

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

GEOESTATÍSTICA APLICADA A DADOS GEOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS
DA BACIA DE SÃO PAULO

Angélica Oliveira Miranda

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

Área de concentração: Recursos Minerais e Meio
Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Monteiro da Rocha

SÃO PAULO

2021

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

Serviço de Biblioteca e Documentação do IGc/USP

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

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

Oliveira Miranda, Angélica
Geoestatística Aplicada a Dados Geológico e
Geotécnicos da Bacia de São Paulo / Angélica
Oliveira Miranda; orientador Marcelo Monteiro da
Rocha. -- São Paulo, 2021.
131 p.

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

1. Krigagem Ordinária. 2. Krigagem de Variáveis
Indicadoras. 3. Krigagem de Resíduos. 4. Inverso da
Potência da Distância. 5. SPT (Standard Penetration
Test). I. Monteiro da Rocha, Marcelo, orient. II.
Título.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**GEOESTATÍSTICA APLICADA A DADOS GEOLÓGICOS E
GEOTÉCNICOS DA BACIA DE SÃO PAULO**

ANGÉLICA OLIVEIRA MIRANDA

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Monteiro da Rocha

Dissertação de Mestrado

Nº 870

COMISSÃO JULGADORA

Dr. Marcelo Monteiro da Rocha

Dr. José Alberto Quintanilha

Dra. Rita Parisi Conde Pozzi

SÃO PAULO

2021

“There is a theory which states that if ever anyone discovers exactly what the universe is for and why it is here, it will instantly disappear and be replaced by something even more bizarre and inexplicable.

There is another theory which states that this has already happened.”

Douglas Adams in

“The Hitchhiker's Guide to the Galaxy: The Restaurant at the End of the Universe”

Ao meu marido Cezar

AGRADECIMENTOS

Agradeço, antes de tudo, à minha família, em especial aos meus pais, Celso e Angela, e ao meu marido e melhor amigo, Cezar, que me apoiou muito durante a elaboração deste trabalho.

Aos meus amigos e colegas da sala 105, em especial ao futuro doutor em geoestatística Gustavo Zanco Ramos, considerado por mim como coorientador deste trabalho, pois me ajudou e me ensinou muito.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos durante o desenvolvimento deste mestrado.

Aos funcionários de Metrô de São Paulo, em especial ao geólogo mestre Marcelo Denser Monteiro, que contribuiu muito para este trabalho, cedendo dados de sondagens do metrô.

Aos funcionários do DAEE, em especial aos funcionários Igor Borges Ludwig e Edna de Oliveira Lopes Barbosa, que me receberam na empresa e me auxiliaram na aquisição de dados.

Aos funcionários da CPRM, em especial aos geólogos Andréa Segura Franzini e Thiago Affonso Franzolin, que me enviaram dados importantes para realização deste trabalho.

A empresa Geovariances, que apoia o ensino e a pesquisa no Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, disponibilizando licenças do software de geoestatística Isatis.

Aos funcionários do Instituto de Geociências, especialmente ao funcionário Antônio Tadashi Kikuda, responsável pelo Laboratório de Informação Geológica, que me ajudou muito durante a pandemia, me auxiliando com os softwares necessários para a realização deste trabalho.

Aos professores do Instituto de Geociências, especialmente ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelo Monteiro da Rocha, por me auxiliar na realização desse trabalho e por me dar a oportunidade de aprofundar meus conhecimentos de geoestatística e sua aplicabilidade a dados geológicos e geotécnicos.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	VI
SUMÁRIO	VII
RESUMO	IX
ABSTRACT	X
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS	XV
LISTA DE QUADROS	XVII
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS E METAS	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1 GEOLOGIA DA BACIA DE SÃO PAULO	3
3.1.1 <i>Contexto geológico e tectônico regional</i>	5
3.1.2 <i>Contexto geológico e tectônico local</i>	6
3.1.2.1 <i>Embasamento Pré-Cambriano</i>	8
3.1.2.2 <i>Litoestratigrafia dos Sedimentos Paleógenos</i>	10
3.1.2.3 <i>Coberturas Neocenozóicas</i>	12
3.2 ESTATÍSTICA	13
3.3 GEOESTATÍSTICA	15
3.3.1 <i>Variáveis Regionalizadas</i>	16
3.3.2 <i>Variograma</i>	16
3.3.3 <i>Krigagem Ordinária</i>	19
3.3.4 <i>Krigagem de Variáveis Indicadoras</i>	21
3.3.5 <i>Krigagem Residual</i>	22
3.3.6 <i>Inverso da Potência da Distância</i>	24
3.3 GEOTECNIA	25
3.3.1 <i>Geotecnia da Bacia de São Paulo</i>	25
3.3.2 <i>Compacidade e Consistência dos Solos</i>	33
3.3.3 <i>Recuperação</i>	33
3.3.4 <i>RQD (Rock Quality Designation)</i>	34
4. MATERIAIS E MÉTODOS	35
4.1 AQUISIÇÃO DE DADOS E CONSOLIDAÇÃO DO BANCO DE DADOS	36
4.3 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS	42
5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS	43
5.1 ESTIMATIVA DO TOPO ROCHOSO DA BACIA DE SÃO PAULO	43

5.1.1 Krigagem de Resíduos dos Dados em um Único Domínio.....	43
5.1.2 Krigagem Ordinária dos Dados Divididos em Seis Domínios.....	51
5.1.3 Comparação entre os dois métodos.....	75
5.2 ESTIMATIVA DA ESPESSURA DOS SOLOS DA BACIA DE SÃO PAULO.....	79
5.2.1 Espessura dos Sedimentos.....	79
5.2.2 Espessura do Solo de Alteração de Rocha.....	85
5.3 KRIGAGEM INDICADORA.....	90
5.3.1 Variável Indicadora Sedimento.....	92
5.3.2 Variável Indicadora Solo de Alteração de Rocha.....	97
5.3.3 Variável Indicadora Rocha.....	101
5.4 GEOESTATÍSTICA DE DADOS GEOTÉCNICOS.....	106
5.4.1 SPT (Standard Penetration Test).....	107
5.4.3 Recuperação e RQD (Rock Quality Designation).....	112
5.4.2 Variável Indicadora Areia e Argila.....	119
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	124
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	126

RESUMO

Situada no maior centro urbano do país, a bacia de São Paulo apresenta grande número de informações, provenientes de sondagens geotécnicas e de poços, espalhadas por toda a sua extensão. Estas sondagens geotécnicas e poços foram realizados nos últimos anos por empresas públicas e privadas visando obras e o abastecimento de água. As informações geológicas e geotécnicas obtidas por tais técnicas de investigação ainda não foram analisadas do ponto de vista geoestatístico. O principal objetivo deste trabalho foi a definição do topo rochoso do embasamento da bacia utilizando técnicas geoestatísticas, além da definição das espessuras dos sedimentos e solos de alteração e o cálculo das probabilidades de ocorrência de sedimentos, solos de alteração ou rochas no interior da bacia. A definição do topo rochoso foi realizada a partir de dois procedimentos: o primeiro considerando a bacia como um todo e, no segundo, a bacia foi dividida em seis domínios definidos estruturalmente. No primeiro caso os dados descreveram um fenômeno não estacionário e, portanto, sem variância espacial finita. Para o tratamento destes dados optou-se pela krigagem dos resíduos, uma opção para os casos de variáveis não estacionárias em que a deriva pode ser filtrada por uma superfície polinomial de baixo grau ajustada ao conjunto de dados. Já no segundo método, os dados se comportaram de forma estacionária, sendo realizada, neste caso, a krigagem ordinária para cada domínio. Para a definição das espessuras dos sedimentos e solos de alteração, foram utilizadas as técnicas geoestatísticas krigagem ordinária e inverso da potência da distância, respectivamente. Para o cálculo das probabilidades de ocorrência de sedimentos, solos de alteração ou rochas em determinado ponto da bacia, foi aplicada a krigagem de variáveis indicadoras – uma técnica geoestatística não paramétrica. O segundo objetivo deste trabalho foi analisar sondagens mistas realizadas para a construção da Linha 2 Amarela do Metrô da cidade de São Paulo, estimando os valores de SPT (Standard Penetration Test) a partir da krigagem ordinária e a probabilidade de ocorrência de areias ou argilas, a partir da krigagem de variáveis indicadoras, com a codificação indicadora da granulometria do solo. Também foi realizada nesta etapa a estimativa de valores de recuperação e RQD (Rock Quality Designation) por krigagem ordinária, para as rochas descritas nas sondagens, mostrando diferentes tipos de análises que podem ser realizadas em futuras obras do Metrô.

ABSTRACT

Located in the largest urban centre's country, the São Paulo basin presents a great number of information, from geotechnical drillings and wells, spread throughout its length. These geotechnical drillings and wells have been made in recent years by public and private companies for construction and water supply. The geological and geotechnical information obtained by these investigation techniques has not yet been analysed from a geostatistical point of view. The main objective of this work was to define the rocky top of the basement of the basin using geostatistical techniques, besides the definition of the thickness of sediments and alteration soils and the calculation of the probabilities of occurrence of sediments, alteration soils or rocks inside the basin. The definition of the rocky top of the basin was made by two procedures: the first one considering the basin as a whole and in the second one, the basin was divided into six domains defined by the basin's structure. In the first case, the data described a non-stationary phenomenon and, therefore, do not have a finite spatial variance. For the treatment of these data, the residual kriging was chosen, an option for non-stationary variables which the drift can be filtered by a low-degree polynomial surface adjusted to the data set. In the second method, the data behaved in a stationary way, being done, in this case, the ordinary kriging for each domain. For the definition of the thickness of the sediments and alteration soils, the geostatistical techniques ordinary kriging and inverse of the distance to a power, respectively, were used. To calculate the probabilities of occurrence of sediments, alteration soils or rocks at a certain point in the basin, was applied the indicator kriging – a non-parametric geostatistical technique. The second objective of this work was to analyse the rotary drilling rigs made for the construction of the Line 2 Yellow of the subway of the city of São Paulo, estimating the SPT (Standard Penetration Test) values, using ordinary kriging, and the probability of occurrence of sands or clays, using indicator kriging from the indicator codification of the soil granulometry. The core recovery and RQD (Rock Quality Designation) values were also estimated by ordinary kriging, highlighting different forms of analysis that can be done in future Metrô works.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Mapa geológico da Bacia de São Paulo e porção sudoeste da Bacia de Taubaté. Fonte: CPRM (2019).4
- Figura 2 – Contexto geológico regional do Rift Continental do Sudeste do Brasil (RCSB) - 1) embasamento pré-cambriano; 2) rochas sedimentares paleozoicas da Bacia do Paraná; 3) rochas vulcânicas toleíticas eocretáceas da Formação Serra Geral; 4) rochas relacionadas ao magmatismo alcalino mesozoico -cenozoico; 5) bacias cenozoicas do rift (1- Bacia de Itaboraí, 2- Gráben de Barra de São João, 3- Bacia do Macacu, 4- Bacia de Volta Redonda, 5- Bacia de Resende, 6- Bacia de Taubaté, 7- Bacia de São Paulo, 8- Gráben de Sete Barras, 9- Formação Pariquera-Açu, 10- Formação Alexandra e Gráben de Guaraqueçaba, 11- Bacia de Curitiba, 12- Gráben de Cananéia); 6) zonas de cisalhamento pré-cambrianas, em parte reativadas durante o Mesozoico e Cenozóico. Fonte: Riccomini *et al.*, 2004.5
- Figura 3 – Quadro litoestratigráfico e evolução tectono-sedimentar do segmento central do RCSB - Letras: p - leques aluviais proximais; m-d - leques aluviais medianos a distais associados a planície aluvial de rios entrelaçados; t - depósitos de tálus; c - depósitos coluviais; ca - depósitos colúvioaluviais; a – depósitos aluviais. Fonte: Riccomini *et al.*, 2004.6
- Figura 4 – Mapa geológico da Bacia de São Paulo e porção sudoeste da Bacia de Taubaté 1) embasamento pré-cambriano; 2) Formação Resende (sistema de leques aluviais proximais); 3) Formação Resende (sistema de leques aluviais medianos a distais associados a planície aluvial de rios entrelaçados); 4) Formação Tremembé; 5) Formação São Paulo; 6) Formação Itaquaquecetuba; 7) sedimentos quaternários; 8) falhas cenozoicas, em parte reativadas do embasamento pré-cambriano. Fonte: Riccomini & Coimbra, 1992; Riccomini *et al.*, 2004.7
- Figura 5 – Seções geológicas na Bacia de São Paulo construídas a partir de dados de sondagens para água subterrânea e observações de superfície 1) embasamento pré-cambriano; 2) orto e paraconglomerados de leques aluviais proximais da Formação Resende; 3) lamitos de leques aluviais medianos a distais da Formação Resende; 4) lamitos de leques aluviais distais e, principalmente, areias e conglomerados de sistema fluvial entrelaçado da Formação Resende; 5) predominância de areias grossas e conglomerados de sistema fluvial entrelaçado da Formação Resende; 6) sistema lacustre da Formação Tremembé; 7) sistema fluvial meandrante da Formação São Paulo; 8) aluviões quaternários; 9) falha normal (A) e falha transcorrente dextral (B). Para localização das seções na bacia ver esquema no canto superior direito da figura. Fonte: Riccomini & Coimbra, 1992; Riccomini *et al.*, 2004.8
- Figura 6 – Mapa geológico da Região Metropolitana de São Paulo com destaque para o embasamento. Fonte: alterado de Monteiro et al. (2012) e CPRM (2019).9
- Figura 7 – Assimetrias positiva, negativa e simétrica, nesta ordem (Correa, 2003).14
- Figura 8 – Curtoses leptocúrtica, mesocúrtica e platicúrtica, nesta ordem (Correa, 2003).15
- Figura 9 – Variograma típico com patamar e suas propriedades. Fonte: Yamamoto, 2001.18
- Figura 10 – Anisotropias: Geométrica (a), Zonal (b), Mista (c). Fonte: Yamamoto, 2001.18
- Figura 11 – Os principais modelos teóricos de variogramas. Fonte: Yamamoto, 2001.19

Figura 12 – Sistema de classificação de unidades geológico-geotécnicas utilizado pelo Metrô. Fonte: CMSP (2011) <i>apud</i> Gurgueira (2013).....	29
Figura 13 – Mapa geológico simplificado da Bacia de São Paulo (CPRM, 2019) e distribuição dos dados adquiridos	38
Figura 14 – Exemplo de perfil de sondagem que está sendo utilizado na consolidação do banco de dados.....	41
Figura 15 – Histograma da variável cota do topo rochoso da Bacia de São Paulo.....	44
Figura 16 – Domínio para o cálculo do campo geométrico.....	45
Figura 17 – Variograma experimental da variável cota do topo rochoso.....	46
Figura 18 – Superfície polinomial de grau 2 ajustada aos dados.....	46
Figura 19 – Histograma dos resíduos entre a variável e a superfície polinomial ajustada.....	47
Figura 20 – Variograma experimental dos resíduos para os pares 25°/115° e 70°/160°.....	47
Figura 21 – Modelo de variograma para as direções 70° e 160°.....	48
Figura 22 – Resultado da validação cruzada: coeficiente de correlação igual a 0.812.....	50
Figura 23 – Resultado da krigagem ordinária dos resíduos.....	50
Figura 24 – Resultado do topo rochoso estimado.....	51
Figura 25 – Principais falhas do embasamento da Bacia de São Paulo (Takiya <i>et al.</i> 1989) e a separação de domínios adotada por Takiya (1990).....	52
Figura 26 – Mapa geológico simplificado da Bacia de São Paulo (CPRM, 2006), com a divisão dos domínios de acordo com as principais falhas do embasamento da bacia.....	53
Figura 27 – Histograma do domínio 1.....	55
Figura 28 – Histograma do domínio 2.....	55
Figura 29 – Histograma do domínio 3.....	55
Figura 30 – Histograma do domínio 4.....	55
Figura 31 – Histograma do domínio 5.....	55
Figura 32 – Histograma do domínio 6.....	55
Figura 33 – Variograma experimental domínio 1.....	56
Figura 34 – Variograma experimental domínio 2.....	57
Figura 35 – Variograma experimental domínio 3.....	58
Figura 36 – Variograma experimental domínio 4.....	58
Figura 37 – Variograma experimental domínio 5.....	59
Figura 38 – Variograma experimental domínio 6.....	60
Figura 39 – Modelo de variograma do domínio 1.....	61
Figura 40 – Modelo de variograma do domínio 2.....	62
Figura 41 – Modelo de variograma do domínio 3.....	63
Figura 42 – Modelo de variograma do domínio 4.....	64
Figura 43 – Modelo de variograma do domínio 5.....	65
Figura 44 – Modelo de variograma do domínio 6.....	66
Figura 45 – Resultado da validação cruzada para o domínio 1: coeficiente de correlação igual a 0.770.....	67

Figura 46 – Resultado da validação cruzada para o domínio 2: coeficiente de correlação igual a 0.531.	68
Figura 47 – Resultado da validação cruzada para o domínio 3: coeficiente de correlação igual a 0.783.	69
Figura 48 – Resultado da validação cruzada para o domínio 4: coeficiente de correlação igual a 0.873.	70
Figura 49 – Resultado da validação cruzada para o domínio 5: coeficiente de correlação igual a 0.835.	71
Figura 50 – Resultado da validação cruzada para o domínio 6: coeficiente de correlação igual a 0.724.	72
Figura 51 – Resultado da krigagem do domínio 1.....	73
Figura 52 – Resultado da krigagem do domínio 2.....	73
Figura 53 – Resultado da krigagem do domínio 3.....	74
Figura 54 – Resultado da krigagem do domínio 4.....	74
Figura 55 – Resultado da krigagem do domínio 5.....	75
Figura 56 – Resultado da krigagem do domínio 6.....	75
Figura 57 – Resultado da krigagem de resíduos da variável cota do topo rochoso da Bacia de São Paulo (domínio único).....	77
Figura 58 – Resultado das krigagens ordinárias da variável cota do topo rochoso da Bacia de São Paulo (seis domínios).	78
Figura 59 – Histograma da variável espessura do sedimento.....	80
Figura 60 – Domínio para espessura do sedimento.....	80
Figura 61 – Variograma experimental para espessura do sedimento, par N20 e N110.....	81
Figura 62 – Variograma experimental para espessura do sedimento, par N65 e N155.....	82
Figura 63 – Modelo de variograma para espessura do sedimento.....	82
Figura 64 – Resultado da validação cruzada: coeficiente de correlação igual a 0.798.	84
Figura 65 – Resultado da krigagem para espessura do sedimento.	84
Figura 66 – Histograma da variável espessura do solo de alteração.....	85
Figura 67 – Mapa base da espessura do solo de alteração.....	86
Figura 68 – Variograma experimental para espessura do solo de alteração em 4 direções.....	87
Figura 69 – Variograma experimental omnidirecional para espessura do solo de alteração.	87
Figura 70 – Modelo de variograma para espessura do solo de alteração.....	88
Figura 71 – Resultado da validação cruzada: coeficiente de correlação igual a 0.335.	89
Figura 72 – Resultado do inverso da potência da distância para espessura do solo de alteração.	90
Figura 73 – Domínio para a krigagem de variáveis indicadoras.....	91
Figura 74 – Histogramas das variáveis indicadoras para sedimento, alteração e rocha.....	92
Figura 75 – Variograma experimental para a variável indicadora sedimento, calculada para 5 direções.....	93
Figura 76 – Variograma experimental para a variável indicadora sedimento, recalculada para 3 direções.....	93

Figura 77 – Modelo de variograma para a variável indicadora sedimento	94
Figura 78 – Resultado da krigagem da variável indicadora sedimento, níveis 15 (cota 400), 35 (cota 500), 55 (cota 600), 75 (cota 700), 95 (cota 800) e 115 (cota 900), que representa a probabilidade de sedimentos ocorrerem ou não em determinado ponto da bacia.....	96
Figura 79 – Variograma experimental para a variável indicadora solo de alteração de rocha, calculada para 5 direções	97
Figura 80 – Modelo de variograma para a variável indicadora solo de alteração de rocha.....	98
Figura 81 – Resultado da krigagem da variável indicadora solo de alteração de rocha, níveis 15 (cota 400), 35 (cota 500), 55 (cota 600), 75 (cota 700), 95 (cota 800) e 115 (cota 900), que representa a probabilidade de solo de alteração de rocha ocorrer ou não em determinado ponto da bacia.	100
Figura 82 – (a) Variograma experimental para a variável indicadora rocha calculada para 5 direções e (b) recalculada para 3 direções.	102
Figura 83 – Modelo de variograma para a variável indicadora rocha.....	103
Figura 84 – Resultado da krigagem da variável indicadora rocha, níveis 15 (cota 400), 35 (cota 500), 55 (cota 600), 75 (cota 700), 95 (cota 800) e 115 (cota 900), que representa a probabilidade de rochas ocorrerem ou não em determinado ponto da bacia.....	105
Figura 85 – Sondagens Linha 4 Amarela do metrô de São Paulo Fonte: Google Earth.	106
Figura 86 – Histograma da variável SPT.....	107
Figura 87 – Mapa base da variável SPT.	108
Figura 88 – Variograma experimental da variável SPT.....	109
Figura 89 – Modelo de variograma para a variável SPT.	110
Figura 90 – Resultado da validação cruzada: coeficiente de correlação igual a 0.906.	111
Figura 91 – Resultado da krigagem da variável SPT.	112
Figura 92 – Histogramas das variáveis recuperação (rec) e RQD (rqd).....	113
Figura 93 – Domínio das variáveis recuperação de RQD.	113
Figura 94 – Variogramas experimentais das variáveis recuperação e RQD.....	114
Figura 95 – Modelo teórico de variograma para a variável recuperação.....	115
Figura 96 – Modelo de variograma para a variável RQD.	116
Figura 97 – Resultado da validação cruzada para a variável recuperação (coeficiente de correlação igual a 0.859) e RQD (coeficiente de correlação igual a 0.852).....	117
Figura 98 – Resultado da krigagem da variável recuperação.	118
Figura 99 – Resultado da krigagem da variável RQD.	118
Figura 100 – Histogramas das variáveis indicadoras areia e argila.	119
Figura 101 – Domínio das variáveis indicadoras areia e argila.	120
Figura 102 – Variograma experimental das variáveis indicadoras areia e argila.....	121
Figura 103 – Modelo de variograma para as variáveis indicadoras areia e argila.....	122
Figura 104 – Resultado da krigagem da variável indicadora areia. O resultado mostra a probabilidade de areia ocorrer ou não em determinado ponto do perfil.	123

Figura 105 – Resultado da krigagem da variável indicadora argila. O resultado mostra a probabilidade de argila ocorrer ou não em determinado ponto do perfil. 124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplo de como foi realizada a consolidação do banco de dados litológico, utilizando os poços 5036, 5037, 52163, 5053 e 5044. Onde: ID é a identificação do poço, Cidade é a cidade onde foi feito o poço, X e Y são as coordenadas leste e norte respectivamente, Z é a cota, Prof. é a profundidade atingida pelo poço, De e Ate são as informações de topo e base de uma camada, Z Camada é a cota do topo desta camada e Categoria é a categorização das diferentes litologias onde 1, 2 e 3 representam sedimento, solo de alteração e rocha, respectivamente.	39
Tabela 2 – Exemplo de como foi realizada a consolidação do banco de dados, utilizando o perfil da sondagem SM-4611 (Figura 13). Onde: ID é a identificação da sondagem, X e Y são as coordenadas leste e norte respectivamente, Z é a cota da boca do furo, AZ e DIP são o azimute e o mergulho do furo, ind_areia e ind_argila são as variáveis indicadoras que representam areia e argila, SPT, REC e RQD são as variáveis que representam os resultados dos ensaios SPT, a porcentagem de recuperação de rocha e a porcentagem de fragmentos de rocha maiores do que 10 cm, respectivamente.....	40
Tabela 3 – Parâmetros utilizados para o cálculo do variograma experimental.....	45
Tabela 4 – Parâmetros utilizados para o ajuste do modelo teórico de variograma dos resíduos.....	48
Tabela 5 – Parâmetros de vizinhança utilizado para a krigagem dos resíduos.....	49
Tabela 6 – Parâmetros utilizados para o cálculo do variograma experimental do domínio 1.....	57
Tabela 7 – Parâmetros utilizados para o cálculo do variograma experimental do domínio 2.....	57
Tabela 8 – Parâmetros utilizados para o cálculo do variograma experimental do domínio 3.....	58
Tabela 9 – Parâmetros utilizados para o cálculo do variograma experimental do domínio 4.....	59
Tabela 10 – Parâmetros utilizados para o cálculo do variograma experimental do domínio 5.....	59
Tabela 11 – Parâmetros utilizados para o cálculo do variograma experimental do domínio 6.....	60
Tabela 12 – Parâmetros utilizados para o ajuste do modelo teórico de variograma do domínio 1.....	61
Tabela 13 – Parâmetros utilizados para o ajuste do modelo teórico de variograma do domínio 2.....	62
Tabela 14 – Parâmetros utilizados para o ajuste do modelo teórico de variograma do domínio 3.....	63
Tabela 15 – Parâmetros utilizados para o ajuste do modelo teórico de variograma do domínio 4.....	64
Tabela 16 – Parâmetros utilizados para o ajuste do modelo teórico de variograma do domínio 5.....	65
Tabela 17 – Parâmetros utilizados para o ajuste do modelo teórico de variograma do domínio 6.....	66
Tabela 18 – Parâmetros de vizinhança utilizado para a krigagem do domínio 1.	67
Tabela 19 – Parâmetros de vizinhança utilizado para a krigagem do domínio 2.	68
Tabela 20 – Parâmetros de vizinhança utilizado para a krigagem do domínio 3.	69
Tabela 21 – Parâmetros de vizinhança utilizado para a krigagem do domínio 4.	70
Tabela 22 – Parâmetros de vizinhança utilizado para a krigagem do domínio 5.	71
Tabela 23 – Parâmetros de vizinhança utilizado para a krigagem do domínio 6.	72

Tabela 24 – Parâmetros utilizados para o cálculo do variograma experimental para espessura do sedimento.	81
Tabela 25 – Parâmetros utilizados para o ajuste do modelo teórico de variograma para espessura do sedimento.	82
Tabela 26 – Parâmetros de vizinhança utilizado para a krigagem.	83
Tabela 27 – Parâmetros utilizados para o cálculo do variograma experimental para espessura do solo de alteração.	86
Tabela 28 – Parâmetros utilizados para o cálculo do variograma experimental para espessura do solo de alteração.	87
Tabela 29 – Parâmetros utilizados para o ajuste do modelo teórico de variograma para espessura do solo de alteração.	88
Tabela 30 – Parâmetros de vizinhança utilizado para a krigagem.	88
Tabela 31 – Parâmetros utilizados para o cálculo do variograma experimental para a variável indicadora sedimento.	93
Tabela 32 – Parâmetros utilizados para o ajuste do modelo teórico de variograma para a variável indicadora sedimento.	94
Tabela 33 – Parâmetros de vizinhança utilizado para a krigagem.	95
Tabela 34 - Parâmetros utilizados para o cálculo do variograma experimental para a variável indicadora solo de alteração de rocha.	97
Tabela 35 – Parâmetros utilizados para o ajuste do modelo teórico de variograma para a variável indicadora sedimento.	98
Tabela 36 – Parâmetros de vizinhança utilizado para a krigagem.	99
Tabela 37 – Parâmetros utilizados para o cálculo do variograma experimental para a variável indicadora rocha.	101
Tabela 38 – Parâmetros utilizados para o ajuste do modelo teórico de variograma para a variável indicadora rocha.	103
Tabela 39 – Parâmetros de vizinhança utilizado para a krigagem.	104
Tabela 40 – Parâmetros utilizados para o cálculo do variograma experimental da variável SPT.	108
Tabela 41 – Parâmetros utilizados para o ajuste do modelo teórico de variograma para a variável SPT.	110
Tabela 42 – Parâmetros de vizinhança utilizado para a variável SPT.	111
Tabela 43 – Parâmetros utilizados para o cálculo do variograma experimental das variáveis recuperação e RQD.	114
Tabela 44 – Parâmetros utilizados para o ajuste do modelo teórico de variograma para a variável recuperação.	115
Tabela 45 – Parâmetros utilizados para o ajuste do modelo teórico de variograma para a variável RQD.	116
Tabela 46 – Parâmetros de vizinhança utilizados para as variáveis recuperação e RQD.	117
Tabela 47 – Parâmetros utilizados para o cálculo do variograma experimental das variáveis indicadoras areia e argila.	120

Tabela 48 – Parâmetros utilizados para o ajuste do modelo teórico de variograma para as variáveis indicadoras areia e argila.....	122
Tabela 49 – Parâmetros de vizinhança utilizados para as variáveis indicadoras areia e argila.	123

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação e notação dos litotipos mais comuns ocorrentes na Bacia de São Paulo. Fonte: Kutner e Bjornberg (1997).	27
Quadro 2 – Faixas de alguns dos parâmetros geotécnicos dos horizontes litológicos determinados para as formações Resende e São Paulo. Fonte: Kutner e Bjornberg (1997).	28
Quadro 3 – Parâmetros geotécnicos para aterros e aluviões. Fonte: CMSP (1994) <i>apud</i> Gurgueira (2013).	30
Quadro 4 – Parâmetros geotécnicos para a Formação São Paulo. Fonte: CMSP (1994) <i>apud</i> Gurgueira (2013).	30
Quadro 5 – Parâmetros geotécnicos para a Formação Resende. Fonte: CMSP (1994) <i>apud</i> Gurgueira (2013).	31
Quadro 6 – Parâmetros geotécnicos para cálculo na Bacia de São Paulo. Fonte: CMSP (1994) <i>apud</i> Gurgueira (2013).	31
Quadro 7 – Estados de compacidade e consistência das areias e argilas. Fonte: NBR 6484.	33
Quadro 8 – Classificação do IQR convencional. Fonte: Barton <i>et al.</i> (1974).	35

1. INTRODUÇÃO

Situada no maior centro urbano do país, a Bacia de São Paulo apresenta muitas informações, provenientes de sondagens geotécnicas e de poços, espalhadas por toda a sua extensão e que ainda não foram submetidas à consolidação sistemática.

Obras de pequeno a grande porte são realizadas constantemente na região da Bacia de São Paulo, necessitando continuamente de investimentos em investigações do subsolo para aquisição de informações geológicas e geotécnicas. Esses investimentos demandam tempo e dinheiro e a consolidação dessas informações podem otimizar essas obras no sentido de fornecerem informações prévias.

A partir da análise sistemática de informações provenientes de sondagens geotécnicas e poços é possível, através de técnicas de interpolação, definir contatos entre as diferentes litologias que preenchem a bacia e o topo rochoso do embasamento. Esses resultados poderão ser utilizados em obras futuras, auxiliando na administração do número e da distribuição de sondagens geotécnicas a serem realizadas para determinado projeto.

O último trabalho realizado na região com este propósito foi o trabalho pioneiro de Takiya (1991). Desde então o número de informações provenientes de sondagens geotécnicas e poços aumentou consideravelmente, sendo que neste trabalho serão utilizados dados de 3.124 poços e de 120 sondagens mistas, o trabalho de Takiya (1991) contou com dados de 805 poços.

Além disso, o desenvolvimento de computadores e programas computacionais (como o Isatis, que será utilizado neste trabalho) mais eficientes e acurados permite a aplicação de diferentes técnicas de estimativa não utilizadas anteriormente, como as krigagens residual (importante para a retirada da tendência inerente a dados não estacionários) e de variáveis indicadoras (importante para a determinação da probabilidade de ocorrência de diferentes litologias e com isso derivar as espessuras de cada camada).

Acredita-se que os resultados possam contribuir auxiliando obras de infraestrutura de pequeno a grande porte. Ao final deste trabalho serão fornecidas informações do substrato da cidade do ponto de vista geológico e, localmente, do ponto de vista geotécnico.

2. OBJETIVOS E METAS

O principal objetivo deste trabalho foi a definição do topo rochoso do embasamento da bacia, das espessuras dos sedimentos e solos de alteração e, o cálculo das probabilidades de ocorrência de sedimentos, solos de alteração ou rochas na bacia de São Paulo.

O segundo objetivo deste trabalho foi o de analisar sondagens mistas realizadas para a construção da Linha 2 Amarela do Metrô da cidade de São Paulo, estimando os valores de SPT (*Standard Penetration Test*) a partir da krigagem ordinária e a probabilidade de ocorrência de areias ou argilas, a partir da krigagem de variáveis indicadoras, com a codificação indicadora da granulometria do solo. Associado a este objetivo realizou-se a estimativa de valores de recuperação e RQD (*Rock Quality Designation*) por krigagem ordinária, para as rochas descritas nas sondagens. Esse segundo objetivo foi realizado para auxiliar futuras obras do Metrô, mostrando como novos dados de sondagens podem ser analisados.

Para atingir o primeiro objetivo as seguintes metas foram cumpridas:

- a. organização do banco de dados;
- b. retirada da tendência dos dados quando necessária;
- c. análise estatística e geoestatística dos dados adaptados para cada procedimento adotado;
- d. krigagem dos resíduos, krigagem ordinária, krigagem de variáveis indicadoras e inverso da potência da distância.

Para atingir o segundo objetivo (estimativa de valores SPT, Recuperação e RQD) as metas foram:

- a. organização do banco de dados;
- b. análise estatística e geoestatística das variáveis SPT, Recuperação e RQD;
- c. estimativas por krigagem ordinária para cada variável;
- d. criação das variáveis indicadoras para cada litologia descritas nas sondagens;
- e. análise estatística e geoestatística das variáveis indicadoras;
- f. estimativas por krigagem de variáveis indicadoras.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Geologia da Bacia de São Paulo

A Bacia de São Paulo está localizada no maior centro urbano do país, na porção leste do Estado de São Paulo.

Segundo Riccomini & Coimbra (1992), a Bacia de São Paulo está situada no denominado Planalto Paulistano, que compreende uma área de cerca de 5.000 Km², com altitudes que variam entre 715 e 900 metros, relevo suavizado e drenagens fluindo para o rio Tietê e seu afluentes. Além do rio Tietê, a bacia também é drenada pelos rios Pinheiros, Tamanduateí e seus tributários.

Ainda, segundo Riccomini & Coimbra (1992), os sedimentos continentais Paleógenos da Bacia de São Paulo apresentam área de distribuição muito irregular, com pouco mais de 1.000 km². A borda norte é retilínea, controlada pelas zonas de cisalhamento Taxaquara-Jaguari, e a borda sul possui contatos irregulares com o embasamento cristalino (Figura 1). Os sedimentos ocorrem entre Arujá e Embu-Guaçú, numa extensão máxima de 75 Km, e entre Santana e Santo André, numa extensão mínima de 25 Km, com ramificações de pequena expressão em área para leste, passando por Mogi das Cruzes, Biritiba Mirim e alcançando os arredores de Salesópolis e, para sul, até Engenheiro Marsillac.

A bacia é um *hemi-graben*, basculado para NNW, com espessura máxima de sedimentos estimada, inicialmente, em 290m (Almeida, 1955). Segundo Takiya (1991), a Bacia de São Paulo possui espessura máxima contínua verificada em sondagens de 256m.

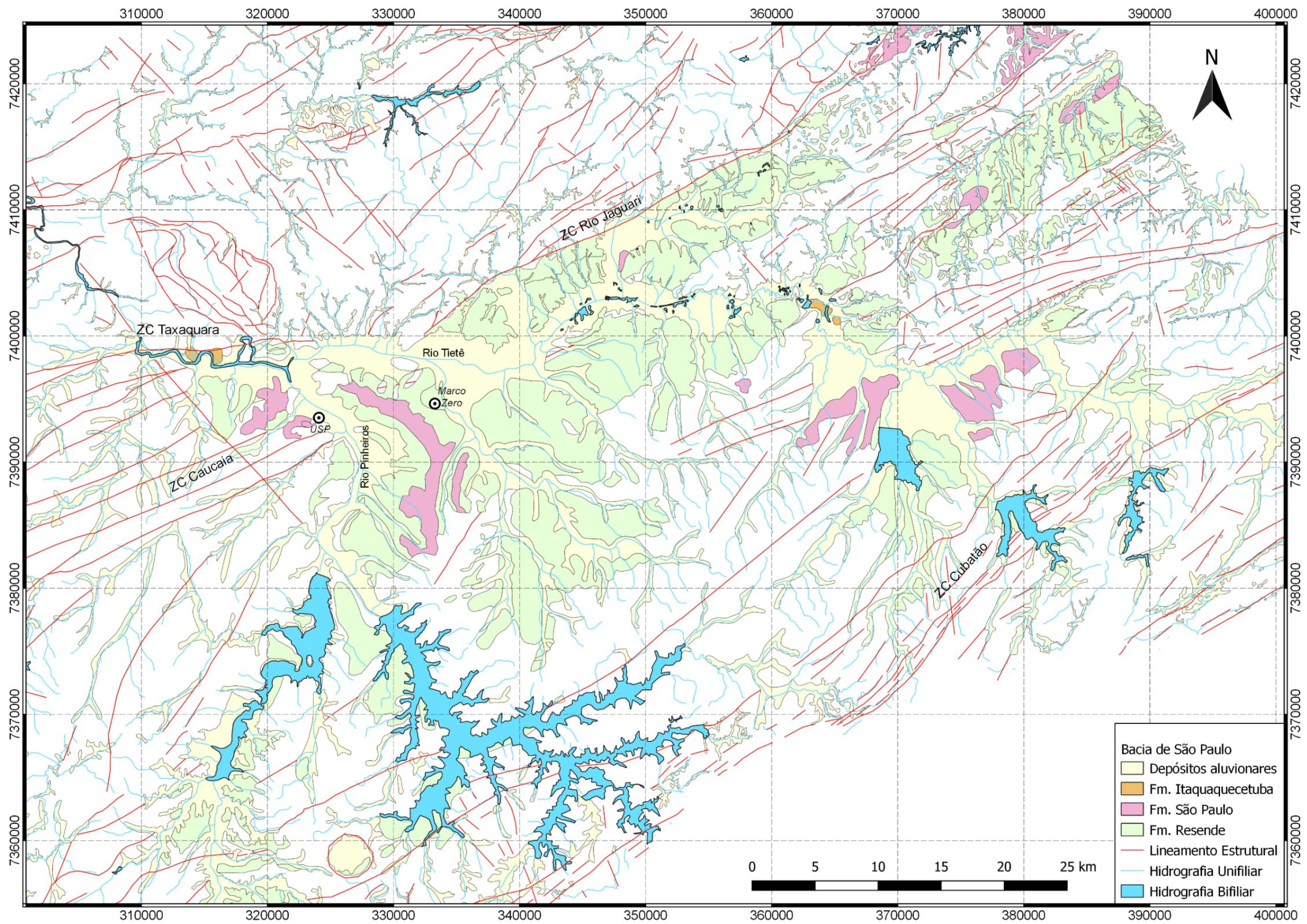


Figura 1 – Mapa geológico da Bacia de São Paulo e porção sudoeste da Bacia de Taubaté. Fonte: CPRM (2019).

3.1.1 Contexto geológico e tectônico regional

A Bacia de São Paulo é uma das unidades integrantes do segmento central do denominado *Rift* Continental do Sudeste do Brasil (RCSB), uma feição tectônica de idade cenozoica desenvolvida entre as cidades de Curitiba, no Paraná, e Barra de São João, no Rio de Janeiro, numa extensão de pouco mais de 900 Km (Riccomini, 1989) (Figura 2).

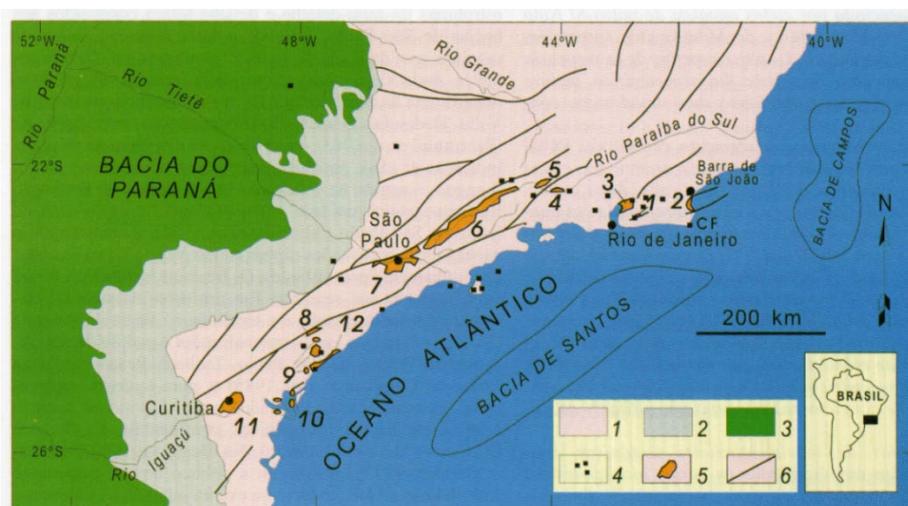


Figura 2 – Contexto geológico regional do Rift Continental do Sudeste do Brasil (RCSB) - 1) embasamento pré-cambriano; 2) rochas sedimentares paleozoicas da Bacia do Paraná; 3) rochas vulcânicas toleíticas eocretáceas da Formação Serra Geral; 4) rochas relacionadas ao magmatismo alcalino mesozoico -cenozoico; 5) bacias cenozoicas do rift (1- Bacia de Itaboraí, 2- Gráben de Barra de São João, 3- Bacia do Macacu, 4- Bacia de Volta Redonda, 5- Bacia de Resende, 6- Bacia de Taubaté, 7- Bacia de São Paulo, 8- Gráben de Sete Barras, 9- Formação Pariqueira-Açu, 10- Formação Alexandra e Gráben de Guaraqueçaba, 11- Bacia de Curitiba, 12- Gráben de Cananéia); 6) zonas de cisalhamento pré-cambrianas, em parte reativadas durante o Mesozoico e Cenozóico. Fonte: Riccomini *et al.*, 2004.

O RCSB desenvolve-se sobre terrenos policíclicos, referentes ao Cinturão de Dobramentos Ribeira (Hasui *et al.*, 1975), constituído, essencialmente, por rochas metamórficas, migmatitos e granitoides relacionados em parte ao ciclo Brasileiro/Pan Africano e, em parte, resultantes do retrabalhamento de rochas de ciclos mais antigos (Riccomini & Coimbra, 1992). Este conjunto litológico está recortado por denso sistema de falhamentos transcorrentes de caráter dextral (Sadowski, 1984).

No Jurássico Superior a região esteve sujeita aos fenômenos relacionados inicialmente à Reativação Wealdeniana (Almeida, 1967), que evoluíram sucessivamente para a ruptura continental e abertura do Atlântico Sul, processo que tem seu início assinalado pelo vulcanismo basáltico eocretáceo da Formação Serra Geral e inclui, ainda, manifestações alcalinas, distribuídas em

três pulsos principais: Eocretáceo; Neocretáceo a Paleoceno e Eoceno (Riccomini *et al.*, 2004).

Segundo Riccomini *et al.* (2004), admite-se hoje, de forma consensual, a existência de vínculo entre a instalação e desenvolvimento do RCSB com o Evento Sul-Atlântico. Embora os diferentes modelos propostos para a origem dessas bacias tafrogênicas apresentem convergência ao relacioná-las com o tectonismo e a morfogênese que levaram à formação das serras do Mar e da Mantiqueira, não há consenso quanto aos seus mecanismos geradores. Estudos dedicados ao tectonismo deformador ou modificador dessas bacias, incluindo importante atividade neotectônica, ainda são pouco numerosos.

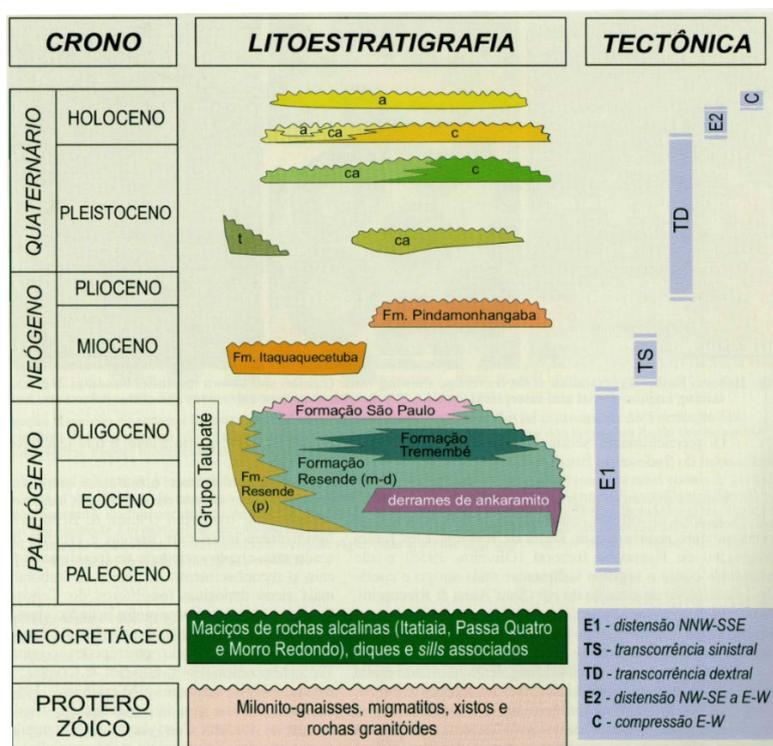


Figura 3 – Quadro litoestratigráfico e evolução tectono-sedimentar do segmento central do RCSB - Letras: p - leques aluviais proximais; m-d - leques aluviais medianos a distais associados a planície aluvial de rios entrelaçados; t - depósitos de tálus; c - depósitos colúviais; ca - depósitos colúvioaluviais; a – depósitos aluviais. Fonte: Riccomini *et al.*, 2004.

3.1.2 Contexto geológico e tectônico local

A área da Bacia de São Paulo compreende terrenos pré-cambrianos, sedimentos Paleógenos, além de coberturas colúvio-aluviais quaternários (Riccomini & Coimbra, 1992) (Figuras 4 e 5).

Segundo Riccomini (1989), a evolução da bacia sedimentar apresentou forte controle tectônico, iniciando-se com uma fase distensiva com direção NNW-SSE, seguida por etapas de transcorrência, primeiramente, com movimentação sinistral de direção E-W, com distensão NW-SE e, localmente, compressão NE-SW, e, posteriormente, com movimentação dextral, com compressão NW-SE. A quarta etapa foi caracterizada por distensão de direção WNW-ESE e, por fim, uma fase compressional de direção E-W.

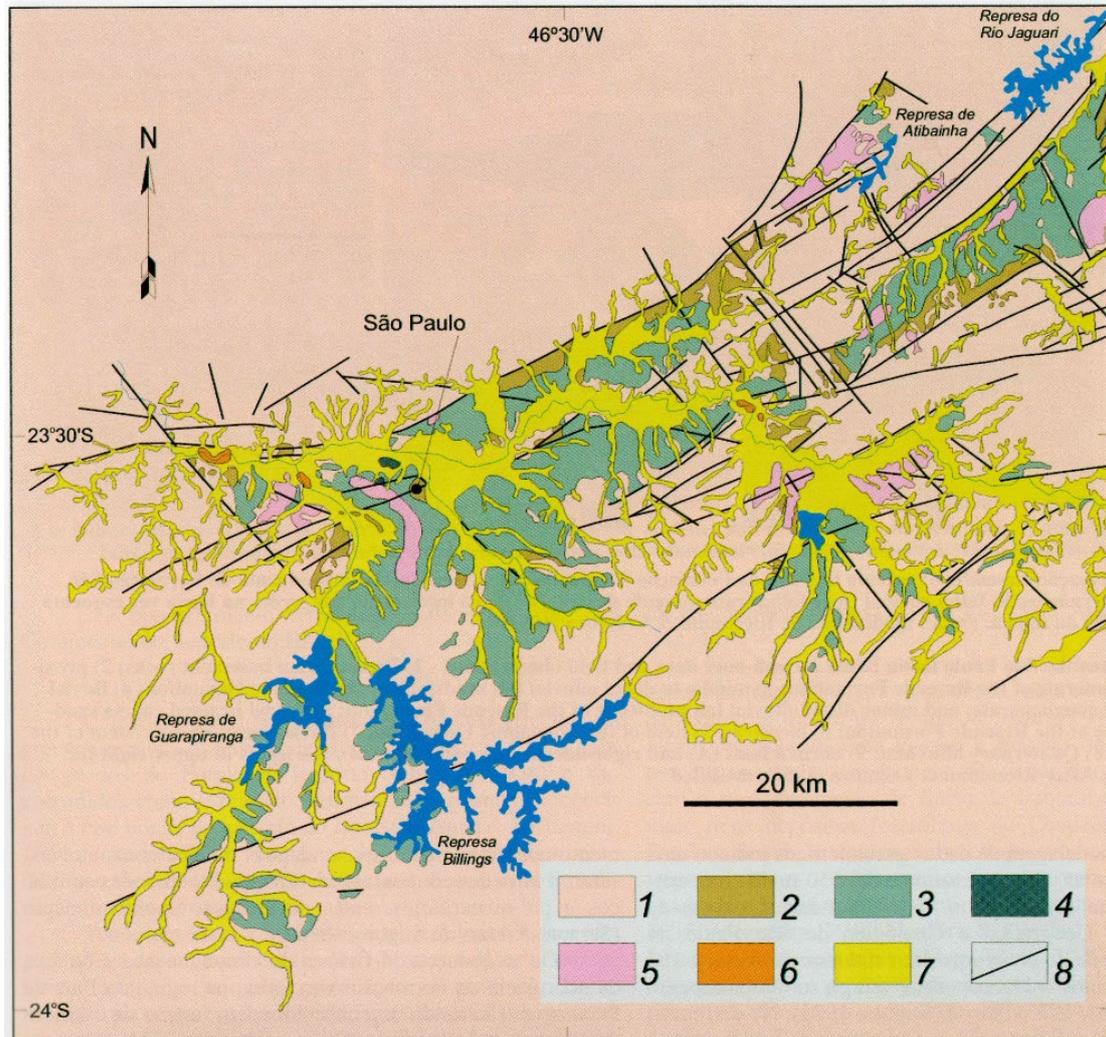


Figura 4 – Mapa geológico da Bacia de São Paulo e porção sudoeste da Bacia de Taubaté
 1) embasamento pré-cambriano; 2) Formação Resende (sistema de leques aluviais proximais);
 3) Formação Resende (sistema de leques aluviais medianos a distais associados a planície aluvial de rios entrelaçados); 4) Formação Tremembé; 5) Formação São Paulo; 6) Formação Itaquaquecetuba; 7) sedimentos quaternários; 8) falhas cenozoicas, em parte reativadas do embasamento pré-cambriano. Fonte: Riccomini & Coimbra, 1992; Riccomini *et al.*, 2004.

