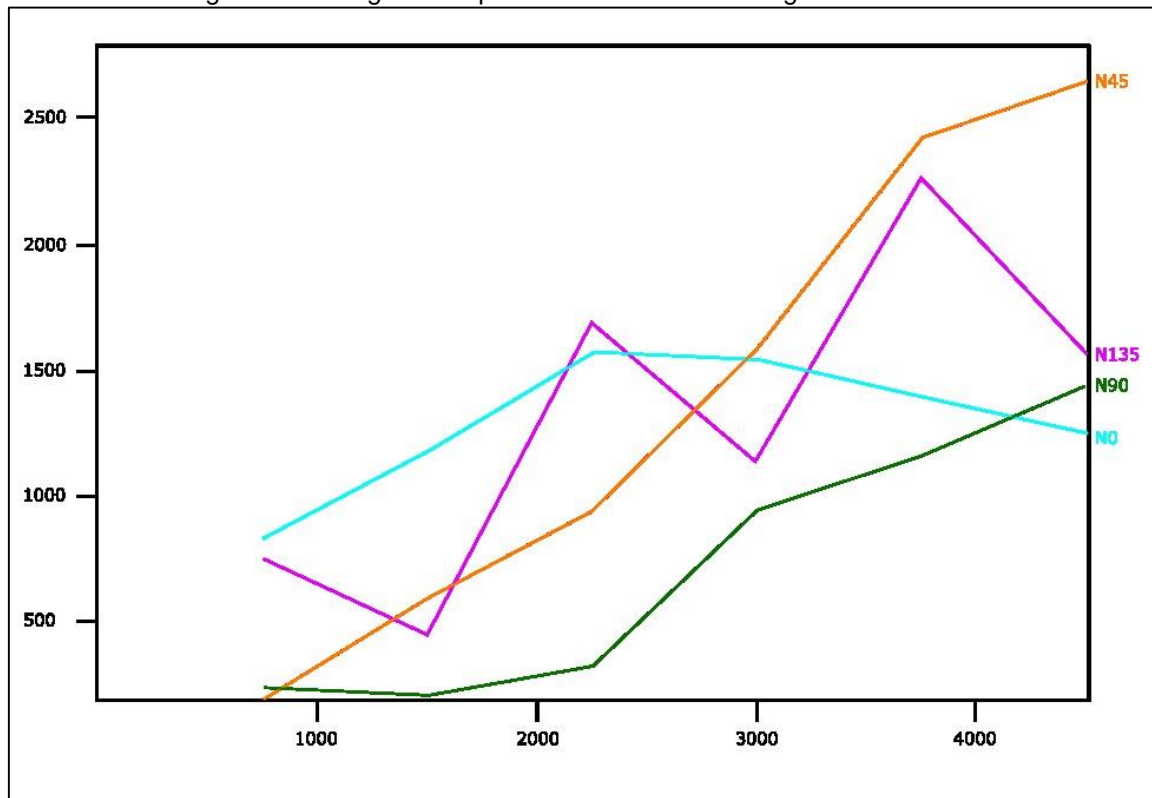
5.2.1.1 Análise de Anisotropia

Através da análise do semivariograma, é possível concluir se o parâmetro investigado é isotrópico (a função variograma não varia com a direção) ou anisotrópico (há alteração da função variograma com a direção). Dessa forma, a isotropia da carga hidráulica foi estudada a partir da construção de semivariogramas nas direções horizontais: 0°, 45°, 90° e 135° (Figura 8). Além das direções, utilizou-se os seguintes parâmetros para o cálculo do variograma: tamanho do passo (valor médio da distância entre as amostras vizinhas); número de passos (divisão do tamanho do campo geométrico pelo número de passos) e tolerância do passo (metade do tamanho do passo). Os parâmetros utilizados estão definidos na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros utilizados na construção do semivariograma.