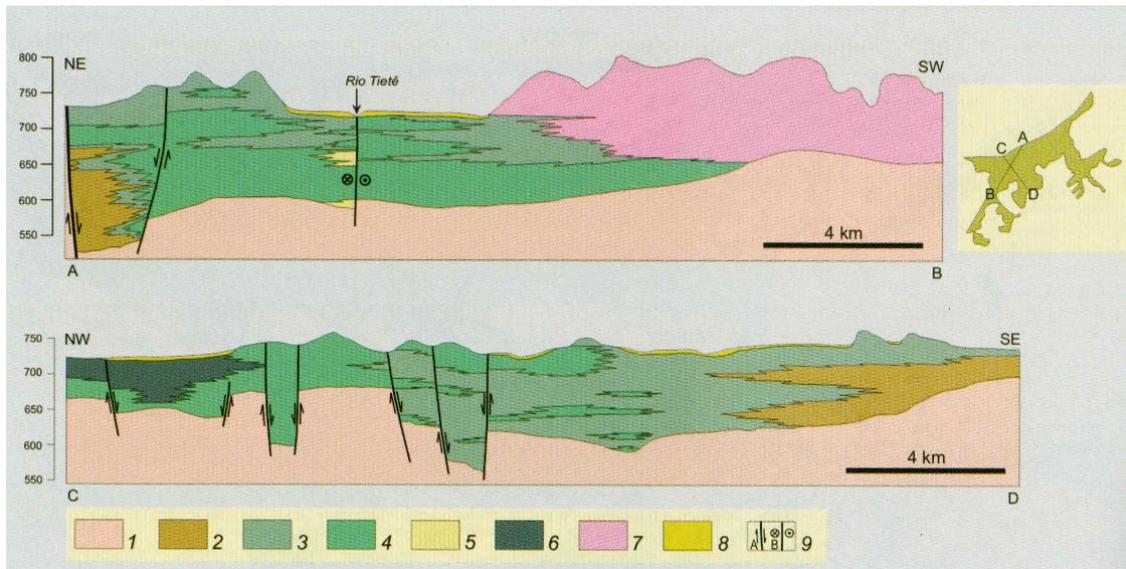


Figura 5 – Seções geológicas na Bacia de São Paulo construídas a partir de dados de sondagens para água subterrânea e observações de superfície 1) embasamento pré-cambriano; 2) orto e paraconglomerados de leques aluviais proximais da Formação Resende; 3) lamitos de leques aluviais medianos a distais da Formação Resende; 4) lamitos de leques aluviais distais e, principalmente, areias e conglomerados de sistema fluvial entrelaçado da Formação Resende; 5) predominância de areias grossas e conglomerados de sistema fluvial entrelaçado da Formação Resende; 6) sistema lacustre da Formação Tremembé; 7) sistema fluvial meandrante da Formação São Paulo; 8) aluviões quaternários; 9) falha normal (A) e falha transcorrente dextral (B). Para localização das seções na bacia ver esquema no canto superior direito da figura. Fonte: Riccomini & Coimbra, 1992; Riccomini *et al.*, 2004.

3.1.2.1 Embasamento Pré-Cambriano

Conforme a compilação de Monteiro *et al.* (2012), o embasamento da Bacia de São Paulo é constituído por rochas metamórficas e ígneas, associadas ao Complexo Embu e aos grupos São Roque e Serra do Itaberaba, além de corpos de rochas granitoides intrusivas. Com menor expressão ocorrem as rochas do Complexo Costeiro, Complexo Pico do Papagaio e da *Nappe* Socorro-Guaxupé (CPRM, 2006) (Figura 6).

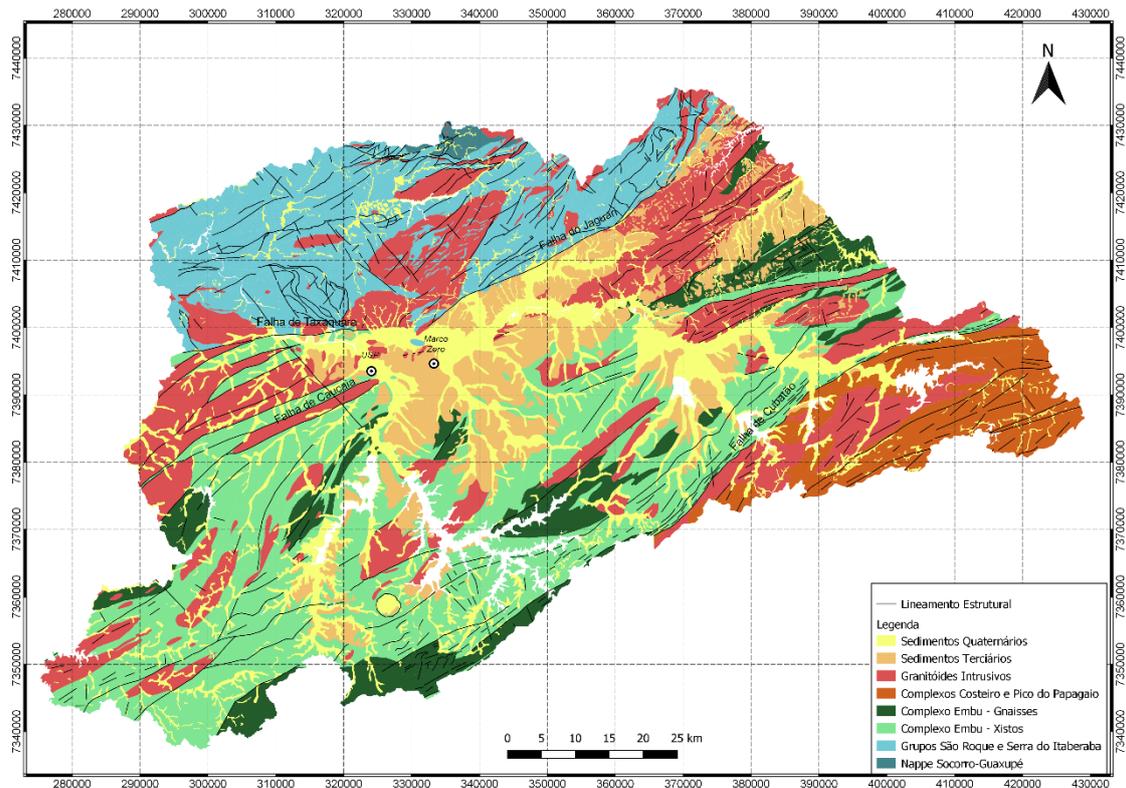


Figura 6 – Mapa geológico da Região Metropolitana de São Paulo com destaque para o embasamento. Fonte: alterado de Monteiro et al. (2012) e CPRM (2019).

O Complexo Costeiro e o Complexo Pico do Papagaio ocorrem no extremo leste da Região Metropolitana de São Paulo. O Complexo Costeiro é constituído por rochas predominantemente migmatíticas policíclicas de paleossoma gnáissico (Rodríguez, 1998). Essa unidade, conforme proposto por Hasui *et al.* (1981), aflora no litoral do Estado de São Paulo. Seu limite norte se dá com as rochas do Complexo Embu, através da Falha de Cubatão e a sul é limitado pela linha de costa, aflorando também nas ilhas próximas (CPRM, 2006). O Complexo Pico do Papagaio pertence a um grupo de granitos foliados calcialcalinos que afloram no litoral norte do Estado de São Paulo. Esses granitos alojam-se no Complexo Costeiro através de zonas de cisalhamento, no geral dextrais, de orientação NE-SW, de forma concordante com a estruturação das encaixantes (CPRM, 2006).

O Complexo Embu ocorre na porção centro-sul da Bacia de São Paulo, sendo o embasamento de maior expressão em área desta bacia. É limitado a norte pelo sistema de falhas Taxaquara e Jaguari e ao sul pela falha de Cubatão, separando-o dos grupos São Roque e Serra de Itaberaba, e do Complexo Costeiro, respectivamente (Rodríguez, 1998). Esta unidade ocupa uma faixa de

afloramentos com direção NE-SW e é formada por xistos, filitos, migmatitos, gnaisses migmatizados e corpos lenticulares de quartzitos, anfibolitos e rochas calciossilicáticas (Rodriguez, 1998).

As rochas granitoides constituem batólitos e bossas que se distribuem na periferia da bacia, sustentando elevadas serranias (Hasui & Carneiro, 1980). Segundo Hasui *et al.* (1978) estes corpos são sin-tectônicos ou pós-tectônicos e ocorrem em diques, *stocks* e batólitos, cujas relações de contato podem ser concordantes, parcialmente discordantes e discordantes, com respeito às estruturas das encaixantes.

Os grupos São Roque e Serra do Itaberaba ocorrem na extensão norte da Região Metropolitana de São Paulo. Esses grupos entram em contato, ao sul, com o Complexo Embu, através do sistema de falhas Taxaquara e Jaguari, e, ao norte, com terrenos associados à Nappe Socorro-Guaxupé, através da Falha de Jundiuvira. O Grupo São Roque ocorre discordante sobre o Grupo Serra do Itaberaba de idade mesoproterozóica (Heilbron, 2004). Esses grupos são constituídos por rochas metassedimentares e metavulcânicas, representadas por filitos, metarenitos e quartzitos, tendo secundariamente a ocorrência de anfibolitos, metacalcários, dolomitos, xistos porfiroblásticos e rochas calciossilicatadas (Rodriguez, 1998).

De acordo com CPRM (2006), ocorrem na extremidade norte da Região Metropolitana de São Paulo, a norte da Falha de Jundiuvira, as unidades ortognáissica migmatítica intermediária e paragnáissica migmatítica superior do Complexo Varginha-Guaxupé (Schobbenhaus Filho *et al.*, 1984) estendendo-se a denominação para as unidades reconhecidas mais a sul por Campos Neto e Basei (1983) como a ele correlatas, dentro do conceito da unidade tectonoestratigráfica denominada *Nappe* Socorro-Guaxupé.

3.1.2.2 Litoestratigrafia dos Sedimentos Paleógenos

O preenchimento sedimentar Paleógeno da Bacia de São Paulo corresponde a deposição paleógena do Grupo Taubaté (Formação Resende, Formação Tremembé e Formação São Paulo) e neógena da Formação Itaquaquecetuba (Figuras 3 e 4).

Os depósitos sedimentares da Bacia de São Paulo são representados por sedimentos argilosos e arenosos de sistema fluvial e lamíticos de leques aluviais,

além de algumas ocorrências de sedimentos pelíticos lacustres (Rodríguez, 1998).

A Formação Resende é um sistema de leques aluviais associados a planície aluvial de rios entrelaçados e é dividida em duas litofácies equivalentes aos depósitos proximais e distais de leques aluviais (Takiya, 1991).

Segundo Riccomini & Coimbra (1992) a Formação Resende apresenta distribuição generalizada, compreendendo mais de 80% do preenchimento sedimentar da Bacia de São Paulo, com espessura máxima estimada em 256 m.

Esta formação encerra depósitos fanglomeráticos (leques aluviais - diamictitos e conglomerados com seixos, matacões e blocos dispersos em matriz lamítica e arenosa de coloração esverdeada) que gradam para depósitos relacionados à planície aluvial de rios entrelaçados (lamitos arenosos de coloração esverdeada esbranquiçada ou acinzentada, localmente com estratificação cruzada acanalada de médio porte e níveis conglomeráticos) (Riccomini & Coimbra, 1992). Os depósitos distais (rios entrelaçados) exibem contato interdigitado com os depósitos proximais (leques aluviais).

Segundo Riccomini (1989) a Formação Tremembé é um sistema lacustre formado por camadas tabulares decimétricas de argilas verdes maciças intercaladas com argilas cinza-escuro a preta, ricas em matéria orgânica, pertencentes aos grupos da illita e esmectita.

Essas argilas foram expostas pela primeira vez durante as escavações da Estação Barra Funda do Metrô de São Paulo e foram correlacionadas por Riccomini (1989) aos depósitos da Formação Tremembé encontrados na Bacia de Taubaté, onde está localizada a seção-tipo desta unidade.

A Formação São Paulo corresponde a depósitos de sistema fluvial meandrante. Takiya (1991) verificou em campo e em sondagens do DAEE diversas litofácies geradas por esse sistema, como depósitos de canal, de barra de pontal (*point bar*), de meandros abandonados (*oxbow lakes*) e de planícies de inundação com feições de rompimento de diques marginais (*crevasse splay*).

Segundo Riccomini & Coimbra (1992), a Formação São Paulo é constituída por duas litofácies principais, a primeira formada por arenitos grossos, conglomeráticos, localmente conglomerados, com granodecrescência ascendente para siltitos e argilitos e a segunda por arenitos médios a grossos,

com granodecrescência ascendente para sedimentos arenosos progressivamente mais finos até siltitos e argilitos.

Ocorrem ainda couraças (crostas e concreções) limoníticas de espessura variada na interface entre sedimentos argilosos e arenosos. O espigão central da cidade possui suas elevações controladas por estas couraças limoníticas (Riccomini & Coimbra, 1992).

A Formação São Paulo ocorre principalmente ao longo do espigão central da cidade de São Paulo por onde correm a Rua Heitor Penteado e avenidas Doutor Arnaldo, Paulista, Vergueiro e Domingos de Moraes. Também existem ocorrências na porção oeste da cidade (Jaguaré, Parque Continental, Rio Pequeno e Cidade Universitária) e em exposições aparentemente descontínuas (Alto de Santana e região Anhangabaú – Mosteiro de São Bento – Pátio do Colégio) (Riccomini & Coimbra, 1992).

De acordo com Takiya (1991), os sedimentos da Formação São Paulo ocorrem geralmente em cotas acima de 780 m. Segundo Riccomini & Coimbra (1992) esta unidade ocorre, no espigão central e no Alto de Santana em cotas superiores a 750-760 m e com espessura da ordem de 70 m na Avenida Paulista, já na porção oeste, com distribuição altimétrica irregular, provavelmente resultante do tectonismo pós-sedimentar.

A Formação Itaquaquecetuba corresponde a depósitos de sistema fluvial entrelaçado e é constituída em maior proporção por sedimentos areno-conglomeráticos de até 130 m de espessura, que ocorrem sob os aluviões atuais dos rios Pinheiros e Tietê, em cotas inferiores a 710 m (Riccomini, 1989; Takiya, 1991).

Esta unidade é restrita à área geográfica da Bacia de São Paulo e ela ocorre assentada diretamente sobre rochas do embasamento pré-cambriano, sem que tenha sido verificada a sua relação com as unidades sedimentares paleógenas (Riccomini & Coimbra, 1992).

3.1.2.3 Coberturas Neocenozóicas

Sob a designação de coberturas Neocenozóicas são incluídos os depósitos de idade pliocênica e recentes. Correspondem às associações colúvio-aluviais, com espessuras de 4 a 5 m, de distribuição relativamente restrita, acompanhando a topografia atual (IPT, 1981).

Segundo Riccomini & Coimbra (1992), as coberturas neocenoicas são compostas por conglomerados basais superpostos por sedimentos argilo-arenosos com seixos dispersos, além dos sedimentos que preenchem a depressão circular do Astroblema Colônia e das couraças limoníticas presentes no topo de algumas colinas terciárias no espigão central da cidade de São Paulo.

Os depósitos pleistocênicos compreendem predominantemente colúvios argilo-arenosos, com lentes argilosas a conglomeráticas, ocasionalmente exibindo madeira fossilizada, e aluviões subordinados constituídos por conglomerados basais sobrepostos por areias grossas a conglomeráticas com estratificações cruzadas, gradando para areias finas a médias, com porções de argila arenosa (Melo *et al.*, 1987).

Os depósitos holocênicos são representados por coluviões e aluviões em várzeas e baixos terraços, com espessura raramente ultrapassando os 10 m. Os depósitos coluviais ocorrem de forma descontínua e de pouca espessura, mas com distribuição generalizada (Riccomini & Coimbra, 1992).

3.2 Estatística

Antes de se realizar a análise geoestatística é essencial que se faça a análise estatística dos dados, com o objetivo de caracterizar e descrever sua distribuição e melhor entender o comportamento das variáveis de interesse (Yamamoto *et al.*, 2001). Essa análise, além de proporcionar melhor entendimento da variável estudada, pode também evidenciar erros durante a aquisição dos dados e/ou elaboração do banco de dados, evitando problemas durante a análise geoestatística.

Yamamoto *et al.* (2001, p. 50) descrevem que “a análise estatística deve ser iniciada pelo estudo da distribuição de frequências (que pode ser simples ou acumulada), e que descreve o modo como as unidades de uma população estão distribuídas sobre o intervalo amostrado. A distribuição de frequências simples é usualmente representada graficamente por um histograma, que permite a melhor visualização destes dados do ponto de vista de sua distribuição”.

A partir da análise do histograma é possível determinar os graus de assimetria e curtose de determinada variável. A assimetria (Figura 7) é a medida do grau de simetria das caudas de uma distribuição de frequências em relação à média, podendo ser positiva, se a cauda da distribuição estiver à direita da

média, negativa, se estiver à esquerda (Yamamoto *et al.* 2001), ou simétrica, quando ambas as caudas são iguais. As distribuições simétricas apresentam o mesmo valor para a moda, a média e a mediana (Correa, 2003).

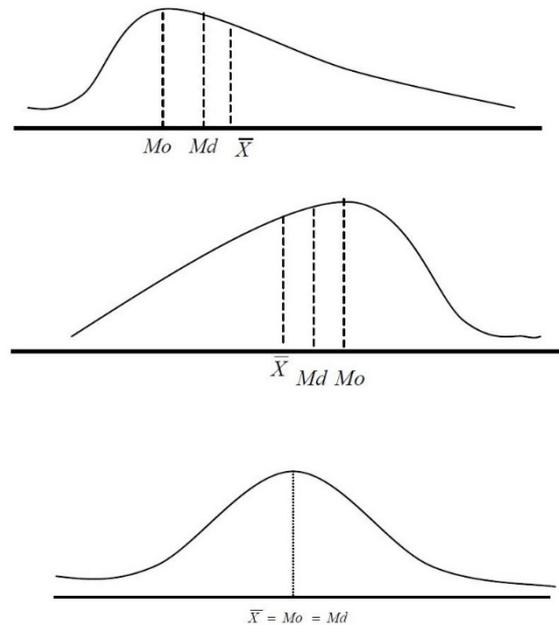


Figura 7 – Assimetrias positiva, negativa e simétrica, nesta ordem (Correa, 2003).

A curtose (Figura 8) é a medida do grau de achatamento de uma distribuição em relação à distribuição normal, que reflete a dispersão dos valores em torno da média (Spiegel, 1967). A distribuição pode ser leptocúrtica, quando a curva de frequências é mais fechada que a da distribuição normal, mesocúrtica, quando curva de frequências é igual à da distribuição normal, ou platicúrtica, quando a distribuição apresenta uma curva de frequências mais aberta que a da distribuição normal (Correa, 2003).

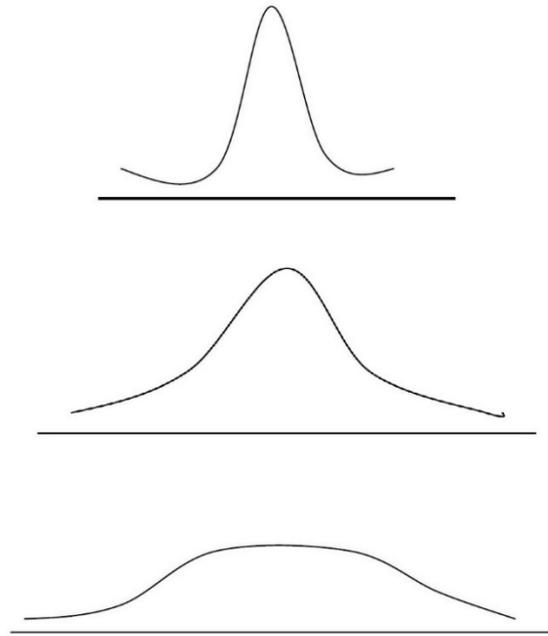


Figura 8 – Curtoses leptocúrtica, mesocúrtica e platicúrtica, nesta ordem (Correa, 2003).

A análise estatística também envolve o cálculo de estatísticas descritivas como média, moda, mediana, variância, desvio padrão e coeficiente de variação (Takiya, 1991). O cálculo desses estimadores estatísticos tem por finalidade o melhor entendimento do comportamento da variável em estudo, de modo a facilitar a análise geoestatística.

3.3 Geoestatística

Segundo Wackernagel (2003), a geoestatística é um ramo da matemática aplicada que se originou na indústria de mineração no início dos anos cinquenta para auxiliar na estimativa de teores de ouro em painéis em minas subterrâneas da África do Sul pelo engenheiro de minas Daniel Krige e o estatístico Herbert Sichel. Tais técnicas atraíram a atenção dos engenheiros de minas franceses e, em particular, de Georges Matheron, que uniu os conceitos inovadores de Krige e os definiu em uma única estrutura poderosa com a sua Teoria de Variáveis Regionalizadas (Wackernagel, 2003).

Ainda segundo Wackernagel (2003), as técnicas geoestatísticas se espalharam nos anos setenta para outras áreas das ciências da terra com o advento de computadores, que para a época eram de alta velocidade. Atualmente elas são populares em muitos campos da ciência e da indústria onde

há a necessidade de avaliar dados correlacionados espacialmente ou temporalmente (Wackernagel, 2003).

3.3.1 Variáveis Regionalizadas

Uma variável regionalizada é qualquer função numérica cuja distribuição espacial que varia de um lugar para outro com continuidade aparente, mas cujas variações não podem ser representadas por uma função determinística (Matheron, 1963). Ela possui características qualitativas que métodos estatísticos convencionais não conseguem reconhecer. Estas características são: Localização, os valores de uma variável regionalizada são dependentes de suas funções espaciais relativas dentro do campo geométrico; Suporte, os valores de uma variável regionalizada são dependentes do tamanho da amostra, de sua forma e orientação; Continuidade, onde a variação de uma variável regionalizada pode ser grande ou pequena, mas deve existir continuidade de ponto a ponto; a regionalização pode apresentar variações graduais em uma certa direção e rápida ou irregular em outra, caracterizando assim a Anisotropia (Bubenicek & Haas, 1969).

A teoria das variáveis regionalizadas tem por objetivo o estudo e a representação das propriedades estruturais das variáveis regionalizadas para a resolução de problemas de estimativa (Yamamoto, 2001).

Segundo IPT (1989), a hipótese intrínseca é um conceito básico na Teoria das Variáveis Regionalizadas e implica que a função intrínseca descreve o comportamento espacial da variável regionalizada dentro do espaço e que essa função, o chamado semivariograma, é uma característica intrínseca da regionalização. Ainda segundo IPT (1989) *apud* Yamamoto (2001) a variação espacial é estacionária se ela for invariante à translação, isso significa que a variância espacial será a mesma em todo o domínio, ou seja, o variograma é o mesmo onde quer que se amostra.

3.3.2 Variograma

De acordo com Armstrong (1998), o variograma é a ferramenta básica da Geoestatística e é utilizado para quantificar correlações espaciais entre amostras. Uma vez que uma função matemática tenha sido ajustada à um

variograma experimental, esse modelo pode ser usado para fornecer as informações necessárias à estimativa de valores não amostrados.

A função $\gamma(h)$ é denominada função semivariograma, metade da função variograma $2\gamma(h)$. Entretanto muitos autores utilizam simplesmente o termo função variograma para expressá-la. Desse modo, a função $\gamma(h)$ será denominada aqui como função variograma.

A função variograma pode ser escrita como:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \cdot \sum_{i=1}^n [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (3.1)$$

Onde $\gamma(h)$ é a função variograma; n é o número de pares de pontos separados por uma distância h , $Z(x_i)$ é o valor da variável regionalizada no ponto x_i e $Z(x_i + h)$ é o valor da variável regionalizada no ponto $(x_i + h)$.

Yamamoto (2001) cita que as propriedades de um variograma típico com patamar são:

- a. Amplitude: distância a partir da qual as amostras passam a ser espacialmente independentes. A amplitude é a distância que separa o campo estruturado (amostras espacialmente correlacionadas) do campo aleatório (amostras espacialmente independentes).
- b. Patamar: é o valor de variância no qual o variograma estabiliza;
- c. Efeito Pepita (C_0): é o valor da função variograma próximo à origem. O efeito pepita é, normalmente, atribuído a erros na amostragem e/ou variabilidade natural dos dados em distâncias pequenas;
- d. Variância espacial (C): é a diferença entre a variância a *priori* (valor da variância no patamar) e o efeito pepita (C_0) (Figura 9).

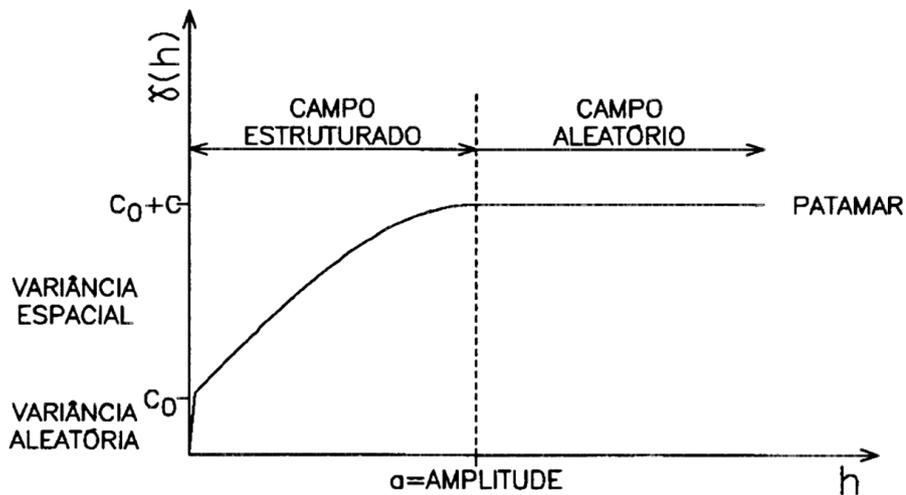


Figura 9 – Variograma típico com patamar e suas propriedades. Fonte: Yamamoto, 2001.

Matheron (1963) descreve que os variogramas determinados ao longo de diferentes direções podem mostrar variações distintas, podendo ser reconhecidos três tipos de anisotropia, conforme exemplificadas em Yamamoto (2001) e apresentadas na Figura 10.

- a. Anisotropia geométrica: a amplitude varia conforme as direções, mas sob um patamar constante (Figura 10a);
- b. Anisotropia zonal: a amplitude permanece constante e o patamar varia conforme as direções (Figura 10b);
- c. Anisotropia mista: tanto amplitude quanto patamar variam de acordo com as direções (Figura 10c).

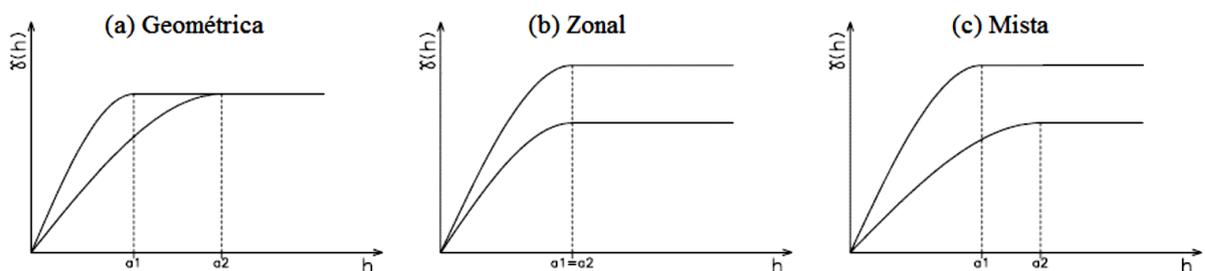


Figura 10 – Anisotropias: Geométrica (a), Zonal (b), Mista (c). Fonte: Yamamoto, 2001.

Os pontos calculados que formam o variograma experimental devem ter ajustados a si uma função matemática que descreva continuamente a variabilidade ou correlação espacial existente nos dados. Este ajuste de uma

função matemática, conhecido como ajuste de modelos teóricos de variograma, geralmente é feito de maneira interativa, em que a partir do variograma experimental as propriedades do variograma são inferidas (modelo, efeito pepita, amplitude e variância espacial), deste modo o modelo teórico de variograma é desenhado junto com o variograma experimental (Yamamoto, 2001).

Os principais modelos teóricos de variograma e suas respectivas formas estão representados na Figura 11.

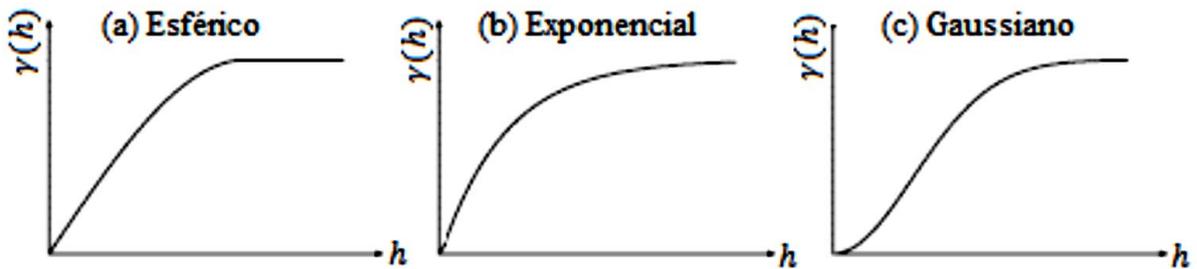


Figura 11 – Os principais modelos teóricos de variogramas. Fonte: Yamamoto, 2001.

As funções que descrevem os modelos esférico, exponencial e gaussiano são, respectivamente:

$$\begin{cases} \gamma(h) = C_0 + C \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & \text{para } h < a \\ \gamma(h) = C_0 + C & \text{para } h \geq a \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{h}{a} \right) \right) \right] \quad (3.3)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{h}{a} \right)^2 \right) \right] \quad (3.4)$$

3.3.3 Krigagem Ordinária

Krigagem é um processo geoestatístico de estimativa de valores de variáveis distribuídas no espaço e/ou tempo, com base em valores adjacentes quando considerados interdependentes pela análise variográfica. Pode ser comparada a métodos tradicionais de estimativa por médias ponderadas ou por médias móveis, mas a diferença fundamental é que somente a krigagem apresenta estimativas não tendenciosas e com mínima variância do erro de estimativa associada ao valor estimado (Yamamoto & Landim, 2013).

Segundo Armstrong (1998) a krigagem é um método de estimativa que calcula as melhores estimativas lineares não enviesadas de valores pontuais ou de médias de blocos.

A krigagem ordinária é o método mais utilizado de krigagem, pois não necessita da média populacional conhecida, porém existe a obrigatoriedade de que haja estacionariedade de segunda ordem (Rocha *et al.*, 2007).

De acordo com Yamamoto (2001), krigagem é um método que permite estimar o valor desconhecido $Z^*(x_0)$ associado a um ponto, área ou volume a partir de um conjunto de n dados $\{Z(x_i), i = 1, n\}$ disponíveis.

O estimador da krigagem ordinária $Z^*(x_0)$ será obtido, segundo Matheron (1963), a partir da combinação linear dos dados disponíveis, conforme:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z(x_i) \quad (3.5)$$

Onde: $Z^*(x_0)$ é o valor da variável estimada no ponto x_0 , λ_i são os ponderadores de krigagem, $Z(x_i)$ é o valor observado da variável Z no i -ésimo ponto.

Para que o estimador $Z^*(x_0)$ não seja enviesado é necessário que a condição de não-enviesamento seja honrada, para isso o somatório dos ponderadores λ_i deve ser igual a 1 (Matheron, 1963).

Os ponderadores ($\lambda_i, i = 1, n$) são obtidos pela resolução de um sistema de equações lineares, denominado sistema de equações de krigagem.

Como pode ser visto em Armstrong (1998), o sistema de equações de krigagem pode ser escrito na forma de matriz $AX = B$:

$$\begin{bmatrix} \gamma(x_1; x_1) & \gamma(x_1; x_2) & \dots & \gamma(x_1; x_n) & 1 \\ \gamma(x_2; x_1) & \gamma(x_2; x_2) & \dots & \gamma(x_2; x_n) & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma(x_n; x_1) & \gamma(x_n; x_2) & \dots & \gamma(x_n; x_n) & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(x_1; x_0) \\ \gamma(x_2; x_0) \\ \vdots \\ \gamma(x_n; x_0) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Onde: $\gamma(x_n; x_n)$ é a variância espacial entre as amostras; μ é o Multiplicador de Lagrange; $\gamma(x_n; x_0)$ é a variância espacial entre a n -ésima amostra e o ponto x_0 que será estimado.

Os métodos de krigagem podem ser divididos em lineares (krigagens ordinária e simples) e não lineares (krigagens multigaussiana, lognormal e indicadora). Os métodos não lineares fazem o uso da krigagem ordinária para dados transformados não linearmente (Yamamoto & Landim, 2013).

3.3.4 Krigagem de Variáveis Indicadoras

Variável indicadora é uma variável categórica resultante da transformação não linear de uma variável aleatória em que os valores transformados são restritos a 0 e 1. Essa transformação também pode ser aplicada a variáveis categóricas, na forma de ausência ou presença de determinada característica, ou a variáveis contínuas, como limiares na distribuição de frequência.

Uma variável aleatória contínua pode ser discretizada em relação a um valor de referência, como teor de corte/*cutoff*, da seguinte forma (Journel, 1983).

$$I(x, zc) = \begin{cases} 1, & \text{se } Z(x) \leq zc \\ 0, & \text{se } Z(x) > zc \end{cases} \quad (3.7)$$

Onde: zc é o teor de corte.

Da mesma maneira, uma variável aleatória categórica pode ser transformada em relação a presença ou não de determinada feição. Deutsch (2002) afirma que o objetivo da krigagem de uma variável indicadora categórica é o de estimar diretamente a distribuição da incerteza de determinada feição da variável categórica. A probabilidade de distribuição consiste em estimar as probabilidades para cada categoria: $p^*(k)$, $k=1, \dots, K$. Os valores de probabilidade são estimados pela codificação indicadora dos dados ou pelos valores de probabilidade, conforme:

$$\begin{cases} I(x, zk) = \text{Prob} \{ \text{feição } k \text{ estar presente} \\ I(x, zk) = \begin{cases} 1, & \text{se feição } k \text{ é presente em } x \\ 0, & \text{se feição } k \text{ é ausente em } x \end{cases} \end{cases} \quad (3.8)$$

Essas transformações não lineares resultam na função indicadora.

Deutsch (2002) afirma que a krigagem de uma variável indicadora é a krigagem (simples ou ordinária) para estimar uma variável que foi transformada em uma indicadora.

Diferentemente da krigagem ordinária, os resultados da krigagem de variáveis indicadoras não estimam um valor, mas sim a probabilidade de determinada situação ocorrer (Oliveira, 2008), como por exemplo a probabilidade de o teor do minério de um determinado depósito ser menor que o teor de corte,

no caso de variáveis contínuas, ou a probabilidade de determinada litologia ocorrer, no caso de variáveis categóricas.

A krigagem indicadora requer um variograma da variável indicadora para cada teor de corte z_c (ou para cada feição k), sendo que o melhor variograma da variável indicadora corresponde ao teor de corte igual à mediana da distribuição, pois metade dos valores é igual a 1 e a outra metade é igual a zero (Journel, 1983).

O estimador da krigagem indicadora pode ser escrito conforme (Journel, 1980):

$$I_{KO}^*(x_0; z_c) = \sum_{i=1}^n \lambda_i I(x_i; z_c) \quad (3.9)$$

3.3.5 Krigagem Residual

Uma variedade de problemas geoestatísticos envolvem fenômenos não estacionários que exibem deriva espacial. Exemplos incluem a topografia de uma encosta, a elevação do mergulho de uma feição estrutural e a espessura de uma camada em forma de cunha (Neuman e Jacobson, 1984).

Neste trabalho estão sendo estudados dados de topo rochoso e de espessuras de camadas sedimentares da Bacia de São Paulo. Tais dados, assim como os apresentados por Neuman e Jacobson (1984), descrevem um fenômeno que, usualmente, é não estacionário e, portanto, não possui variância espacial finita.

Um dos métodos de estimativa geoestatística propostos para o tratamento de dados não estacionários é o da krigagem residual, que consiste em estimar os resíduos de uma superfície de tendência ajustada aos dados (Rocha *et al.*, 2007).

Davis (2002) afirma que a análise de superfícies de tendência é um método matemático de separação de dados, distribuídos em mapas, em dois componentes distintos, um de natureza regional, responsável pela deriva, e outro relacionado a flutuações locais, expresso como os resíduos da superfície.

Segundo Rocha *et al.* (2007), esses resíduos apresentam variogramas experimentais estacionários.

De acordo com Davis (2002), a separação entre componentes de natureza regional e local foi feita por geólogos durante anos de forma intuitiva ou

gráfica, com base na geologia estrutural da região estudada e, para que a definição destes componentes não seja inteiramente subjetiva, ela deve ser feita utilizando, ao invés de definições geológicas, uma definição operacional que especifique o modo como os dados devem ser tratados. Sendo assim, deve-se ajustar aos dados, para separar a tendência regional, uma superfície polinomial (de baixo grau) por mínimos quadrados, ou seja, a superfície deve ser “posicionada” de modo que a soma dos quadrados das diferenças entre a superfície e as observações seja mínima.

De acordo com Neuman e Jacobson (1984), uma função não-intrínseca $Z(X)$ pode ser expressa pela soma da deriva, representada pela superfície de tendência $F(X)$, e o resíduo $R(X)$, que apresentam variogramas experimentais estacionários, conforme:

$$Z(X_i) = F(X_i) + R(X_i) \quad (3.10)$$

Onde: $F(X_i)$ é o valor da superfície polinomial ajustada ao i -ésimo ponto amostral do domínio e $R(X_i)$ é o resíduo da i -ésima amostra.

A krigagem residual pode ser utilizada quando variáveis possuem deriva que pode ser filtrada por uma superfície polinomial de baixo grau ajustada ao conjunto de dados (Rocha *et al*, 2007).

Neuman e Jacobson (1984) definem que a estimativa por krigagem residual consiste na krigagem ordinária dos resíduos que apresentam variogramas experimentais estacionários e então somá-los à deriva, representada pela superfície de tendência, conforme:

$$Z^*(x_0) = F(x_0) + R^*(x_0) \quad (3.11)$$

Onde: $Z^*(x_0)$ é o valor estimado, $F(x_0)$ é o valor da superfície polinomial ajustada e $R^*(x_0)$ é o resíduo estimado.

e o resíduo estimado, $R^*(x_0)$, como:

$$R^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i R(x_i)$$

(3.12)

Onde: $R^*(x_0)$ é o resíduo estimado, λ_i é o ponderador da i -ésima amostra e $R(x_i)$ é o resíduo da i -ésima amostra.

Assim como na krigagem ordinária, para que o estimador $R^*(x_0)$ seja não enviesado é necessário garantir a condição de restrição da krigagem ordinária, onde a somatória dos ponderadores λ_i deve ser igual a 1.

Assim, é realizada a krigagem ordinária dos resíduos para então somá-los à superfície de tendência.

3.3.6 Inverso da Potência da Distância

De acordo com Guerra (1988), o método do inverso da distância é um método que utiliza uma função linear para fazer as estimativas de modo que pontos amostrados a uma distância maior do ponto a ser estimado exerçam uma menor influência sobre ele. Para isso, o inverso da enésima potência da distância é utilizado como ponderador para cada amostra que está dentro do raio de influência do ponto a ser estimado. A estimativa é realizada segundo a seguinte fórmula:

$$u(x) = \frac{\sum_{i=1}^N w_i(x)u(x_i)}{\sum_{i=1}^N w_i(x)}, \quad \forall i \quad (3.13)$$

$$w_i(x) = \frac{1}{d(x, x_i)^p} \quad (3.14)$$

Onde: u é o valor da variável de interesse, w é a ponderação pelo inverso da potência p da distância, x é o ponto a ser estimado e x_i é o ponto amostral i .

Segundo Barnes (1980), a potência de valor 2 ($p = 2$) é aquela que, em regra, apresenta melhores resultados, pois potências baixas tendem a suavizar os valores extremos, enquanto potências elevadas tendem a destacá-los.

Quando utilizado de forma convencional, o método do inverso da potência da distância não considera a disposição relativa dos pontos amostrados, que podem ocorrer agrupados, enviesando o resultado da estimativa. Para evitar esses agrupamentos, Sinclair & Blackwell (2002) sugerem uma adaptação do método do inverso da potência da distância, onde são estabelecidos setores de busca ao redor do ponto a ser estimado, dividindo esta região em, por exemplo, quadrantes ou octantes, promovendo uma otimização da distribuição espacial das amostras. Após a divisão da região, é determinado o número de amostras que serão consideradas para cada setor na estimativa.

Segundo Barnes (1980) esse método pode ser aplicado a casos de anisotropia, quando esta é bem conhecida, sendo possível se estabelecer uma elipse de procura, orientada de acordo com a anisotropia presente.

3.3 Geotecnia

3.3.1 Geotecnia da Bacia de São Paulo

Kutner e Bjornberg (1997) propuseram uma classificação e notação dos litotipos mais comuns presentes na Bacia de São Paulo (Quadro 1). Essa classificação foi baseada na análise de sondagens executadas principalmente na Zona Oeste de São Paulo.

Além da proposta de classificação de notação dos litotipos, Kutner e Bjornberg (1997) criaram uma tabela contendo as faixas com alguns dos parâmetros geotécnicos dos horizontes litológicos determinados para as formações Resende e São Paulo (Quadro 2).

Ainda de acordo com esses autores, o contato entre as formações São Paulo e Resende ocorre em cota aproximada de 750 metros, sendo difícil a sua distinção do ponto de vista textural, pois ambas as formações são compostas praticamente pelos mesmos materiais, com diferenças muito sutis em termos de resistência a penetração (mais elevados nos estratos argilosos superficiais da Formação Resende) e de coloração (cores variegadas nas camadas argilosas da Formação São Paulo). A diferença entre essas formações se dá pela geometria dos horizontes litológicos: contínuos e espessos na Formação Resende e irregulares e interdigitados na Formação São Paulo. A Formação São Paulo também pode ser caracterizada pelo recobrimento generalizado por argilas vermelhas de baixa resistência a penetração (conhecidas como argilas vermelhas porosas) em cotas superiores a 785 metros.

O manto de intemperismo do embasamento pode alcançar espessuras de uma ou duas dezenas de metros (ou até mesmo maiores) e possui texturas e constituições variáveis em função da natureza litológica do maciço rochoso (Kutner e Bjornberg, 1997).

Em 2011, em estudos realizados pelo Metrô de São Paulo, foi feita uma modificação ao modelo proposto por Kutner e Bjornberg (1997), conforme pode ser observado na Figura 12.

Quadro 1 – Classificação e notação dos litotipos mais comuns ocorrentes na Bacia de São Paulo. Fonte: Kutner e Bjornberg (1997).

Formações Geológicas	Horizontes Litológicos			
	Notação Simplific.	Notação Abrangente	Constituição	Fácies
5 - Depósitos Tecnogênicos	5	5 (-)	Aterros de materiais diversos com predominância de argila siltosa pouco arenosa geralmente com pedregulho e/ou matéria orgânica	-
4 - Depósitos Aluvionares (Quaternário)	4a	4Tf (4Pt)	Turfa muito mole, preta	Argiloso
		4Ag1 (4CM)	Argila siltosa com matéria orgânica disseminada, plástica, muito mole, cinza e marrom	
	-	4Ag2 (4CS)	Argila arenosa (fina), com matéria orgânica, muito mole a medianamente consistente, marrom e cinza	
		4Ag3 (4CG)	Argila siltosa arenosa, com pedregulhos e matéria orgânica, plástica, mole, cinza e marrom	
	4b	4Ar1 (4SC)	Areia fina a média argilosa, pouco plástica, fofa, marrom e cinza	Arenoso
	-	4Ar2 (4S)	Areia média a grossa pouco argilosa, fofa, cinza	
4c	4Ar3 (4SG)	Areia média a grossa argilosa, com pedregulhos, fofa a medianamente compacta, cinza e marrom		
3 - Formação São Paulo (Terciário)		3Agp1 (3Cp1)	Argila siltosa, pouco arenosa, porosa, mole a média, vermelha e amarela	Argiloso (Arg. Vermelhas)
		3Agp2 (3Cp2)	Argila siltosa, pouco arenosa, média a rija, vermelha	Argiloso (Arg. Variegadas)
		3Ag1 (3CM)	Argila siltosa, pouco arenosa, rija a dura, variegada (amarela, cinza e vermelho arroxeadado)	
		3Ag2 (3CS)	Argila arenosa, pouco siltosa, média a dura, variegada (amarela, cinza e vermelho arroxeadado)	Arenoso
		3Ar1 (3SC)	Areia fina a média argilosa, medianamente compacta a compacta, amarela e vermelha	
		3Ar2 (3SG)	Areia de granulação variada, argilosa, com pedregulho fino a médio, medianamente compacta a compacta, cinza e amarela	
2 - Formação Resende (Terciário)	2a	2Ag1 (2CM)	Argila siltosa, pouco arenosa (fina a média), medianamente plástica a plástica, rija a dura, cinza esverdeada	Argiloso
	-	2Ag2 (2CS)	Argila arenosa (fina a média), pouco micácea, pouco a medianamente plástica, rija a dura, cinza	
		2Ag3 (2CG)	Argila arenosa pouco siltosa, com pedregulhos variados, medianamente plástica a plástica, rija a dura, cinza e marrom	
	2b	2Ar1 (2SC)	Areia fina a média argilosa, pouco siltosa, pouco micácea, pouco compacta a compacta, cinza e amarela	Arenoso
	2c	2Ar2 (2S)	Areia média a grossa, pouco siltosa, medianamente a muito compacta, cinza e amarela	
2d	2Ar3 (2SG)	Areia média a grossa, pouco siltosa, com fragmentos de quartzo e pedregulhos variados, medianamente a muito compacta, cinza e amarelo		
1 - Embasamento Cristalino (Pré-Cambriano)		1SR (1MS)	Silte arenoso (areia fina a média), micáceo, compacto a muito compacto, cinza escuro (solo residual de gnaïsse)	
		1SP (1MC)	Silte argiloso, pouco arenoso (areia fina a média) micáceo, compacto a muito compacto, verde (sapolito de gnaïsse)	
		1R (1R)	Gnaïsse com textura protomilonítica, foliação vertical (60° a 70°), fraturas inclinadas (45°) a subverticais, pouco a medianamente alterado (A2 a A3), coerente (C2) e fraturado (F2) (Rocha sã)	

Quadro 2 – Faixas de alguns dos parâmetros geotécnicos dos horizontes litológicos determinados para as formações Resende e São Paulo. Fonte: Kutner e Bjornberg (1997).