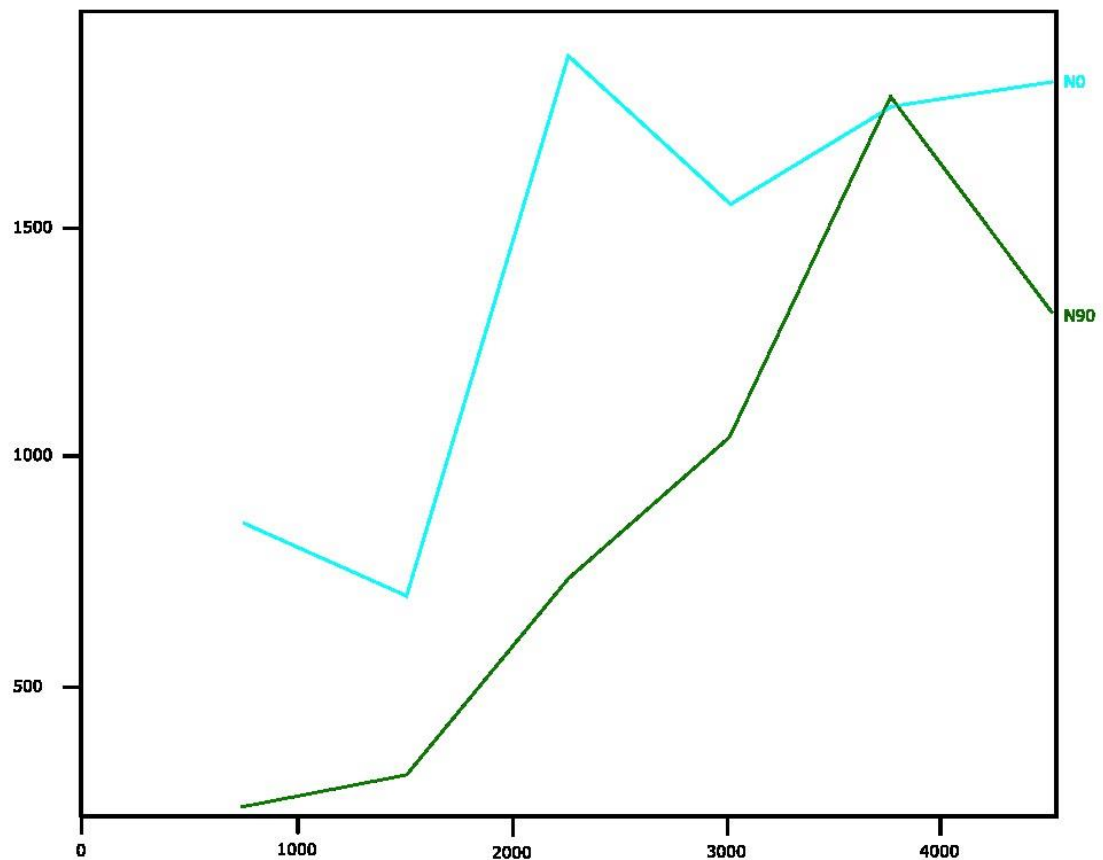
| Direção | Campo Geométrico | Tamanho do Passo | Número de Passos | Tolerância do passo |
|---------|------------------|------------------|------------------|---------------------|
| 0° | 4500 | 750 | 6 | 375 |
| 45° | 4500 | 750 | 6 | 375 |
| 90° | 4500 | 750 | 6 | 375 |
| 135° | 4500 | 750 | 6 | 375 |

Figura 8 - Variograma experimental da variável carga hidráulica.



A partir da análise dos variogramas acima, constatou-se a anisotropia e, ainda, observou-se uma maior estruturação na direção de 0° . Dessa forma, focou-se a análise dos variogramas nas direções de 0° e 90° , ajustando-se a tolerância de 22,5 para 45, conforme pode ser visto na Figura 9.

Figura 9. Variograma experimental nas direções 0° e 90°.



Nas direções citadas, o variograma apresentado descreve um fenômeno não estacionário, já que não apresenta um patamar definido as duas direções apresentadas tendem a não se estabilizar, conforme observado na Figura 9.

5.2.1.2 Cálculo dos Resíduos

Devido ao fato de os dados da carga hidráulica terem gerado um variograma não estacionário, optou-se por ajustar os dados a uma superfície polinomial de primeiro grau a fim de calcular seus resíduos. Esse ajuste polinomial foi realizado com base nos mínimos quadrados, visando minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre a superfície ajustada e as observações. A Figura 10 mostra a superfície ajustada.

Figura 10 - Superfície polinomial de grau 1 ajustada aos dados de carga hidráulica.



A partir da superfície ajustada, demonstrada na Figura 10, calcularam-se os resíduos subtraindo-se os valores ajustados dos valores originais.