Horizontes Litológicos (Notação Abrangente)	Peso Específico (kN/m³)	Coesão Efetiva (kN/m²)	Ângulo de Atrito Efetivo (°)	Módulo de Elasticidade Secante (Mpa)
5	15	10	20	7
4Tf	13	5	15	0,5-1
4Ag0	16	8	20	3
4Ag1				
4Ag2				
4Ag3				
4Ar1	17	5	25-30	8-11
4Ar2				
4Ar3				
3Agp1	15	20	27	5-15
3Agp2	16	40	25	15-30
3Ag1	18-20	30-100	20-25	10-60
3Ag2				
3Ar1	19	1-3	33	30-50
3Ar2				
2Ag1	20-22	40-100	20-25	20-60
2Ag2				
2Ag3				
2Ar1	20-21	1-5	30-35	15-50
2Ar2				
2Ar3				

<p>① DEPÓSITOS TECNÓGENICOS</p> <p>ATERROS COM MATERIAIS DIVERSOS COM PREDOMÍNIO DE ARGILA SILTOSA POUCO ARENOSA, GERALMENTE COM PEDREGULHOS E/OU MATÉRIA ORGÂNICA.</p>			
<p>② DEPÓSITOS ALUVIONARES (QUATERNÁRIO)</p>			
<p>• FACIES ARGILOSO</p>		<p>• FACIES ARENOSO</p>	
<p>2Tf TURFA MUITO MOLE, PRETA.</p>		<p>2Ar1 AREIA FINA E MÉDIA ARGILOSA, POUCO PLÁSTICA, FOFA, MARRROM E CINZA.</p>	
<p>2Ag1 ARGILA SILTOSA COM MATÉRIA ORGÂNICA DISSEMINADA, PLÁSTICA, MUITO MOLE, CINZA E MARRROM.</p>		<p>2Ar2 AREIA MÉDIA E GROSSA POUCO ARGILOSA, FOFA, CINZA.</p>	
<p>2Ag2 ARGILA ARENOSA (AREIA FINA), COM MAT. ORGÂNICA, MUITO MOLE A MÉD. CONSISTENTE, MARRROM E CINZA.</p>		<p>2Ar3 AREIA MÉDIA E GROSSA ARGILOSA COM PEDREGULHOS, FOFA A MÉD. COMPACTA, CINZA E MARRROM.</p>	
<p>2Ag3 ARGILA SILTOSA ARENOSA, COM PEDREGULHOS E MAT. ORGÂNICA, PLÁSTICA, MOLE, CINZA E MARRROM.</p>			
<p>③ FORMAÇÃO SÃO PAULO (TERCIÁRIO)</p>			
<p>• FACIES ARGILOSO</p>		<p>• FACIES ARENOSO</p>	
<p>– ARGILAS VERMELHAS</p>			
<p>3Ag1 ARGILA SILTOSA POUCO ARENOSA, POROSA, DE CONSISTÊNCIA MOLE A MÉDIA, VERMELHA E AMARELA.</p>		<p>3Ar1 AREIA FINA A MÉDIA ARGILOSA MEDIANAMENTE COMPACTA A COMPACTA, AMARELA E VERMELHA.</p>	
<p>3Ag2 ARGILA SILTOSA POUCO ARENOSA, DE CONSISTÊNCIA MÉDIA A RÍJIDA, VERMELHA.</p>		<p>3Ar2 AREIA DE GRANULAÇÃO VARIADA ARGILOSA COM PEDREGULHOS FINOS E MÉDIOS, MEDIANAMENTE COMPACTA A COMPACTA, VERMELHA.</p>	
<p>– ARGILAS VARIEGADAS</p>			
<p>3Ag3 ARGILA SILTOSA POUCO ARENOSA, DE CONSISTÊNCIA RÍJIDA A DURA, VARIEGADA (AMARELA, CINZA E VERMELHA)</p>			
<p>3Ag4 ARGILA ARENOSA POUCO SILTOSA, DE CONSISTÊNCIA MÉDIA A DURA, VARIEGADA (AMARELA, CINZA E VERMELHA)</p>			
<p>④ FORMAÇÃO RESENDE (TERCIÁRIO)</p>			
<p>• FACIES ARGILOSO</p>		<p>• FACIES ARENOSO</p>	
<p>4Ag1 ARGILA SILTOSA POUCO ARENOSA (AREIA FINA E MÉDIA) MEDIANAMENTE PLÁSTICA A PLÁSTICA, RÍJIDA A DURA, CINZA ESVERDEADA.</p>		<p>4Ar1 AREIA FINA E MÉDIA ARGILOSA, POUCO SILTOSA, POUCO MICÁCEA, POUCO PLÁSTICA, POUCO COMPACTA A COMPACTA, CINZA AMARELA.</p>	
<p>4Ag2 ARGILA ARENOSA (AREIA FINA E MÉDIA), POUCO MICÁCEA, POUCO A MEDIANAMENTE PLÁSTICA, RÍJIDA A DURA, CINZA.</p>		<p>4Ar2 AREIA MÉDIA E GROSSA, POUCO SILTOSA, MEDIANAMENTE A MUITO COMPACTA, CINZA AMARELA.</p>	
<p>4Ag3 ARGILA ARENOSA, POUCO SILTOSA, COM PEDREGULHOS VARIADOS, MEDIANAMENTE PLÁSTICA A PLÁSTICA, RÍJIDA A DURA, CINZA E MARRROM.</p>		<p>4Ar3 AREIA MÉDIA E GROSSA, POUCO SILTOSA, COM FRAGMENTOS DE QUARTZO E PEDREGULHOS VARIADOS, MEDIANAMENTE A MUITO COMPACTA, CINZA AMARELA.</p>	
<p>⑤ EMBASAMENTO CRISTALINO (PRÉ-CAMBRIANO)</p>			
<p>5SR1 SILTE ARGILOSO POUCO ARENOSO, POUCO A MEDIANAMENTE COMPACTO, CINZA AVERMELHADO (SOLO RESIDUAL MADURO).</p>		<p>5SP SILTE ARGILOSO POUCO ARENOSO (AREIA FINA E MÉDIA), MICÁCEO, COMPACTO A MUITO COMPACTO, VERDE (SAFRÓLITO).</p>	
<p>5SR2 SILTE ARENOSO (AREIA FINA E MÉDIA), MICÁCEO, COMPACTO A MUITO COMPACTO, CINZA ESCURO (SOLO RESIDUAL JOVEM).</p>		<p>5R GNAISSE DE TEXTURA PROTOMILONÍTICA, GRANULAÇÃO MÉDIA, FOLIAÇÃO SUBVERTICAL A 60° – 70°, FRATURAS INCLINADAS (45°) A SUBVERTICAIS, POUCO A MEDIANAMENTE ALTEFADO (A2/A3), COERENTE (C2), FRATURADO (F2).</p>	

Figura 12 – Sistema de classificação de unidades geológico-geotécnicas utilizado pelo Metrô.
Fonte: CMSP (2011) *apud* Gurgueira (2013).

A partir de diversos estudos realizados pelo Metrô de São Paulo, em 1994 foi compilado um memorial justificativo dos parâmetros geotécnicos do projeto básico da Linha 4 Amarela, contendo informações dos principais parâmetros geotécnicos das unidades presentes nos depósitos aluvionares (Quadro 3), na Formação São Paulo (Quadro 4) e na Formação Resende (Quadro 5) (CMSP, 1994 *apud* Gurgueira, 2013).

Quadro 3 – Parâmetros geotécnicos para aterros e aluviões. Fonte: CMSP (1994) *apud* Gurgueira (2013).

Propriedades (Unidades)	1 Aterro	2 Tf	2 Ag1	2 Ag2	2 Ag3	2 Ar1	2Ar2 e 2Ar3
Descrição	Argila silto arenosa	Turfa muito mole	Argila siltosa com matéria orgânica	Argila arenosa com matéria orgânica	Argila arenosiltosa com matéria orgânica	Areia fina argilosa	Areia média e grossa, argilosa e com pedregulhos
SPT	2 a 7	0	0 a 4	0 a 4	0 a 4	1 a 9	2 a 13
γ (kN/m ³)	16	14	16	16	16	17	17
ϕ' (°)	20	15	20	20	20	28	28
c' (kPa)	10	5	8	8	8	5	5
$Cc/(1+C_0)$	0,07	0,3	0,15	0,10	0,08	0,05	0,05
K (cm/s)	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻³	5x10 ⁻³
E_0 (Mpa)	8 a 28	1	1 a 16	1 a 16	1 a 16	4 a 36	8 a 52
C_v (cm ² /s)		10 ⁻³	5x10 ⁻³	5x10 ⁻³	5x10 ⁻³		
K_0	0,83	0,88	0,83	0,83	0,83	0,73	0,73
E estático = 2 x E_0 / 5 Poisson = 0,15 a 0,25							

Quadro 4 – Parâmetros geotécnicos para a Formação São Paulo. Fonte: CMSP (1994) *apud* Gurgueira (2013).

Propriedades (unidades)	3 Ar1	3 Ar2	3 AgP1	3 AgP2	3 Ag1	3 Ag2
Descrição	Areia fina a média e argilosa	Areia média, argilosa com pedregulhos	Argila porosa vermelha	Argila vermelha rija	Argila siltosa variegada rija a dura	Argila arenosa variegada média e dura
SPT/prof (m)	SPT = prof (m)/2 a SPT = 1,35 x prof (m)					
γ (kN/m ³)	19,0	19,0	14,5 a 16,0	16,0 a 18,0	17,0 a 20,0	17,0 a 20,0
e	0,85	0,85	1,20 a 1,80	1,00 a 1,40	0,50 a 1,20	0,50 a 1,20
K (cm/s)	10 ⁻³	10 ⁻³	5x10 ⁻⁴	5x10 ⁻⁴	10 ⁻⁴	5x10 ⁻⁴
C_v (cm ² /s)	-	-	5x10 ⁻²	5x10 ⁻²	5x10 ⁻²	5x10 ⁻²
$C_e/(1+C_0)$	-	-	0,016 a 0,023	0,023 a 0,029	0,008 a 0,022	0,008 a 0,022
$C_c/(1+C_0)$	-	-	0,16 a 0,23	0,23 a 0,29	0,08 a 0,22	0,08 a 0,22
c' (kPa)	3	1	20	40	75 a 100	40 a 100
ϕ' (°)	30 a 35	30 a 35	27	25	22 a 21	24 a 21
pa' (kPa)	400 a 1000	400 a 1000	200	400	750 a 1000	400 a 1000
OCR	3,0 a 1,5	3,0 a 1,5	2,0 a 1,1	2,0 a 1,5	3,0 a 2,5	3,3 a 2,2
K_0	0,87 a 0,54	0,87 a 0,54	0,60	0,60	0,80 a 1,00	0,80 a 1,00
E_0 (Mpa)	50 a 200	50 a 175	10 a 30	35 a 80	50 a 200	30 a 175
R_f	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
E estático = 2 x E_0 / 5 Poisson = 0,15 a 0,25						

Quadro 5 – Parâmetros geotécnicos para a Formação Resende. Fonte: CMSP (1994) *apud* Gurgueira (2013).

Propriedades (unidades)	4 Ar1	4 Ar2	4 Ar3	4 Ag1	4 Ag2	4 Ag3
Descrição	Areia fina, média e argilosa	Areia média, grossa e argilosa	Areia média e grossa	Argila siltosa	Argila arenosa	Argila arenosa com pedregulhos
SPT/prof (m)	SPT = prof (m)/2 a SPT = 2 x prof (m)					
γ (kN/m ³)	18,7 a 20,6	18,7 a 20,6	18,7 a 20,6	18,8 a 21,6	18,8 a 21,6 (3,4)	18,8 a 21,6
K (cm/s)	5×10^{-3} a 9×10^{-3}	2×10^{-2} a 10^{-4}	9×10^{-3} a 5×10^{-2}	10^{-7}	10^{-7}	10^{-7}
Cv (cm ² /s)	-	-	-	5×10^{-3}	5×10^{-3}	5×10^{-3}
Ce/(1+C ₀)	-	-	-	0,01 a 0,02	0,01 a 0,02	0,01 a 0,02
Cc/(1+C ₀)	-	-	-	0,10 a 0,20	0,10 a 0,20	0,10 a 0,20
c' (kPa)	5	3	1	40 a 100	40 a 100	>25
ϕ' (°)	30 a 35	30 a 40	30 a 40	24 a 21	24 a 21	27
pa' (kPa)	400 a 1000	400 a 1000	400 a 1000	400 a 1000	400 a 1000	>360
OCR	3,3 a 1,7	3,3 a 1,7	> 3,3 a 1,7	3,3 a 1,7	3,3 a 1,7	>4
K ₀	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
E ₀ (Mpa)	40 a 150	50 a 350	30 a 200	40 a 170	40 a 80	180 a 360
Rf	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
E estático = 2 x E ₀ / 5 Poisson = 0,15 a 0,25						

O Quadro 6 apresenta os parâmetros geotécnicos para cálculo a partir das faixas de valores de N_{spt} para cada camada (Gurgueira, 2013). Dessa forma é possível calcular de modo aproximado os parâmetros geotécnicos das unidades da Bacia de São Paulo realizando apenas sondagens a percussão.

Quadro 6 – Parâmetros geotécnicos para cálculo na Bacia de São Paulo. Fonte: CMSP (1994) *apud* Gurgueira (2013).

Solo	SPT	γ (kN/m ³)	c' (kN/m ²)	ϕ' (graus)	K ₀	Kh (MN/m ³)	E (Mpa)
1	2 a 7	16,0	10	20	0,83	4,68	7,2
2 TF	0	14,0	5	15	0,88	0,52	0,8
2 Ag1	0 a 4	16,0	8	20	0,83	2,08	3,2
2 Ag2	0 a 4	16,0	8	20	0,83	2,08	3,2
2 Ag3	0 a 4	16,0	8	20	0,83	2,08	3,2
2 Ar1	1 a 9	17,0	5	28	0,73	5,20	8,0
2 Ar2	2 a 13	17,0	5	28	0,73	7,28	11,2
2 Ar3	2 a 13	17,0	5	28	0,73	7,28	11,2
2 AgP1	2 a 4	15,0	20	27	0,60	3,90	6
	5 a 10	16,0	20	27	0,60	9,75	15
2 AgP2	5 a 10	16,5	40	25	0,60	9,75	15
	>10	18,0	40	25	0,60	19,50	30

continua...

...continuação

Solo	SPT	γ (kN/m ³)	c' (kN/m ²)	ϕ' (graus)	K_0	K_h (MN/m ³)	E (Mpa)
3 Ag1	3 a 5	17,0	25	27	0,90	5,20	8
	5 a 8	18,0	30	25	0,90	9,75	15
	8 a 12	19,0	40	24	0,90	13,00	20
	12 a 18	20,0	50	23	0,90	19,50	30
	18 a 25	20,0	75	22	0,80	29,25	45
	25 a 40	20,0	100	21	0,80	42,25	65
	>40	20,0	150	20	0,80	65,00	100
3 Ag2	3 a 5	17,0	25	27	0,90	5,20	8
	5 a 8	18,0	30	25	0,90	9,75	15
	8 a 12	19,0	40	24	0,90	13,00	20
	12 a 18	20,0	50	23	0,90	19,50	30
	18 a 25	20,0	75	22	0,80	29,25	45
	25 a 40	20,0	100	21	0,80	42,25	65
	>40	20,0	150	20	0,80	65,00	100
3 Ar1	5 a 10	19,0	3	30	0,80	6,50	10
	10 a 20	19,0	3	32	0,80	19,50	30
	>20	19,0	3	35	0,80	32,50	50
3 Ar2	5 a 10	19,0	3	30	0,80	6,50	10
	10 a 20	19,0	3	32	0,80	19,50	30
	>20	19,0	3	35	0,80	32,50	50
4 Ag1	3 a 5	19,0	25	27	0,80	5,20	8
	5 a 8	19,5	30	25	0,80	9,75	15
	8 a 12	20,0	40	24	0,80	13,00	20
	12 a 18	20,5	50	23	0,80	19,50	30
	18 a 25	21,0	75	22	0,80	29,25	45
	25 a 40	21,5	100	21	0,80	42,25	65
	>40	21,5	150	20	0,80	65,00	100
4 Ag2	3 a 5	19,0	25	27	0,80	5,20	8
	5 a 8	19,5	30	25	0,80	9,75	15
	8 a 12	20,0	40	24	0,80	13,00	20
	12 a 18	20,5	50	23	0,80	19,50	30
	18 a 25	21,0	75	22	0,80	29,25	45
	25 a 40	21,5	100	21	0,80	42,25	65
	>40	21,5	150	20	0,80	65,00	100
4 Ag3	3 a 5	19,0	25	27	0,80	5,20	8
	5 a 8	19,5	30	25	0,80	9,75	15
	8 a 12	20,0	40	24	0,80	13,00	20
	12 a 18	20,5	50	23	0,80	19,50	30
	18 a 25	21,0	75	22	0,80	29,25	45
	25 a 40	21,5	100	21	0,80	42,25	65
	>40	21,5	150	20	0,80	65,00	100
4 Ar1	5 a 10	19,0	5	30	0,80	9,75	15
	10 a 20	20,0	5	32	0,80	19,50	30
	>20	20,6	5	35	0,80	32,50	50
4 Ar2	5 a 10	19,0	5	30	0,80	9,75	15
	10 a 20	20,0	5	32	0,80	19,50	30
	>20	20,6	5	35	0,80	32,50	50
4 Ar3	5 a 10	19,0	5	30	0,80	9,75	15
	10 a 20	20,0	5	32	0,80	19,50	30
	>20	20,6	5	35	0,80	32,50	50

3.3.2 Compacidade e Consistência dos Solos

De acordo com a norma NBR – 7250:1982 – “Identificação e descrição de amostras de solos obtidas em sondagens de simples reconhecimento dos solos”, compacidade é o estado de compactação dos depósitos de solos granulares grossos e consistência é a facilidade com a qual um solo pode ser deformado. A compacidade e a consistência de um solo podem ser medidas pelo ensaio SPT (*Standard Penetration Test*), sendo a compacidade referente às areias e siltes arenosos e a consistência referente às argilas e siltes argilosos.

Os estados de compacidade e consistência das areias e argilas podem ser observados na Quadro 7:

Quadro 7 – Estados de compacidade e consistência das areias e argilas. Fonte: NBR 6484.

Solo	Índice de resistência à penetração N	Designação
Areias e siltes arenosos	≤ 4	Fofa(o)
	5 a 8	Pouco compacta(o)
	9 a 18	Medianamente compacta(o)
	19 a 40	Compacta(o)
	> 40	Muito compacta(o)
Argilas e siltes argilosos	≤ 2	Muito mole
	3 a 5	Mole
	6 a 10	Média(o)
	11 a 19	Rija(o)
	20 a 30	Muito Rija(o)
	> 30	Dura(o)

3.3.3 Recuperação

A recuperação corresponde, em porcentagem, à relação entre a somatória dos comprimentos dos testemunhos (peças de rocha recuperadas) e o comprimento da manobra de avanço de perfuração (Monticeli & Tressoldi, 2013).

Segundo os mesmos autores, o valor da recuperação é dado por:

$$R = 100 \frac{\sum_{i=1}^{i=n} l}{L} \quad (3.15)$$

Onde: R é a recuperação, i é o comprimento de cada peça, n é o número de peças e L é o comprimento da manobra.

Segundo Monticeli & Tressoldi (2013), o valor de recuperação indica a quantidade de material obtido (recuperado) pela sondagem rotativa e a classificação geológica e geotécnica de trechos de recuperação inferior a 100% devem ser feitas com cuidado, procurando identificar as profundidades e os motivos que causaram esta perda. Além disso, a determinação de parâmetros geotécnicos, principalmente do grau de fraturamento e do RQD, não dever ser feita para trechos de recuperação inferior a 75%.

3.3.4 RQD (*Rock Quality Designation*)

O conceito de RQD (*Rock Quality Designation*) foi definido por Deere em 1964 e publicado pela primeira vez em 1967, e se trata de um parâmetro de classificação de qualidade da rocha baseada na recuperação de testemunhos de sondagem (Deere & Deere, 1988).

De acordo com Monticeli & Tressoldi (2013) o RQD, definido por Deere, considera a relação, em porcentagem, entre a somatória das peças de testemunhos maiores ou iguais a 10 centímetros e o comprimento da manobra, mas no Brasil foi feita uma adaptação do parâmetro RQD, chamada de IQR (Índice de Qualidade da Rocha), e corresponde à relação, também em porcentagem, entre a somatória das peças de testemunhos maiores ou iguais a 10 centímetros e o comprimento do trecho de fraturamento homogêneo considerado, ao invés da manobra.

Segundo os mesmos autores, o valor do IQR é dado por:

$$IQR = 100 \sum_{i=1}^{i=n} \frac{x_i}{N} \quad (3.16)$$

Onde: x_i é o comprimento das peças ≥ 10 cm e N é o comprimento do trecho de fraturamento homogêneo.

De acordo com Fiori & Carmignani (2009), o IQR representa uma medida de espaçamento, mas foi originalmente concebido como um método para descrever o grau de alteração ao longo de um furo de sondagem, conforme Quadro 8.

Quadro 8 – Classificação do IQR convencional. Fonte: Barton *et al.* (1974).

Valores de IQR (%)	Qualidade da Rocha
0 – 25	muito pobre
25 – 50	pobre
50 – 75	razoável
75 – 90	boa
90 – 100	excelente

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar esse objetivo serão utilizados os dados de poços, fornecidos pelo departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) e pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), distribuídos de forma irregular pela bacia.

A definição do topo rochoso da bacia foi realizada a partir de dois métodos: o primeiro estudando a bacia como um todo; o segundo estudando a bacia dividida em seis domínios, definidos estruturalmente.

No primeiro método os dados descreveram um fenômeno não estacionário e, portanto, sem variância espacial finita. Para o tratamento destes dados optou-se pela krigagem dos resíduos, uma opção para os casos de variáveis não estacionárias em que a deriva pode ser filtrada por uma superfície polinomial de baixo grau ajustada ao conjunto de dados. Já no segundo método,

os dados se comportaram de forma estacionária, sendo realizada, neste caso, a krigagem ordinária para cada domínio.

Para a definição das espessuras dos sedimentos e solos de alteração, foram utilizadas as técnicas geoestatísticas krigagem ordinária e inverso da potência da distância, respectivamente.

Para o cálculo das probabilidades de ocorrência de sedimentos, solos de alteração ou rochas em determinado ponto da bacia, foram utilizadas técnicas de geoestatística não paramétricas, mais especificamente krigagem de variáveis indicadoras a partir da codificação indicadora das litologias, análise estatística e geoestatística das variáveis indicadoras e estimativa das probabilidades por krigagem de variáveis indicadoras.

Esta parte do trabalho foi realizada em uma área menor, fora da Bacia, na região Oeste de São Paulo, utilizando dados de sondagens a percussão disponibilizados pela Companhia do Metropolitano de São Paulo.

4.1 Aquisição de Dados e Consolidação do Banco de Dados

Foram adquiridos e utilizados neste trabalho os dados de 3.124 poços, disponibilizados pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), e 112 sondagens a percussão, rotativas e mistas, disponibilizados pela Companhia do Metropolitano de São Paulo (Linha 4 Amarela).

Os poços utilizados nesse trabalho estão distribuídos por toda a extensão da bacia de forma irregular, conforme apresentado na Figura 13, onde pode-se observar maior concentração de dados na região centro-oeste da Bacia de São Paulo.

As sondagens utilizadas nesse trabalho estão concentradas na zona oeste da Região Metropolitana de São Paulo, no embasamento da bacia.

A organização das informações contidas nos descritivos dos poços e sondagens é a apresentada nas Tabelas 1 e 2.

Exemplifica-se na Tabela 1 o banco de dados litológico, contendo todas as informações de poços. Esse banco de dados não possui informações geotécnicas e foi utilizado para avaliação do topo rochoso e das espessuras dos pacotes de sedimentos e de solo de alteração de rocha. Todos os poços estão sendo utilizados neste banco de dados.

Já na Tabela 2 o banco de dados geotécnico é exemplificado, essa base de dados contém as informações das 112 sondagens a percussão, rotativas e mistas, apresentando os resultados dos ensaios SPT (solos), a porcentagem de recuperação e o RQD (rochas). Esse banco de dados também foi utilizado na avaliação de pacotes de solos arenosos e argilosos. Mostra-se na Figura 14 um modelo de perfil de sondagem utilizado.

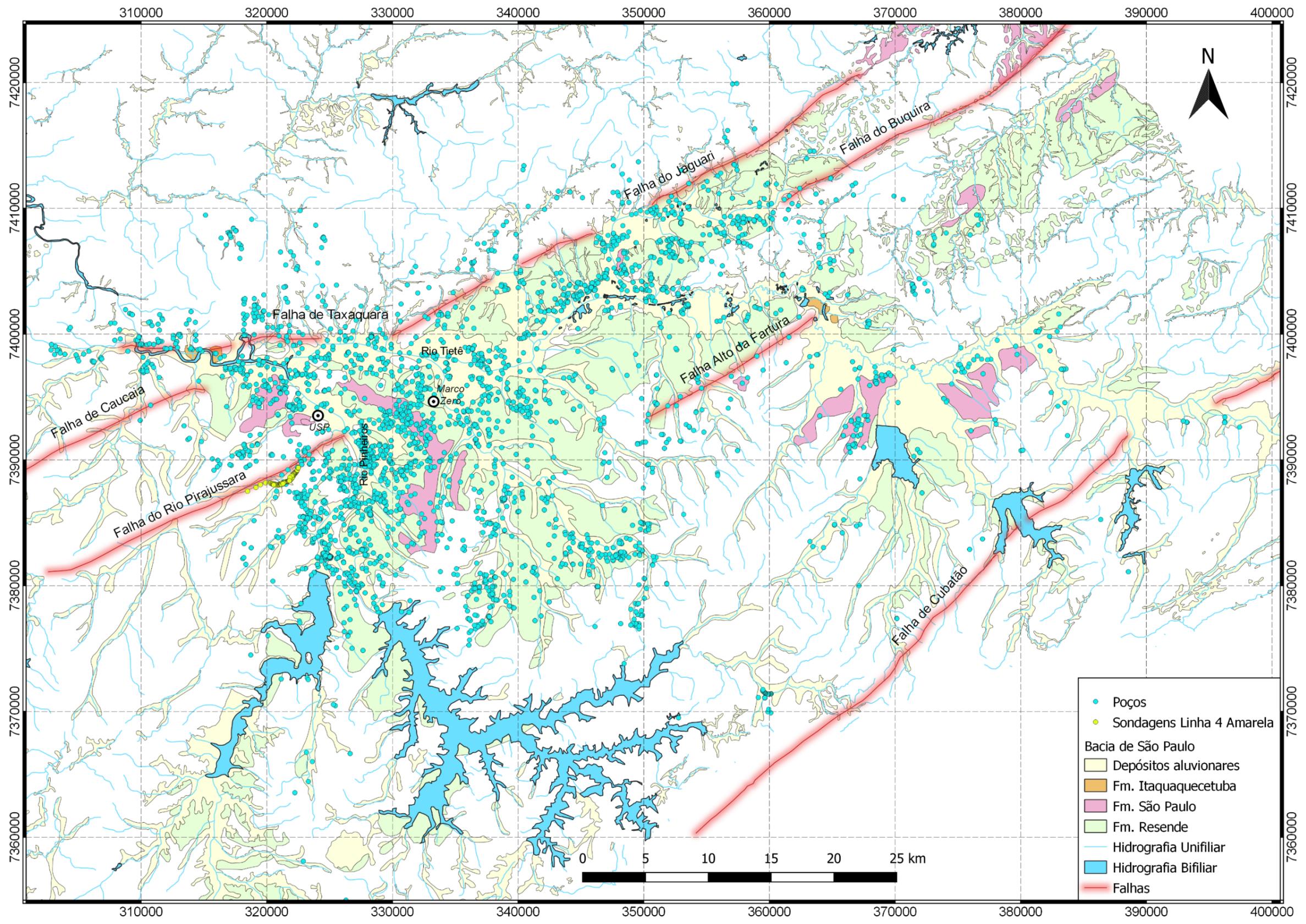


Figura 13 – Mapa geológico simplificado da Bacia de São Paulo (CPRM, 2019) e distribuição dos dados adquiridos

Tabela 1 – Exemplo de como foi realizada a consolidação do banco de dados litológico, utilizando os poços 5036, 5037, 52163, 5053 e 5044. Onde: ID é a identificação do poço, Cidade é a cidade onde foi feito o poço, X e Y são as coordenadas leste e norte respectivamente, Z é a cota, Prof. é a profundidade atingida pelo poço, De e Ate são as informações de topo e base de uma camada, Z Camada é a cota do topo desta camada e Categoria é a categorização das diferentes litologias onde 1, 2 e 3 representam sedimento, solo de alteração e rocha, respectivamente.

ID	Cidade	X	Y	Z	Prof	De	Ate	Z Camada	Categoria	Descrição
5036	Santo andre	347560	7382000	763	140	0	27	763	2	Solo de alteração de rocha vermelho, argiloso, micáceo
5036	Santo andre	347560	7382000	763	140	27	140	736	3	Biotita-xisto
5037	Santo andre	347600	7382200	760	151	0	17	760	1	Solo marrom argiloso
5037	Santo andre	347600	7382200	760	151	17	35	743	3	Biotita-xisto
5037	Santo andre	347600	7382200	760	151	35	110	725	3	Quartzo-biotita-xisto
5037	Santo andre	347600	7382200	760	151	110	151	650	3	Gnaisse
52163	Guarulhos	339850	7404830	735	150	0	8	735	1	Solo argiloso vermelho
52163	Guarulhos	339850	7404830	735	150	8	14	727	1	Argila cinza avermelhada
52163	Guarulhos	339850	7404830	735	150	14	38	721	1	Argilito cinza amarelado
52163	Guarulhos	339850	7404830	735	150	38	40	697	2	Rocha alterada
52163	Guarulhos	339850	7404830	735	150	40	150	695	3	Granito gnáissico
5053	Diadema	337670	7379600	799	200	0	10	799	1	Solo argilo-arenoso
5053	Diadema	337670	7379600	799	200	10	40	789	1	Argilito cinza com lentes de conglomerado
5053	Diadema	337670	7379600	799	200	40	55	759	1	Arenito fino a grosso, cinza, muito argiloso
5053	Diadema	337670	7379600	799	200	55	72	744	3	Quartzo-mica-xisto alterado
5053	Diadema	337670	7379600	799	200	72	200	727	3	Quartzo-mica-xisto são
5044	Sao paulo	337600	7395070	750	199	0	12	750	1	Solo
5044	Sao paulo	337600	7395070	750	199	12	80	738	1	Areia média a grossa intercalada com argila
5044	Sao paulo	337600	7395070	750	199	80	112	670	1	Argila cinza com areia fina
5044	Sao paulo	337600	7395070	750	199	112	120	638	1	Areia média cinza com argila esverdeada
5044	Sao paulo	337600	7395070	750	199	120	160	630	1	Areia cinza média a grossa
5044	Sao paulo	337600	7395070	750	199	160	166	590	1	Nível de seixos
5044	Sao paulo	337600	7395070	750	199	166	199	584	1	Areia muito grossa com seixos
5044	Sao paulo	337600	7395070	750	199	199	200	551	3	Rocha cristalina

Tabela 2 – Exemplo de como foi realizada a consolidação do banco de dados, utilizando o perfil da sondagem SM-4611 (Figura 13). Onde: ID é a identificação da sondagem, X e Y são as coordenadas leste e norte respectivamente, Z é a cota da boca do furo, AZ e DIP são o azimute e o mergulho do furo, ind_areia e ind_argila são as variáveis indicadoras que representam areia e argila, SPT, REC e RQD são as variáveis que representam os resultados dos ensaios SPT, a porcentagem de recuperação de rocha e a porcentagem de fragmentos de rocha maiores do que 10 cm, respectivamente.

ID	X	Y	Z	AZ	DIP	de	ate	lito	ind_areia	ind_argila	SPT	REC	RQD
4611	322026.256	7388746.596	742.704	0	90	0	1	areia	1	0	-999	-999	-999
4611	322026.256	7388746.596	742.704	0	90	1	2	areia	1	0	-999	-999	-999
4611	322026.256	7388746.596	742.704	0	90	2	3	areia	1	0	-999	-999	-999
4611	322026.256	7388746.596	742.704	0	90	3	4	areia	1	0	-999	-999	-999
4611	322026.256	7388746.596	742.704	0	90	4	5	areia	1	0	18	-999	-999
4611	322026.256	7388746.596	742.704	0	90	5	6	areia	1	0	16	-999	-999
4611	322026.256	7388746.596	742.704	0	90	6	7	areia	1	0	22	-999	-999
...
...
...
...
...
4611	322026.256	7388746.596	742.704	0	90	19	20	areia	1	0	157.5	-999	-999
4611	322026.256	7388746.596	742.704	0	90	20	20.88	areia	1	0	195	-999	-999
4611	322026.256	7388746.596	742.704	0	90	20.88	21.3	rocha	-999	-999	-999	100	0
4611	322026.256	7388746.596	742.704	0	90	21.3	24.3	rocha	-999	-999	-999	98	71
4611	322026.256	7388746.596	742.704	0	90	24.3	25.3	rocha	-999	-999	-999	21	11
4611	322026.256	7388746.596	742.704	0	90	25.3	26.2	rocha	-999	-999	-999	20	0
4611	322026.256	7388746.596	742.704	0	90	26.2	27.2	rocha	-999	-999	-999	25	17
4611	322026.256	7388746.596	742.704	0	90	27.2	29.3	rocha	-999	-999	-999	99	77
4611	322026.256	7388746.596	742.704	0	90	29.3	30.3	rocha	-999	-999	-999	90	69
4611	322026.256	7388746.596	742.704	0	90	30.3	33.3	rocha	-999	-999	-999	100	93
4611	322026.256	7388746.596	742.704	0	90	33.3	35.6	rocha	-999	-999	-999	90	74
4611	322026.256	7388746.596	742.704	0	90	35.6	37	rocha	-999	-999	-999	98	65
4611	322026.256	7388746.596	742.704	0	90	37	39.35	rocha	-999	-999	-999	100	71
4611	322026.256	7388746.596	742.704	0	90	39.35	40.31	rocha	-999	-999	-999	100	89

4.3 Análise e Interpretação de Resultados

Essa etapa é dividida em três partes: análise estatística, análise geoestatística e interpretação dos resultados.

A análise estatística, feita após a consolidação do banco de dados, é seguida pela análise geoestatística. Ambas as análises foram realizadas utilizando o software Isatis, disponível no Laboratório de Informação Geológica do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. Posteriormente foi realizada a interpretação dos resultados destas análises.

Neste trabalho estão sendo realizados três tipos de estimativas geoestatísticas: a krigagem de resíduos, a krigagem ordinária, a krigagem de variáveis indicadoras e ainda foi realizada a estimativa pelo método do inverso da potência da distância.

A krigagem de resíduos foi realizada para variável cota do topo rochoso do embasamento, quando estudada em um único domínio, cujo variograma é não estacionário. Para isso, foi realizada primeiramente análise estatística. Em seguida foi realizada a análise geoestatística, confirmando que o variograma desta variável é não estacionário e calculando os resíduos a partir do ajuste de uma superfície polinomial de grau 2 aos dados por mínimos quadrados. Então foi calculado o variograma experimental para quatro direções, buscando verificar se há a presença de anisotropia no domínio. Verificada a anisotropia, o variograma foi recalculado para duas direções, sendo a direção principal de maior continuidade e sua perpendicular. Esse variograma experimental foi utilizado para o ajuste do modelo teórico de variograma no programa Isatis. Posterior ao ajuste, foi realizada krigagem dos resíduos e o resultado foi somado à superfície polinomial, gerando o resultado de estimativas para o topo rochoso da bacia.

A krigagem ordinária foi realizada para a variável cota do topo rochoso do embasamento, quando dividida em seis domínios, e para as variáveis espessura dos sedimentos, SPT, Recuperação e RQD. Para cada uma destas variáveis foram realizadas análise estatística, seguida por análise geoestatística a partir do cálculo do variograma experimental para quatro direções, buscando encontrar a presença de anisotropia no domínio. Verificada a anisotropia, o variograma foi recalculado para duas direções, sendo a direção principal de maior continuidade e sua perpendicular. Esse variograma experimental foi utilizado para o ajuste do modelo teórico de variograma no programa Isatis. Posterior ao ajuste, foi realizada krigagem ordinária, gerando o resultado de estimativas para cada variável.

A krigagem de variáveis indicadoras foi aplicada aos dados não paramétricos litologia (sedimentos, solo de alteração e rocha, nos dados de poços) e granulometria (areia e argila, nos dados de sondagens). Para esses dados não paramétricos, foi realizada, primeiramente, a categorização de cada litologia/granulometria, e então foram criadas as variáveis indicadoras para cada categorização.

Para as variáveis indicadoras foi realizada análise estatística, sobretudo para definir as proporções de cada indicadora e com isso inferir qual será o comportamento esperado dos variogramas. Na análise geoestatística foi feita análise exploratória para cada indicadora, buscando reconhecer a presença de anisotropia. Verificada a existência de anisotropia os variogramas foram recalculados, para três direções, quando os dados eram 3D (litologia), ou para duas direções quando os dados eram 2D (granulometria), sendo essas a direção principal de anisotropia e sua perpendicular e, no caso 3D, a direção vertical. Em seguida estes variogramas foram utilizados para o ajuste do modelo teórico de variograma e esse modelo foi utilizado para o cálculo da krigagem das variáveis indicadoras.

O método do inverso da potência da distância foi utilizado para a estimativa da espessura do solo de alteração de rocha e para o cálculo de probabilidade de ocorrência de solo de alteração de rocha. Este método foi aplicado pois as variáveis de espessura e indicadora do solo de alteração de rocha não apresentaram variograma estruturado.

5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

5.1 Estimativa Do Topo Rochoso da Bacia de São Paulo

A estimativa do topo rochoso da Bacia de São Paulo foi realizada de duas maneiras, uma ao se analisar as amostras em apenas um domínio, utilizando krigagem de resíduos, e outra ao se analisar as amostras subdividindo o domínio em seis, utilizando krigagem ordinária em cada um deles.

Nessa parte do trabalho foi utilizada uma malha regular de 500 metros por 500 metros.

5.1.1 Krigagem de Resíduos dos Dados em um Único Domínio

Foram realizadas análise estatística, análise geoestatística e a estimativa por krigagem de resíduos do topo rochoso da Bacia de São Paulo a partir das informações de 2.390 poços distribuídos em uma malha irregular pela bacia. Neste estudo não

foram utilizados os dados de todos os poços, pois nem todos atingiam o embasamento da bacia.

O histograma dos dados de topo rochoso (Figura 15) apresenta assimetria negativa da variável cota do topo rochoso, com cotas que variam entre 412 e 954 metros, com média de 703,02 e desvio padrão de 55,56.

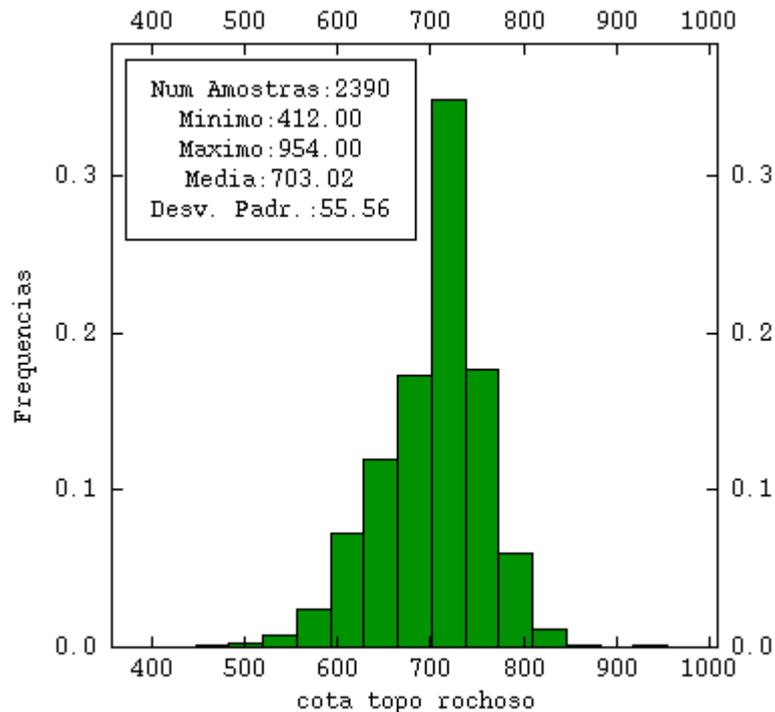


Figura 15 – Histograma da variável cota do topo rochoso da Bacia de São Paulo.

Apresenta-se na Figura 16 o mapa base com o domínio no qual foi calculado o campo geométrico para as quatro direções durante a análise exploratória, as distâncias utilizadas foram 12.500 metros para a direção 25°, 70°, 115° e 160°.

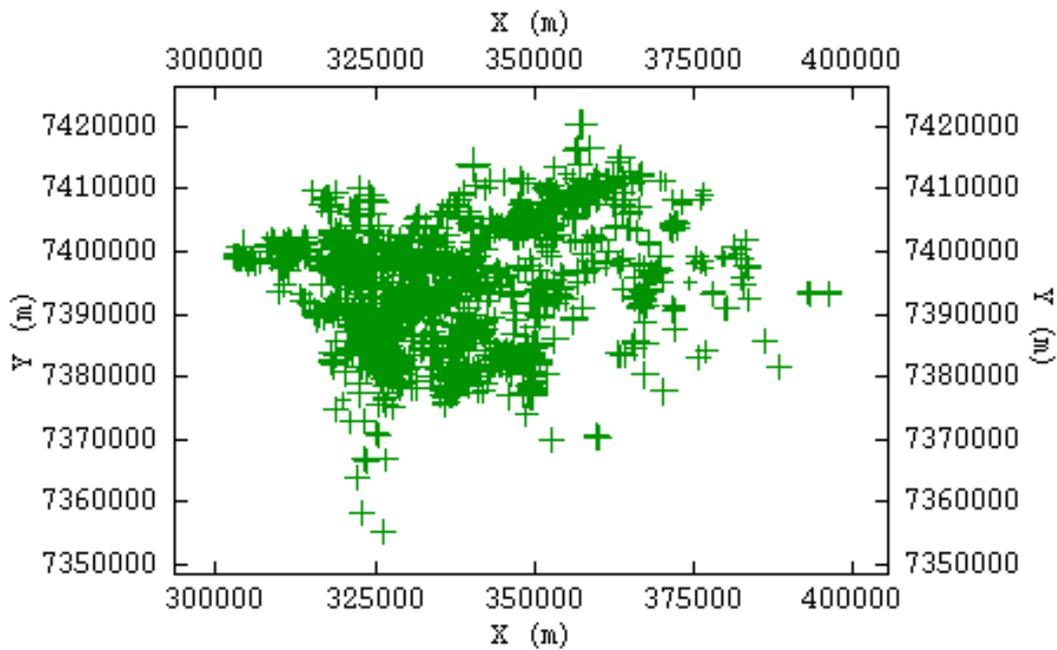


Figura 16 – Domínio para o cálculo do campo geométrico.

O variograma experimental foi calculado com os parâmetros apresentados na Tabela 3:

Tabela 3 – Parâmetros utilizados para o cálculo do variograma experimental.

Direção	Campo Geométrico (m)	Comprimento de Passo (m)	Número de Passos
25°	12.500	500	25
70°	12.500	500	25
115°	12.500	500	25
160°	12.500	500	25

A variável Z descreve um fenômeno que não possui variância espacial finita, ou seja, o variograma experimental é não estacionário, pois não apresenta patamar definido. Essa característica pode ser observada na Figura 17.

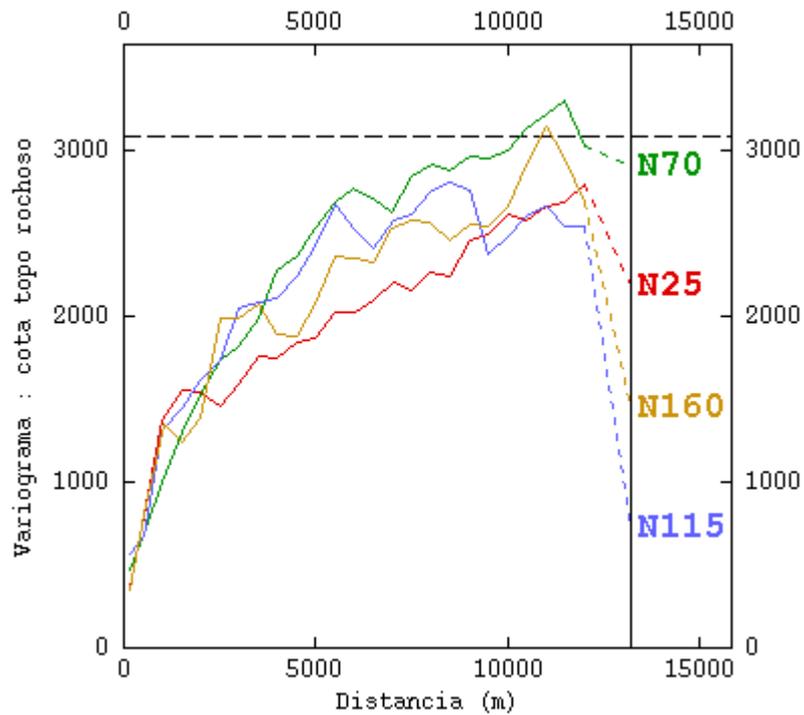


Figura 17 – Variograma experimental da variável cota do topo rochoso.

Devido a não estacionariedade da variável estudada, ajustou-se a ela uma superfície polinomial de grau 2 (Figura 18) satisfazendo o critério dos mínimos quadrados. O grau 2 foi escolhido pois obteve-se com ele um resultado melhor que o com o grau 1.

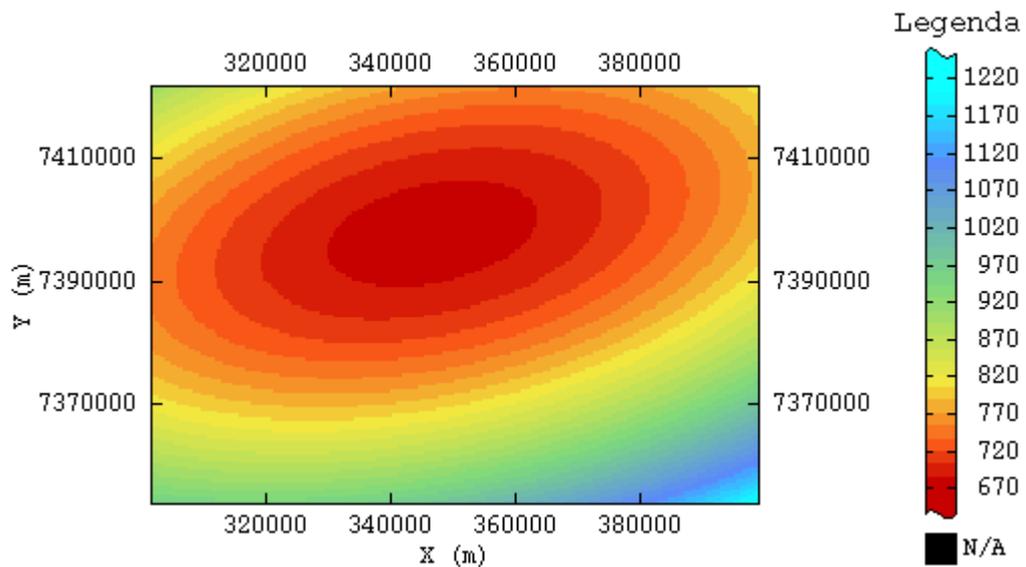


Figura 18 – Superfície polinomial de grau 2 ajustada aos dados.

Após o ajuste foram calculados os resíduos a partir da subtração entre os valores originais e os valores ajustados. O histograma dos resíduos apresenta distribuição aproximadamente normal, com valores negativos e positivos (Figura 19).

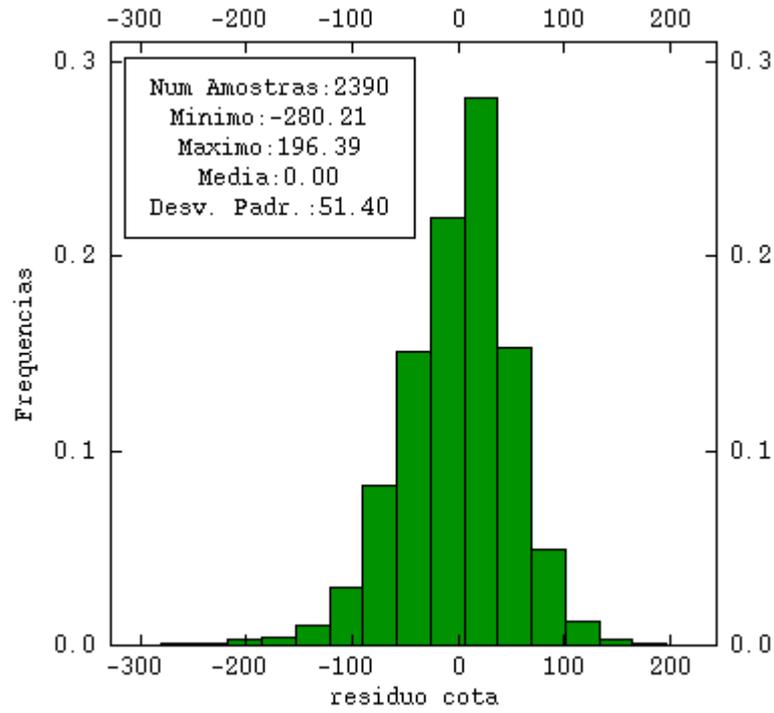


Figura 19 – Histograma dos resíduos entre a variável e a superfície polinomial ajustada.

Após o cálculo dos resíduos, foi feita a análise exploratória utilizando os mesmos parâmetros apresentados na Tabela 3 (Figuras 20).

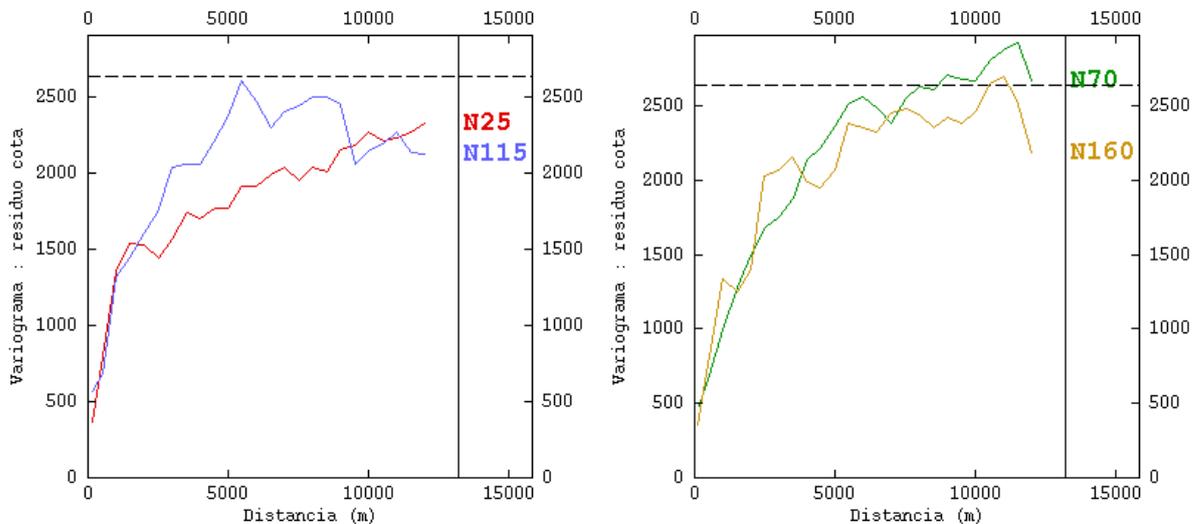


Figura 20 – Variograma experimental dos resíduos para os pares 25°/115° e 70°/160°.

Observando as direções do variograma experimental apresentado na Figura 20 vê-se que ele apresenta anisotropia mista. A anisotropia aparece mais bem demarcada no par 70° e 160°. Por esse motivo, e pela direção da estrutura da bacia, ele foi escolhido para ajuste do modelo teórico de variograma.