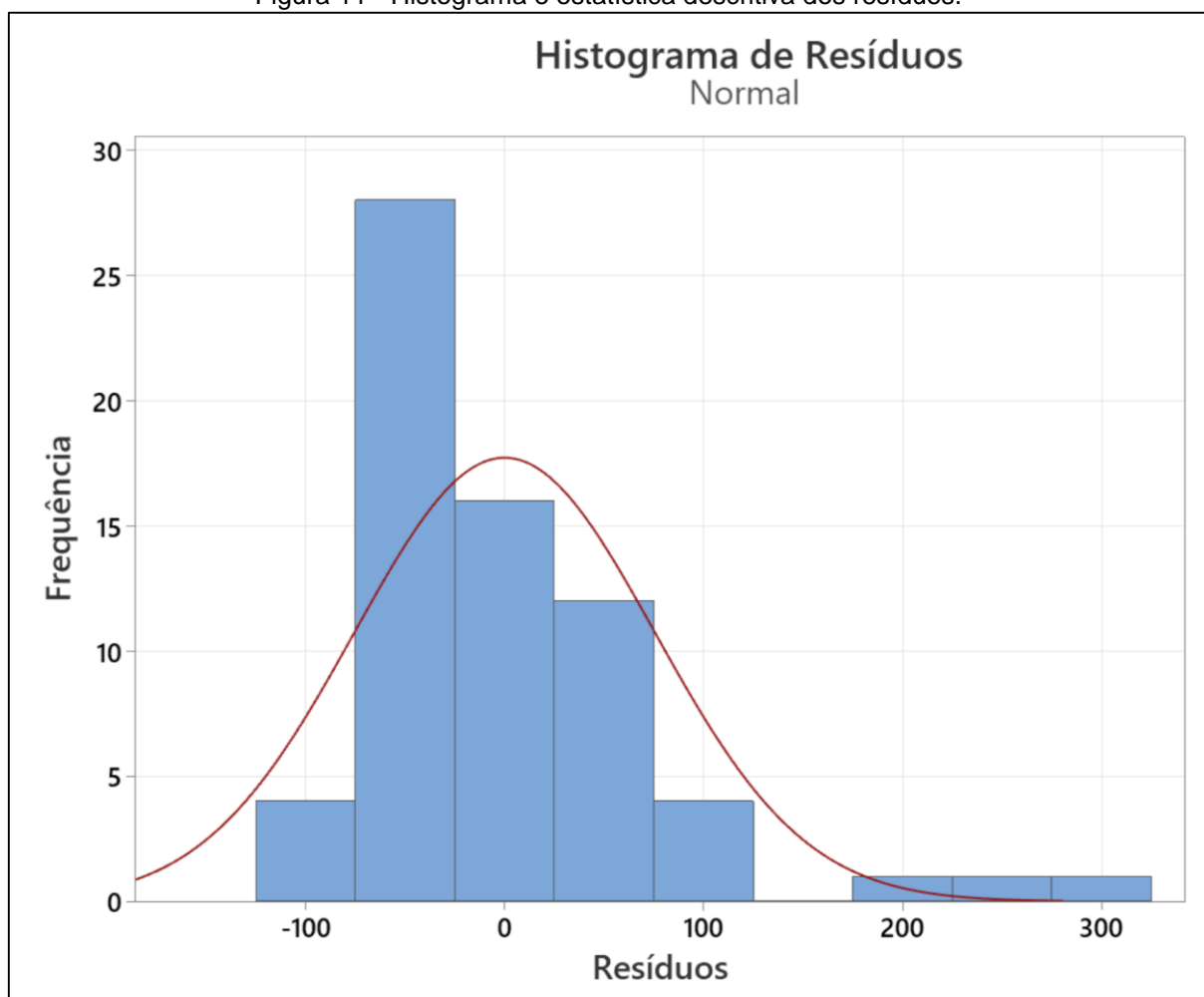
A análise dos dados dos resíduos foi feita por meio da estatística descritiva cujo histograma é apresentado na Figura 11. Na Tabela 4, apresentam-se os dados calculados para os poços utilizados no estudo.

Tabela 4 - Estatísticas descritivas calculadas para os resíduos da área em estudo.

| Mínimo | Máximo | Média | Mediana | Desvio Padrão |
|--------------------------|---------|-------------|------------------|------------------|
| -94,71 | 318,16 | -0,00044777 | -20,39 | 75,46 |
| Coefficiente de Variação | Curtose | Assimetria | Primeiro Quartil | Terceiro Quartil |
| -1,68531E07 | 5,75 | 2,08 | -44,78 | 31.63 |

Com base nos resultados apresentados na Tabela 4, os resíduos apresentam média e mediana iguais a -0,0004 m e -20,39 m, respectivamente. É importante destacar que o valor da média está coerente com o que se é esperado quando se ajusta os dados por meio do método dos mínimos quadrados. Para o auxílio da interpretação estatística dos dados, apresenta-se o histograma da Figura 11, em que se constata que as distribuições dos valores de carga hidráulica apresentam uma distribuição de assimetria positiva.

Figura 11 - Histograma e estatística descritiva dos resíduos.



5.2.2 Análise Geoestatística Exploratória – Após Cálculo dos Resíduos

Com base nos valores calculados dos resíduos, conduziu-se uma segunda análise exploratória, resultando na obtenção do variograma experimental da Figura 12 para quatro direções coplanares: 0°, 45°, 90° e 135°. Os parâmetros utilizados são apresentados na Tabela 5.