Apresenta-se na Figura 21 o variograma experimental e respectivo modelo ajustado com os parâmetros mostrados na Tabela 4:

Tabela 4 – Parâmetros utilizados para o ajuste do modelo teórico de variograma dos resíduos.
Modelo de variograma para os resíduos da variável cota do topo rochoso

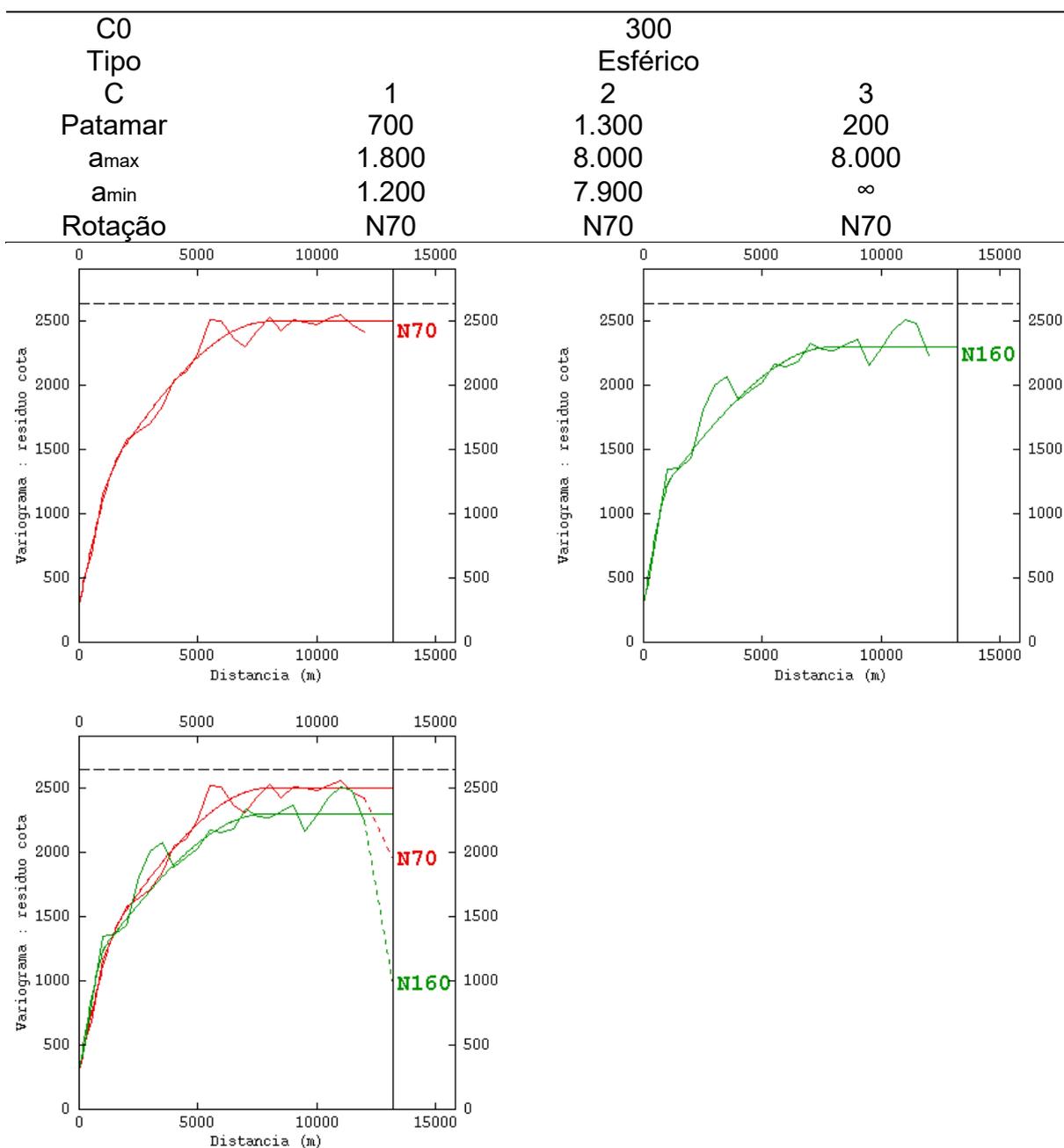


Figura 21 – Modelo de variograma para as direções 70° e 160°.

O modelo de variograma foi ajustado com quatro estruturas, sendo: C0 (efeito pepita igual a 300), C1 (modelo esférico rotacionado em 70° com amplitude de 1.800 m na direção 70° e de 1.200 m na direção 160° e patamar em 700), C2 (modelo esférico rotacionado em 70° com amplitude de 8.000 m na direção 70° e de 7.900 m na direção 160° e patamar em 1.300) e C3 (modelo esférico rotacionado em 70° com amplitude de 8.000 m na direção 70° e infinita na direção 160° e patamar em 200). As estruturas C1, C2 e C3 foram rotacionadas na direção de 70° pois esta é a direção mais contínua, com maior amplitude.

Após o ajuste do modelo de variograma foi feita validação cruzada. Foi adotada a vizinhança dividida em 4 setores, com número ótimo de amostras por setor igual a 4, número mínimo de amostras igual a 1 e raio de busca máximo de 8.000 m para a direção 70° e de 7.900 m para a direção 160°, obtendo-se correlação de 0,812 (Figura 22) e número de pontos estimados igual a 2.390.

Tabela 5 – Parâmetros de vizinhança utilizado para a krigagem dos resíduos.

Parâmetros de vizinhança	
Número Mínimo de Amostras	1
Número de Setores Angulares Horizontais	4
Raio de busca máximo para a direção 70°	8.000 m
Raio de busca máximo para a direção 160°	7.900 m
Número Ótimo de Amostras por Setor	4

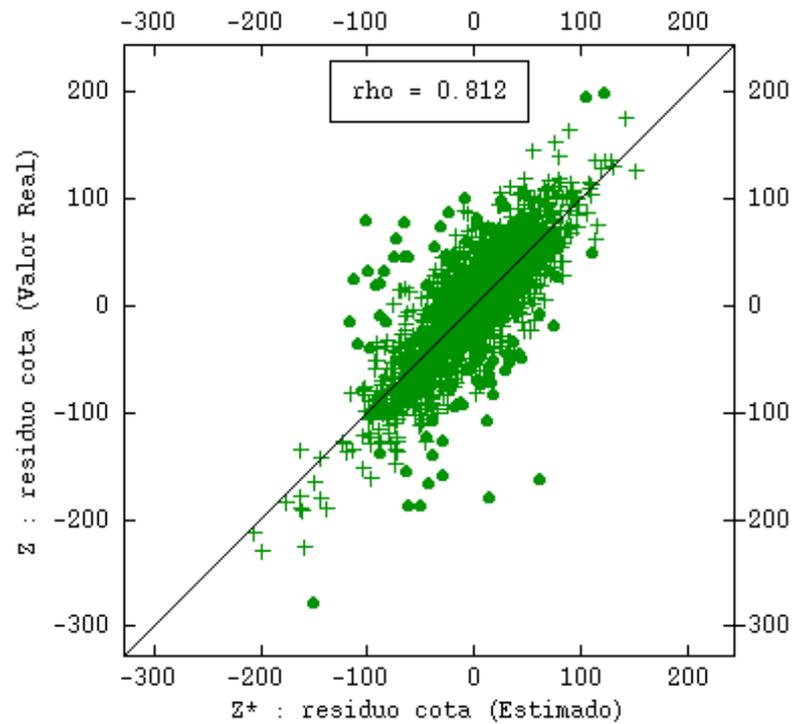


Figura 22 – Resultado da validação cruzada: coeficiente de correlação igual a 0.812.

Definidos os parâmetros do modelo e de vizinhança foi realizada a krigagem ordinária dos resíduos, cujo resultado está representado na Figura 23.

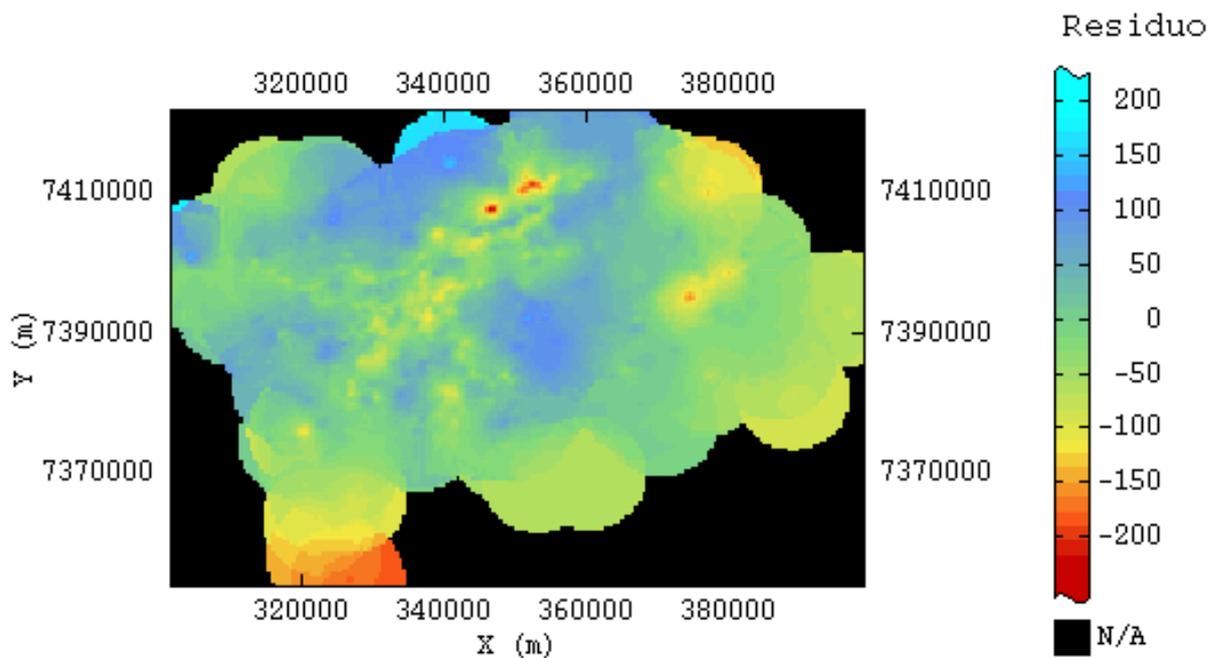


Figura 23 – Resultado da krigagem ordinária dos resíduos.

Após a krigagem ordinária dos resíduos, os resultados foram somados à superfície polinomial de grau 2 (Figura 17), tendo-se então o resultado da estimativa do topo rochoso do embasamento da Bacia de São Paulo (Figura 24).

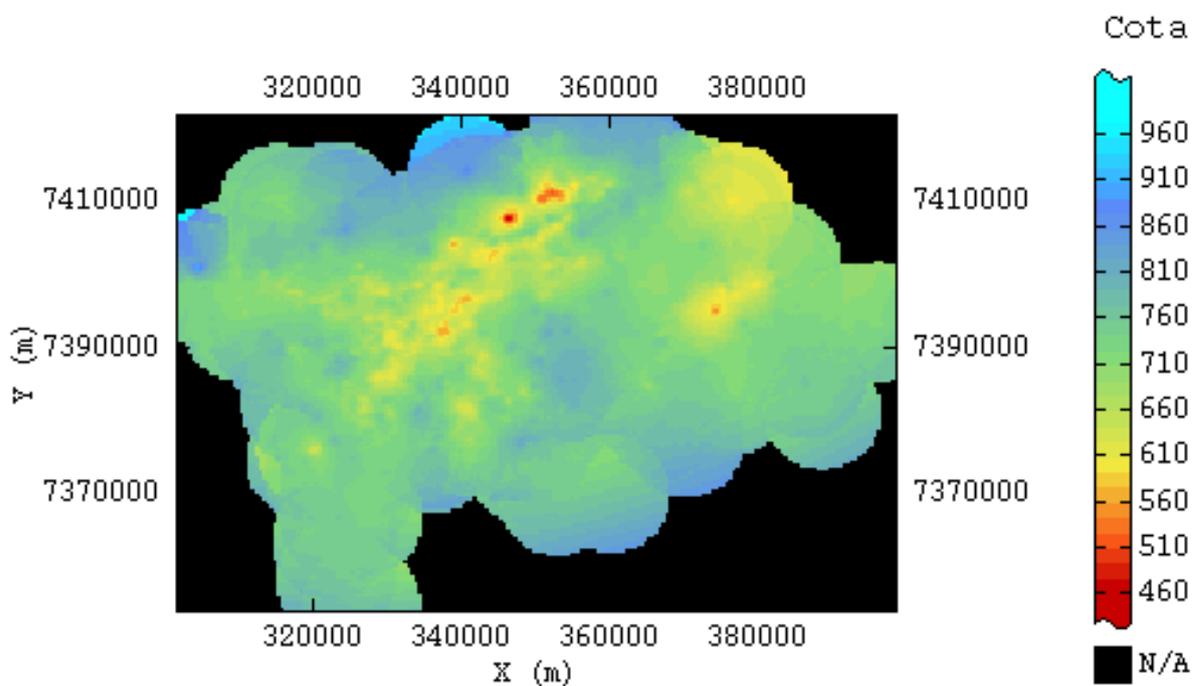


Figura 24 – Resultado do topo rochoso estimado.

5.1.2 Krigagem Ordinária dos Dados Divididos em Seis Domínios

Os dados dos 2.390 poços foram divididos em seis domínios (Figura 26) para uma melhor análise. A divisão dos domínios foi realizada seguindo as principais falhas do embasamento da Bacia de São Paulo, apresentadas em Takiya *et al.* (1989), e a separação de domínios realizada por Takiya (1990) (Figura 25).

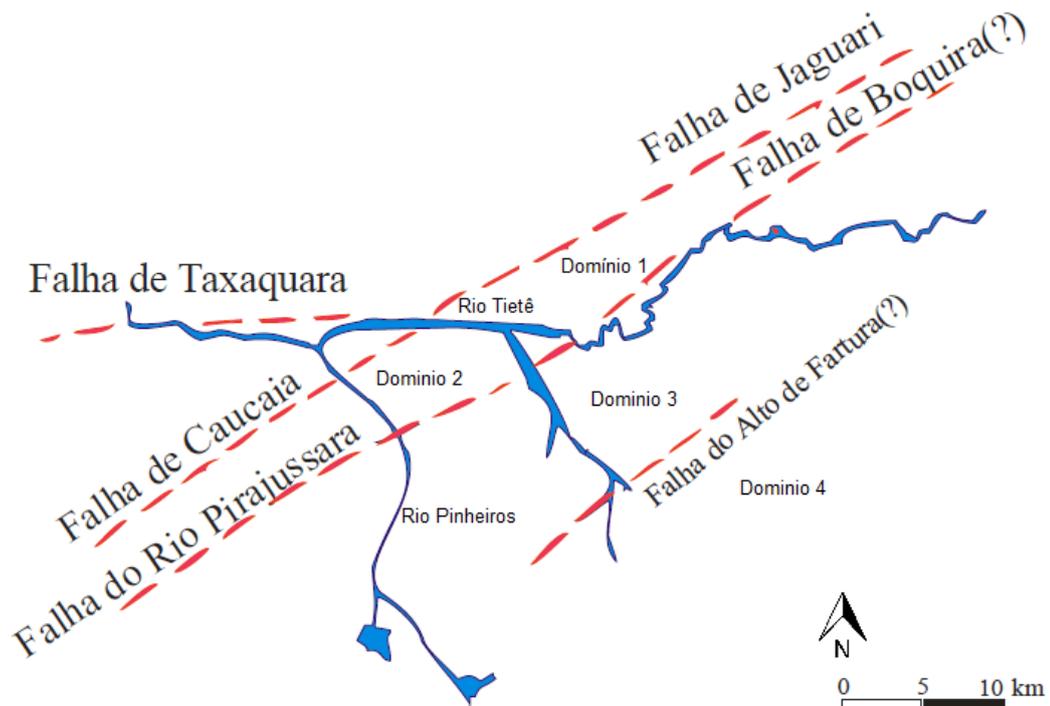


Figura 25 – Principais falhas do embasamento da Bacia de São Paulo (Takiya *et al.* 1989) e a separação de domínios adotada por Takiya (1990).

O primeiro domínio é representado pelas amostras ao norte das falhas do Jaguari e de Taxaquara; o segundo domínio pelas amostras entre as falhas de Taxaquara e de Caucaia; o terceiro domínio pelas amostras entre as falhas de Caucaia e do Rio Pirajussara e a esquerda do Rio Tietê; o quarto domínio pelas amostras entre as falhas do Jaguari e do Buquira e a direita do Rio Tietê; o quinto domínio pelas amostras entre as falhas do Buquira e Alto da Fatura; o sexto domínio pelas amostras entre as falhas Alto da Fatura e de Cubatão.

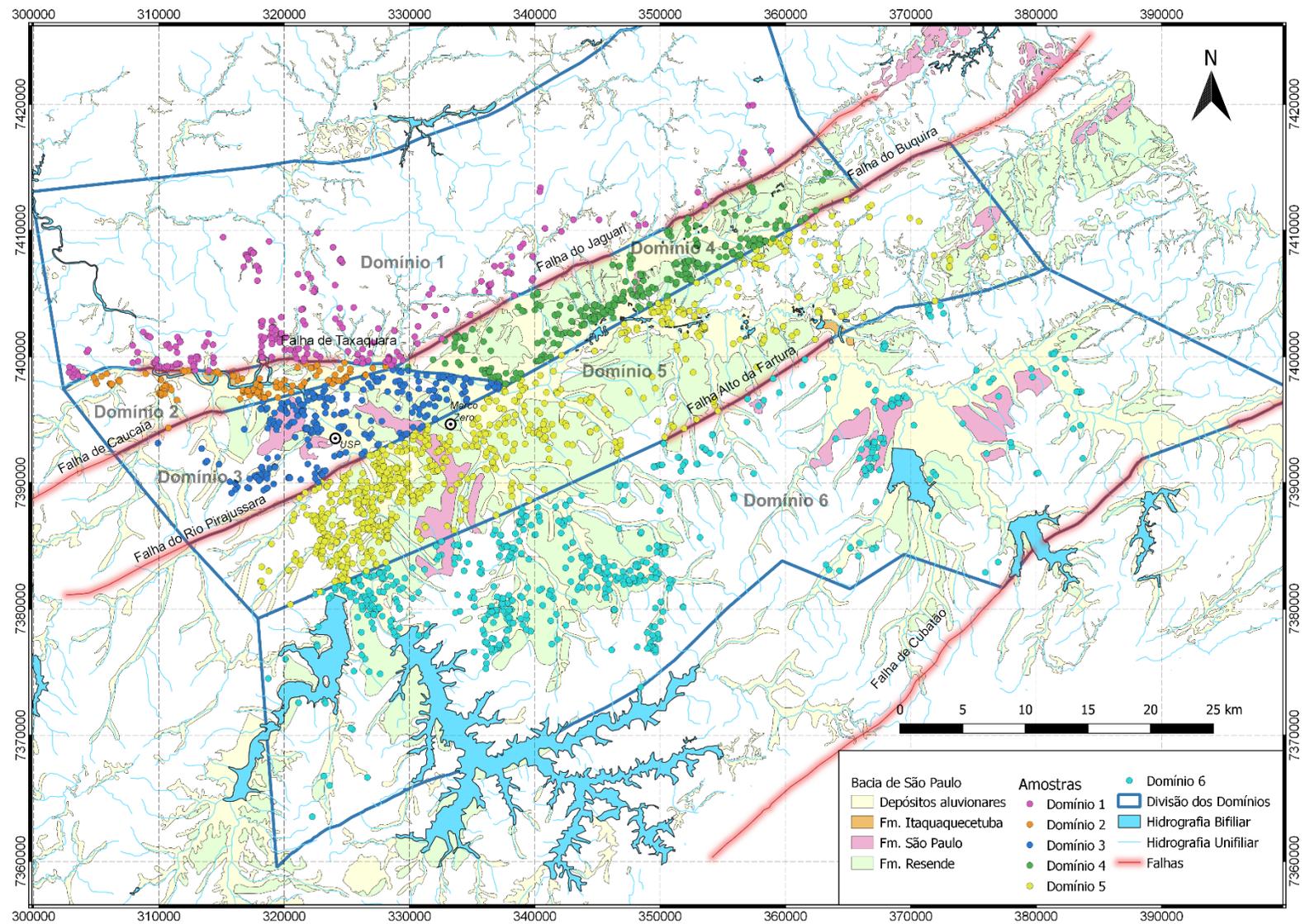


Figura 26 – Mapa geológico simplificado da Bacia de São Paulo (CPRM, 2006), com a divisão dos domínios de acordo com as principais falhas do embasamento da bacia.

Estão apresentados nas Figuras 27 a 32 os histogramas calculados para cada um dos domínios e, abaixo encontram-se as análises de cada um deles:

- Domínio 1: 227 amostras de cota do topo rochoso (z_1);
assimetria positiva da variável z_1 ;
cotas que variam entre 643 e 954 metros;
média de 744,11 metros;
desvio padrão de 41,02.
- Domínio 2: 114 amostras de cota do topo rochoso (z_2);
assimetria negativa da variável z_2 ;
cotas que variam entre 612 e 764 metros;
média de 699,31 metros;
desvio padrão de 27,78.
- Domínio 3: 292 amostras de cota do topo rochoso (z_3);
assimetria levemente negativa da variável z_3 ;
cotas que variam entre 546 e 802 metros;
média de 695,49 metros;
desvio padrão de 43,34.
- Domínio 4: 328 amostras de cota do topo rochoso (z_4);
assimetria negativa da variável z_4 ;
cotas que variam entre 412 e 819 metros;
média de 667,74 metros;
desvio padrão de 68,75.
- Domínio 5: 798 amostras de cota do topo rochoso (z_5);
assimetria negativa da variável z_5 ;
cotas que variam entre 500 e 843 metros;
média de 692,95 metros;
desvio padrão de 55,07.
- Domínio 6: 621 amostras de cota do topo rochoso (z_6);
assimetria negativa da variável z_6 ;
cotas que variam entre 525 e 851 metros;
média de 722,33 metros;
desvio padrão de 44,59.

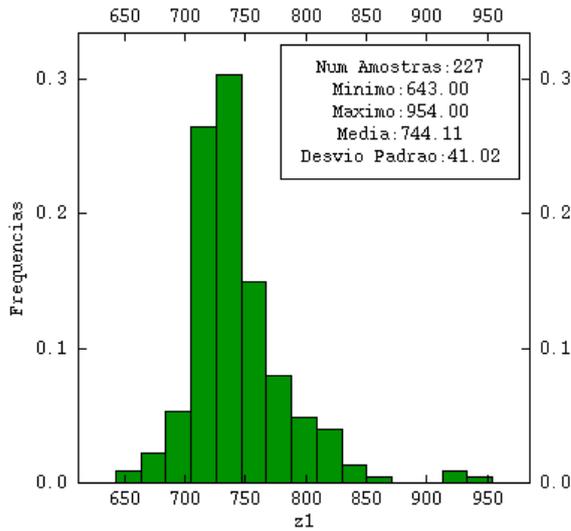


Figura 27 – Histograma do domínio 1.

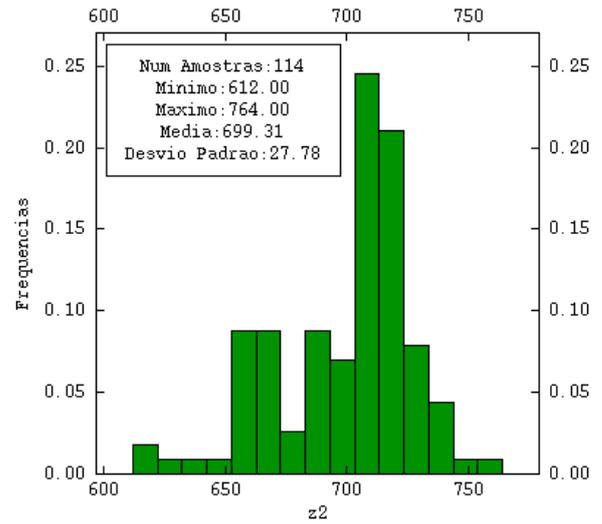


Figura 28 – Histograma do domínio 2.

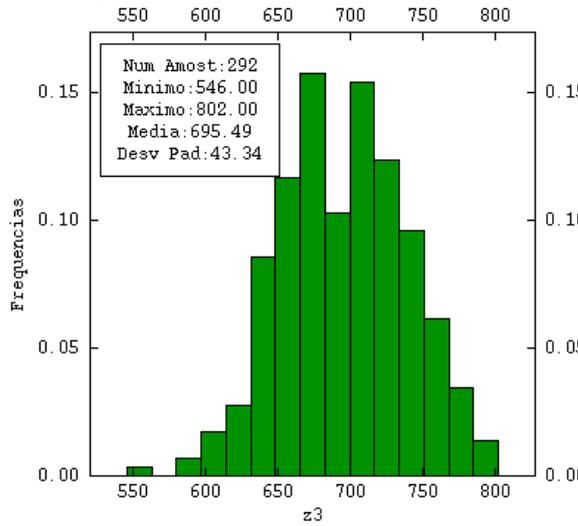


Figura 29 – Histograma do domínio 3.

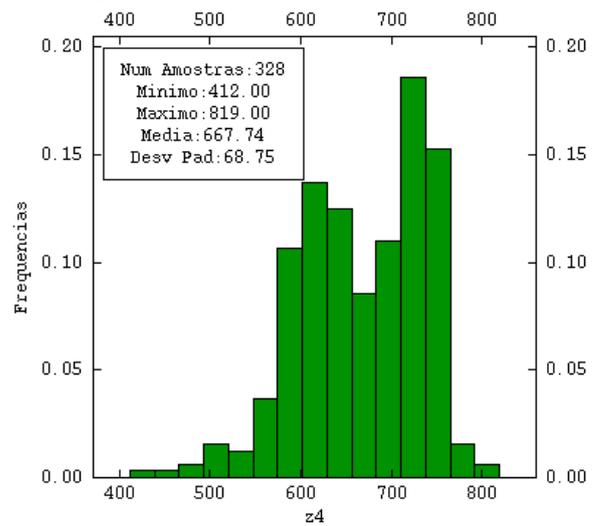


Figura 30 – Histograma do domínio 4.

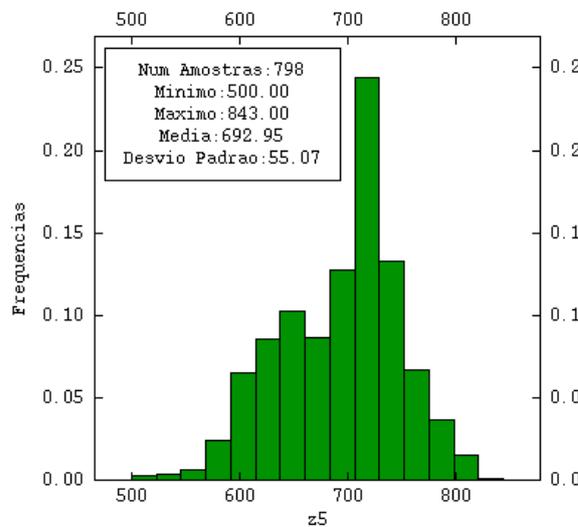


Figura 31 – Histograma do domínio 5.

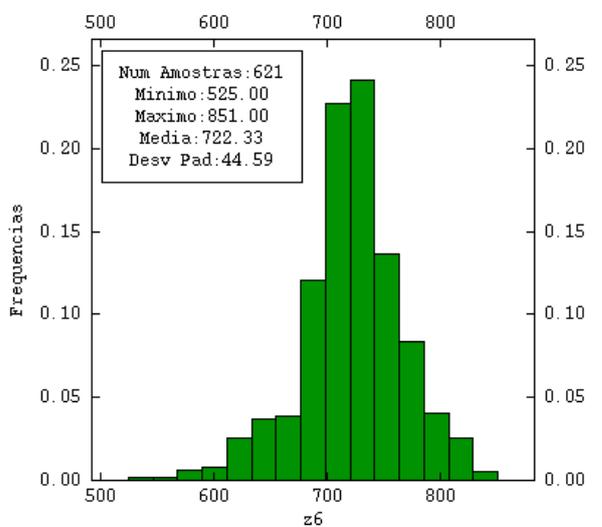


Figura 32 – Histograma do domínio 6.

A Figura 26 foi utilizada para o cálculo do campo geométrico para cada domínio para quatro direções durante a análise exploratória. As distâncias utilizadas foram:

- Domínio 1: 2.000 metros para as direções 0° e 45°, 3.500 metros para a direção 90° e 4.000 metros para a direção 135°;
- Domínio 2: 1.000 metros para as direções 0° e 45°, 5.000 metros para a direção 90° e 1.500 metros para a direção 135°;
- Domínio 3: 2.500 metros para as direções 20° e 155° e 3.500 metros para as direções 65° e 110°;
- Domínio 4: 3.000 metros para a direção 15°, 11.000 metros para a direção 60°, 6.500 metros para a direção 105° e 2.500 metros para a direção 150°;
- Domínio 5: 2.500 metros para as direções 15° e 150°, 7.500 metros para a direção 60° e 5.000 metros para a direção 105°;
- Domínio 6: 5.600 metros para a direção 20°, 11.900 metros para a direção 65° e 7.000 metros para as direções 110° e 155°.

As Figuras 33 a 38 apresentam os variogramas experimentais calculados para cada domínio e as Tabelas 6 a 11 apresentam os parâmetros utilizados para o cálculo de cada variograma.

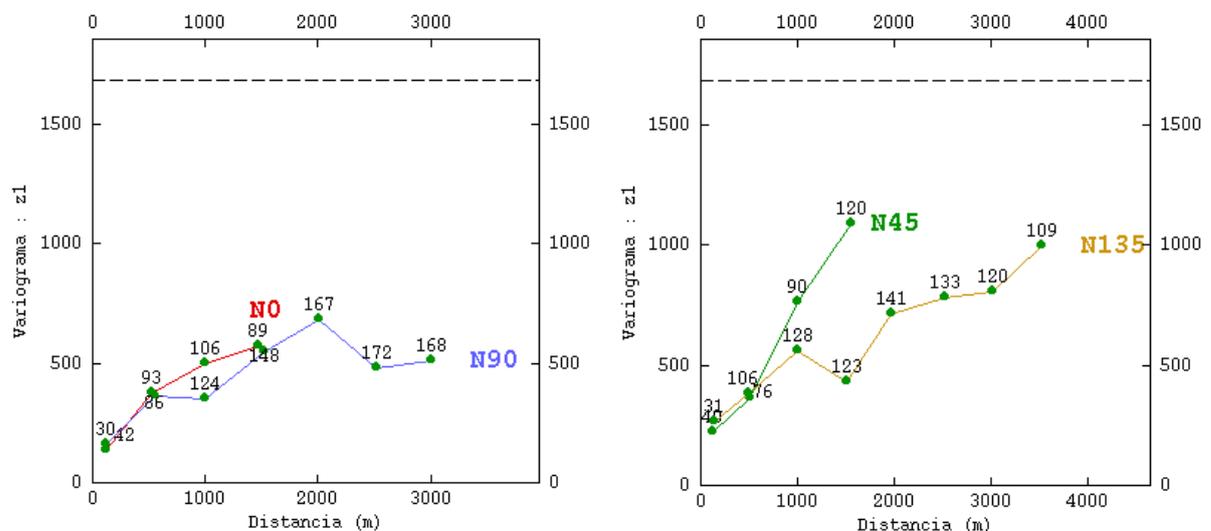


Figura 33 – Variograma experimental domínio 1.

Tabela 6 – Parâmetros utilizados para o cálculo do variograma experimental do domínio 1.

Direção	Campo Geométrico (m)	Comprimento de Passo (m)	Número de Passos
0°	2.000	500	4
45°	2.000	500	4
90°	3.500	500	7
135°	4.000	500	8

Domínio 1: Observando as direções apresentadas na Figura 33, nota-se anisotropia mista. A anisotropia aparece mais bem demarcada no par 45° e 135°. Por esse motivo e pela observação da estrutura da bacia nesse domínio (Falha do Jaguarí) foi escolhido o par 45° e 135° para ajuste do modelo teórico de variograma.

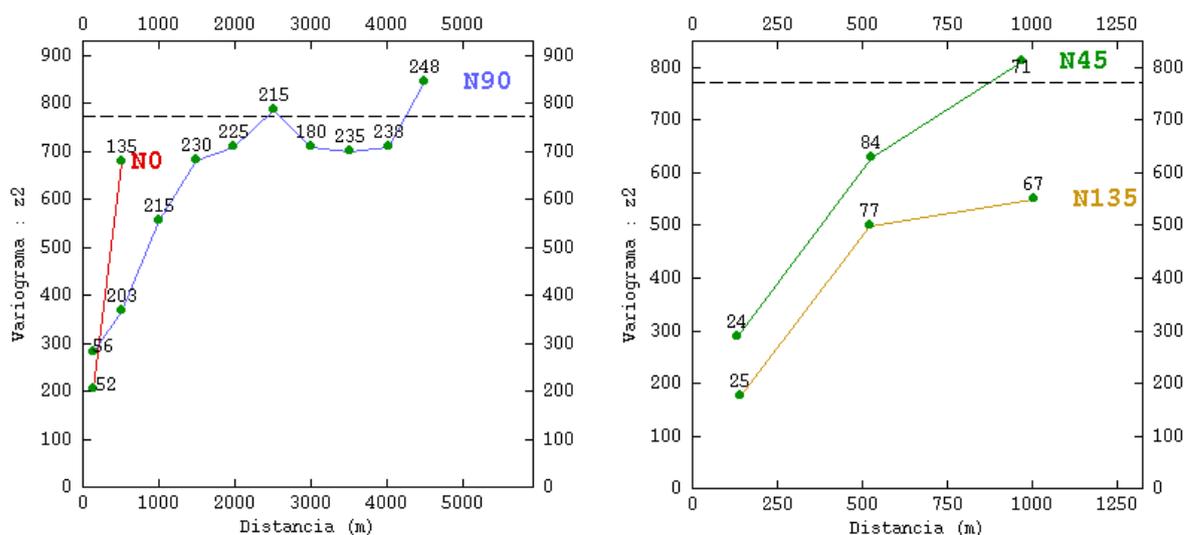


Figura 34 – Variograma experimental domínio 2.

Tabela 7 – Parâmetros utilizados para o cálculo do variograma experimental do domínio 2.

Direção	Campo Geométrico (m)	Comprimento de Passo (m)	Número de Passos
0°	1.000	500	2
45°	1.500	500	3
90°	5.000	500	10
135°	1.500	500	3

Domínio 2: Observando as direções apresentadas na Figura 34, interpreta-se a presença de anisotropia geométrica. A anisotropia aparece mais bem demarcada no par 0° e 90°. Por esse motivo e pela observação da estrutura da bacia nesse domínio (Falha de Taxaquara) foi escolhido o par 0° e 90° para ajuste do modelo teórico de variograma.

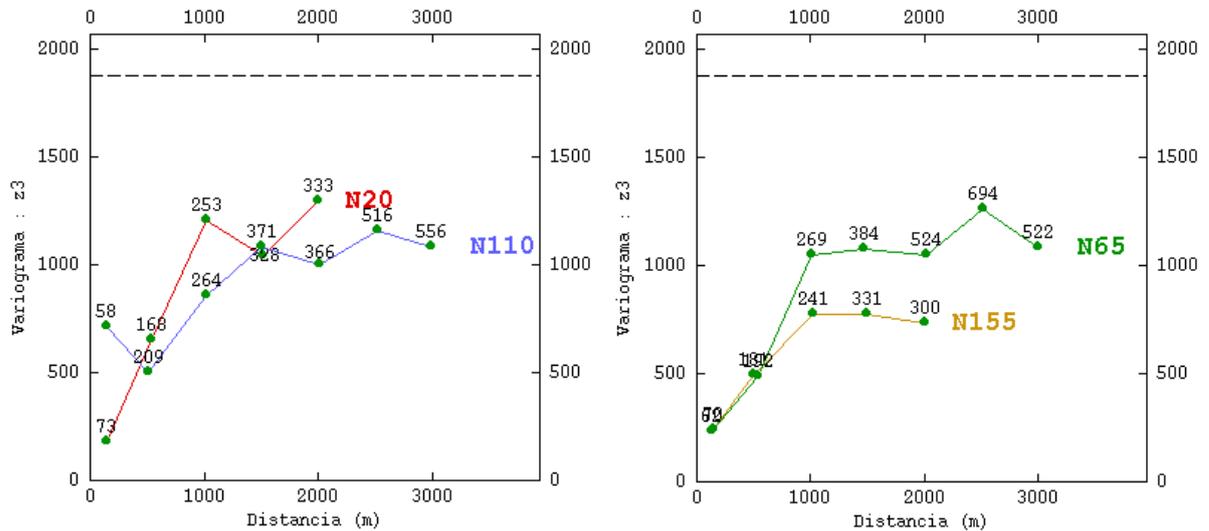


Figura 35 – Variograma experimental domínio 3.

Tabela 8 – Parâmetros utilizados para o cálculo do variograma experimental do domínio 3.

Direção	Campo Geométrico (m)	Comprimento de Passo (m)	Número de Passos
20°	2.500	500	5
65°	3.500	500	7
110°	3.500	500	7
155°	2.500	500	5

Domínio 3: Observando as direções apresentadas na Figura 35, interpreta-se a anisotropia como anisotropia mista. A anisotropia aparece mais bem demarcada no par 65° e 155°. Por esse motivo foi escolhido o par 65° e 155° para ajuste do modelo teórico de variograma.

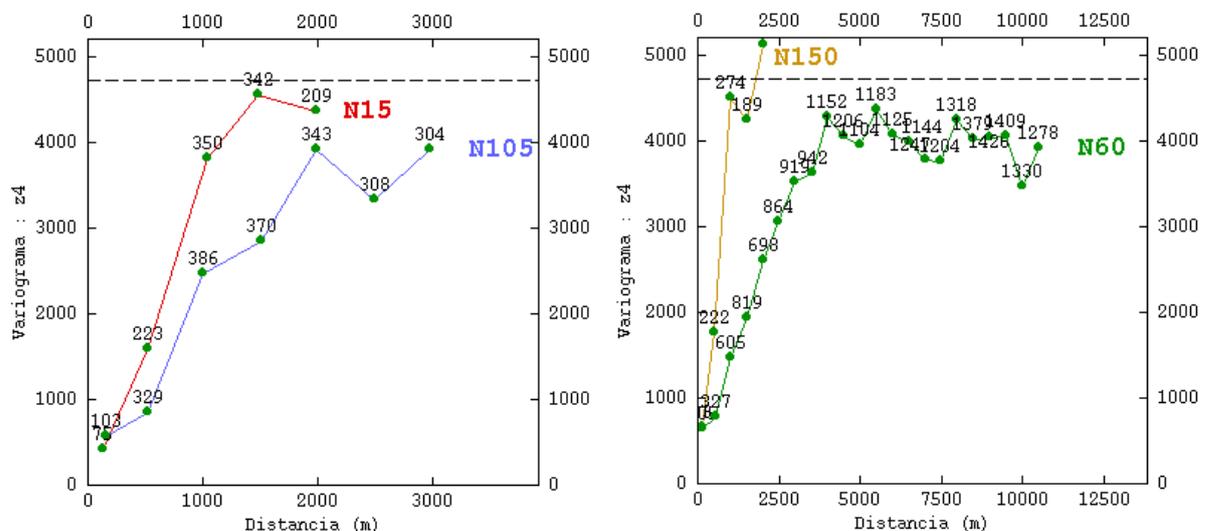


Figura 36 – Variograma experimental domínio 4.

Tabela 9 – Parâmetros utilizados para o cálculo do variograma experimental do domínio 4.

Direção	Campo Geométrico (m)	Comprimento de Passo (m)	Número de Passos
15°	2.500	500	5
60°	11.000	500	22
105°	3.500	500	7
150°	2.500	500	5

Domínio 4: Observando as direções apresentadas na Figura 36, nota-se anisotropia geométrica. A anisotropia aparece mais bem demarcada no par 60° e 150°. Por esse motivo foi escolhido o par 60° e 150° para ajuste do modelo teórico de variograma.

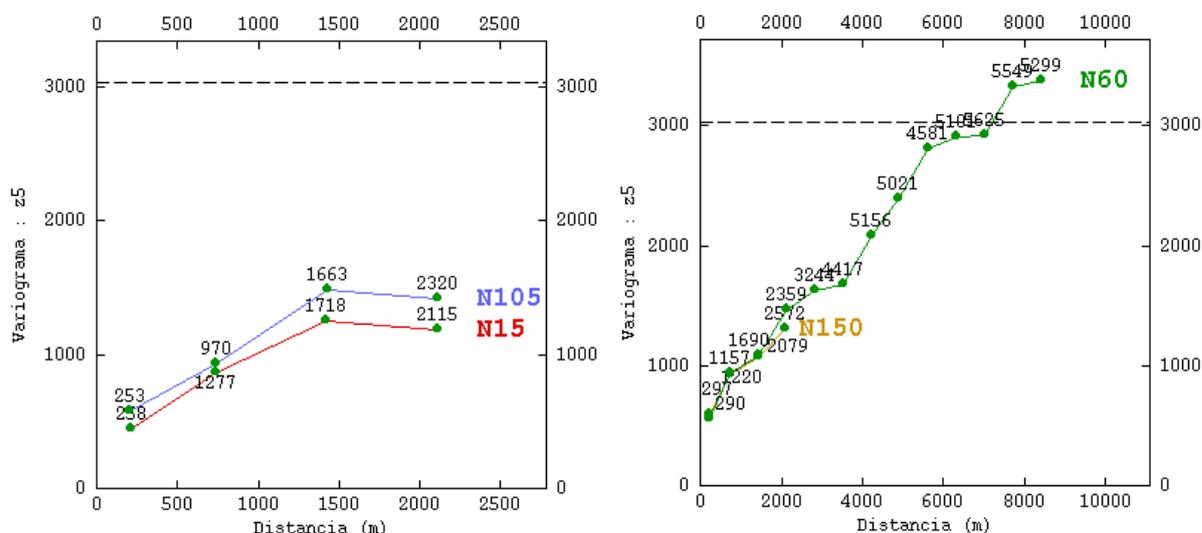


Figura 37 – Variograma experimental domínio 5.

Tabela 10 – Parâmetros utilizados para o cálculo do variograma experimental do domínio 5.

Direção	Campo Geométrico (m)	Comprimento de Passo (m)	Número de Passos
15°	2.800	700	4
60°	9.100	700	13
105°	2.800	700	4
150°	2.800	700	4

Domínio 5: Observando as direções apresentadas na Figura 37, interpreta-se anisotropia mista. A anisotropia aparece mais bem demarcada no par 60° e 150°. Por esse motivo foi escolhido o par 60° e 150° para ajuste do modelo teórico de variograma.

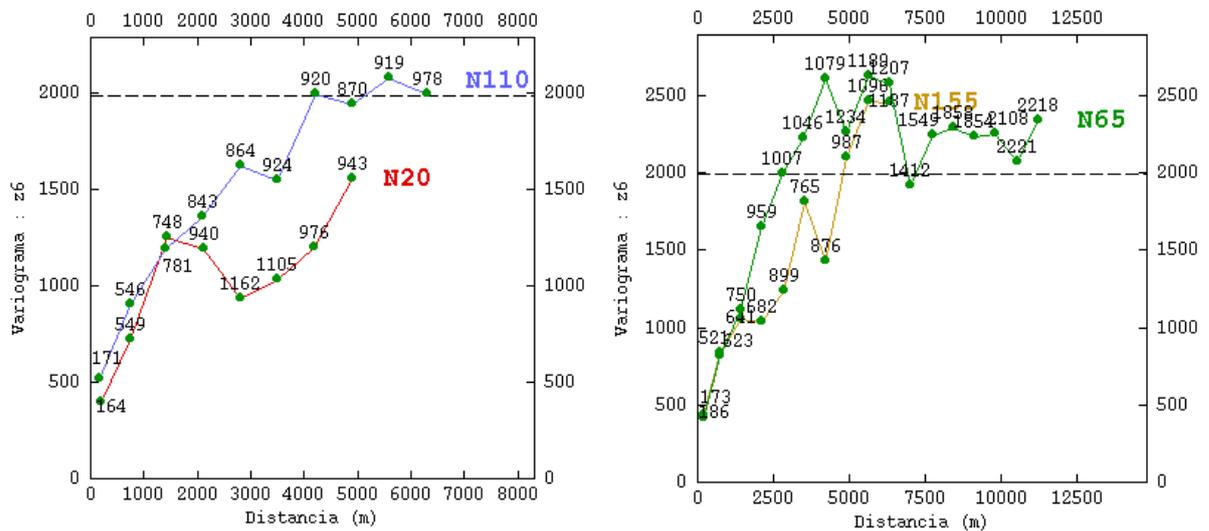


Figura 38 – Variograma experimental domínio 6.

Tabela 11 – Parâmetros utilizados para o cálculo do variograma experimental do domínio 6.

Direção	Campo Geométrico (m)	Comprimento de Passo (m)	Número de Passos
20°	5.600	700	8
65°	11.900	700	17
110°	7.000	700	10
155°	7.000	700	10

Domínio 6: a Figura 38, interpreta-se anisotropia mista. A anisotropia aparece mais bem demarcada no par 65° e 155°. Por esse motivo, pela estrutura da bacia e pelo variograma na direção N65 ser mais bem estruturado, foi escolhido o par 65° e 155° para ajuste do modelo teórico de variograma.

As Figuras 39 a 44 apresentam os variogramas experimentais e respectivos modelos teóricos de variograma ajustados para cada domínio e as Tabelas 12 a 17 apresentam os parâmetros utilizados para cada ajuste.

Domínio 1: O modelo de variograma foi ajustado com três estruturas, sendo: C0 (efeito pepita igual a 50), C1 (modelo exponencial rotacionado em 135° com amplitude de 3.000 m na direção 135° e de 1.500 m na direção 45° e patamar em 840) e C2 (modelo exponencial rotacionado em 135°, amplitude infinita na direção 135° e de 1.500 m na direção 45° e patamar em 80). As estruturas C1 e C2 foram rotacionadas na direção de 135° pois esta é a direção mais contínua, com maior amplitude.

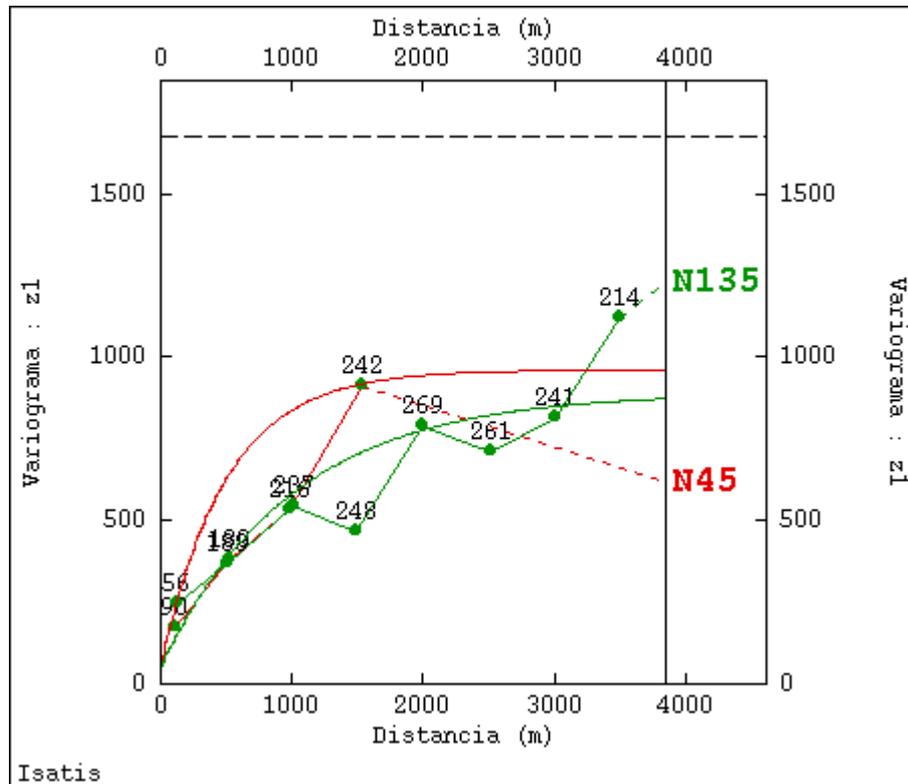


Figura 39 – Modelo de variograma do domínio 1.

Tabela 12 – Parâmetros utilizados para o ajuste do modelo teórico de variograma do domínio 1.
Modelo de variograma para o domínio 1 da variável cota do topo rochoso

C0	50
Tipo	Exponencial
Estrutura	1
C	840
a_{max}	3.000
a_{min}	1.500
Rotação	N135

Domínio 2: O modelo de variograma foi ajustado com duas estruturas, sendo: C0 (efeito pepita igual a 110) e C1 (modelo gaussiano rotacionado em 90° com amplitude de 1.350 m na direção 90° e de 500 m na direção 0° e patamar em 590). A estrutura C1 foi rotacionada na direção de 90° pois esta é a direção mais contínua, com maior amplitude e mais bem estruturada.

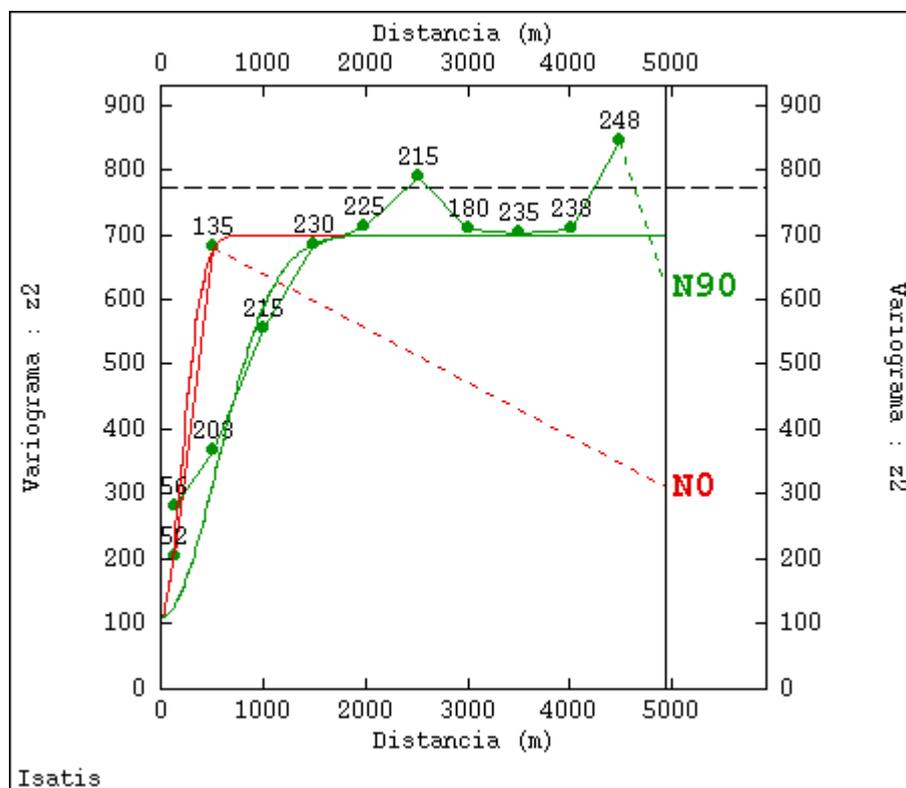


Figura 40 – Modelo de variograma do domínio 2.

Tabela 13 – Parâmetros utilizados para o ajuste do modelo teórico de variograma do domínio 2.

Modelo de variograma para o domínio 2 da variável cota do topo rochoso

Efeito Pepita	110
Tipo	Gaussiana
Estrutura	1
Patamar	590
Eixo Maior	1.350
Eixo Menor	500
Rotação	N90

Domínio 3: O modelo de variograma foi ajustado com quatro estruturas, sendo: C0 (efeito pepita igual a 100), C1 (modelo esférico rotacionado em 65° com amplitude de 1.200 m na direção 65° e de 150 m na direção 155° e patamar em 300), C2 (modelo esférico rotacionado em 65°, amplitude de 1.200 m na direção 65° e de 1.400 m na direção 155° e patamar em 500) e C3 (modelo esférico rotacionado em 65°, amplitude de 2.500 na direção 65° e infinita na direção 155° e patamar em 260). As estruturas C1, C2 e C3 foram rotacionadas na direção de 65° pois esta é a direção mais contínua, mais bem estruturada e com maior amplitude.

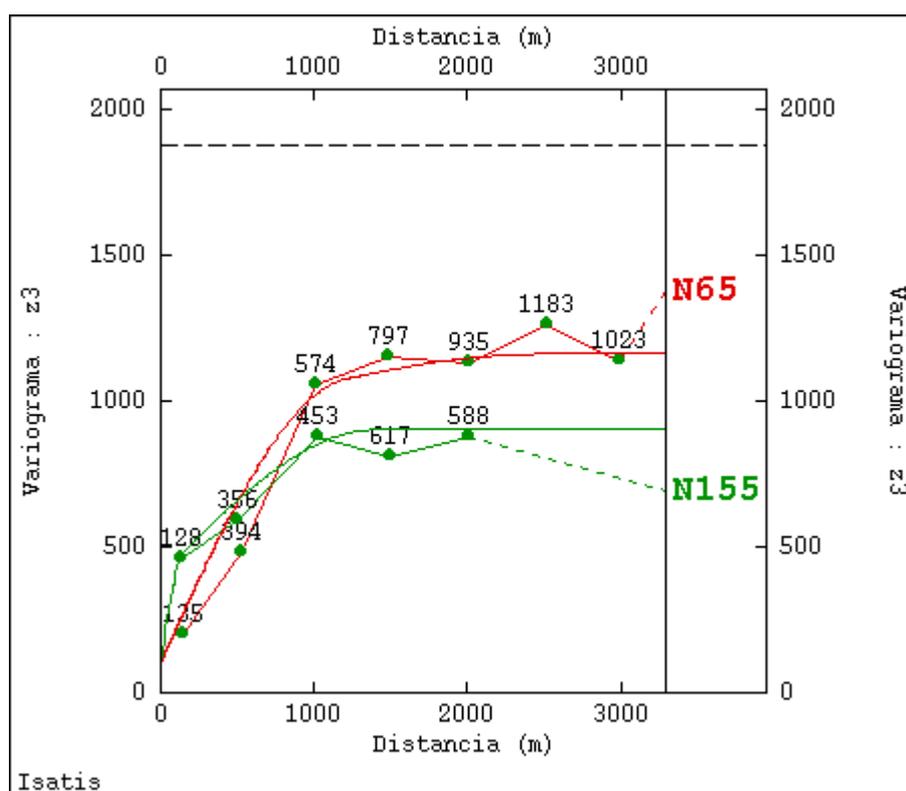


Figura 41 – Modelo de variograma do domínio 3.

Tabela 14 – Parâmetros utilizados para o ajuste do modelo teórico de variograma do domínio 3.

Modelo de variograma para o domínio 3 da variável cota do topo rochoso

	100		
C0			
Tipo		Esférico	
Estrutura	1	2	3
C	300	500	260
a _{max}	1.200	1.200	2.500
a _{min}	150	1.400	∞
Rotação	N65	N65	N65

Domínio 4: O modelo de variograma foi ajustado com três estruturas, sendo: C0 (efeito pepita igual a 100), C1 (modelo esférico rotacionado em 60° com amplitude de 4.200 m na direção 60° e de 2.000 m na direção 150° e patamar em 3.940) e C2 (modelo exponencial rotacionado em 60°, amplitude de 7.500 m na direção 60° e de 2.000 m na direção 150° e patamar em 640). As estruturas C1 e C2 foram rotacionadas na direção de 60° pois esta é a direção mais contínua, com maior amplitude e mais bem estruturada.

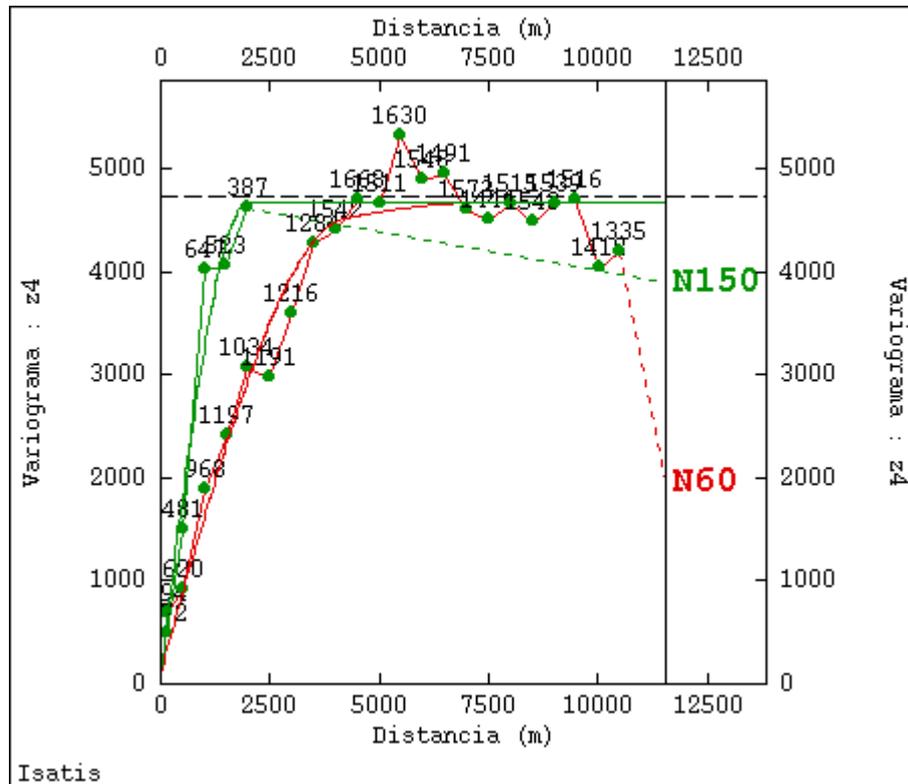


Figura 42 – Modelo de variograma do domínio 4.

Tabela 15 – Parâmetros utilizados para o ajuste do modelo teórico de variograma do domínio 4.
Modelo de variograma para o domínio 4 da variável cota do topo rochoso

C0	100
Tipo	Esférica
Estrutura	1
C	3.940
a _{max}	4.200
a _{min}	2.000
Rotação	N60

Domínio 5: O modelo de variograma foi ajustado com 3 estruturas, sendo: C0 (efeito pepita igual a 400), C1 (modelo esférico rotacionado em 60° com amplitude de 8.100 m na direção 60° e de 1.850 m na direção 150° e patamar em 900) e C2 (modelo esférico rotacionado em 60°, amplitude de 8.100 m na direção 60° e infinita na direção 150° e patamar em 1,700). As estruturas C1 e C2 foram rotacionadas na direção de 60° pois esta é a direção mais contínua, com maior amplitude e mais bem estruturada.

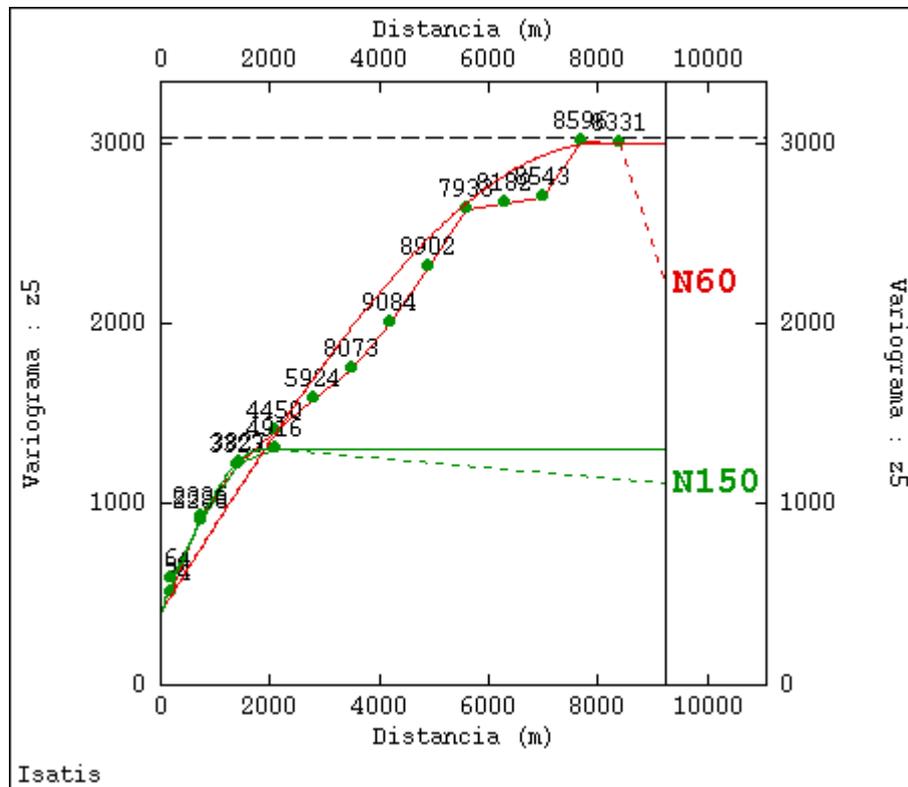


Figura 43 – Modelo de variograma do domínio 5.

Tabela 16 – Parâmetros utilizados para o ajuste do modelo teórico de variograma do domínio 5.

Modelo de variograma para o domínio 5 da variável cota do topo rochoso

	400	
C0	400	
Tipo	Esférico	
Estrutura	1	2
C	900	1.700
a _{max}	8.100	8.100
a _{min}	1.850	∞
Rotação	N60	N60

Domínio 6: O modelo de variograma foi ajustado com quatro estruturas, sendo: C0 (efeito pepita igual a 200), C1 (modelo esférico rotacionado em 65° com amplitude de 2.250 m na direção 65° e de 6.500 m na direção 155° e patamar em 950), C2 (modelo esférico rotacionado em 65°, amplitude de 10.000 m na direção 65° e de 6.500 m na direção 155° e patamar em 870) e C3 (modelo esférico rotacionado em 65°, amplitude de 10.500 m na direção 65° e infinita na direção 155° e patamar em 315). As estruturas C1, C2 e C3 foram rotacionadas na direção de 65° pois esta é a direção mais contínua, com maior amplitude e mais bem estruturada.

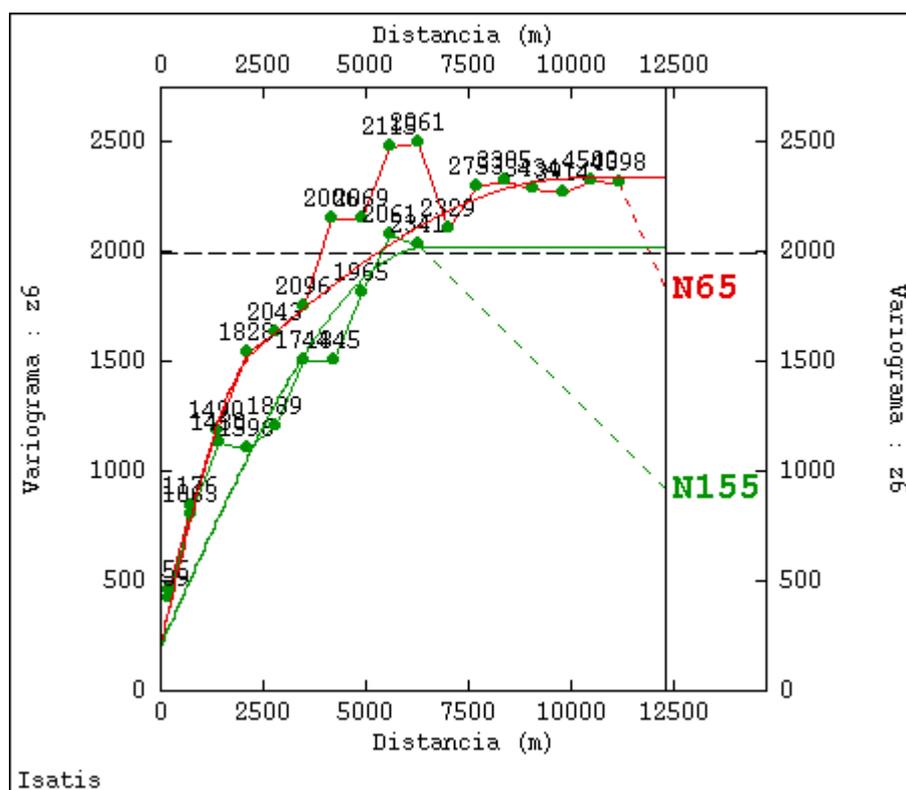


Figura 44 – Modelo de variograma do domínio 6.

Tabela 17 – Parâmetros utilizados para o ajuste do modelo teórico de variograma do domínio 6.

Modelo de variograma para o domínio 6 da variável cota do topo rochoso

	1	2	3
C0		200	
Tipo		Esférico	
Estrutura	1	2	3
C	950	870	315
a _{max}	2.250	10.000	10.500
a _{min}	6.500	6.500	∞
Rotação	N65	N65	N65

Após os ajustes dos modelos teóricos de variograma, foram realizadas validações cruzadas para cada domínio, para a definição dos parâmetros de vizinhança a serem adotados.

As Tabelas 18 a 23 apresentam os parâmetros de vizinhança adotados para cada domínio e, as Figuras 45 a 50, os resultados de correlação da validação cruzada.

Tabela 18 – Parâmetros de vizinhança utilizado para a krigagem do domínio 1.

Parâmetros de vizinhança	
Número Mínimo de Amostras	1
Número de Setores Angulares Horizontais	4
Número Ótimo de Amostras por Setor	4
Raio de busca máximo para a direção 45°	1.500 m
Raio de busca máximo para a direção 135°	3.000 m
Número de Pontos Estimados	226

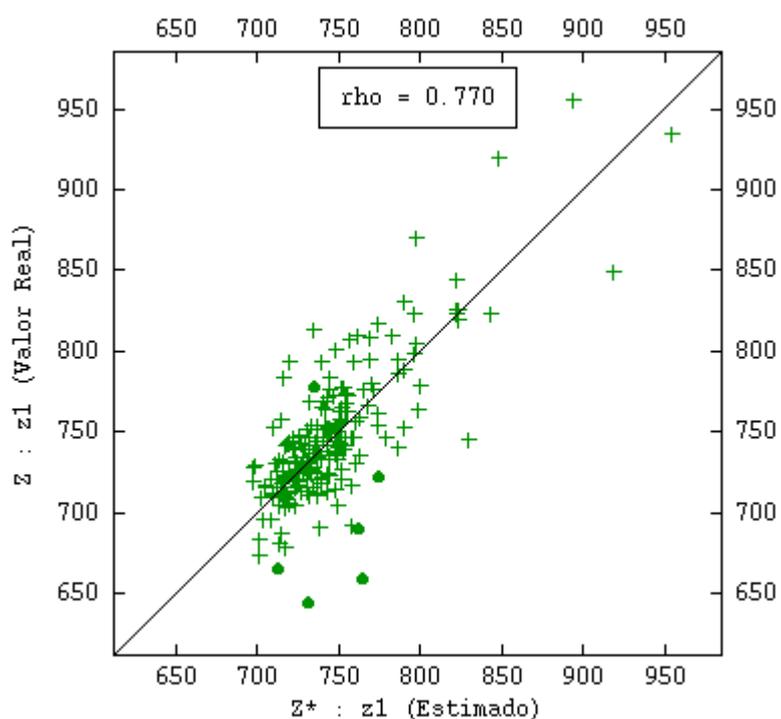


Figura 45 – Resultado da validação cruzada para o domínio 1: coeficiente de correlação igual a 0.770.

Tabela 19 – Parâmetros de vizinhança utilizado para a krigagem do domínio 2.

Parâmetros de vizinhança	
Número Mínimo de Amostras	1
Número de Setores Angulares Horizontais	4
Número Ótimo de Amostras por Setor	4
Raio de busca máximo para a direção 0°	500 m
Raio de busca máximo para a direção 90°	1.350 m
Número de Pontos Estimados	110

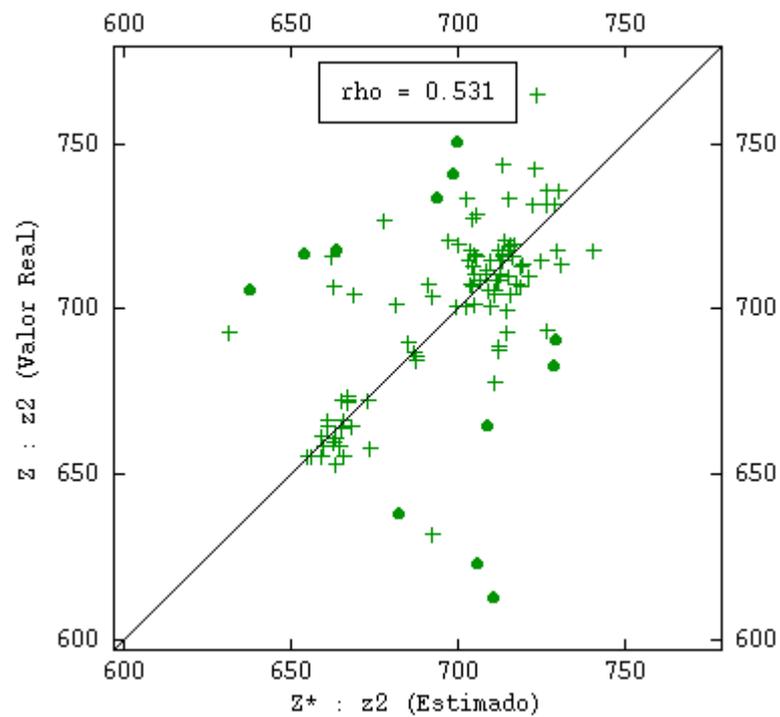


Figura 46 – Resultado da validação cruzada para o domínio 2: coeficiente de correlação igual a 0.531.

Tabela 20 – Parâmetros de vizinhança utilizado para a krigagem do domínio 3.

Parâmetros de vizinhança	
Número Mínimo de Amostras	1
Número de Setores Angulares Horizontais	4
Número Ótimo de Amostras por Setor	2
Raio de busca máximo para a direção 65°	2.500 m
Raio de busca máximo para a direção 155°	1.400 m
Número de Pontos Estimados	291

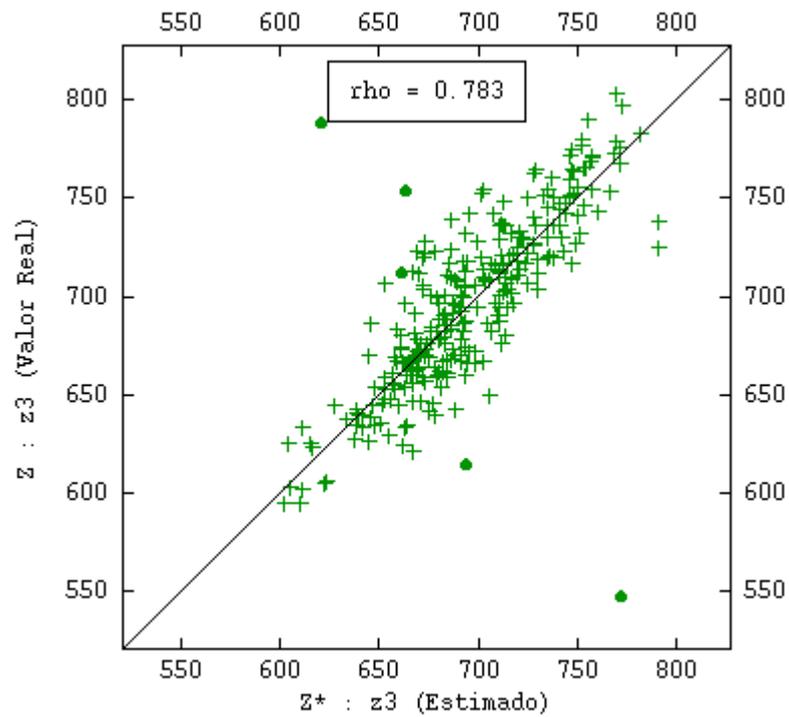


Figura 47 – Resultado da validação cruzada para o domínio 3: coeficiente de correlação igual a 0.783.

Tabela 21 – Parâmetros de vizinhança utilizado para a krigagem do domínio 4.

Parâmetros de vizinhança	
Número Mínimo de Amostras	1
Número de Setores Angulares Horizontais	8
Número Ótimo de Amostras por Setor	1
Raio de busca máximo para a direção 60°	7.500 m
Raio de busca máximo para a direção 150°	2.000 m
Número de Pontos Estimados	328

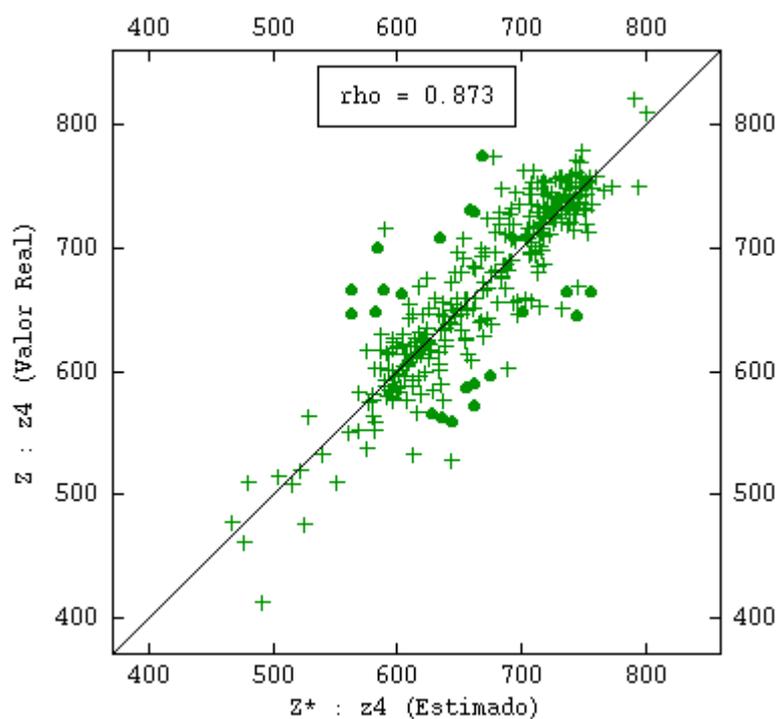


Figura 48 – Resultado da validação cruzada para o domínio 4: coeficiente de correlação igual a 0.873.

Tabela 22 – Parâmetros de vizinhança utilizado para a krigagem do domínio 5.

Parâmetros de vizinhança	
Número Mínimo de Amostras	1
Número de Setores Angulares Horizontais	4
Número Ótimo de Amostras por Setor	4
Raio de busca máximo para a direção 60°	8.100 m
Raio de busca máximo para a direção 150°	1.850 m
Número de Pontos Estimados	798

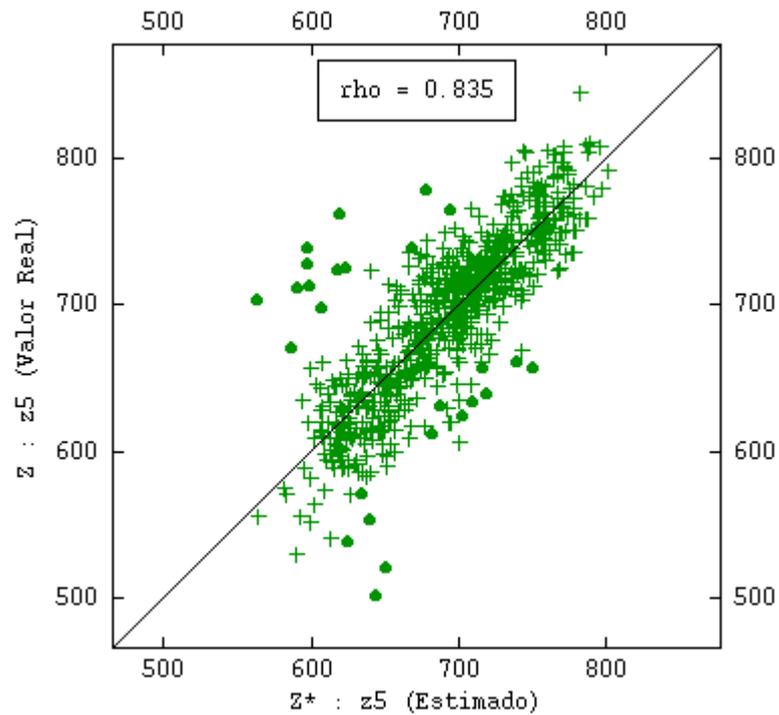


Figura 49 – Resultado da validação cruzada para o domínio 5: coeficiente de correlação igual a 0.835.

Tabela 23 – Parâmetros de vizinhança utilizado para a krigagem do domínio 6.

Parâmetros de vizinhança	
Número Mínimo de Amostras	1
Número de Setores Angulares Horizontais	4
Número Ótimo de Amostras por Setor	4
Raio de busca máximo para a direção 65°	10.500 m
Raio de busca máximo para a direção 155°	6.500 m
Número de Pontos Estimados	621

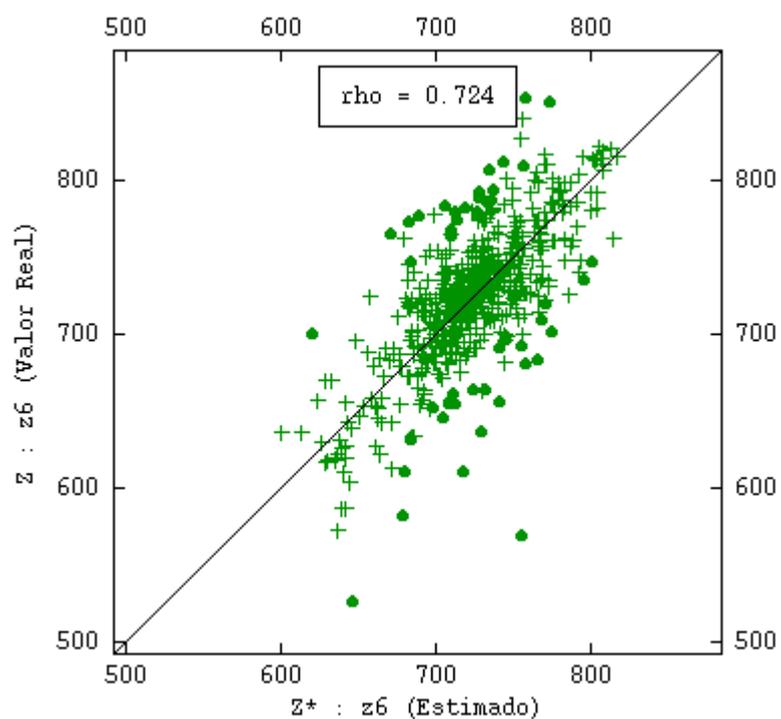


Figura 50 – Resultado da validação cruzada para o domínio 6: coeficiente de correlação igual a 0.724.

Definidos os parâmetros dos modelos teóricos de variograma e os parâmetros de vizinhança, foram realizadas krigagens ordinárias para cada domínio, cujos resultados estão representados nas Figuras 51 a 56.

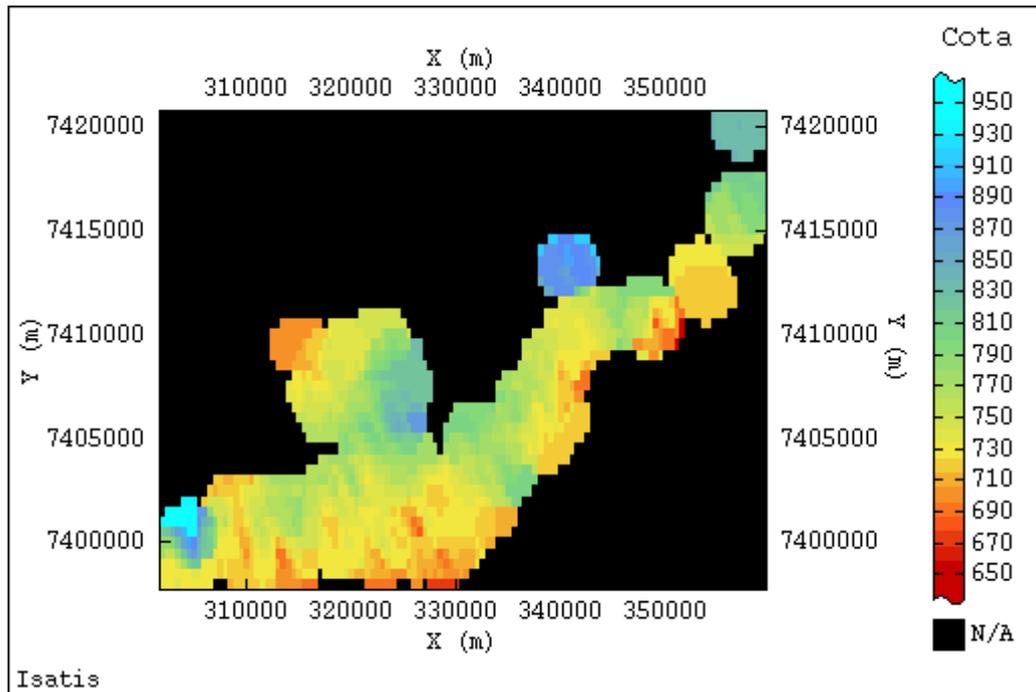


Figura 51 – Resultado da krigagem do domínio 1.

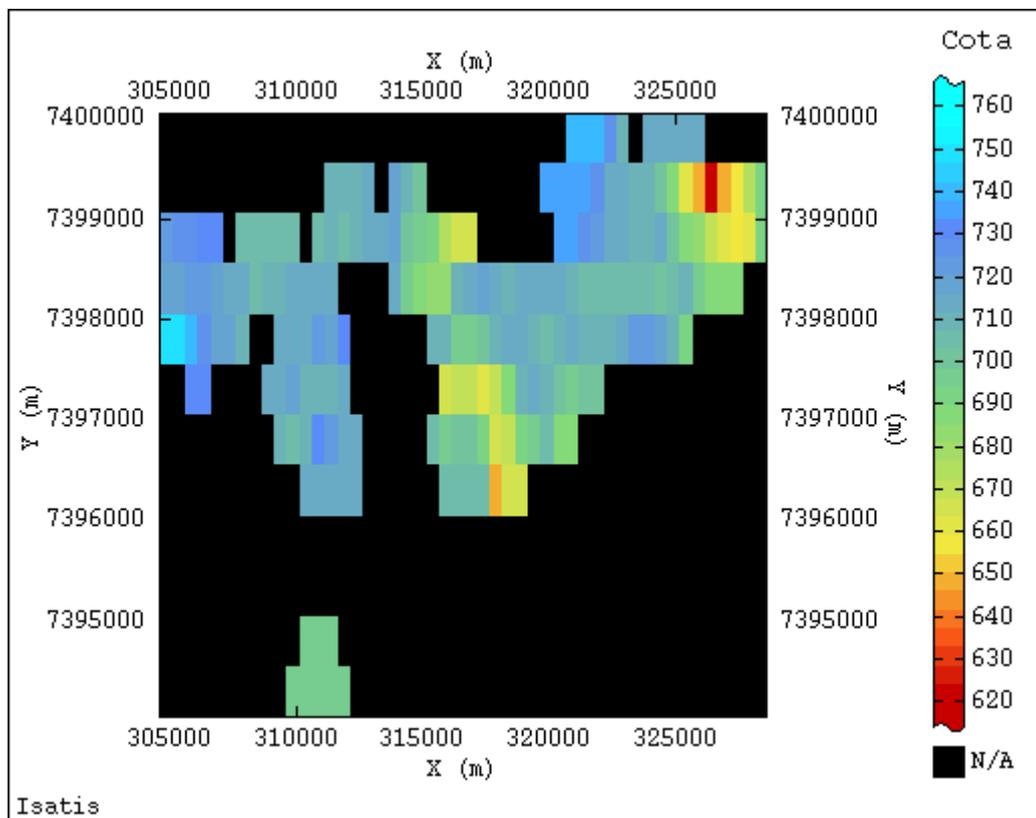


Figura 52 – Resultado da krigagem do domínio 2.

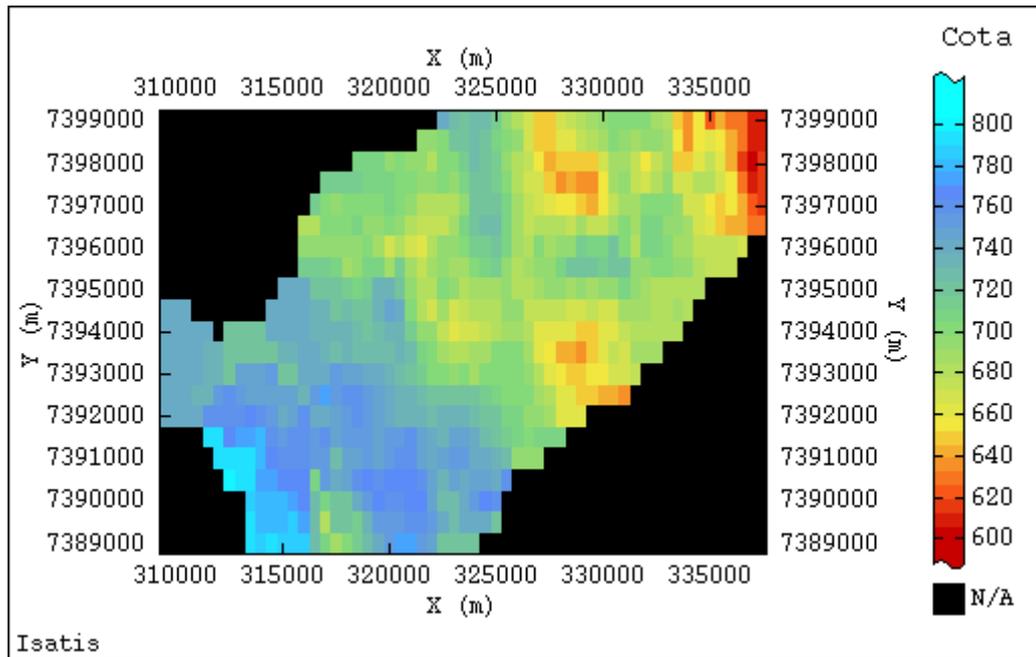


Figura 53 – Resultado da krigagem do domínio 3.

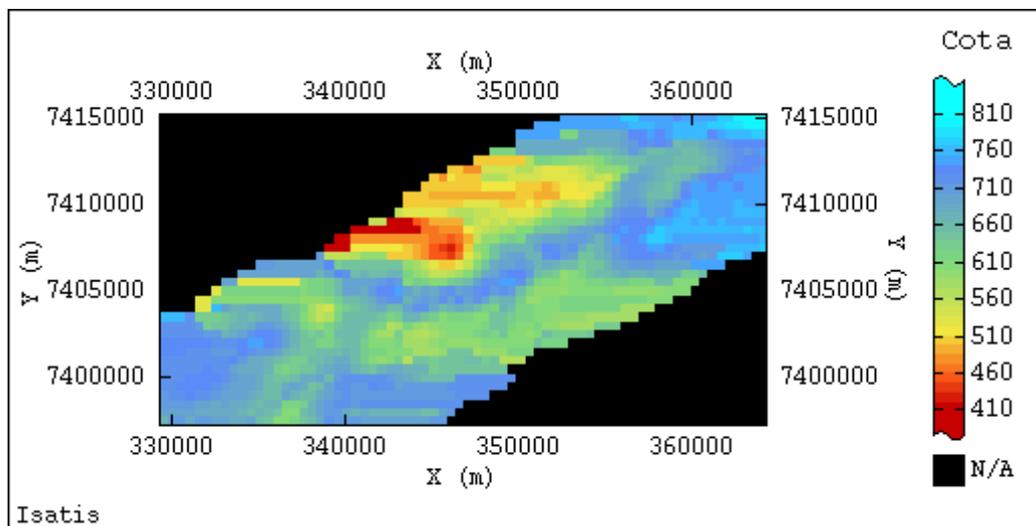


Figura 54 – Resultado da krigagem do domínio 4.

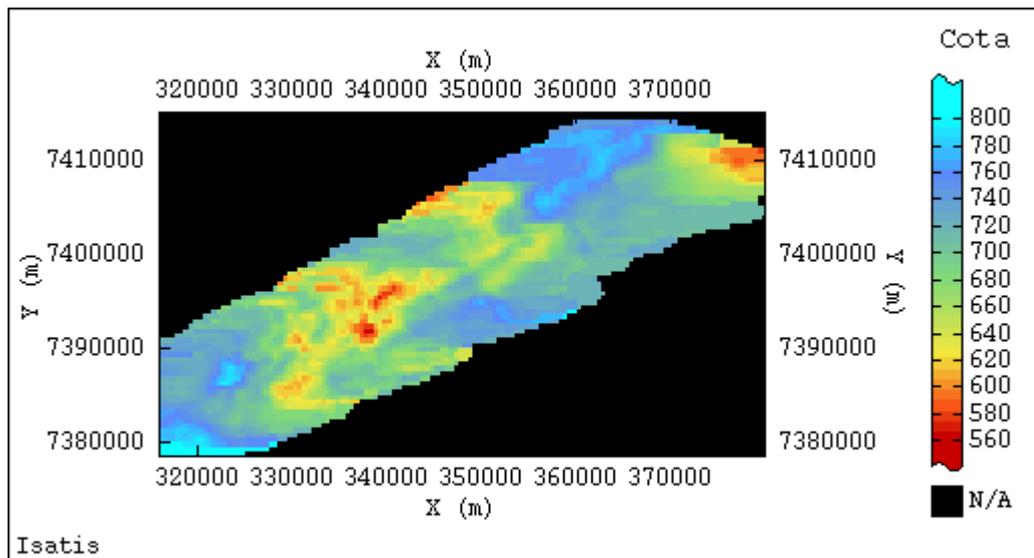


Figura 55 – Resultado da krigagem do domínio 5.

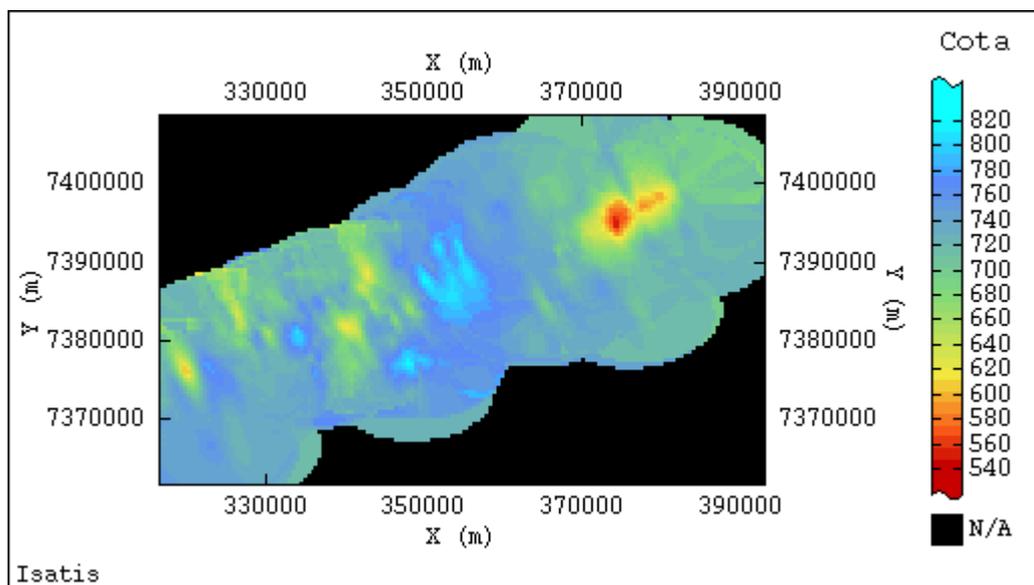


Figura 56 – Resultado da krigagem do domínio 6.

5.1.3 Comparação entre os dois métodos

Ao utilizar um único domínio, a variável cota do topo rochoso da Bacia de São Paulo não apresentou variância espacial finita, com variograma experimental não estacionário, ou seja, sem patamar definido.

Quando as amostras foram divididas em domínios, de acordo com a estrutura da bacia, em todos os domínios a variável apresentou variância espacial finita, com variogramas experimentais que apresentaram patamar definido. Foi realizado um teste ao se tentar ajustar uma superfície polinomial às amostras e calcular os resíduos destas para verificar se tais variogramas ficariam mais bem estruturados, contudo, foi

verificado que os variogramas dos resíduos eram muito semelhantes aos variogramas originais, não havendo vantagem em se utilizar a krigagem de resíduos neste caso, sendo realizada, então, a krigagem ordinária em cada domínio.

Esse comportamento da variável se dá, provavelmente, pela estrutura da Bacia de São Paulo, que é um *hemi-graben* basculado para NNW (Almeida, 1955), com blocos de rocha de diferentes cotas topográficas delimitados por falhas. Quando tais blocos são analisados como um único domínio, pode ser observada uma tendência na variável, e quando são analisados como domínios diferentes, a tendência não pode ser observada.

As Figuras 57 e 58 apresentam os resultados das estimativas por krigagem realizadas em um único domínio e nos seis domínios, e pode-se notar que o resultado em ambos os métodos foi muito semelhante.

Na krigagem em um único domínio, nota-se a presença de estruturas arredondadas nas bordas do local estimado. Tais estruturas indicam a propagação de valores em regiões com pouca ou nenhuma amostra e se formaram devido aos parâmetros de vizinhança, que possuem um raio de busca grande, adequado às amplitudes do modelo teórico de variograma.

Essas estruturas não são observadas na krigagem em seis domínios pois, como as amplitudes dos modelos teóricos de variograma destes são menores, os parâmetros de vizinhança também possuem um raio de busca menor. Esse raio de busca menor causou, contudo, a presença de algumas regiões não estimadas, que podem ser notados principalmente nos domínios 1, 2 e 3.

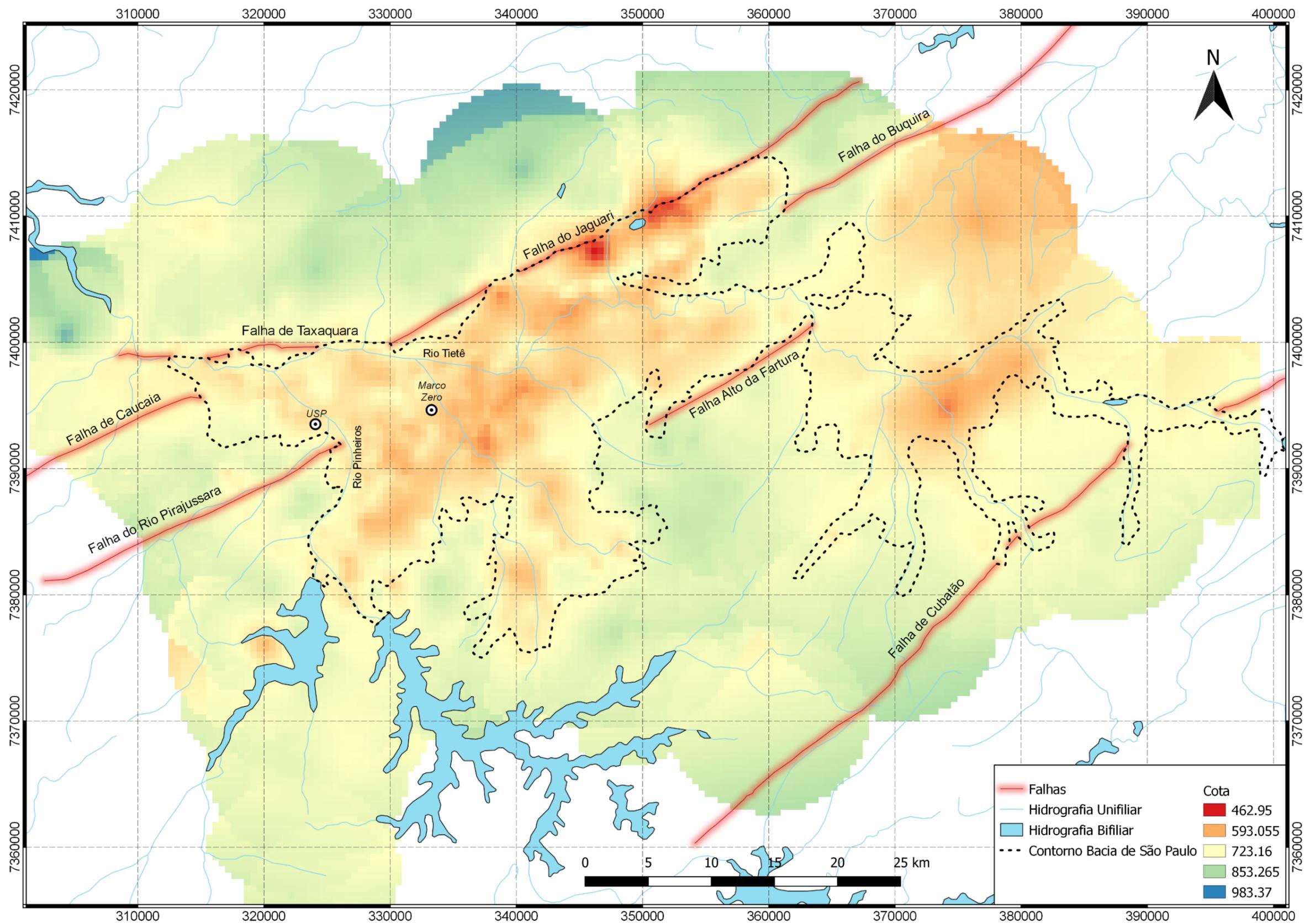


Figura 57 – Resultado da krigagem de resíduos da variável cota do topo rochoso da Bacia de São Paulo (domínio único)

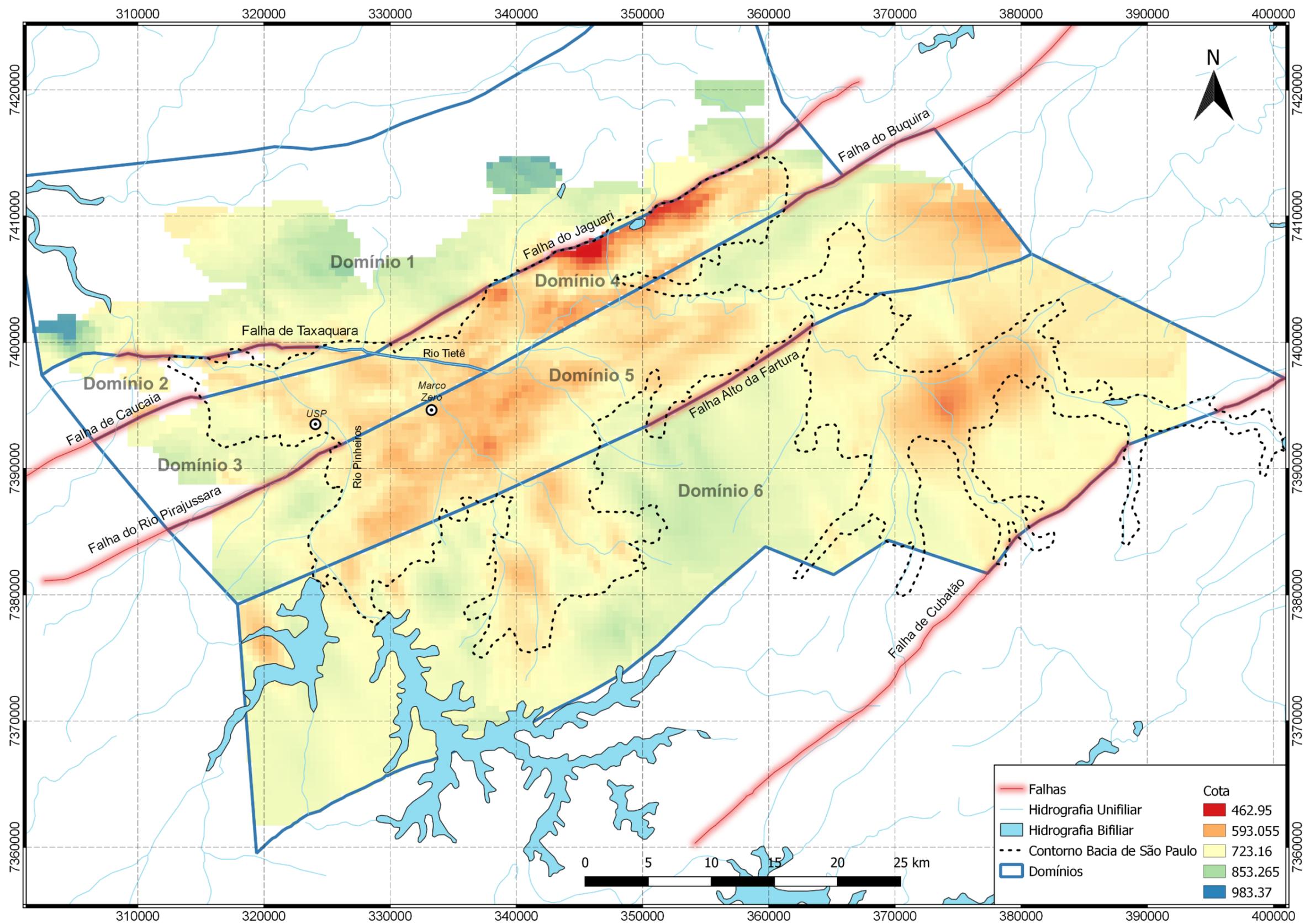


Figura 58 – Resultado das krigagens ordinárias da variável cota do topo rochoso da Bacia de São Paulo (seis domínios).