Figura 12. Variograma experimental dos resíduos calculados para as direções 0°, 45°, 90° e 135°.

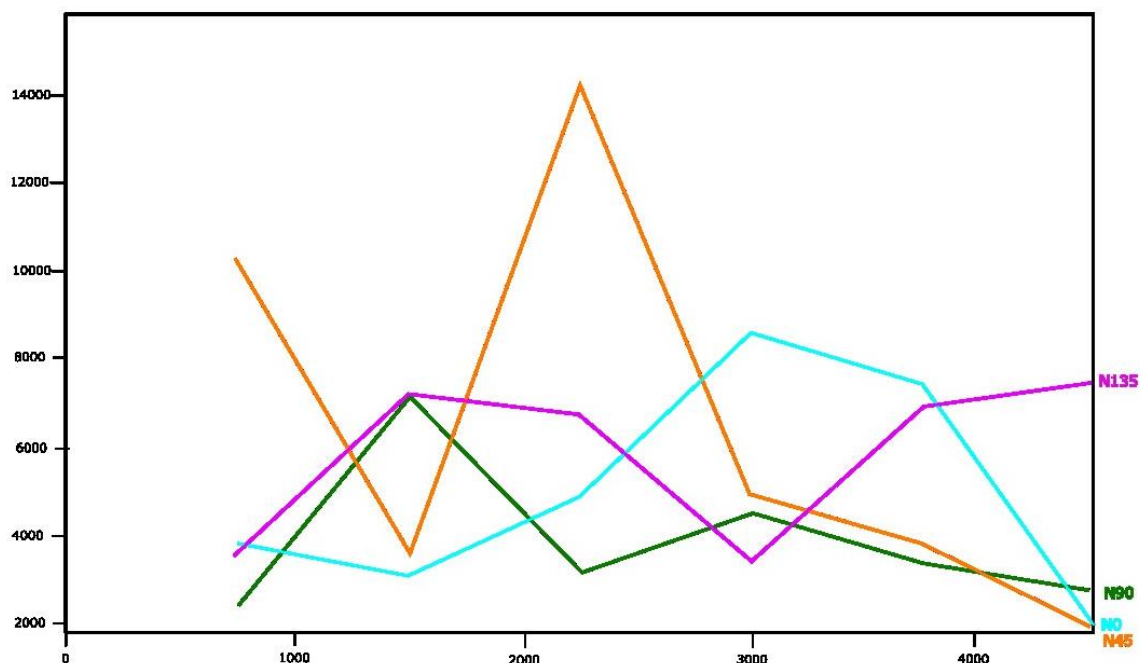


Tabela 5. Parâmetros utilizados na construção do semivariograma.

| Direção | Campo Geométrico | Tamanho do Passo | Número de Passos | Tolerância |
|---------|------------------|------------------|------------------|------------|
| 0° | 4500 | 750 | 6 | 375 |
| 45° | 4500 | 750 | 6 | 375 |
| 90° | 4500 | 750 | 6 | 375 |
| 35° | 4500 | 750 | 6 | 375 |

A análise do variograma da Figura 12 nos mostra que não é possível identificar claramente a anisotropia da carga hidráulica, sendo que no par 0°/90° identifica-se estrutura em apenas uma direção. Essa característica pode ser fruto da ausência de anisotropia ou do número insuficiente de informações (malha amostral ruim para o tamanho da área pesquisada). Neste caso, optou-se por calcular o variograma omnidirecional para, em sequência, realizar o ajuste do modelo

teórico do variograma (Figura 13). Os parâmetros considerados para a realização desse ajuste estão apresentados na Tabela 6.

Figura 13. Modelo Teórico de Variograma Tipo Esférico Ajustado ao Variograma Experimental Omnidirecional dos Resíduos.