5.2 Estimativa da Espessura dos Solos da Bacia de São Paulo

Apresentam-se aqui os resultados das estimativas das espessuras dos solos da Bacia de São Paulo. Esses foram divididos em duas categorias: sedimentos, que englobam os sedimentos quaternários e Paleógenos (Formações São Paulo e Resende), e solo de alteração de rocha.

Para que a realização da estimativa, foi calculada, para cada poço, a espessura de tais solos, que foi utilizada como variável para análise estatística, análise geoestatística e krigagem ordinária.

Nessa parte do trabalho também foi utilizada uma malha regular de 500 metros por 500 metros.

5.2.1 Espessura dos Sedimentos

Foram realizadas análise estatística, análise geoestatística e a estimativa por krigagem ordinária da espessura dos sedimentos da Bacia de São Paulo a partir das informações de 2.471 poços distribuídos em uma malha irregular pela bacia. Neste estudo não foram utilizados os dados de todos os poços, pois nem todos continham informações de sedimento.

O histograma dos dados (Figura 59) apresenta assimetria positiva da variável espessura do sedimento, com espessuras que variam entre 0,50 e 370 metros, com média de 66,28 e desvio padrão de 57,26.

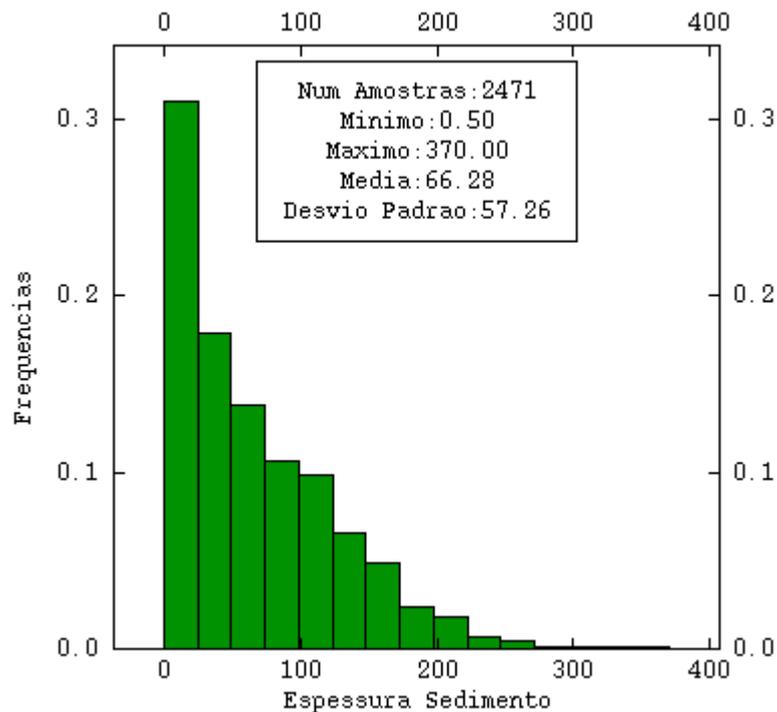


Figura 59 – Histograma da variável espessura do sedimento.

Apresenta-se na Figura 60 o mapa base com o domínio no qual foi calculado o campo geométrico para as quatro direções durante a análise exploratória, as distâncias utilizadas foram 10.000 metros para a direção 20°, 17.500 metros para a direção 65° e 12.500 metros para as direções 110° e 155°.

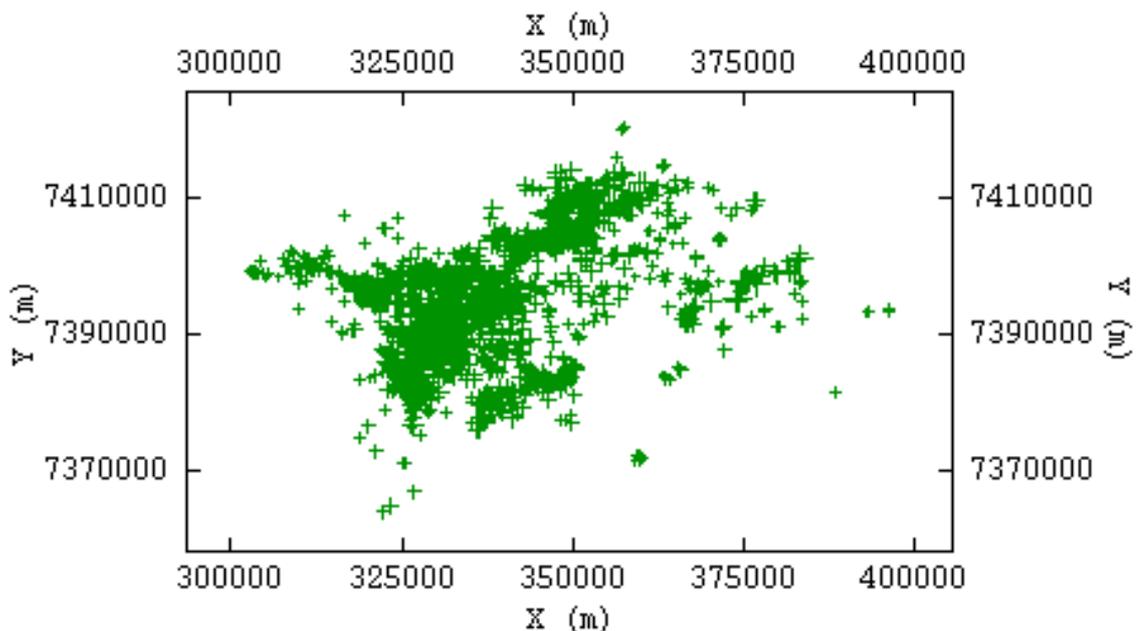


Figura 60 – Domínio para espessura do sedimento.

Tabela 24 – Parâmetros utilizados para o cálculo do variograma experimental para espessura do sedimento.

Direção	Campo Geométrico (m)	Comprimento de Passo (m)	Número de Passos
20°	10.000	500	20
65°	17.500	500	35
110°	12.500	500	25
155°	12.500	500	25

Pela interpretação do variograma das Figuras 61 e 62, a anisotropia mista. A anisotropia aparece mais bem demarcada no par 65° e 155° (Figura 62). Por esse motivo, pela estrutura da bacia e pelo variograma na direção N65 ser mais bem estruturado, foi escolhido o par 65° e 155° para ajuste do modelo teórico de variograma.

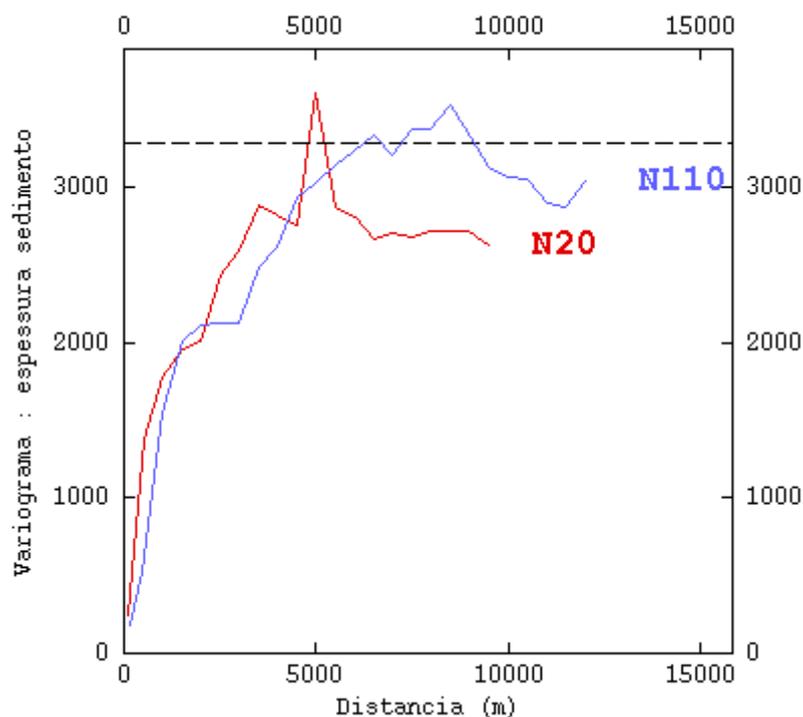


Figura 61 – Variograma experimental para espessura do sedimento, par N20 e N110.

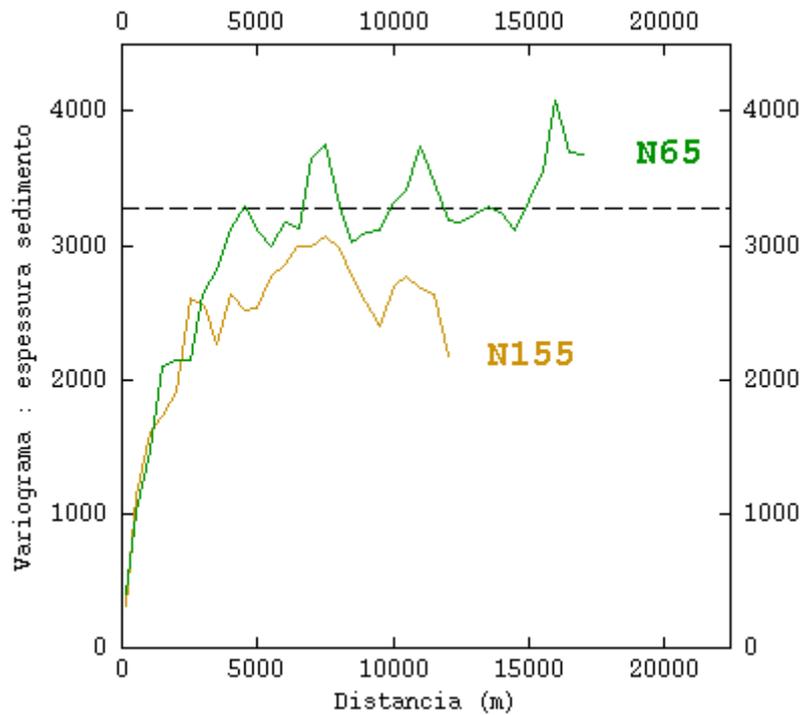


Figura 62 – Variograma experimental para espessura do sedimento, par N65 e N155.

Apresenta-se na Figura 63 o variograma experimental e respectivo modelo ajustado de acordo com os parâmetros da Tabela 25.

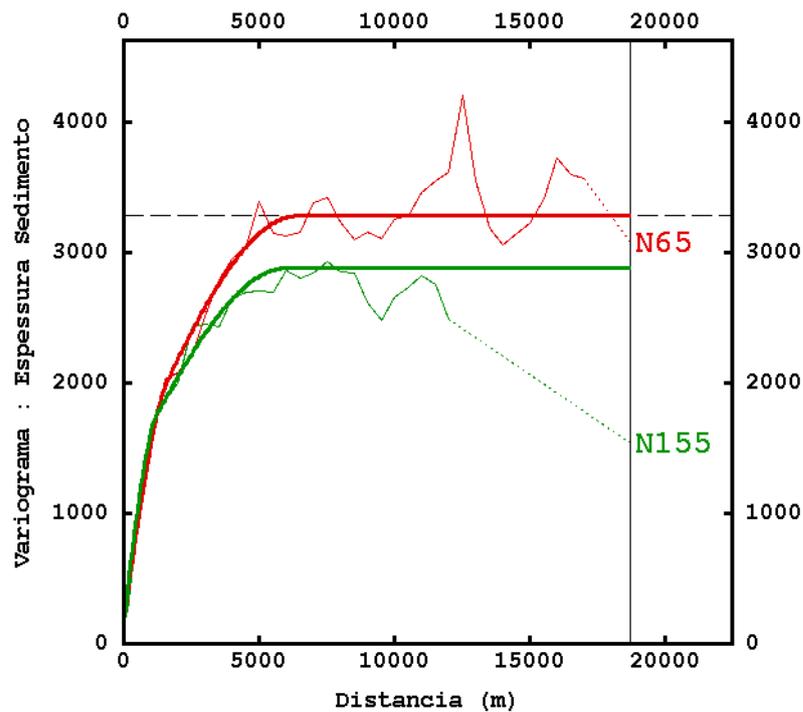


Figura 63 – Modelo de variograma para espessura do sedimento.

Tabela 25 – Parâmetros utilizados para o ajuste do modelo teórico de variograma para espessura do sedimento.

Modelo de variograma para a variável espessura dos sedimentos

C0	180		
Tipo	Esférico		
Estrutura	1	2	3
C	1.100	1.600	400
a _{max}	1.600	6.400	6.400
a _{min}	1.200	6.000	∞
Rotação	N65	N65	N65

O modelo de variograma foi ajustado com quatro estruturas, sendo: C0 (efeito pepita igual a 180), C1 (modelo esférico rotacionado em 65° com amplitude de 1.600 m na direção 65° e de 1.200 m na direção 155° e patamar em 1.100), C2 (modelo esférico rotacionado em 65°, amplitude de 6.400 m na direção 65° e de 6.000 m na direção 155° e patamar em 1.600) e C3 (modelo esférico rotacionado em 65°, amplitude de 6.400 m na direção 65° e infinita na direção 155° e patamar em 400). As estruturas C1, C2 e C3 foram rotacionadas na direção de 65° pois esta é a direção mais contínua, com maior amplitude e mais bem estruturada.

Após o ajuste do modelo teórico de variograma foi feita a validação cruzada. Foi adotada a vizinhança dividida em 8 setores, com número ótimo de amostras por setor igual a 2 e número mínimo de amostras igual a 1, obtendo-se correlação de 0,798 (Figura 75) e número de pontos estimados igual a 2.470.

Tabela 26 – Parâmetros de vizinhança utilizado para a krigagem.

Parâmetros de vizinhança	
Número Mínimo de Amostras	1
Número de Setores Angulares Horizontais	8
Raio de busca máximo para a direção 65°	6.400 m
Raio de busca máximo para a direção 155°	6.000 m
Número Ótimo de Amostras por Setor	2

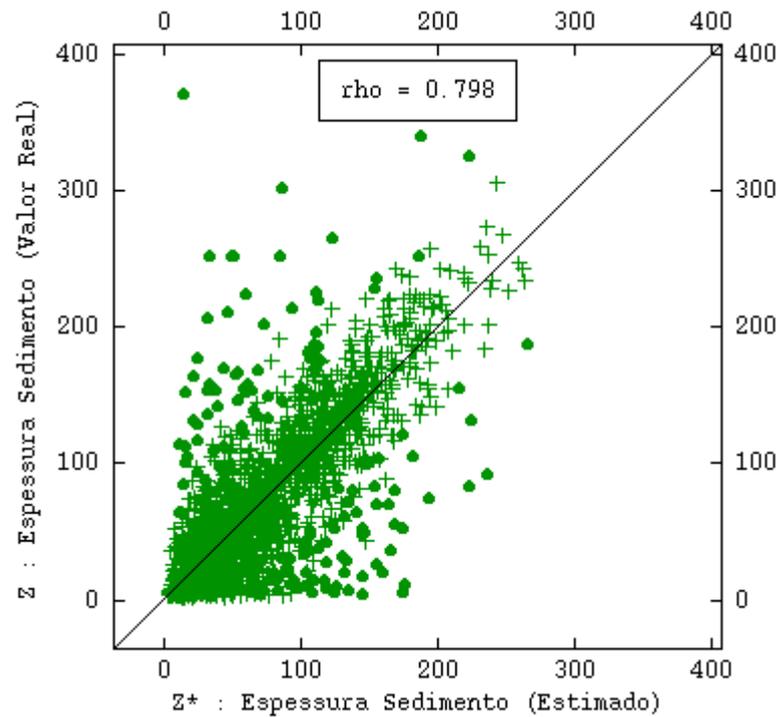


Figura 64 – Resultado da validação cruzada: coeficiente de correlação igual a 0.798.

O próximo passo após a definição dos parâmetros do modelo e de vizinhança é a krigagem ordinária, no caso, da variável espessura do sedimento. O resultado apresenta-se na Figura 65.

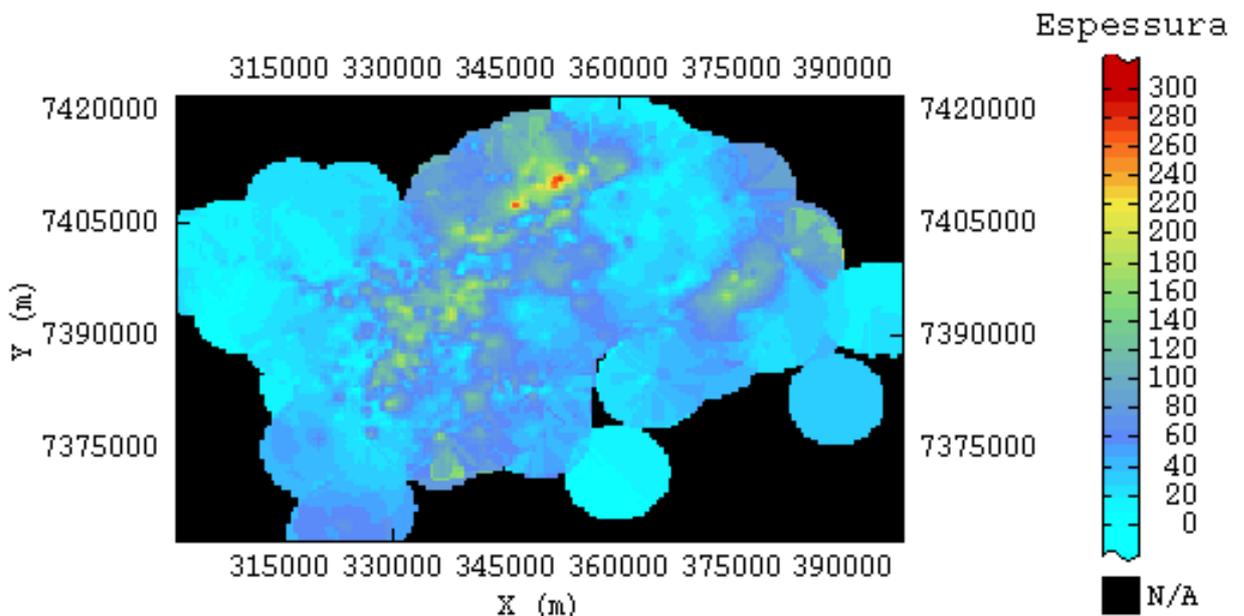


Figura 65 – Resultado da krigagem para espessura do sedimento.

Pode ser observado nesse resultado que os valores de espessura e os resultados de cota do topo rochoso, apresentados em 5.1, se correlacionam

inversamente: quanto menores os valores de cota do topo rochoso, maiores são os valores de espessura dos sedimentos.

Tal observação pode comprovada pela região próxima ao aeroporto de Cumbica, em Guarulhos/SP. Nessa região os resultados da krigagem para espessura dos sedimentos mostrou sua espessura máxima, por volta de 370 metros, sendo essa a região onde o topo rochoso apresenta os seus menores valores.

5.2.2 Espessura do Solo de Alteração de Rocha

Foram realizadas análise estatística, análise geoestatística e a estimativa por inverso da potência da distância da espessura do solo de alteração da Bacia de São Paulo a partir das informações de 1.362 poços distribuídos em uma malha irregular pela bacia.

O histograma dos dados (Figura 66) mostra que a espessura do solo de alteração apresenta distribuição com assimetria positiva, com espessuras que variam ente 0,10 e 250 metros, com média de 13,82 e desvio padrão de 17,22.

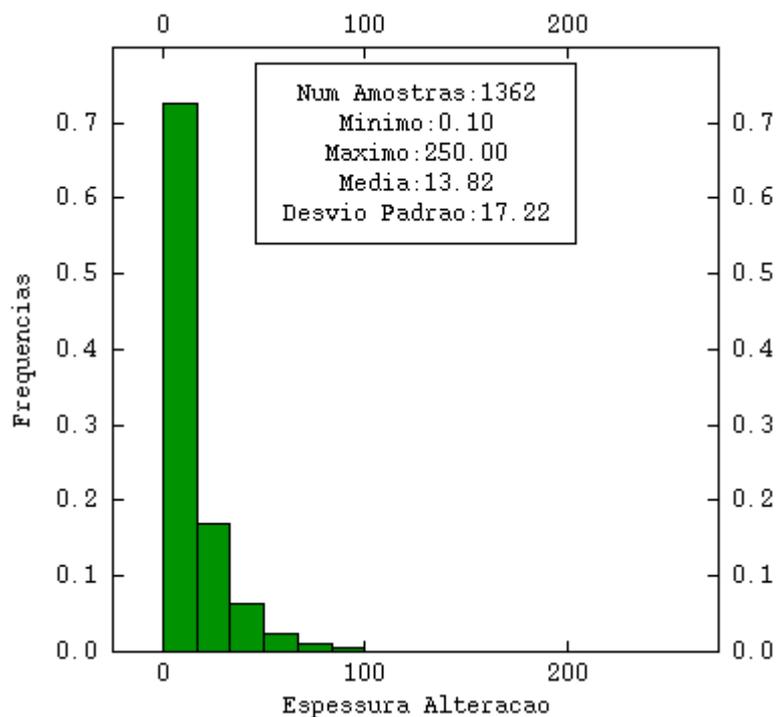


Figura 66 – Histograma da variável espessura do solo de alteração.

Apresenta-se na Figura 67 o mapa base com o domínio no qual foi calculado o campo geométrico para as quatro direções durante a análise exploratória, as

distâncias utilizadas foram 10.000 metros para a direção 20°, 17.500 metros para a direção 65° e 12.500 metros para as direções 110° e 155°.

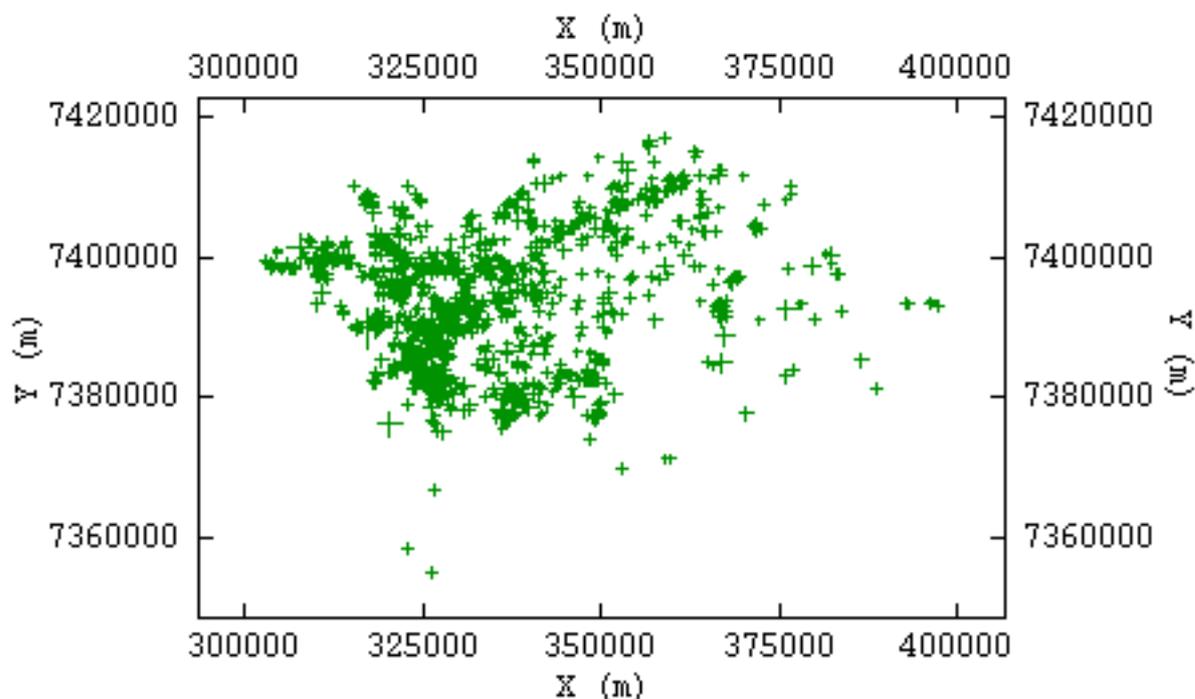


Figura 67 – Mapa base da espessura do solo de alteração.

Observando o variograma experimental, calculado com os parâmetros apresentados na Tabela 27 e apresentado na Figura 68, nota-se que a anisotropia não é evidenciada. Por esse motivo foi escolhido um variograma omnidirecional (Figura 69) de acordo com os parâmetros da Tabela 28 para ajuste do modelo teórico de variograma.

Tabela 27 – Parâmetros utilizados para o cálculo do variograma experimental para espessura do solo de alteração.

Direção	Campo Geométrico (m)	Comprimento de Passo (m)	Número de Passos
20°	10.000	1000	10
65°	17.500	1000	17
110°	12.500	1000	12
155°	12.500	1000	12

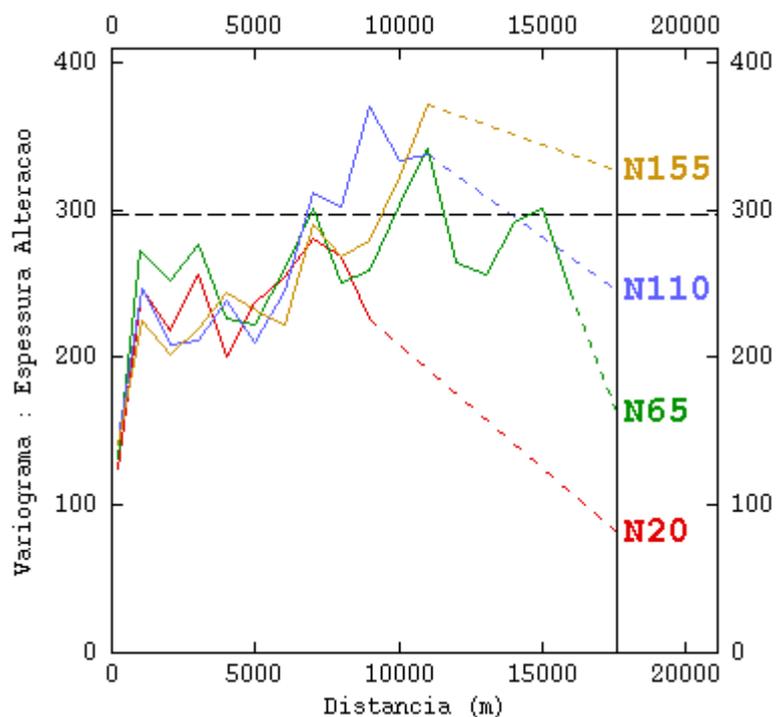


Figura 68 – Variograma experimental para espessura do solo de alteração em 4 direções.

Tabela 28 – Parâmetros utilizados para o cálculo do variograma experimental para espessura do solo de alteração.

Direção	Campo Geométrico (m)	Comprimento de Passo (m)	Número de Passos
Omnidirecional	17.500	1000	17

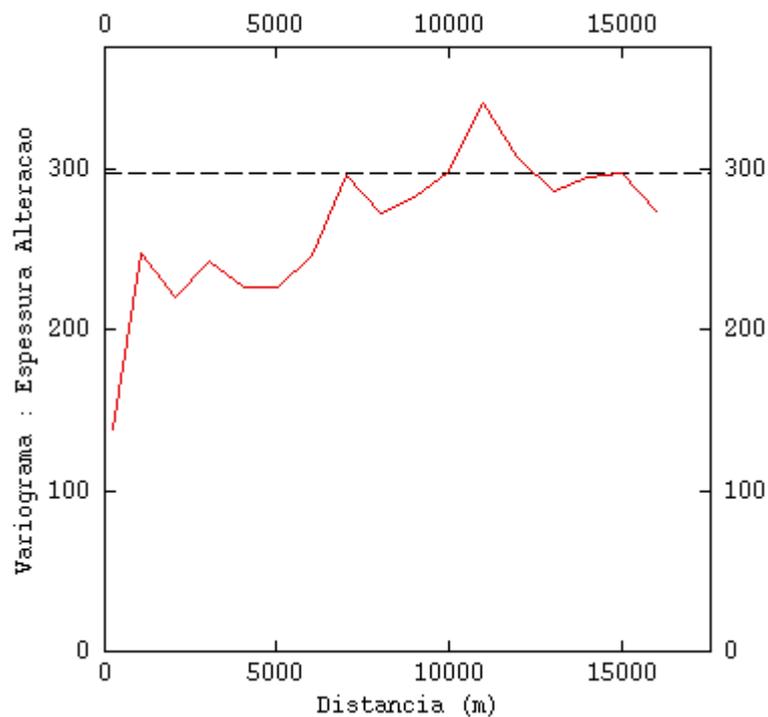


Figura 69 – Variograma experimental omnidirecional para espessura do solo de alteração.

Apresenta-se na Figura 70 o variograma experimental e respectivo modelo teórico de variograma ajustado de acordo com os parâmetros da Tabela 29.

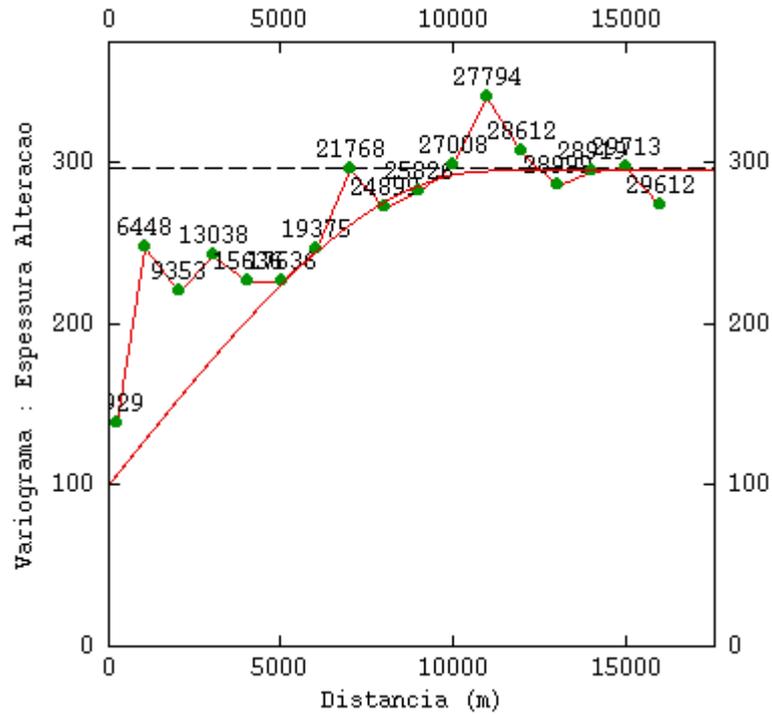


Figura 70 – Modelo de variograma para espessura do solo de alteração.

Tabela 29 – Parâmetros utilizados para o ajuste do modelo teórico de variograma para espessura do solo de alteração.

Modelo de variograma para a variável espessura do solo de alteração	
C0	100
Tipo	Esférico
Estrutura	1
C	195
a	11.000

O modelo de variograma foi ajustado com duas estruturas, sendo: C0 (efeito pepita igual a 100) e C1 (modelo esférico com amplitude de 11.000 m na e patamar em 195).

Após o ajuste do modelo de variograma foi feita validação cruzada. Foi adotada a vizinhança dividida em 4 setores, com número ótimo de amostras por setor igual a 4 e número mínimo de amostras igual a 1, obtendo-se correlação de 0,335 (Figura 71) e número de pontos estimados igual a 1.362.

Tabela 30 – Parâmetros de vizinhança utilizado para a krigagem.

Parâmetros de vizinhança	
Número Mínimo de Amostras	1
Número de Setores Angulares Horizontais	4
Raio de Busca Máximo	11.000 m
Número Ótimo de Amostras por Setor	4

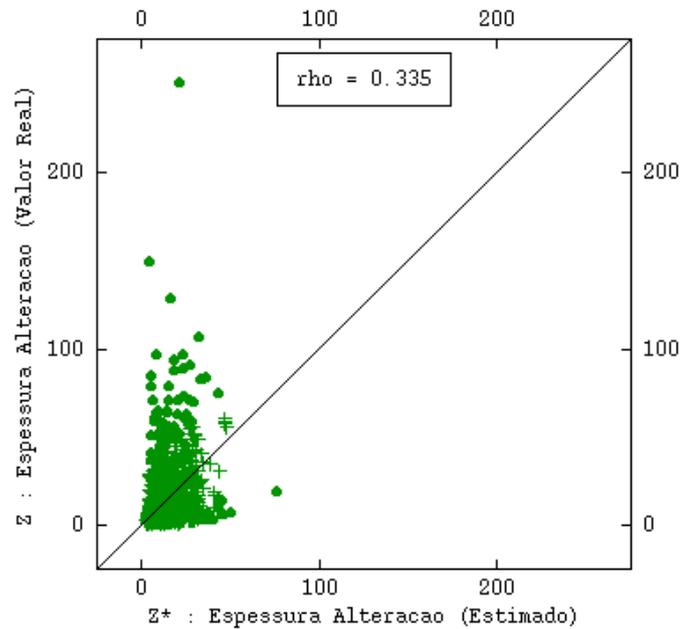


Figura 71 – Resultado da validação cruzada: coeficiente de correlação igual a 0.335.

Devido ao baixo coeficiente de correlação obtido na validação cruzada optou-se pela estimativa da espessura do solo de alteração de rocha pelo método do inverso da potência da distância, utilizando-se potência 2, distância mínima igual a 0,00001 e os mesmos parâmetros de vizinhança descritos acima, com raio de busca de 11.000 metros. O resultado da estimativa encontra-se apresentado na Figura 72.

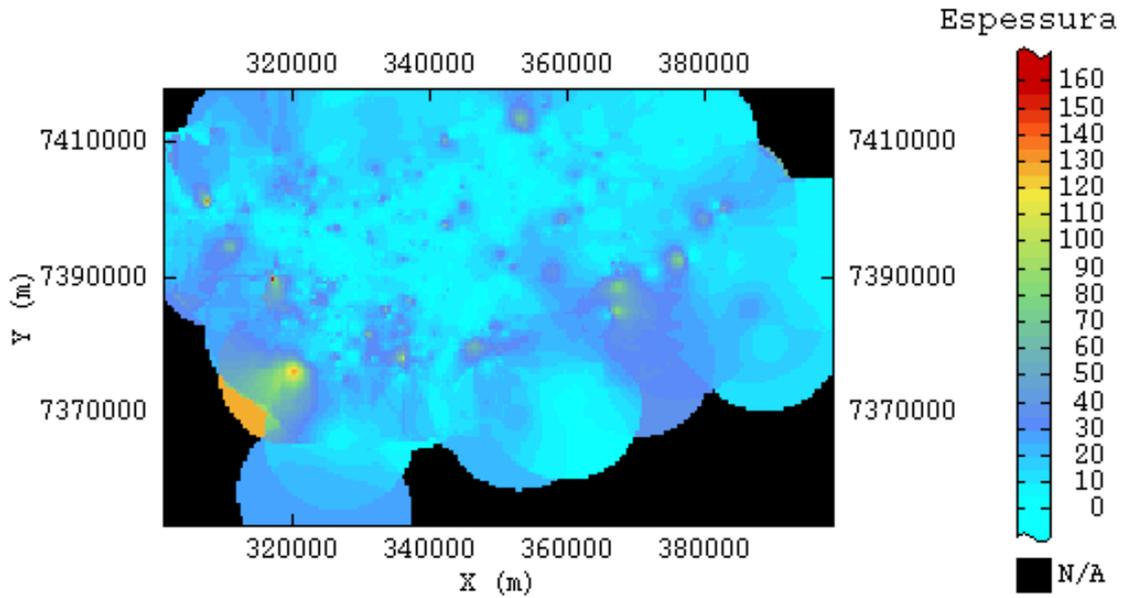


Figura 72 – Resultado do inverso da potência da distância para espessura do solo de alteração.

O resultado para espessura do solo de alteração mostra que, dentro da bacia, o solo de alteração é pouco espesso e que ele ocorre em maior espessura fora da bacia, no seu embasamento.

5.3 Krigagem Indicadora

Foram realizadas análise estatística, análise geoestatística e a estimativa por krigagem indicadora dos dados de 3.124 poços distribuídos em uma malha irregular pela bacia (Figura 73).

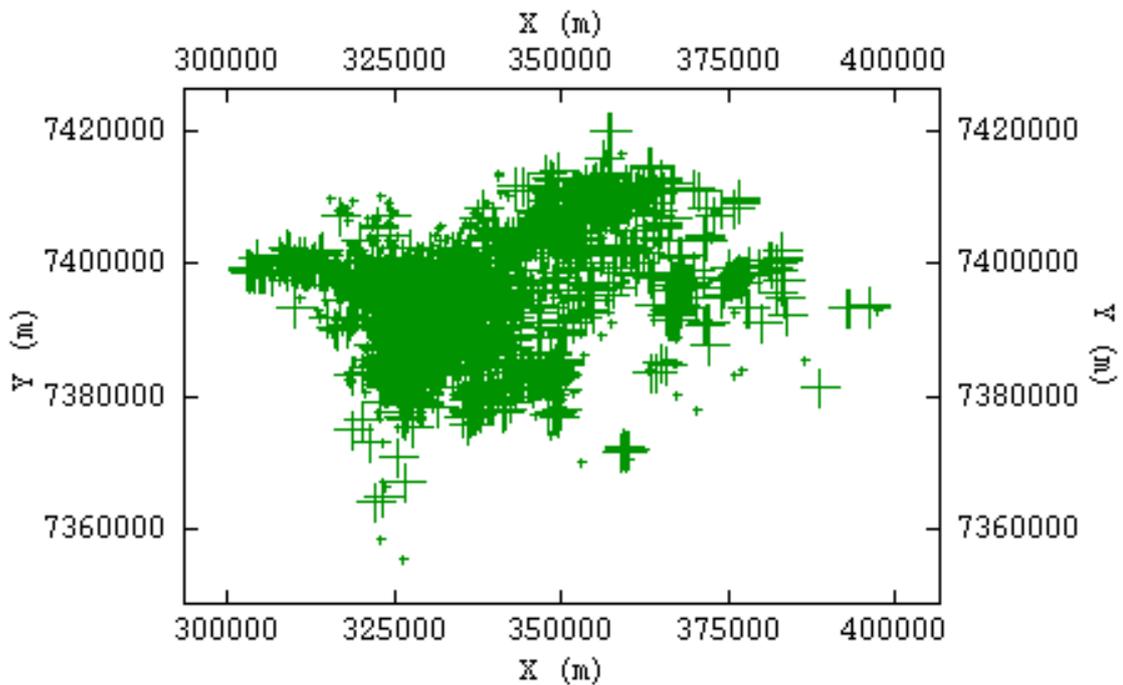


Figura 73 – Domínio para a krigagem de variáveis indicadoras.

Em tais dados foi realizada a categorização considerando a classificação agrupada das litologias em sedimento (1), solo de alteração de rocha (2) e rocha (3). Devido as diferentes espessuras entre tais categorias, os poços foram regularizados em amostras de mesma altura igual a 5 metros e então foram criadas três variáveis indicadoras, uma para cada categoria.

Após criação das variáveis indicadoras, tais foram analisadas do ponto de vista estatístico e geoestatístico, e foram realizadas estimativas por krigagem de indicadoras para cada variável.

Na figura 74 podem ser observados os histogramas das variáveis indicadoras sedimento, alteração e rocha. A variável indicadora rocha é a que possui maiores frequências, seguida pelas variáveis indicadoras sedimento e alteração, que possui a menor frequência entre as três variáveis.

Em termos de variância, a variável indicadora rocha também possui os maiores valores, seguida pelas variáveis indicadoras sedimento e alteração.

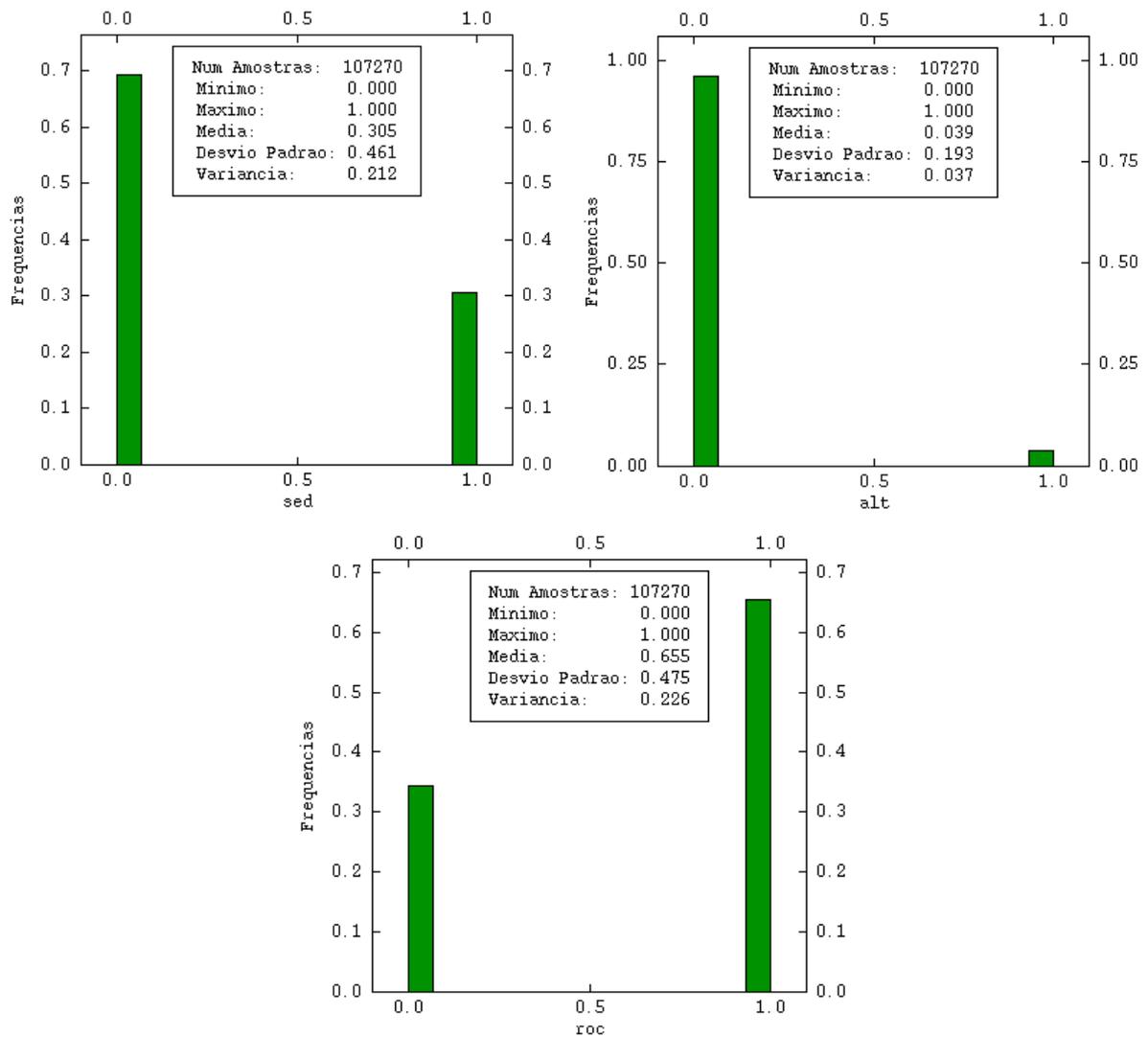


Figura 74 – Histogramas das variáveis indicadoras para sedimento, alteração e rocha.

Nessa parte do trabalho também foi utilizada uma malha regular de 500 metros por 500 metros.

5.3.1 Variável Indicadora Sedimento

Para a variável indicadora sedimento, foi calculado o variograma experimental para cinco direções, de acordo com os parâmetros da Tabela 31 (Figura 75), encontrando-se anisotropia mista no domínio. A direção que apresentou maior amplitude foi a direção de 65°, apresenta-se na Figura 76 o variograma considerando apenas as direções de 65° e 155° no plano horizontal e a direção vertical (D-90°).

Tabela 31 – Parâmetros utilizados para o cálculo do variograma experimental para a variável indicadora sedimento.

Direção	Campo Geométrico (m)	Comprimento de Passo (m)	Número de Passos
20°	10.000	500	20
65°	17.500	500	35
110°	12.500	500	25
155°	12.500	500	25
D90	300	5	60

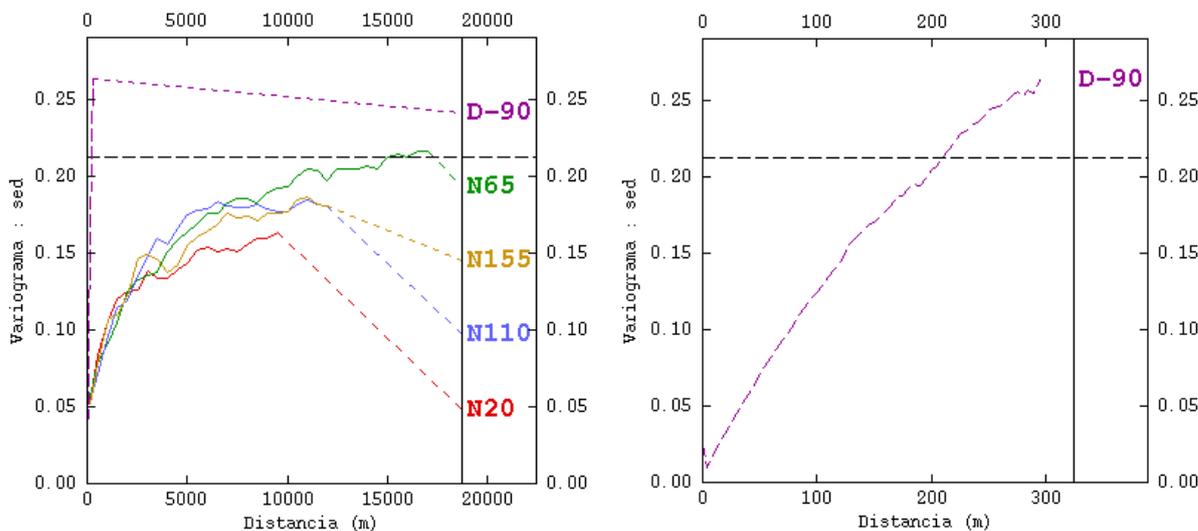


Figura 75 – Variograma experimental para a variável indicadora sedimento, calculada para 5 direções.

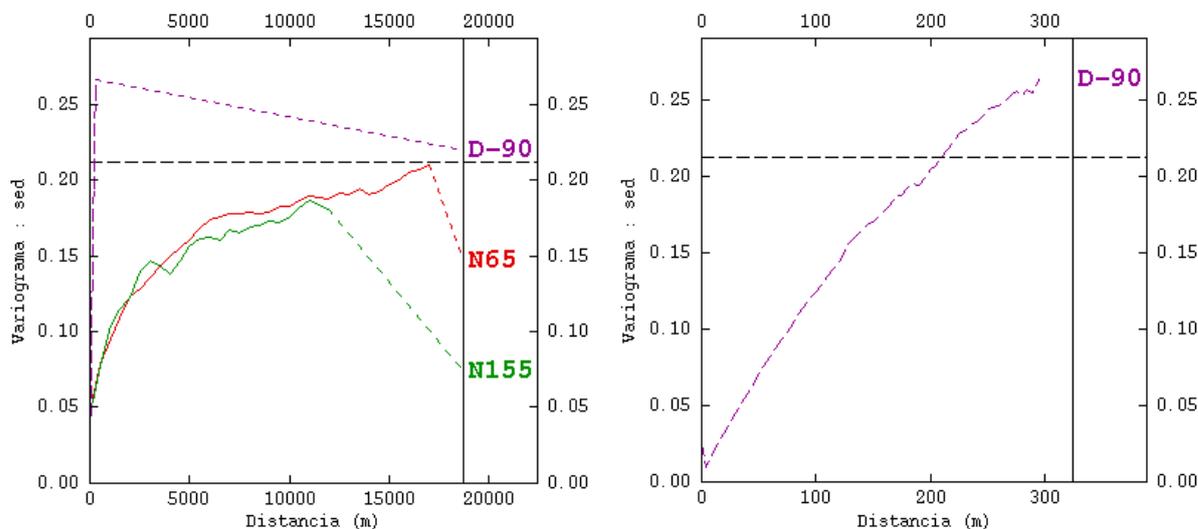


Figura 76 – Variograma experimental para a variável indicadora sedimento, recalculada para 3 direções.

Apresenta-se na Figura 77 o variograma experimental e respectivo modelo ajustado de acordo com os parâmetros da Tabela 32.

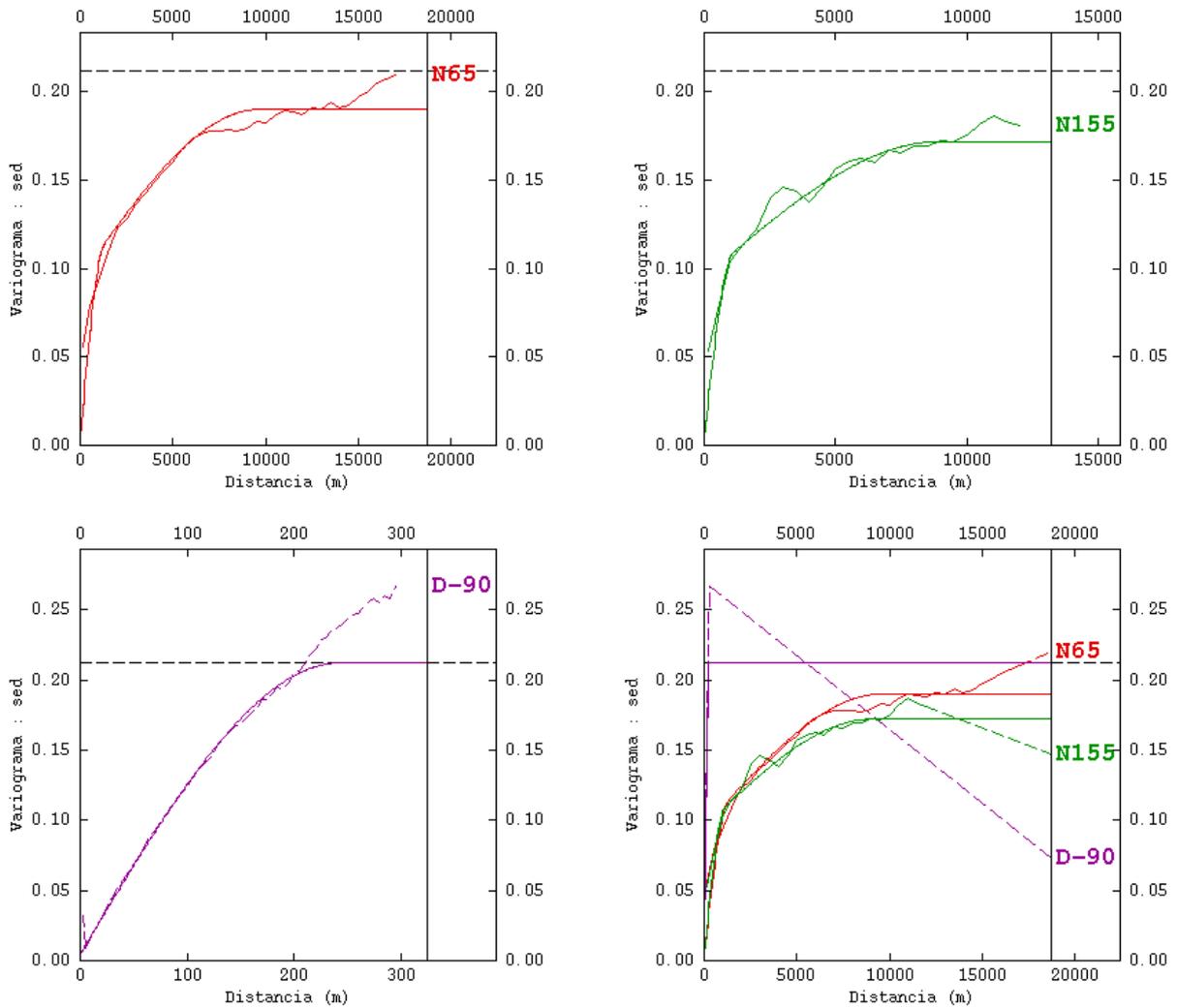


Figura 77 – Modelo de variograma para a variável indicadora sedimento.

Tabela 32 – Parâmetros utilizados para o ajuste do modelo teórico de variograma para a variável indicadora sedimento.

Modelo de variograma para a variável indicadora sedimento				
C0	0,005			
Tipo	Esférico			
Estrutura	1	2	3	4
C	0,09	0,077	0,018	0,022
amax	1.300	9.600	9.600	∞
amix	1.100	9.000	∞	∞
avert	243	243	243	243
Rotação	N65	N65	N65	N65

O modelo de variograma foi ajustado com cinco estruturas, sendo: C0 (efeito pepita igual a 0,005), C1 (modelo esférico rotacionado em 65° com amplitude de 1.300 m na direção 65°, de 1.100 m na direção 155° e de 243 na direção vertical e patamar em 0,09), C2 (modelo esférico rotacionado em 65° com amplitude de 9.600 m

na direção 65°, de 9.000 m na direção 155° e de 243 na direção vertical e patamar em 0,077), C3 (modelo esférico rotacionado em 65° com amplitude de 9.600 m na direção 65°, infinita na direção 155° e de 243 na direção vertical e patamar em 0,018) e C4 (modelo esférico rotacionado em 65° com amplitude infinita na direção 65°, infinita na direção 155° e de 243 na direção vertical e patamar em 0,022). As estruturas C1, C2, C3 e C4 foram rotacionadas na direção de 65° pois esta é a direção mais contínua, com maior amplitude e mais bem estruturada.

Definidos os parâmetros do modelo, foi realizada a krigagem ordinária da variável indicadora sedimento, adotando os parâmetros de vizinhança descritos na Tabela 33. O resultado da krigagem está apresentado na Figura 78.

Tabela 33 – Parâmetros de vizinhança utilizado para a krigagem.

Parâmetros de vizinhança	
Número Mínimo de Amostras	2
Número de Setores Angulares Horizontais	8
Raio de busca máximo para a direção D90°	243 m
Raio de busca máximo para a direção 65°	9.600 m
Raio de busca máximo para a direção 155°	9.000 m
Número Ótimo de Amostras por Setor	2

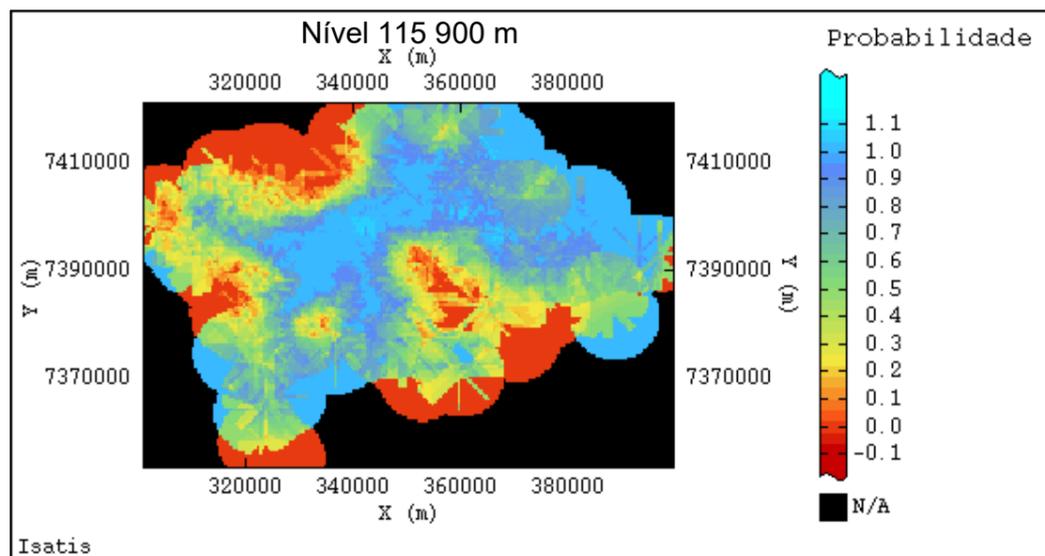
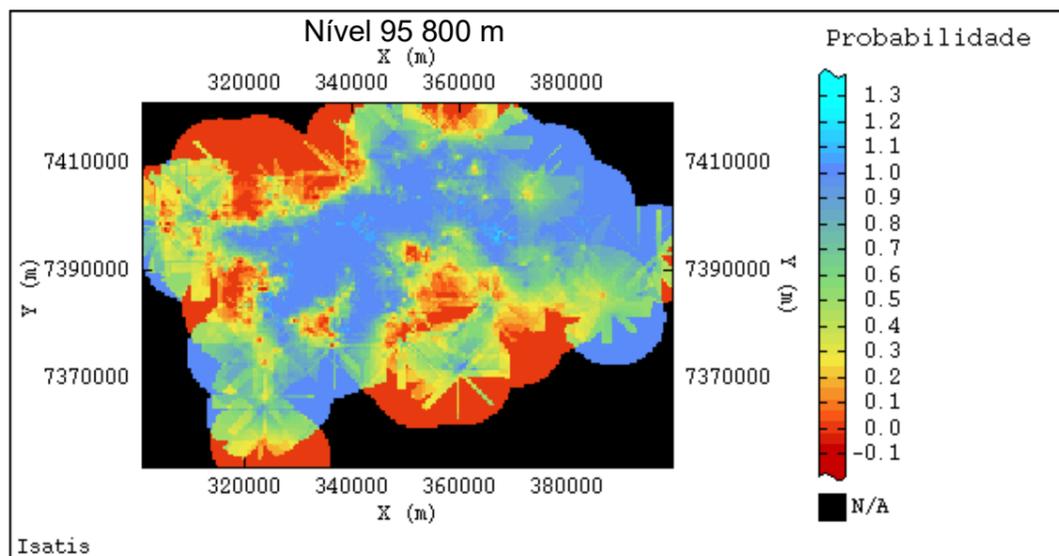
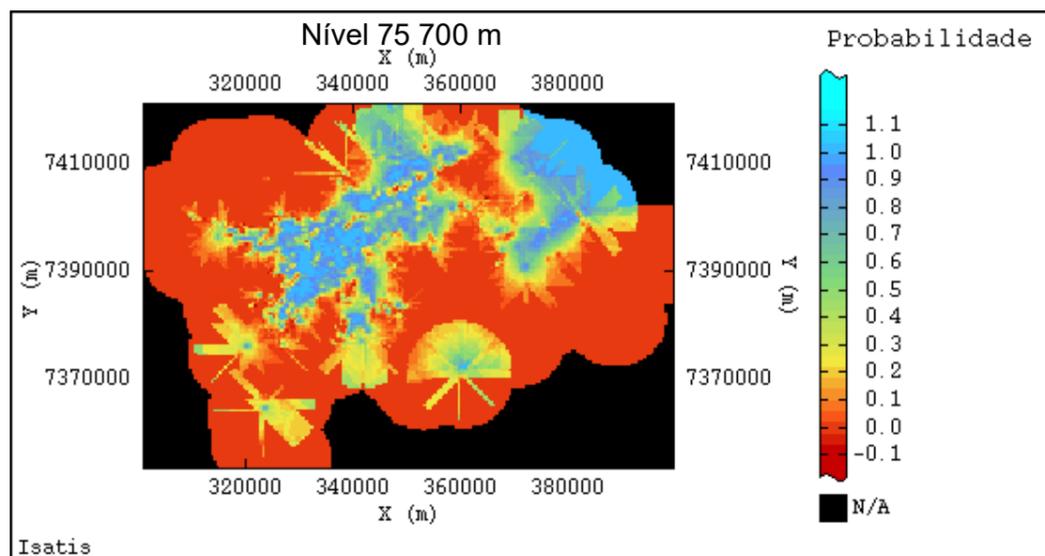
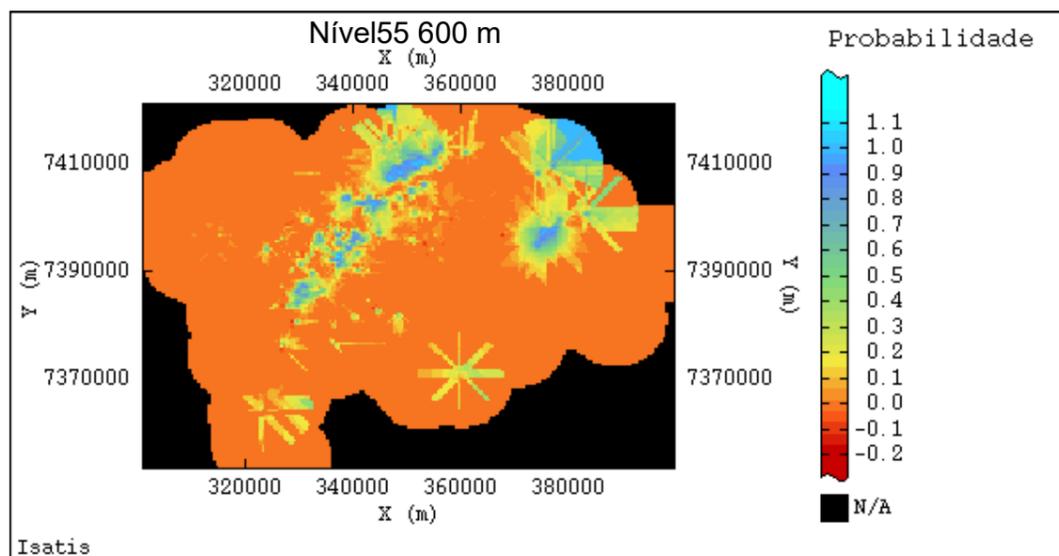
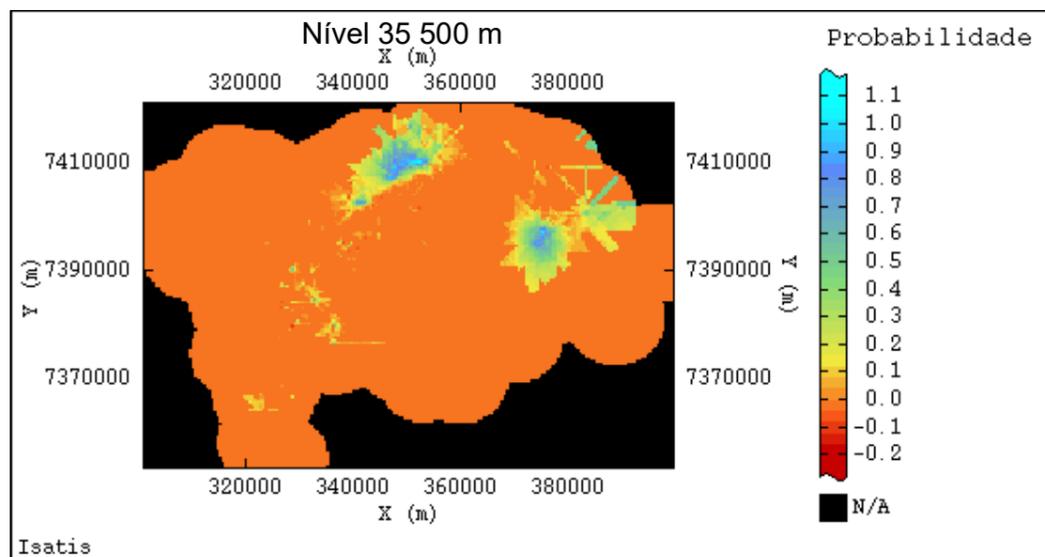
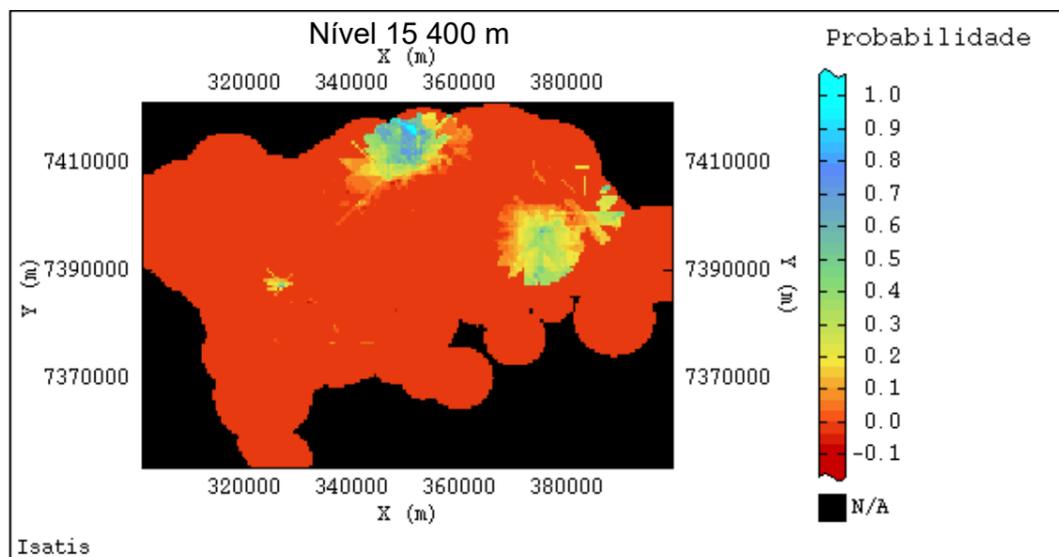


Figura 78 – Resultado da krigagem da variável indicadora sedimento, níveis 15 (cota 400), 35 (cota 500), 55 (cota 600), 75 (cota 700), 95 (cota 800) e 115 (cota 900), que representa a probabilidade de sedimentos ocorrerem ou não em determinado ponto da bacia.

5.3.2 Variável Indicadora Solo de Alteração de Rocha

Para a variável indicadora solo de alteração de rocha, foi calculado o variograma experimental para cinco direções, de acordo com os parâmetros da Tabela 34 (Figura 79), encontrando-se anisotropia mista no domínio. A direção que apresentou maior amplitude foi a direção de 65°, apresenta-se na Figura 79 o variograma considerando apenas as direções de 65° e 155° no plano horizontal e a direção vertical (D-90°).

Tabela 34 - Parâmetros utilizados para o cálculo do variograma experimental para a variável indicadora solo de alteração de rocha.

Direção	Campo Geométrico (m)	Comprimento de Passo (m)	Número de Passos
20°	10.000	500	20
65°	17.500	500	35
110°	12.500	500	25
155°	12.500	500	25
D90	300	5	60

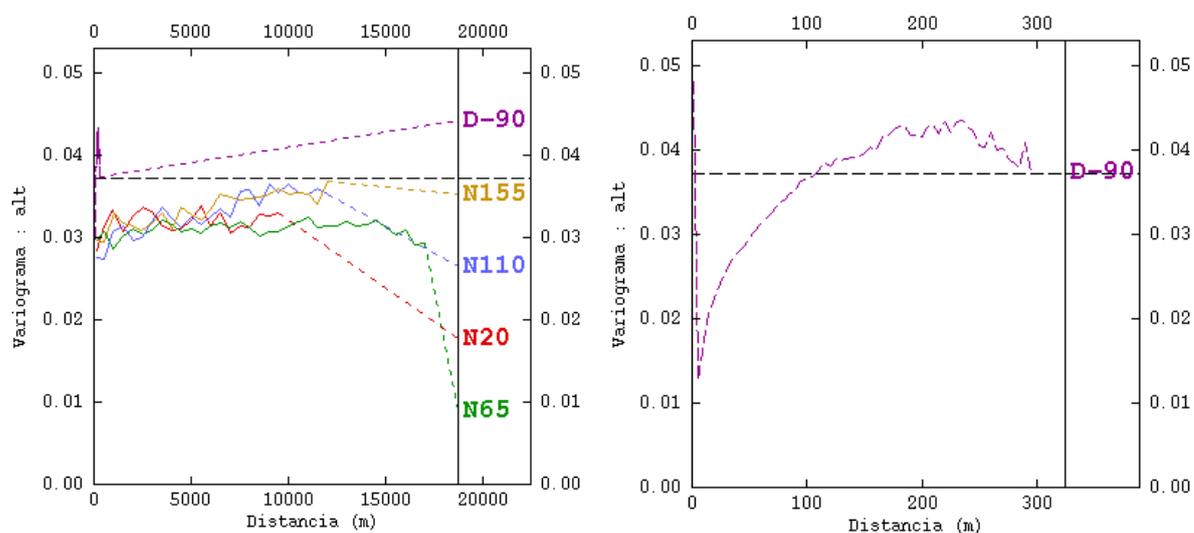


Figura 79 – Variograma experimental para a variável indicadora solo de alteração de rocha, calculada para 5 direções.

Apresenta-se na Figura 80 o variograma experimental e respectivo modelo ajustado de acordo com os parâmetros da Tabela 35.

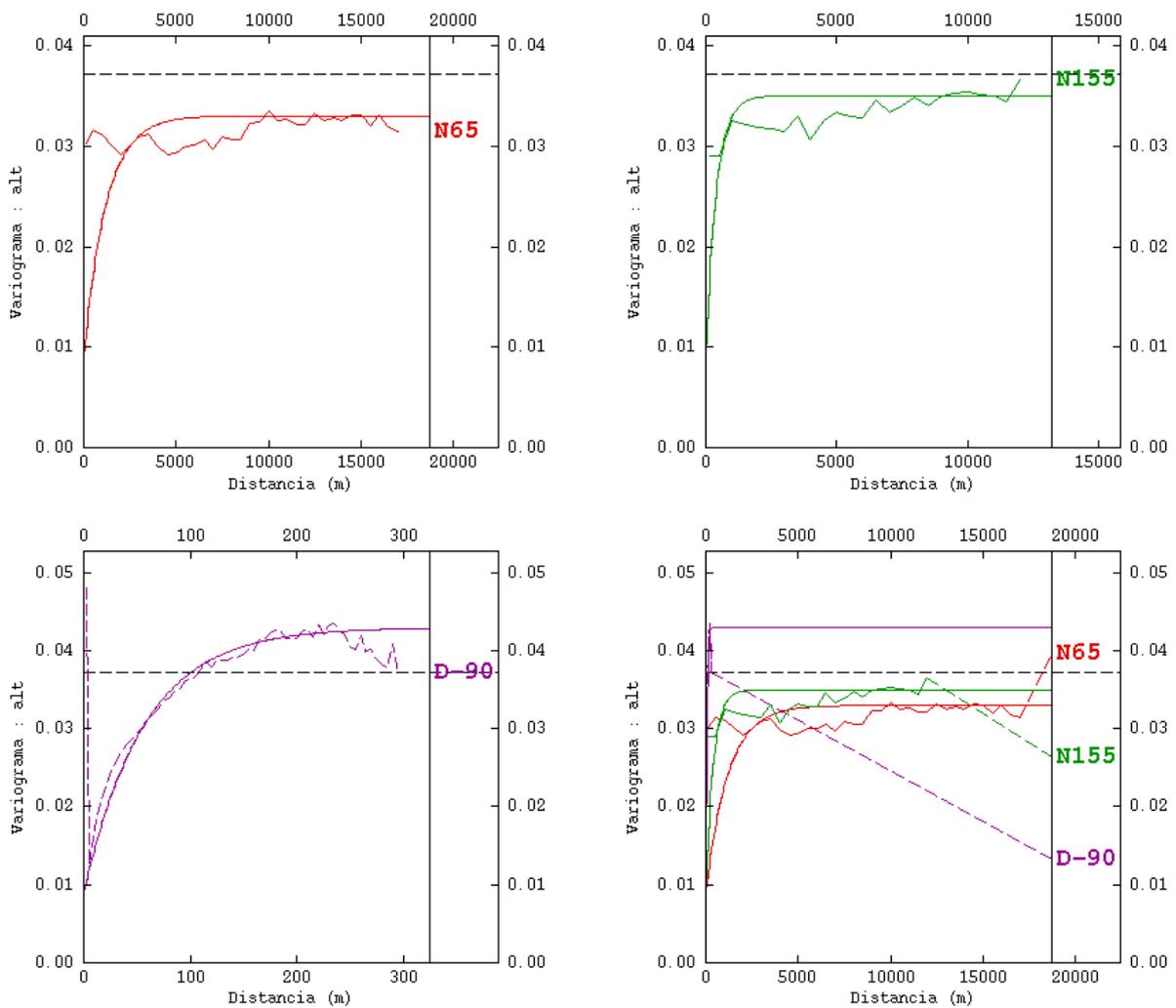


Figura 80 – Modelo de variograma para a variável indicadora solo de alteração de rocha.

Tabela 35 – Parâmetros utilizados para o ajuste do modelo teórico de variograma para a variável indicadora sedimento.

Modelo de variograma para a variável indicadora solo de alteração de rocha			
C0		0,009	
Tipo		Exponencial	
Estrutura	1	2	3
C	0,024	0,002	0,008
a _{max}	3.600	∞	∞
a _{mix}	1.200	1200	∞
a _{vert}	170	170	170
Rotação	N65	N65	N65

O modelo de variograma foi ajustado com quatro estruturas, sendo: C0 (efeito pepita igual a 0,009), C1 (modelo exponencial rotacionado em 65° com amplitude de 3.600 m na direção 65°, de 1.200 m na direção 155° e de 170 na direção vertical e patamar em 0,024), C2 (modelo exponencial rotacionado em 65° com amplitude

infinita na direção 65°, de 1.200 m na direção 155° e de 170 na direção vertical e patamar em 0,002) e C3 (modelo exponencial rotacionado em 65° com amplitude infinita na direção 65°, infinita na direção 155° e de 170 na direção vertical e patamar em 0,008). As estruturas C1, C2 e C3 foram rotacionadas na direção de 65° pois esta é a direção mais contínua, com maior amplitude.

Definidos os parâmetros do modelo, foi realizada a krigagem ordinária da variável indicadora solo de alteração de rocha, adotando os parâmetros de vizinhança descritos na Tabela 36. O resultado da krigagem está apresentado na Figura 81.

Tabela 36 – Parâmetros de vizinhança utilizado para a krigagem.

Parâmetros de vizinhança	
Número Mínimo de Amostras	2
Número de Setores Angulares Horizontais	8
Raio de busca máximo para a direção D90°	170 m
Raio de busca máximo para a direção 65°	3.600 m
Raio de busca máximo para a direção 155°	1.200 m
Número Ótimo de Amostras por Setor	2

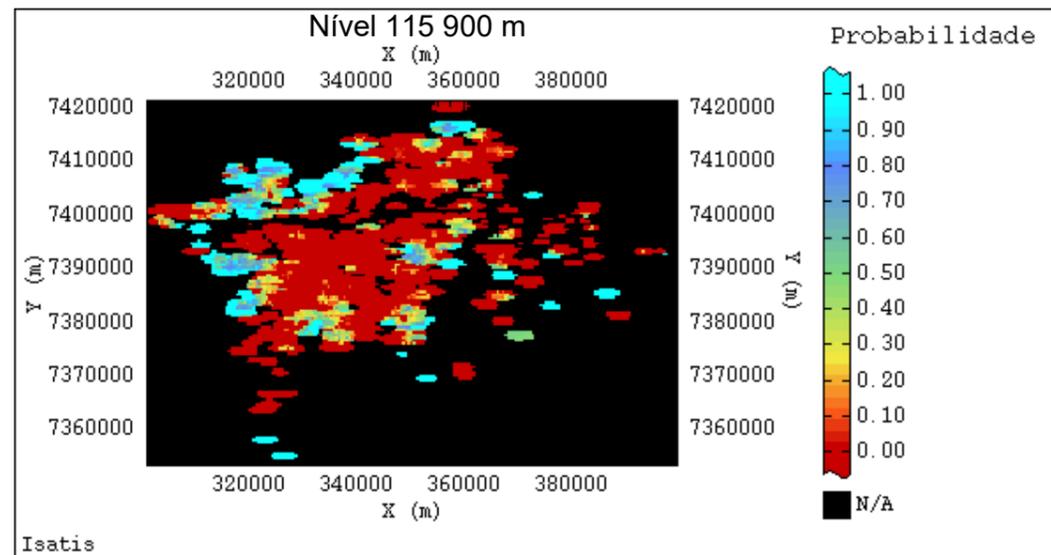
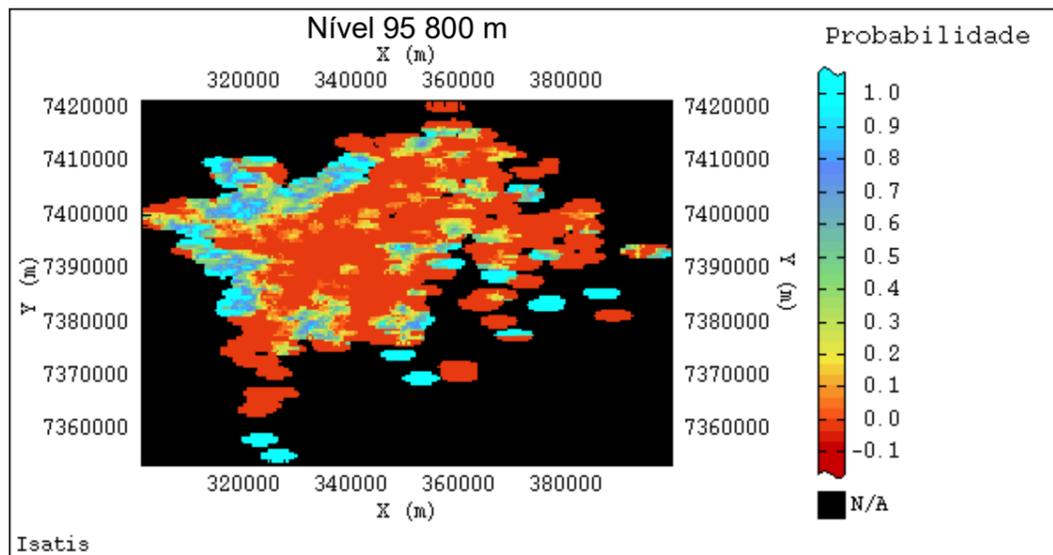
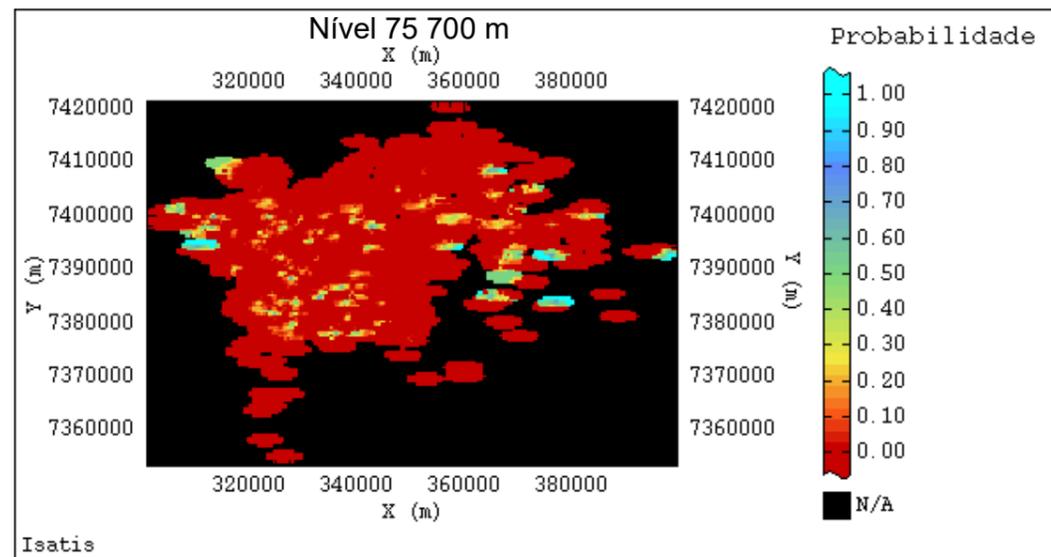
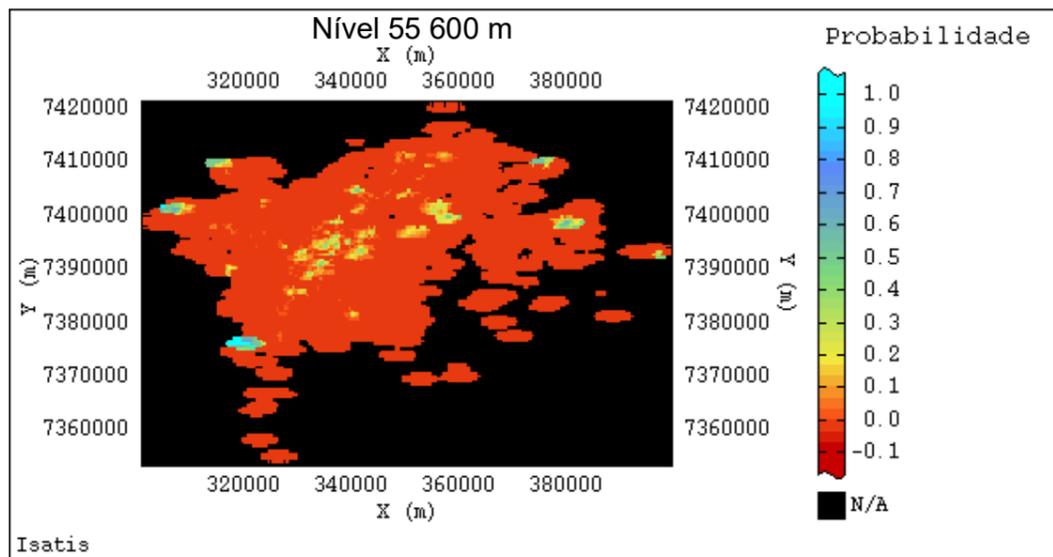
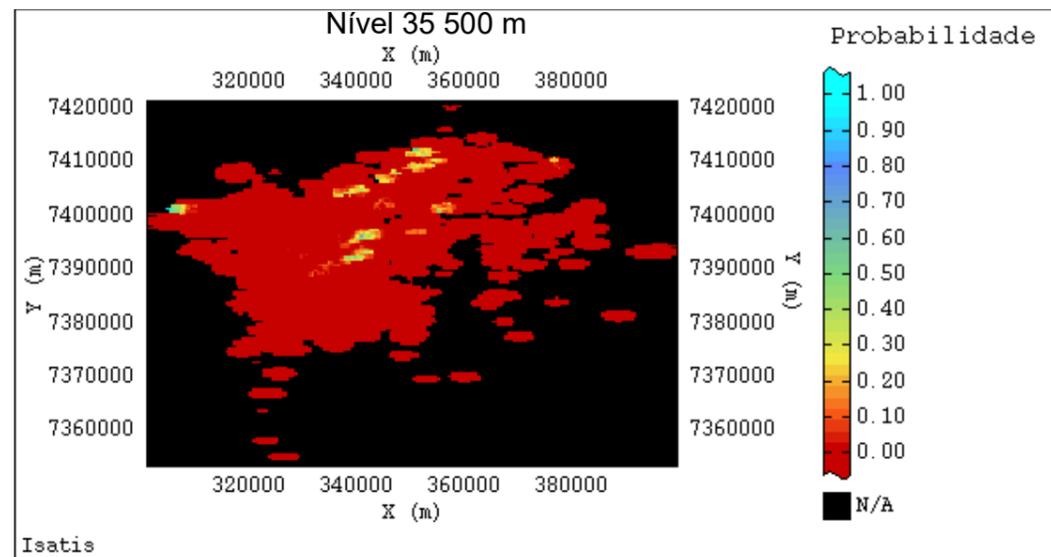
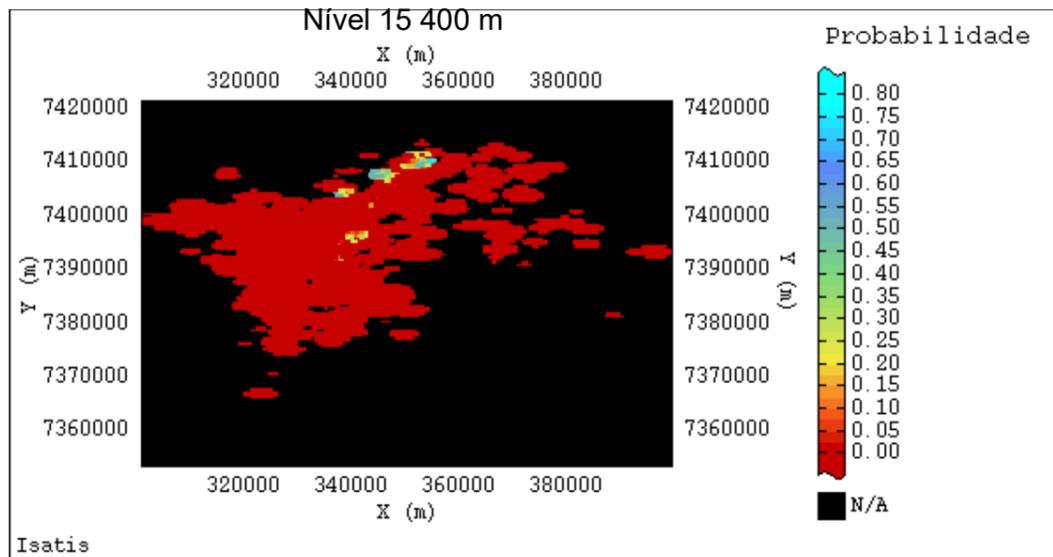


Figura 81 – Resultado da krigagem da variável indicadora solo de alteração de rocha, níveis 15 (cota 400), 35 (cota 500), 55 (cota 600), 75 (cota 700), 95 (cota 800) e 115 (cota 900), que representa a probabilidade de solo de alteração de rocha ocorrer ou não em determinado ponto da bacia.

5.3.3 Variável Indicadora Rocha

Para a variável indicadora rocha, foi calculado o variograma experimental para cinco direções (Figura 82a), utilizando os parâmetros descritos na Tabela 37, encontrando-se anisotropia mista no domínio. O par 20° e 110° foi escolhido (Figura 82b), por evidenciá-la melhor e por apresentar maior amplitude na direção de 110°, sendo essa a direção mais contínua.

Tabela 37 – Parâmetros utilizados para o cálculo do variograma experimental para a variável indicadora rocha.

Direção	Campo Geométrico (m)	Comprimento de Passo (m)	Número de Passos
20°	10.000	500	20
65°	17.500	500	35
110°	12.500	500	25
155°	12.500	500	25
D90	300	5	60

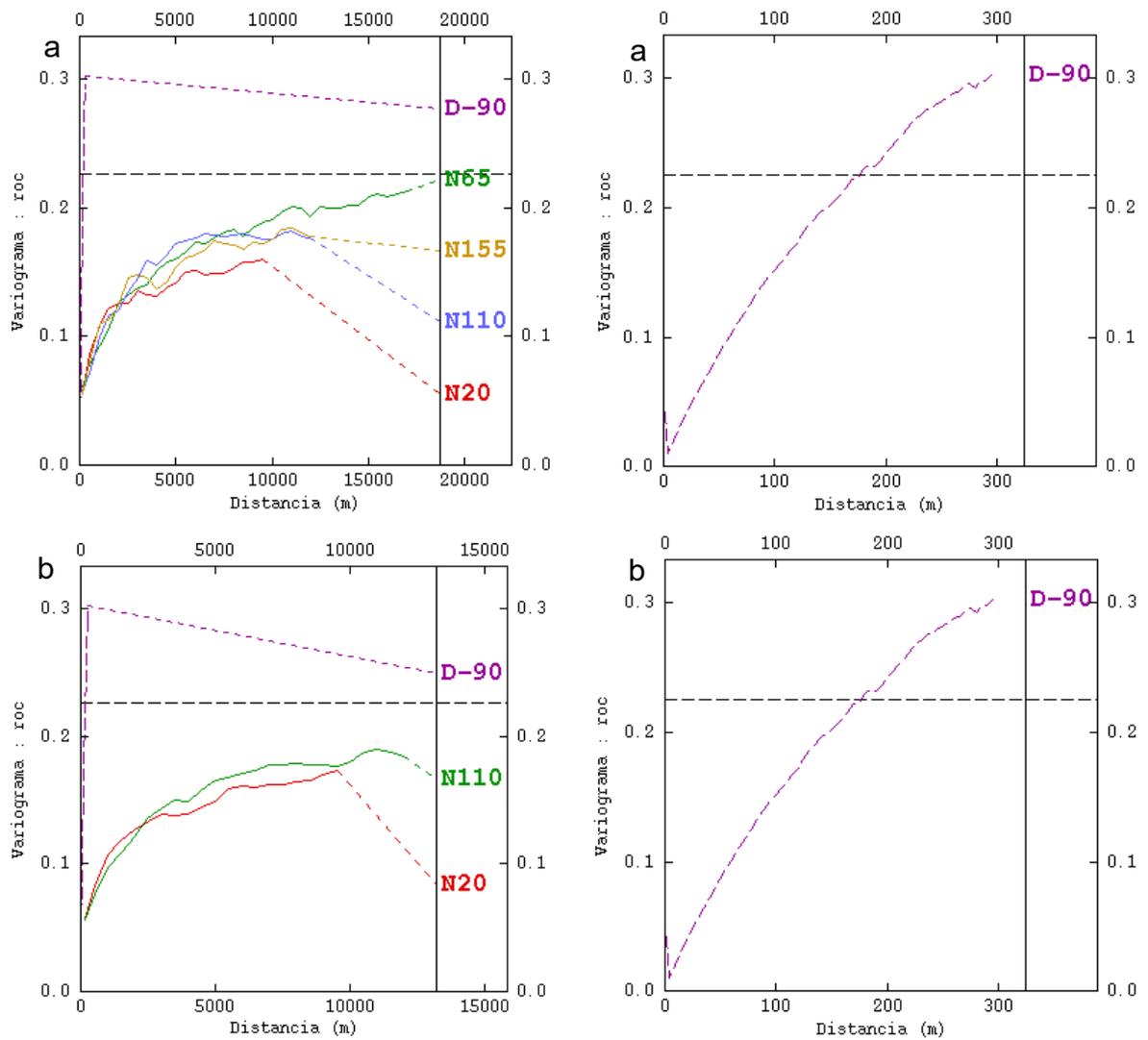


Figura 82 – (a) Variograma experimental para a variável indicadora rocha calculada para 5 direções e (b) recalculada para 3 direções.

Apresenta-se na Figura 83 o variograma experimental e respectivo modelo ajustado de acordo com os parâmetros da Tabela 38.

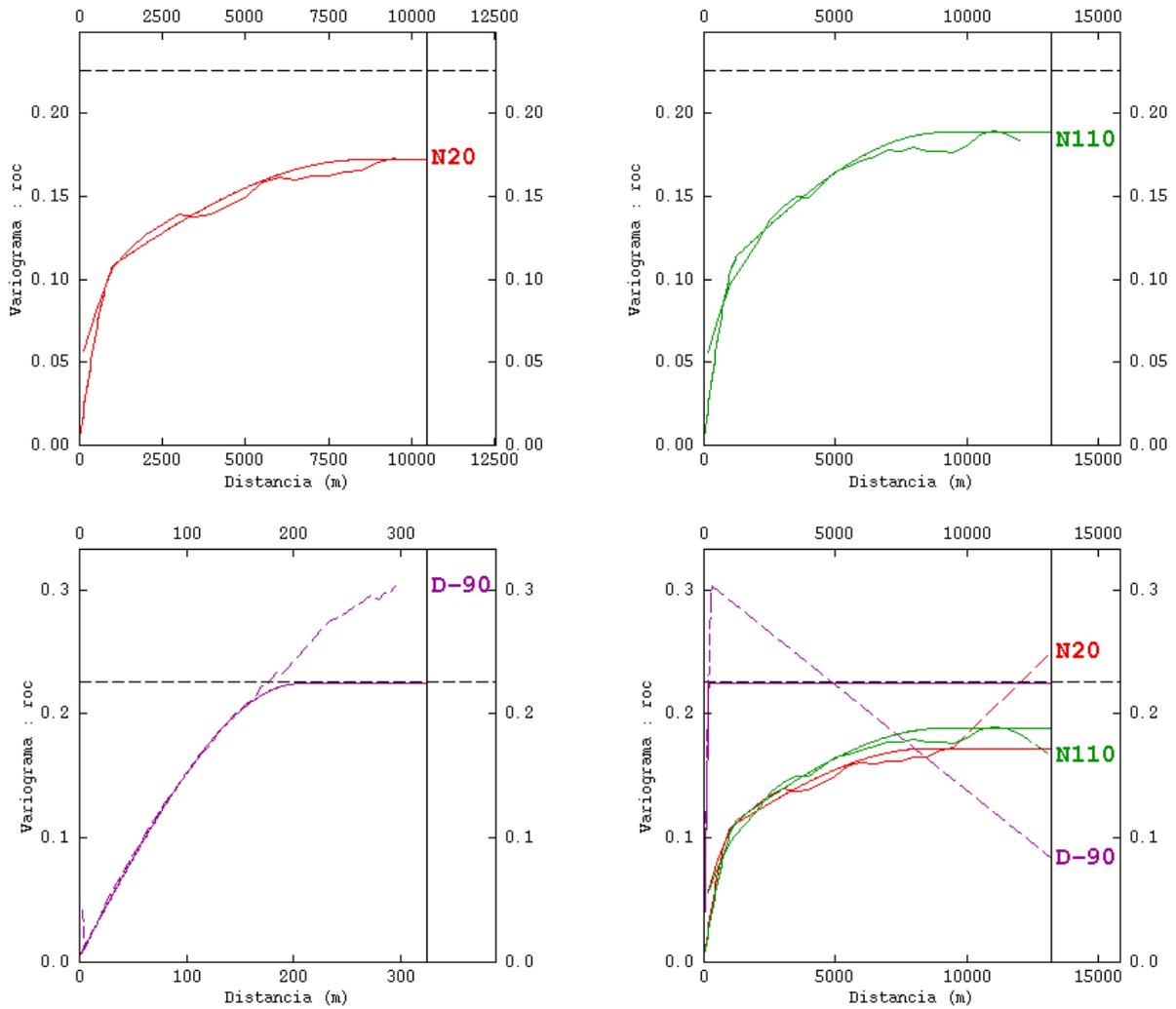


Figura 83 – Modelo de variograma para a variável indicadora rocha.

Tabela 38 – Parâmetros utilizados para o ajuste do modelo teórico de variograma para a variável indicadora rocha.

Modelo de variograma para a variável indicadora rocha			
		0,005	
C0		0,005	
Tipo		Esférico	
Estrutura	1	2	3
C	0,0900	0,0770	0,0164
amax	1.300	9.100	9.100
amix	1.100	8.500	∞
avert	206	206	206
Rotação	N110	N110	N110

O modelo de variograma foi ajustado com quatro estruturas, sendo: C0 (efeito pepita igual a 0,005), C1 (modelo esférico rotacionado em 110° com amplitude de 1.300 m na direção 110°, de 1.100 m na direção 20° e de 206 na direção vertical e patamar em 0,09), C2 (modelo esférico rotacionado em 110° com amplitude de 9.100 m na direção 110°, de 8.500 m na direção 20° e de 206 na direção vertical e patamar em 0,077) e C3 (modelo esférico rotacionado em 110° com amplitude de 9.100 m na direção 110°, infinita na direção 20° e de 206 na direção vertical e patamar em 0,0164). As estruturas C1, C2 e C3 foram rotacionadas na direção de 110° pois esta é a direção mais contínua, com maior amplitude e mais bem estruturada.

Definidos os parâmetros do modelo, foi realizada a krigagem ordinária da variável indicadora sedimento, adotando os parâmetros de vizinhança descritos na Tabela 39 (mesmos parâmetros utilizados na krigagem do topo rochoso em um domínio). O resultado da krigagem está apresentado na Figura 84.

Tabela 39 – Parâmetros de vizinhança utilizado para a krigagem.