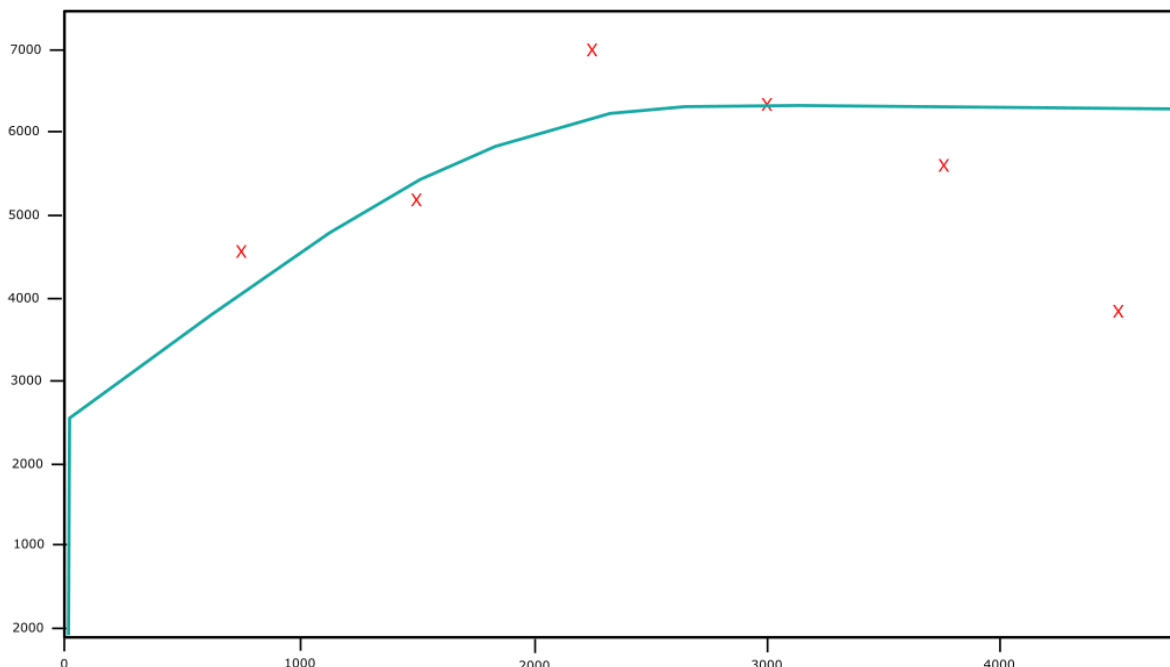
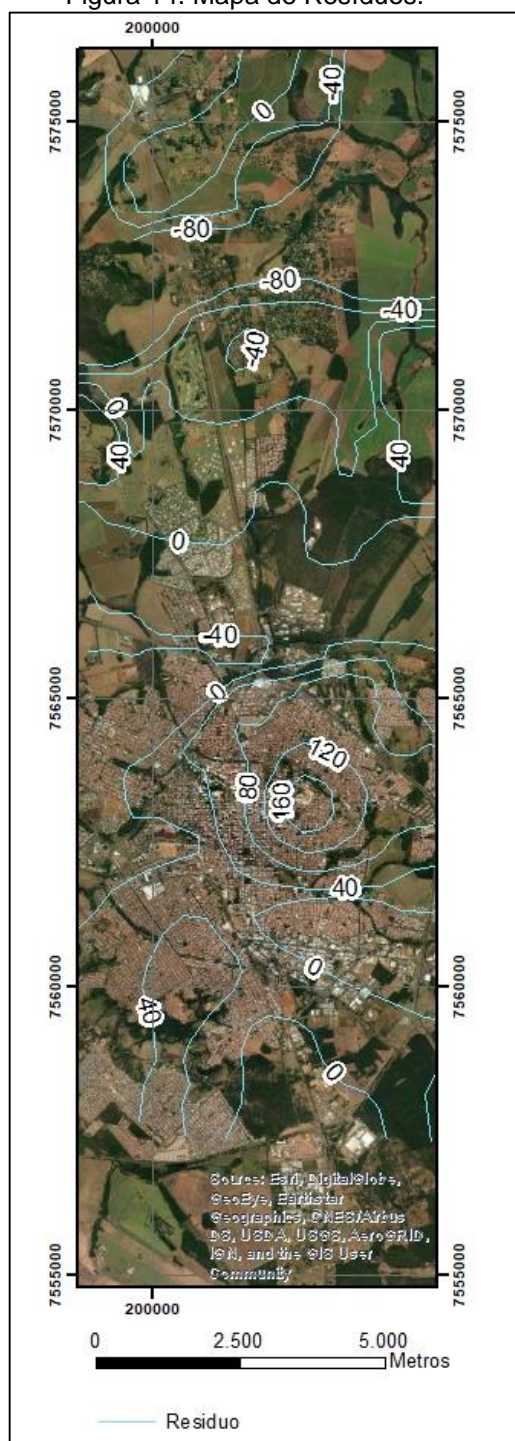


Tabela 6. Parâmetros utilizados no ajuste do modelo teórico esférico ao variograma experimental omnidirecional para análise da carga hidráulica.

| Tipo de Modelo | Número de Estruturas | Efeito Pepita | Variância Espacial 1 | Sill (C_1) | Amplitude Máxima | Amplitude Mínima | Rotação |
|----------------|----------------------|---------------|----------------------|----------------|------------------|------------------|---------|
| Esférico | 1 | 2500 | 6 | 3800 | 2655 | 450 | 0 |

Após o ajuste do modelo teórico de variograma, seguiu-se para a realização da krigagem ordinária que, de acordo com os objetivos desse trabalho, utilizou blocos de 375 x 375 metros. O Mapa da Figura 14 mostra as curvas de isovalores definidas a partir dos resultados da krigagem ordinária para os resíduos.

Figura 14. Mapa de Resíduos.



Com base na superfície ajustada e no mapa de resíduos estimado por krigagem ordinária, elaborou-se o mapa de contorno da carga hidráulica para o município de São Carlos. Esse mapa foi feito no software Arcgis Map versão 10.8, em que as curvas de carga hidráulica estão representadas em intervalos de 40 metros, o que evitou um excesso de informações no mapa. O mapa em questão e análise final dos resultados será apresentado no capítulo a seguir.

6 INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Como se pôde observar nos mapas retroapresentados, a área em que realizou o estudo apresentou uma diminuição, conforme demonstrado a partir do mapa da Figura 15. Importa destacar que essa medida se fez necessária devido às grandes distorções que estavam ocorrendo ao se interpolar as áreas mais marginais da área do estudo, em que não havia tantos pontos disponíveis para interpolação.

Dessa forma, o mapa de carga hidráulica produzido a partir da soma da superfície ajustada e dos resíduos é apresentado na Figura 16. Com base nesse mapa, pode-se afirmar que as cargas hidráulicas do Sistema Aquífero Guarani no município de São Carlos variam entre 40 e 240 m, estando coerentes com o range dos dados coletados e analisados nesse trabalho.

Além disso, é possível concluir, pelo mapa, que a direção do fluxo subterrâneo relacionado ao Sistema Aquífero Guarani está relacionada aos cursos d'água presentes na região de estudo.

Figura 15. Mapa com a diminuição da área estudada.

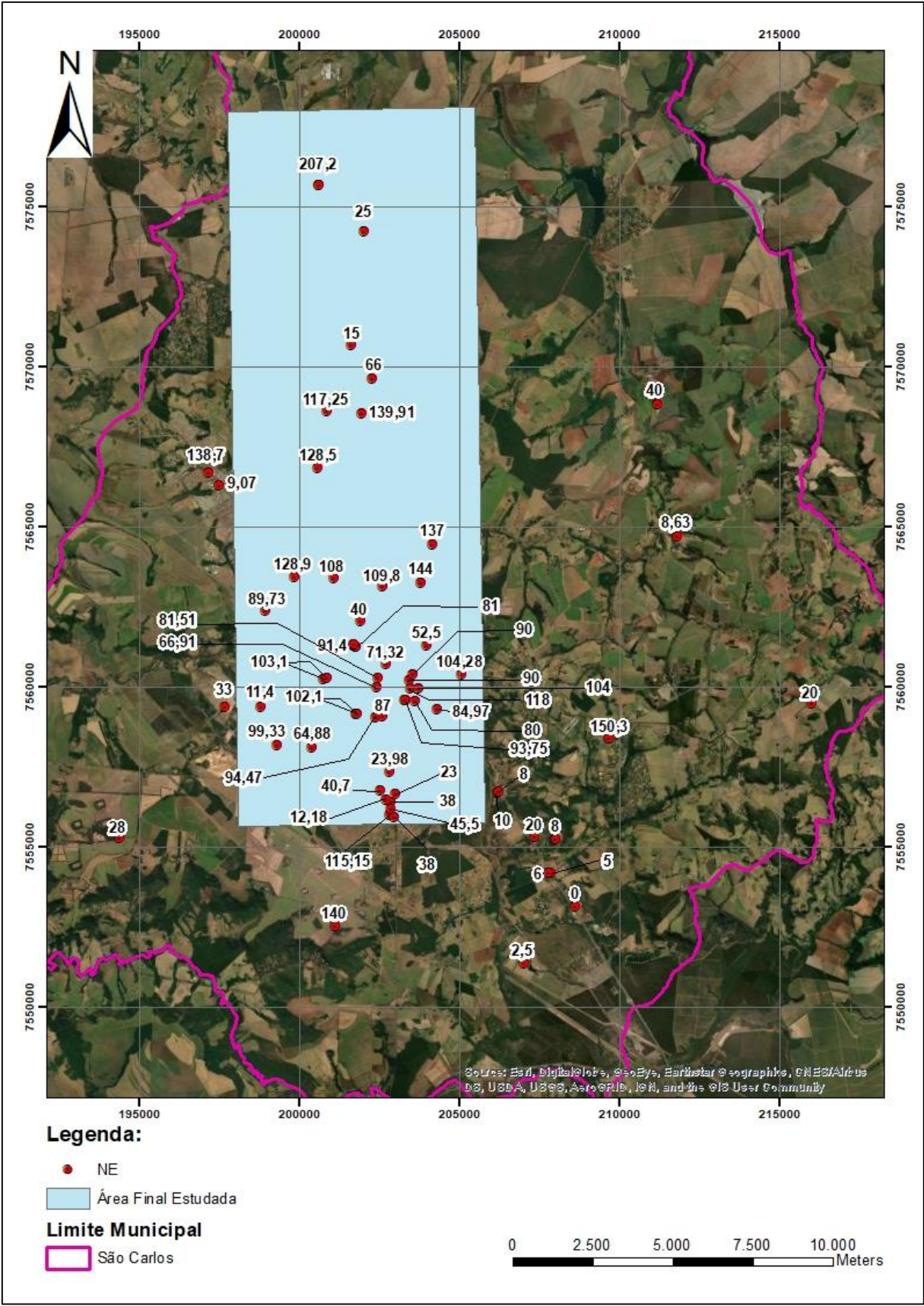
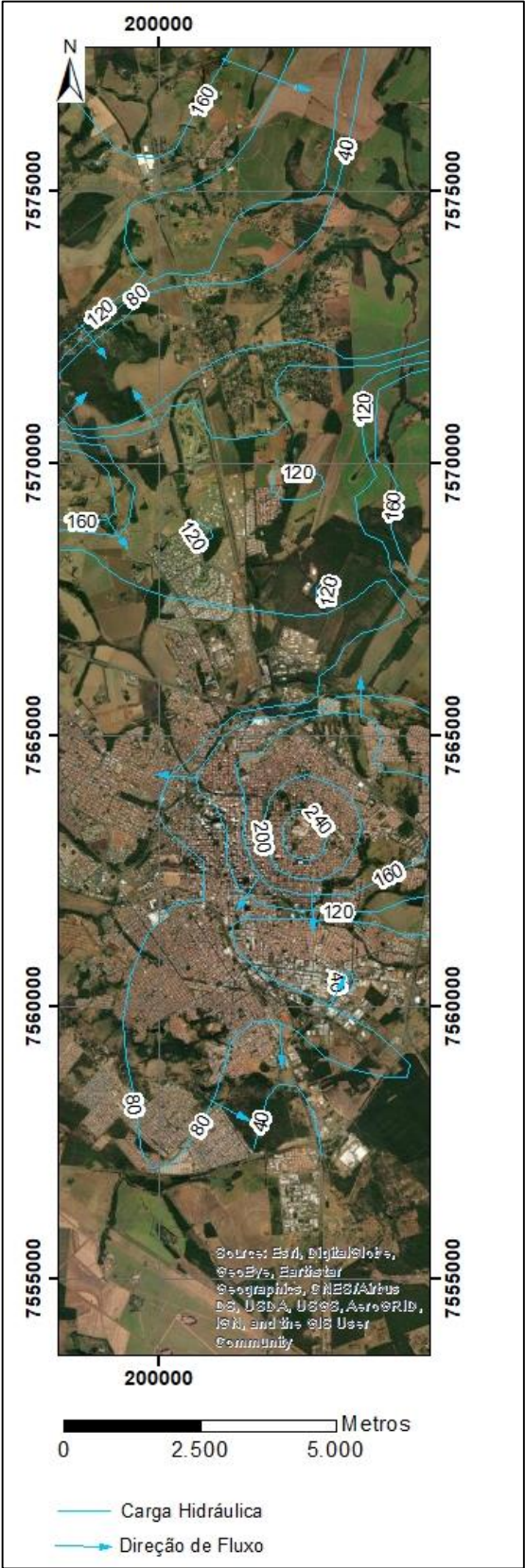


Figura 16. Mapa Carga Hidráulica.



7 CONCLUSÕES

O trabalho apresentado neste documento teve como objetivo estimar os valores de carga hidráulica por meio do método de krigagem de resíduos para o Sistema Aquífero Guarani, no município de São Carlos.

Nesse contexto, a variável carga hidráulica apresentou comportamento não estacionário e a krigagem de resíduos mostrou-se um método adequado para sua análise. No entanto, na análise exploratória dos dados, a análise dos variogramas não possibilitou a identificação de anisotropias, o que levou ao uso do variograma omnidirecional para análise dos dados. É importante ressaltar que esse comportamento dos variogramas provavelmente é reflexo do número insuficiente de poços para caracterizar adequadamente a presença de anisotropia, o que acarreta o aumento de incertezas com relação às estimativas executadas.

Por fim, as estimativas realizadas pelo método de krigagem de resíduos, embora apresentem um nível de incerteza devido aos fatores já citados, mostraram-se próximas e dentro do *range* dos dados amostrados, mostrando que este método foi adequado para a análise e consequente elaboração de mapas de carga hidráulica.

8 REFERÊNCIAS

- Araujo, L. M., França, A. B., & Potter, P. E. (1995). *Aquífero Gigante do Mercosul no Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai; Mapas Hidrogeológicos das Formações Botucatu, Pirambóia, Rosário do Sul, Buena Vista, Misiones e Tacaurémbo*. Texto Explicativo, Curitiba.
- Araujo, L., França, A., & Potter, P. (1999). Hydrogeology of the Mercosul Aquifer System in the Paraná and Chaco-Paraná Basins, South America, and comparison with the Navajo-Nugget Aquifer System, USA. *Hydrogeology Journal*, 317-336.
- Bistrichi, C. A., & Almeida, F. F. (1981). *Mapa Geológico de São Paulo*. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Divisão de Minas e Geologia Aplicada.
- Cabral, J. (2008). Movimento das Águas Subterrâneas. Em F. A. Feitosa, *Hidrogeologia - Conceitos e Aplicações*. Rio de Janeiro: CPRM.
- Camara, G., & Medeiros, J. S. (1998). Geoprocessamento para Projetos Ambientais. Acesso em 11 de Novembro de 2023, disponível em http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis_ambiente/
- Chilès, J. P. (2001). On the Contribution of Hydrogeology to Advances in Geostatistics. Em P. A. Monestiez, *Geostatistics for Environmental Applications. Quantitative Geology and Geostatistics*. Springer.
- Deutsch, C. V., & Journel, A. G. (1997). *GLISB - Geostatistical Software Library and User's Guide*. (2a ed. ed.). New York: Oxford University Press.
- Feitosa, F. A., Filho, J. M., Feitosa, E. C., & Demetrio, J. G. (2008). *Hidrogeologia - Conceitos e Aplicações*. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil: CPRM, LABHID.
- Gastmans, D. (2007). Hidrogeologia e Hidroquímica do Sistema Aquífero Guarani na Porção Ocidental da Bacia Sedimentar do Paraná.
- Gastmans, D. (2007). *Hidrogeologia e Hidroquímica do Sistema Aquífero Guarani na Porção Ocidental da Bacia Sedimentar do Paraná*. Rio Claro: Universidade Estadual Paulista.
- Gonçalves, A. R. (1986). *Geologia Ambiental da Área de São Carlos*. Tese (Doutorado em Geologia Geral e Aplicação), Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, São Paulo.
- Idrissy, E. H., & Smedt, F. D. (2007). *A comparative study of hydraulic conductivity estimations using geostatistics*. (Vol. 15). Hydrogeology Journal. doi:<https://doi.org/10.1007/s10040-007-0166-0>

- Kiang, C. H. (2016). Tipos hidroquímicos do Sistema aquífero Bauru no Estado de São Paulo. *Águas Subterrâneas*, 224-245. doi:<http://dx.doi.org/10.14295/ras.v30i2.28005>
- Milani, E. J. (1997). *Evolução Tectono-Estratigráfica da Bacia do Paraná e seu Relacionamento com a Geodinâmica Fanerozóica do Gondwana Sul-Occidental*. Porto Alegre: Instituto de Geociências – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Oliveira, M. C. (2003). Métodos de estimação de parâmetros em modelos geoestatísticos com diferentes estruturas de covariâncias: uma aplicação ao teor de cálcio no solo. 140. Piracicaba, São Paulo, Brasil: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz.
- Oliveira, R. P., & Grego, C. R. (2015). Conceitos Básicos da Geoestatística. Em R. P. Oliveira, C. R. Grego, & Z. N. Brandão, *Geoestatística Aplicada na Agricultura de Precisão Utilizando o Vesper*. (pp. 41-62). Brasília-DF: Embrapa.
- Rabelo, J. L. (2006). *Estudo de Recarga do Aquífero Guarani no sistema Jacaré-Tietê*. São Carlos.
- Rennó, C., & Soares, J. V. (2007). Conceitos básicos de modelagem hidrológica. Em M. S. Meirelles, *Geomática: modelos e aplicações ambientais*. Embrapa.
- Riccomini, C. (1997). Considerações sobre a posição estratigráfica e tectonismo deformador da Formação Itaqueri na Porção Centro-Leste do estado de São Paulo. *Rev. IG São Paulo*, 41-48.
- Sá, V. R. (2016). *Aplicação de métodos geoestatísticos no estudo das distribuições espaciais de condutividade hidráulica em áreas do Sistema Aquífero Guarani (SAG) e do Sistema Aquífero Bauru (SAB) no estado de São Paulo, Brasil*. USP, IGc. São Paulo.: USP.
- Santos, G. R. (2010). Hierarquização Geométrica dos Preditores Geoestatísticos. Lavras: Universidade federal de Lavras.