Parâmetros de vizinhança	
Número Mínimo de Amostras	2
Número de Setores Angulares Horizontais	4
Raio de busca máximo para a direção D90°	206 m
Raio de busca máximo para a direção 20°	8.500 m
Raio de busca máximo para a direção 110°	9.100 m
Número Ótimo de Amostras por Setor	5

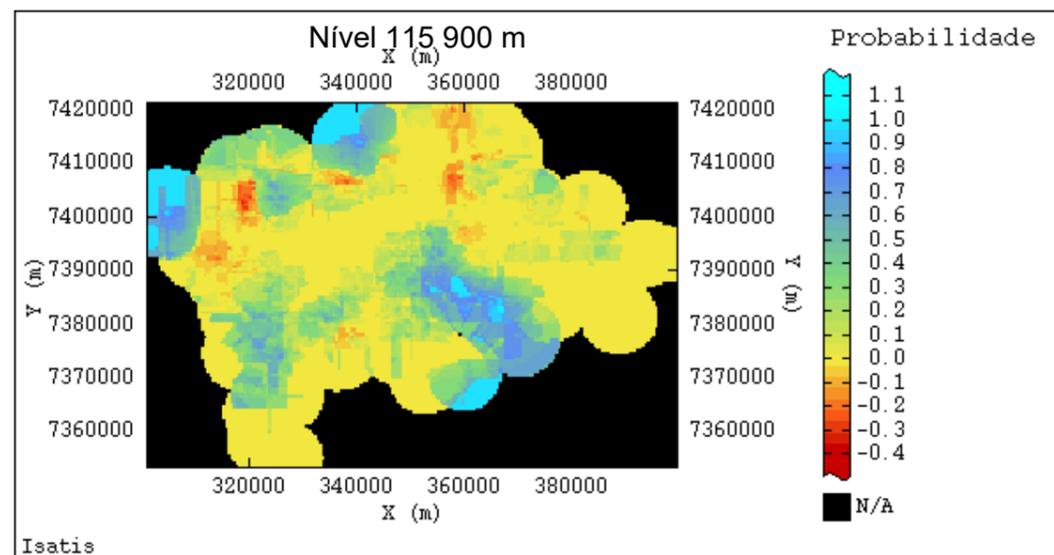
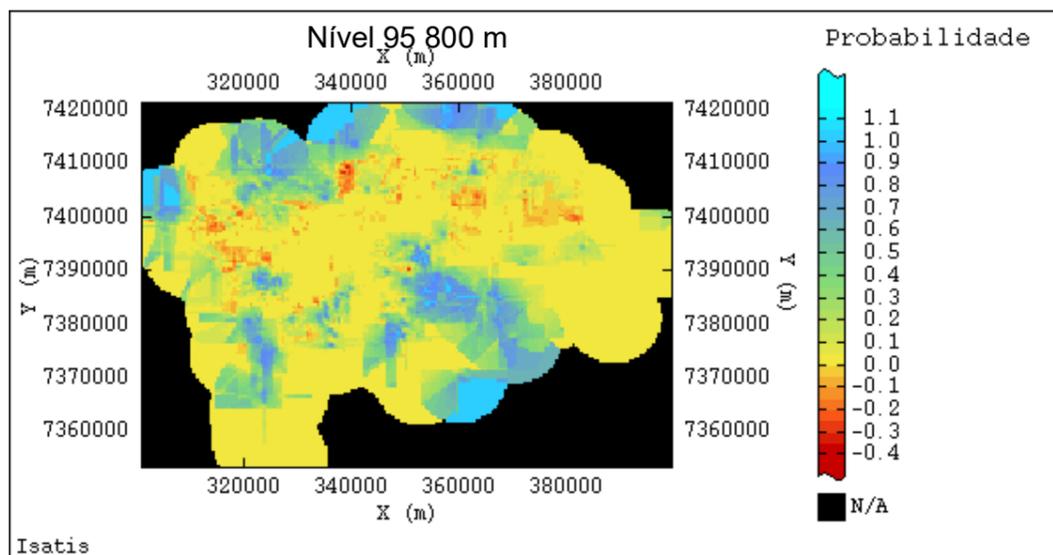
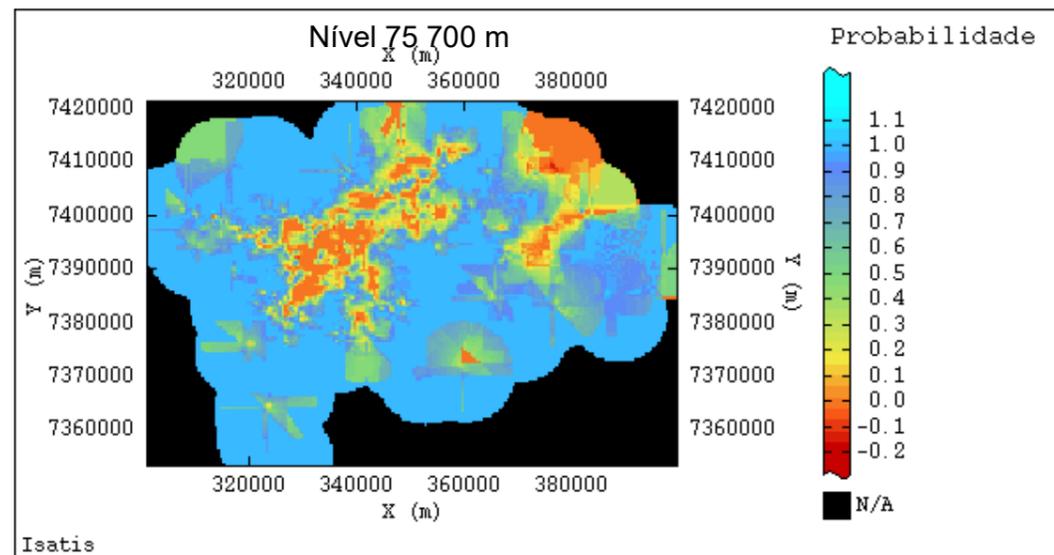
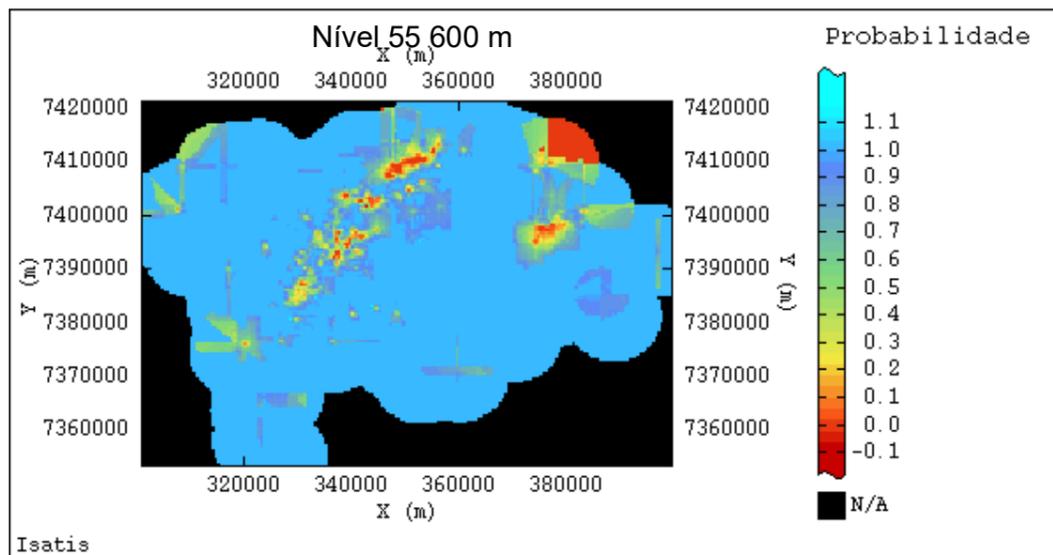
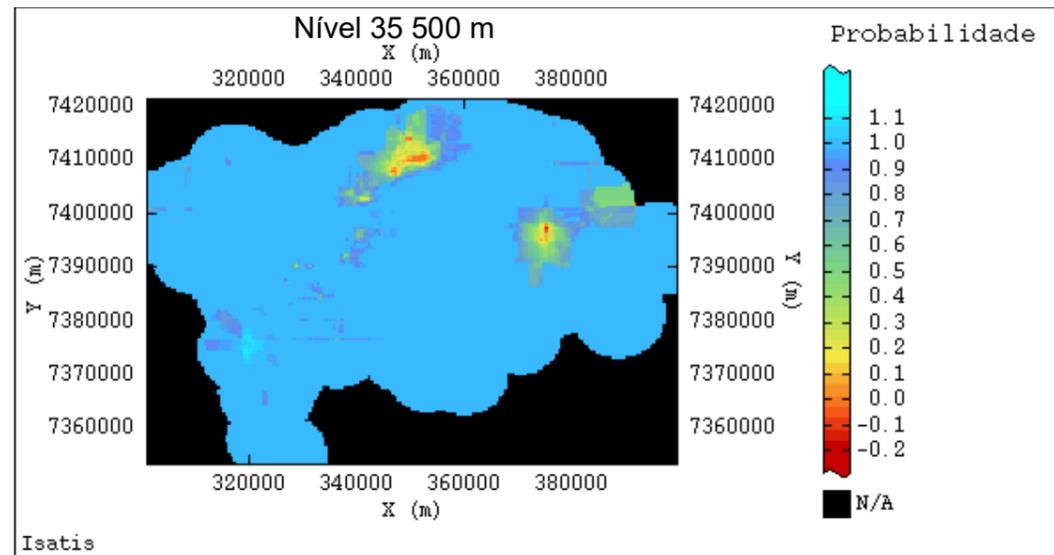
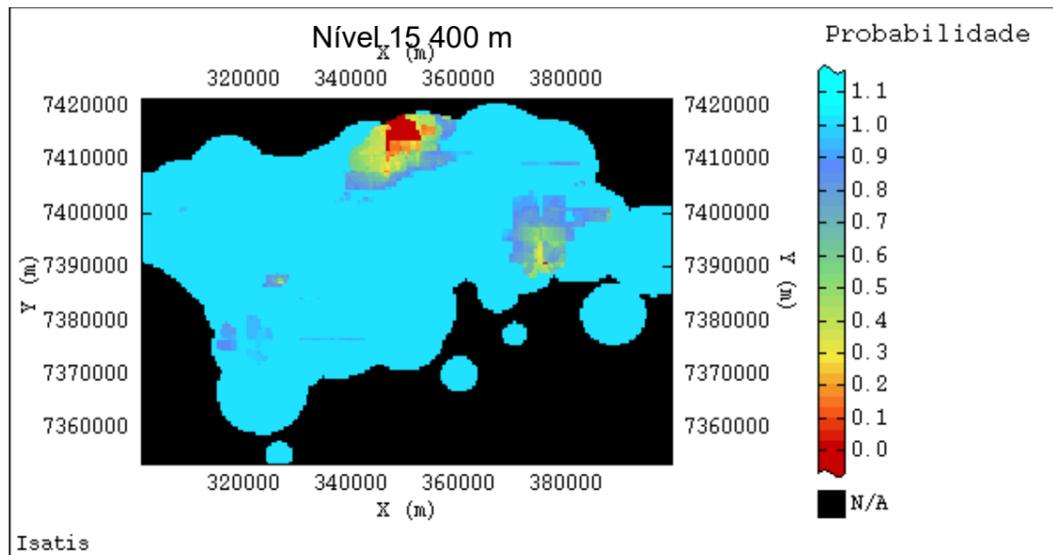


Figura 84 – Resultado da krigagem da variável indicadora rocha, níveis 15 (cota 400), 35 (cota 500), 55 (cota 600), 75 (cota 700), 95 (cota 800) e 115 (cota 900), que representa a probabilidade de rochas ocorrerem ou não em determinado ponto da bacia.

5.4 Geoestatística de Dados Geotécnicos

Foram analisadas 112 sondagens (a percussão, rotativas e mistas), realizadas para a construção da Linha 4 Amarela do metrô de São Paulo (Figura 85).

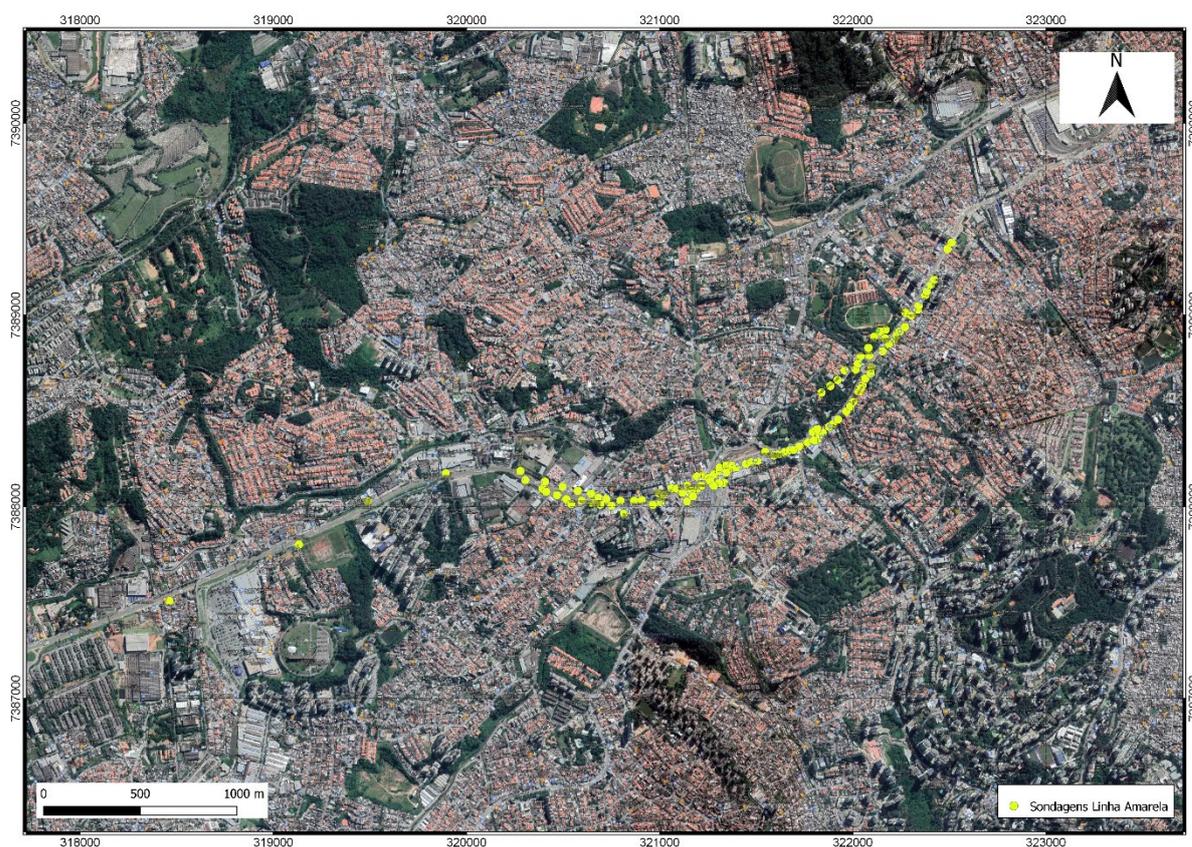


Figura 85 – Sondagens Linha 4 Amarela do metrô de São Paulo Fonte: Google Earth.

Serão descritas a seguir as análises estatísticas, geoestatísticas e as krigagens ordinárias realizadas para as variáveis SPT (resultados do ensaio de penetração, em solo), RQD (resultados da porcentagem de fragmentos maiores do que 10 cm do maciço rochoso) e recuperação (porcentagem de rocha recuperada durante a sondagem), além da análise estatística, geoestatística e a krigagem ordinária das variáveis indicadoras argila e areia.

As análises foram realizadas em 2D, utilizando o plano X^AZ (plano vertical), obtendo-se como resultados das krigagens os perfis estimados dos valores de SPT, recuperação, RQD e de probabilidade de ocorrência de areia ou argila.

A malha utilizada nessa parte do trabalho foi de 25 metros na horizontal e 1 metro na vertical.

5.4.1 SPT (*Standard Penetration Test*)

O histograma de 1.811 ensaios SPT (*Standard Penetration Test*) (Figura 86) apresenta assimetria negativa truncada a direita, com valores de SPT que variam entre 0 e 60, com média de 29,68 e desvio padrão de 19,60.

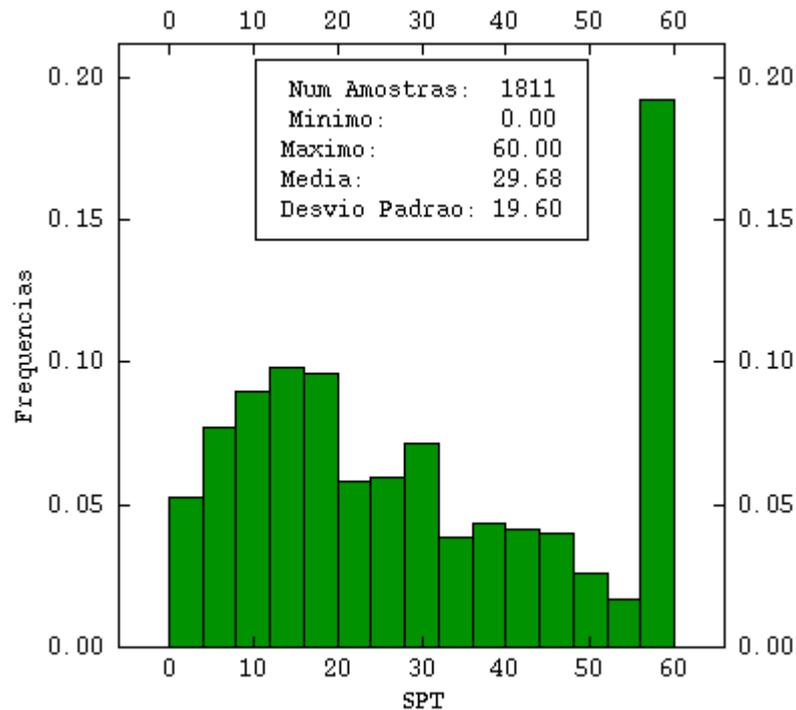


Figura 86 – Histograma da variável SPT.

Apresenta-se na Figura 87 o mapa base com o domínio no qual foi calculado o campo geométrico para as quatro direções durante a análise exploratória, as distâncias utilizadas foram 25 metros para a direção 0°, 40 metros para as direções 45° e 135° e 900 metros para a direção 90°.

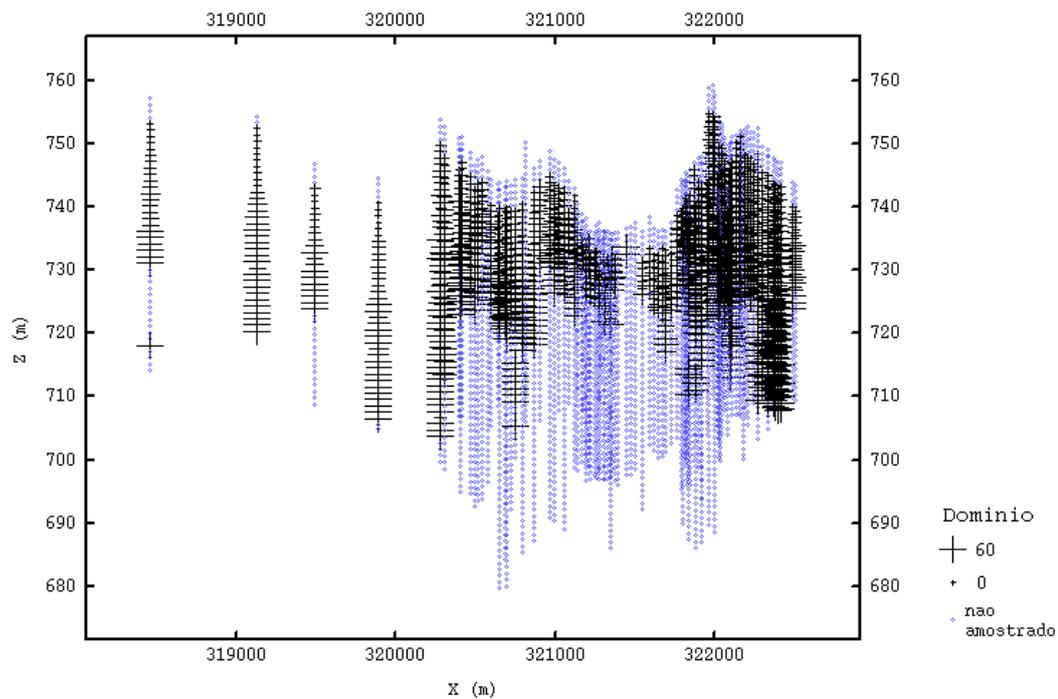


Figura 87 – Mapa base da variável SPT.

O variograma experimental foi calculado com os parâmetros apresentados na Tabela 40, dadas as características da malha de amostragem, não é possível calcular o variograma nas direções de 45° e 135°, por isso o variograma foi calculado considerando apenas as direções de 0° e 90°.

Tabela 40 – Parâmetros utilizados para o cálculo do variograma experimental da variável SPT.

Direção	Campo Geométrico (m)	Comprimento de Passo (m)	Número de Passos
0°	25	1	25
45°	400	20	20
90°	450	25	18
135°	400	20	20

Observando o resultado obtido na Figura 88 interpretou-se anisotropia mista para o domínio.

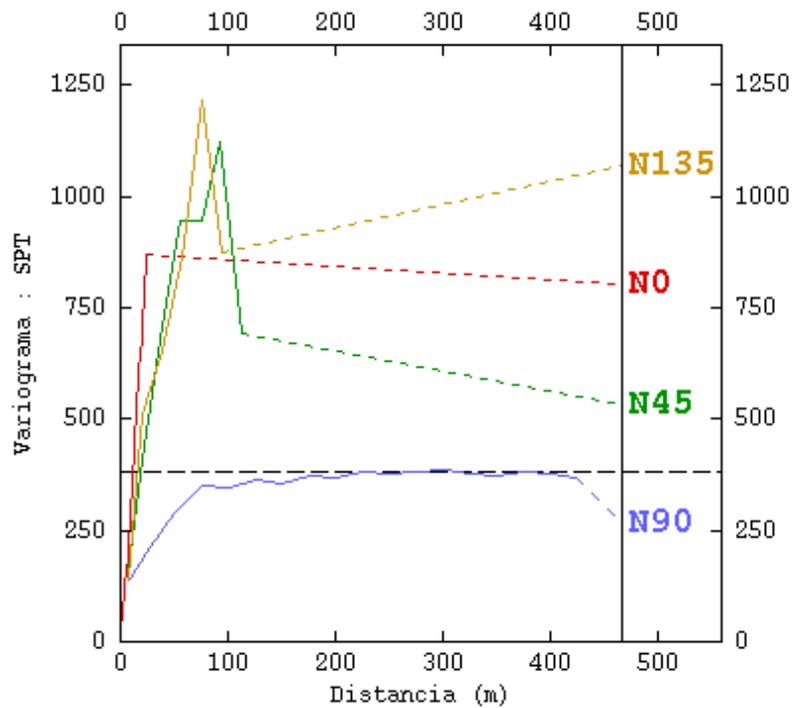


Figura 88 – Variograma experimental da variável SPT.

Apresenta-se na Figura 89 o variograma experimental e respectivo modelo ajustado com os parâmetros mostrados na Tabela 41. O variograma na direção 0° se mostrou não estacionário, por isso, para essa direção, o patamar do modelo teórico de variograma foi forçado ao valor da variância a priori dos dados.

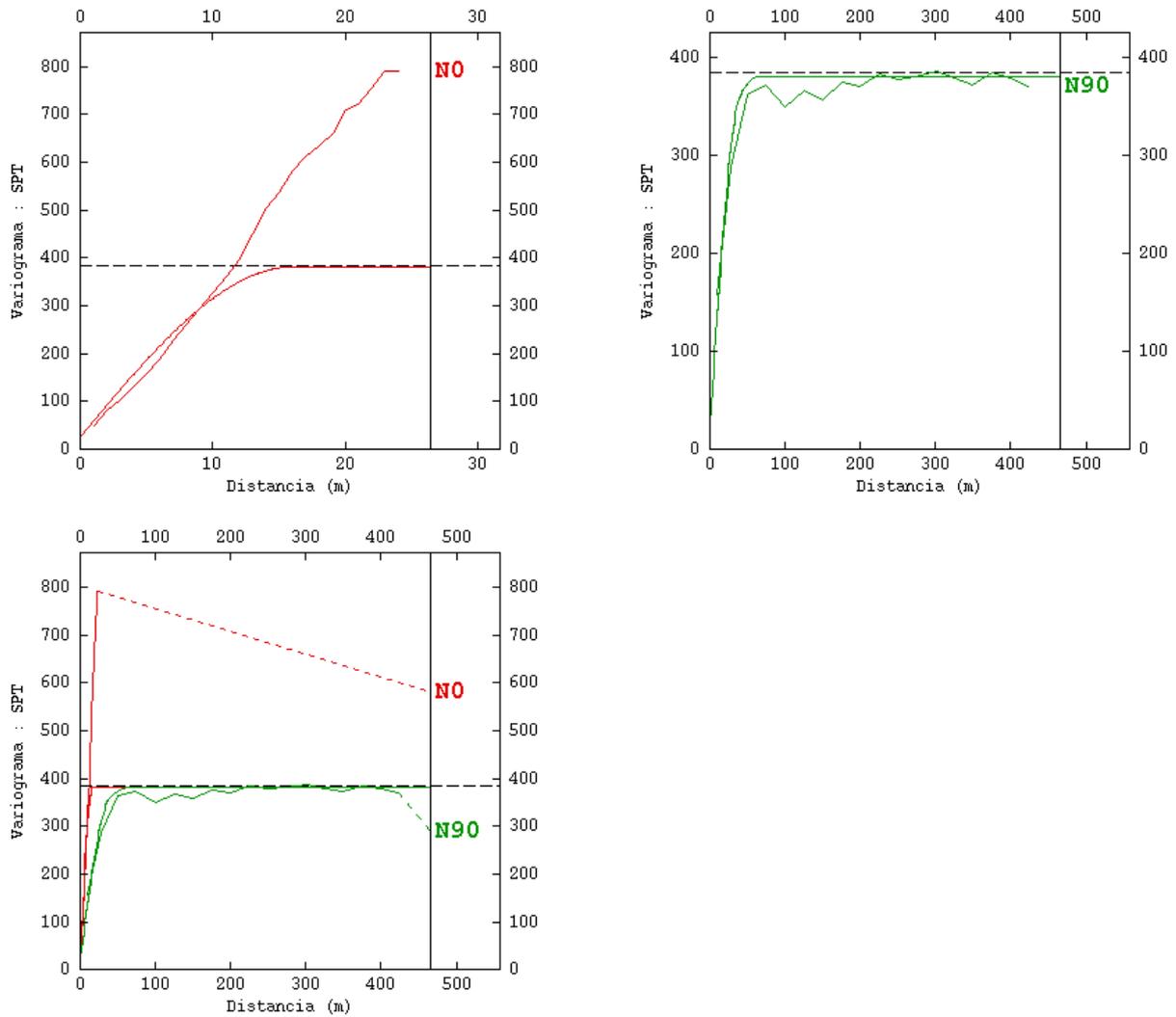


Figura 89 – Modelo de variograma para a variável SPT.

Tabela 41 – Parâmetros utilizados para o ajuste do modelo teórico de variograma para a variável SPT.
Modelo de variograma para a variável SPT

C0		25	
Tipo		Esférico	
Estrutura	1		2
C	250		106
a _{max}	40		65
a _{min}	16		16
Rotação	N90		N90

O modelo de variograma foi ajustado com três estruturas, sendo: C0 (efeito pepita igual a 25), C1 (modelo esférico rotacionado em 90° com amplitude de 40 m na direção 90° e de 16 m na direção 0° e patamar em 250) e C2 (modelo esférico rotacionado em 90° com amplitude de 65 m na direção 90° e de 16 m na direção 0° e

patamar em 106). As estruturas C1 e C2 foram rotacionadas na direção de 90° pois esta é a direção mais contínua, com maior amplitude.

Após o ajuste do modelo de variograma foi feita validação cruzada. Foi adotada a vizinhança dividida em 4 setores, com número ótimo de amostras por setor igual a 4 e número mínimo de amostras igual a 1 (Tabela 42), obtendo-se correlação de 0,906 (Figura 90) e número de pontos estimados igual a 1.809.

Tabela 42 – Parâmetros de vizinhança utilizado para a variável SPT.

Parâmetros de vizinhança	
Número Mínimo de Amostras	2
Número de Setores Angulares Horizontais	4
Raio de busca máximo para a direção 0°	16 m
Raio de busca máximo para a direção 90°	65 m
Número Ótimo de Amostras por Setor	4

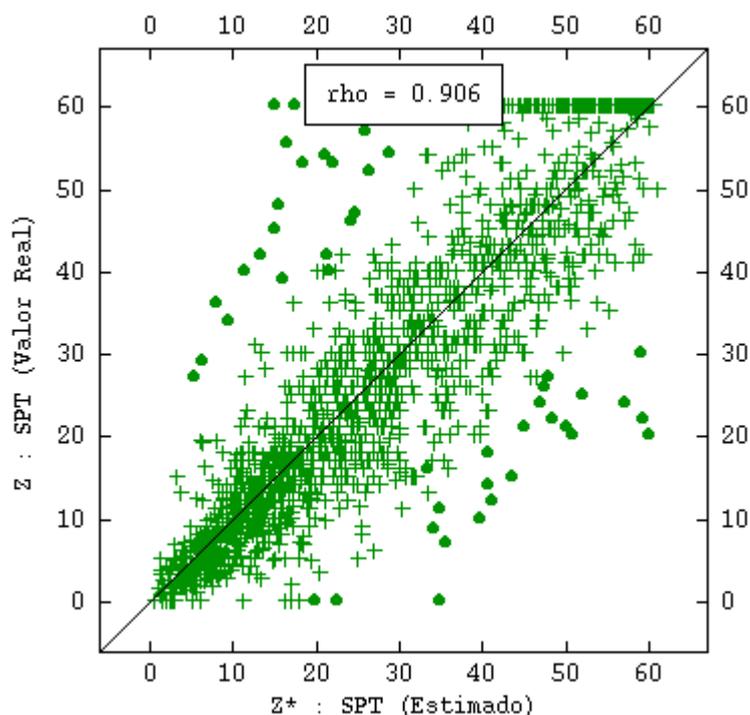


Figura 90 – Resultado da validação cruzada: coeficiente de correlação igual a 0.906.

Definidos os parâmetros do modelo e de vizinhança foi realizada a krigagem ordinária da variável SPT, cujo resultado está representado na Figura 91.

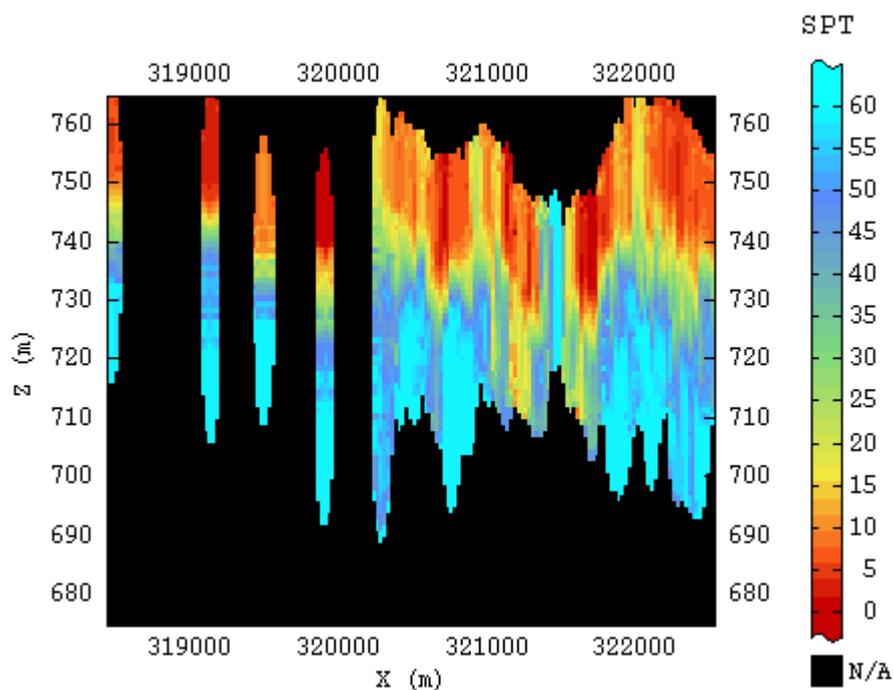


Figura 91 – Resultado da krigagem da variável SPT.

Observa-se, conforme esperado, que os valores de SPT aumentam com a profundidade.

Pode ser observado também uma “anomalia” próximo a coordenada X 321.450, onde foram estimados valores altos de SPT em cotas elevadas. A explicação para este valor é, que no local, a topografia é mais baixa que nos arredores e, com isso, a sondagem encontrou rocha com menor espessura de solo, já duro/compacto por se tratar de solo de alteração de rocha, então os parâmetros de vizinhança extrapolarão esse valor alto de SPT para cotas topográficas mais elevadas.

Podem ser observados também valores baixos de SPT próximo às coordenadas X 321.250 e 321.625 em cotas menores. A explicação para estes valores é que nesses pontos as sondagens perfuraram aluvião, que possui SPT mais baixo por natureza.

5.4.3 Recuperação e RQD (*Rock Quality Designation*)

Os histogramas dos resultados da porcentagem de recuperação da rocha durante as perfurações e de RQD (Figura 92) apresentam assimetria negativa, com valores que variam entre 0 e 100, com média de 91,92 para recuperação (rec) e de 74,78 para RQD e desvios padrão de 16,34 e de 27,48, respectivamente.

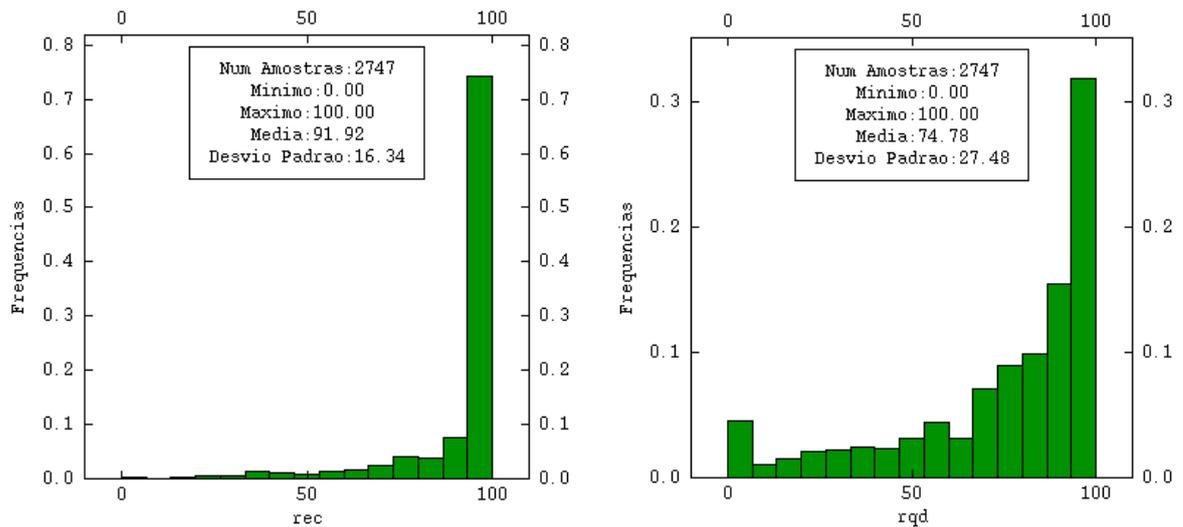


Figura 92 – Histogramas das variáveis recuperação (rec) e RQD (rqd).

Apresenta-se na Figura 93 o mapa base com o domínio no qual foi calculado o campo geométrico para as quatro direções durante a análise exploratória, as distâncias utilizadas foram 29 metros para a direção 0°, 40 metros para as direções 45° e 135° e 375 metros para a direção 90°.

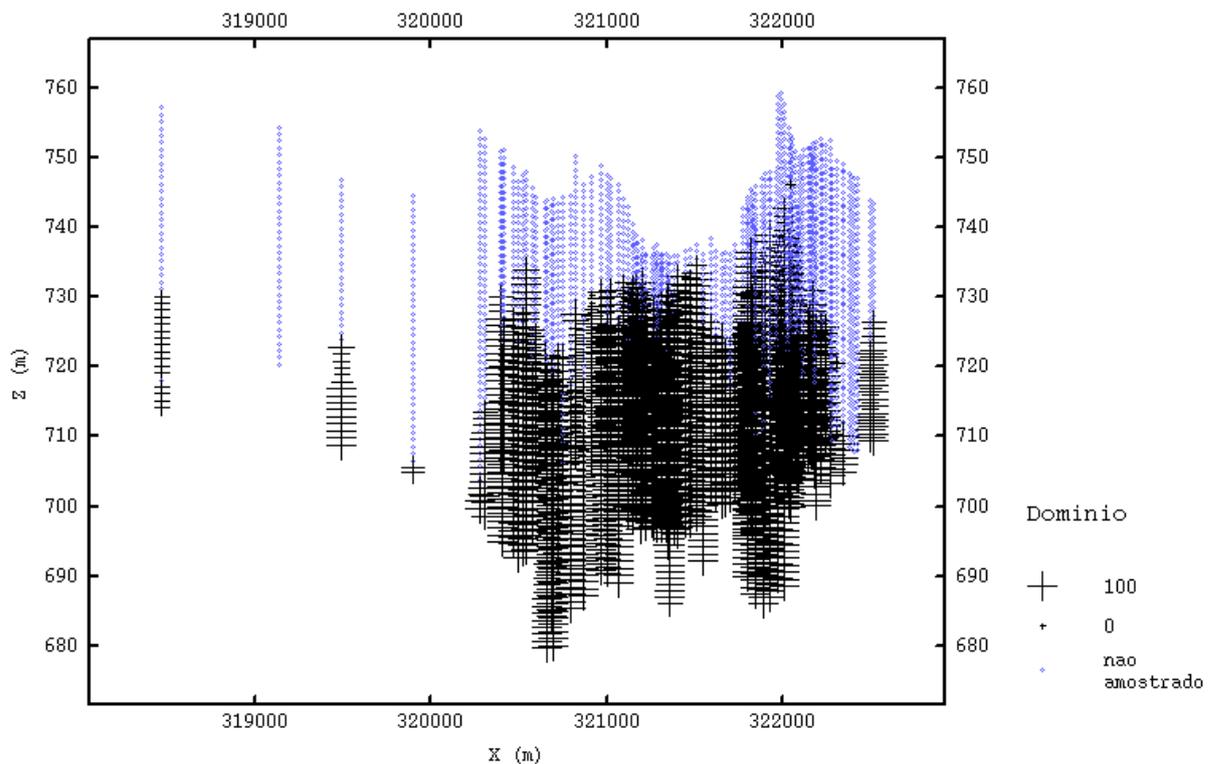


Figura 93 – Domínio das variáveis recuperação de RQD.

Os variogramas experimentais foram calculados com os parâmetros apresentados na Tabela 43 e o gráfico na Figura 94.

Tabela 43 – Parâmetros utilizados para o cálculo do variograma experimental das variáveis recuperação e RQD.

Direção	Campo Geométrico (m)	Comprimento de Passo (m)	Número de Passos para rec	Número de Passos para rqd
0°	29	1	29	20
45°	400	20	7	7
90°	375	25	15	11
135°	400	20	7	7

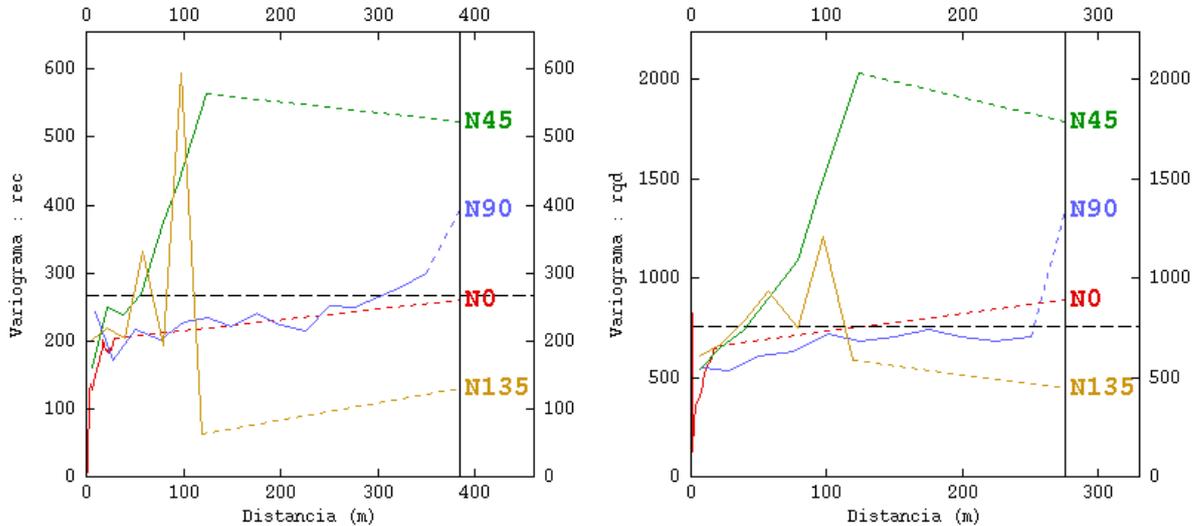


Figura 94 – Variogramas experimentais das variáveis recuperação e RQD.

Observando o variograma experimental da Figura 94, reconhece-se a anisotropia mista. Como o variograma da direção 90° é o mais bem estruturado, optou-se por usar as direções 0° e 90° para o ajuste do modelo teórico de variograma.

Apresentam-se nas Figuras 95 (rec) e 96 (RQD) os variogramas experimentais e respectivos modelos ajustados. Os parâmetros utilizados para o ajuste encontram-se nas Tabelas 44 (rec) e 45 (RQD):

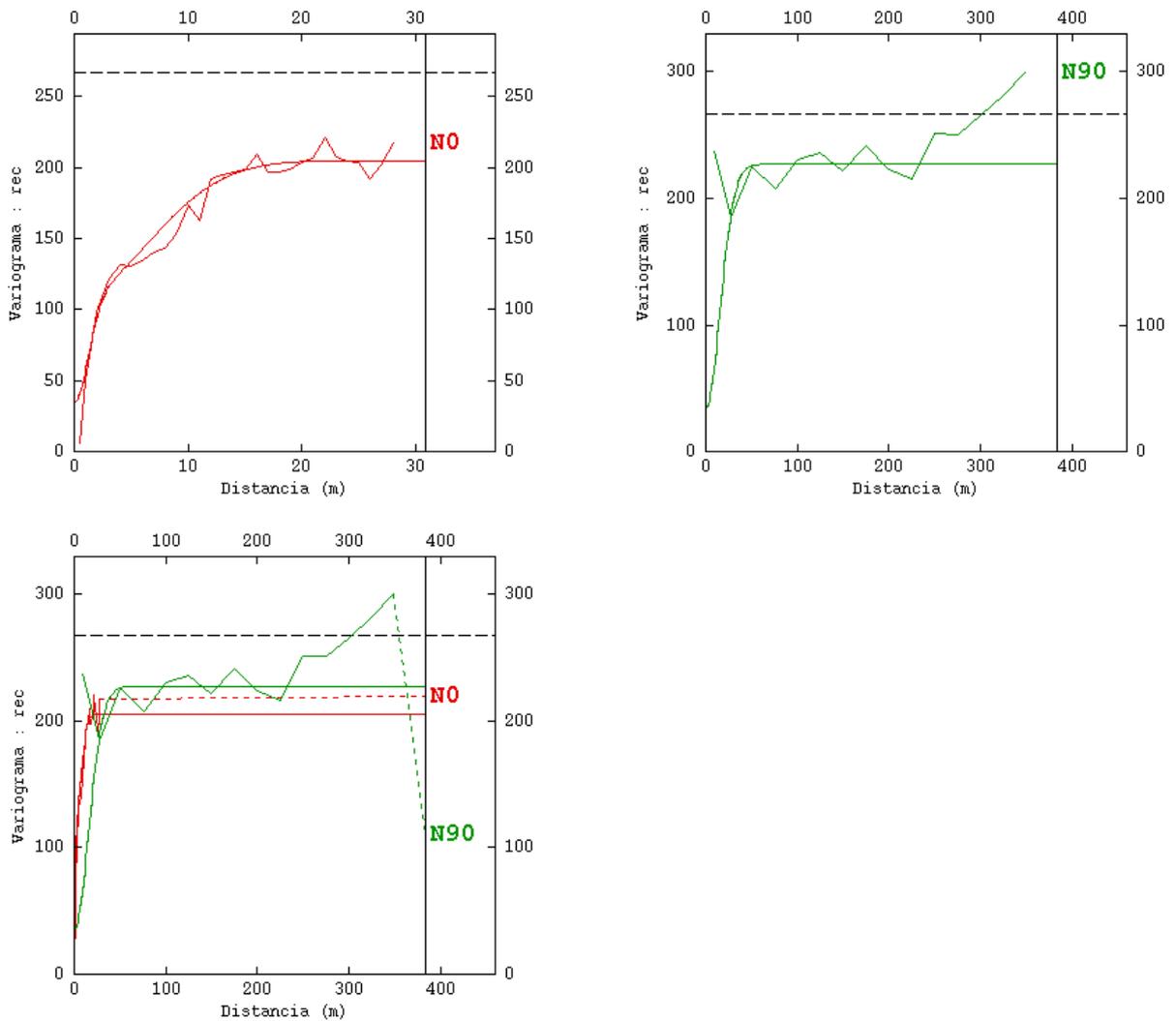


Figura 95 – Modelo teórico de variograma para a variável recuperação.

Tabela 44 – Parâmetros utilizados para o ajuste do modelo teórico de variograma para a variável recuperação.

Modelo de variograma para a variável recuperação			
C0		35	
Tipo		Gaussiano	
Estrutura	1	2	3
C	75	95	22
a _{max}	35	40	40
a _{min}	3	16	∞
Rotação	N90	N90	N90

O modelo teórico de variograma para recuperação foi ajustado com quatro estruturas, sendo: C0 (efeito pepita igual a 35), C1 (modelo gaussiano rotacionado em 90° com amplitude de 35 m na direção 90° e de 3 m na direção 0° e patamar em 75), C2 (modelo gaussiano rotacionado em 90° com amplitude de 40 m na direção 90° e

de 16 m na direção 0° e patamar em 95) e C3 (modelo gaussiano rotacionado em 90° com amplitude de 40 m na direção 90° e infinita na direção 0° e patamar em 22). As estruturas C1, C2 e C3 foram rotacionadas na direção de 90° pois esta é a direção mais contínua, com maior amplitude.

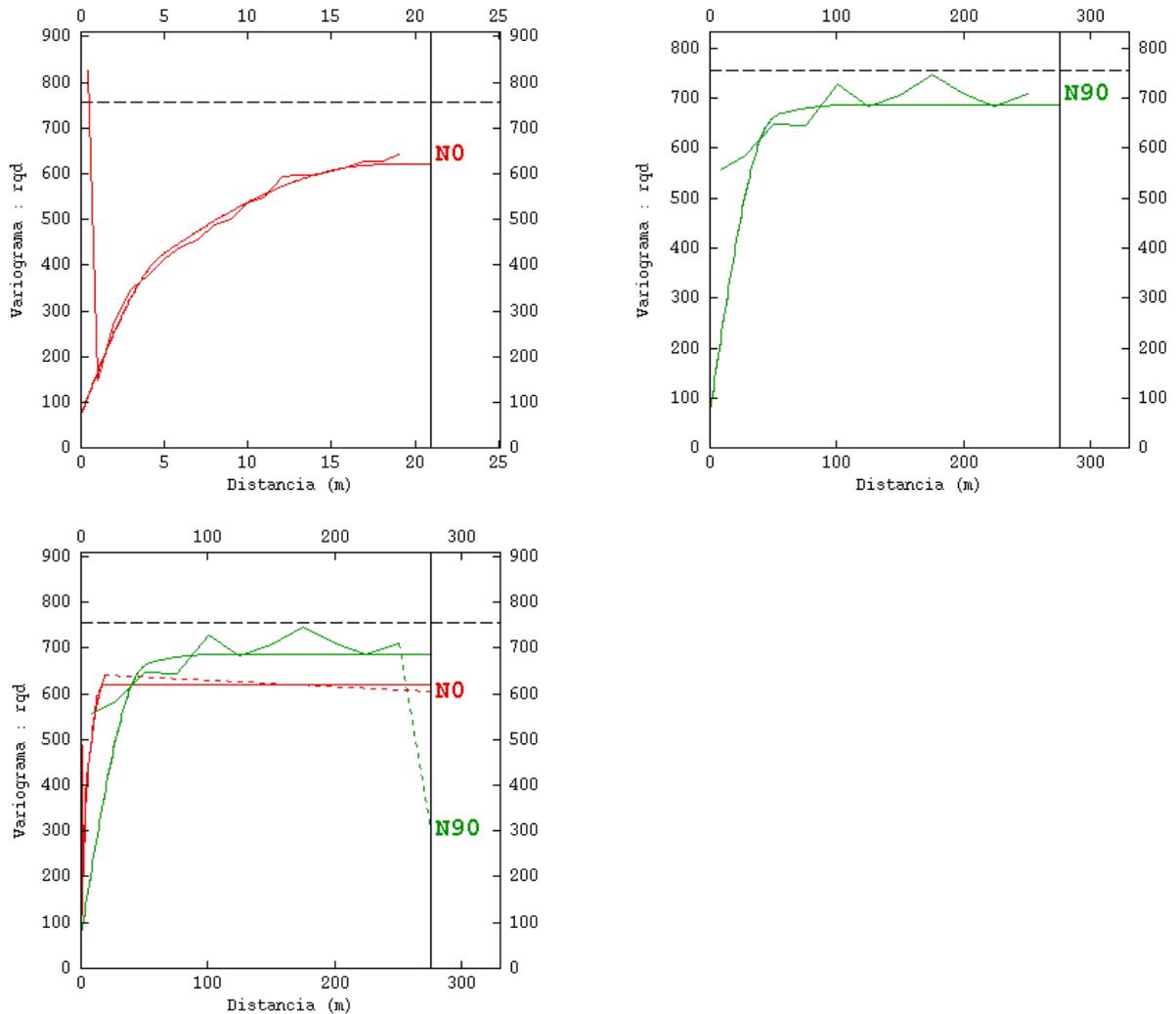


Figura 96 – Modelo de variograma para a variável RQD.

Tabela 45 – Parâmetros utilizados para o ajuste do modelo teórico de variograma para a variável RQD.
Modelo de variograma para a variável RQD

C0		75	
Tipo		Esférico	
Estrutura	1	2	3
C	220	325	65
a _{max}	45	55	100
a _{min}	5	18	∞
Rotação	N90	N90	N90

O modelo teórico de variograma para RQD foi ajustado com quatro estruturas, sendo: C0 (efeito pepita igual a 75), C1 (modelo esférico rotacionado em 90° com amplitude de 45 m na direção 90° e de 5 m na direção 0° e patamar em 220), C2 (modelo esférico rotacionado em 90° com amplitude de 55 m na direção 90° e de 18 m na direção 0° e patamar em 45) e C3 (modelo esférico rotacionado em 90° com amplitude de 100 m na direção 90° e infinita na direção 0° e patamar em 65). As estruturas C1, C2 e C3 foram rotacionadas na direção de 90° pois esta é a direção mais contínua, com maior amplitude.

Após os ajustes dos modelos teóricos de variograma, foram realizadas validações cruzadas para cada variável. Foram adotados como parâmetros de vizinhança os parâmetros descritos na Tabela 46, obtendo-se correlação de 0,859 para recuperação e de 0,852 para RQD (Figura 97), e de número de pontos estimados igual a 2.747 para ambas as variáveis.

Tabela 46 – Parâmetros de vizinhança utilizados para as variáveis recuperação e RQD.

Parâmetros de vizinhança		
	Recuperação	RQD
Número Mínimo de Amostras	1	2
Número de Setores Angulares Horizontais	2	4
Raio de busca máximo para a direção 0°	16 m	18 m
Raio de busca máximo para a direção 90°	40 m	50 m
Número Ótimo de Amostras por Setor	1	1

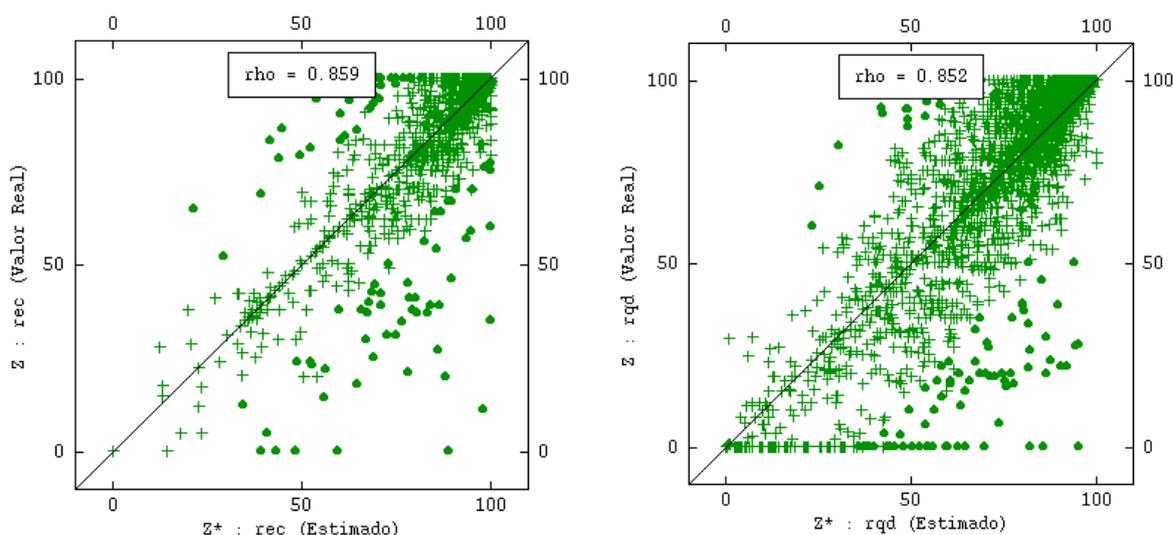


Figura 97 – Resultado da validação cruzada para a variável recuperação (coeficiente de correlação igual a 0.859) e RQD (coeficiente de correlação igual a 0.852).

Definidos os parâmetros do modelo teórico de variograma e de vizinhança, foram realizadas as estimativas por krigagem ordinária para ambas as variáveis, os resultados podem ser vistos nas Figuras 98 (recuperação) e 99 (RQD).

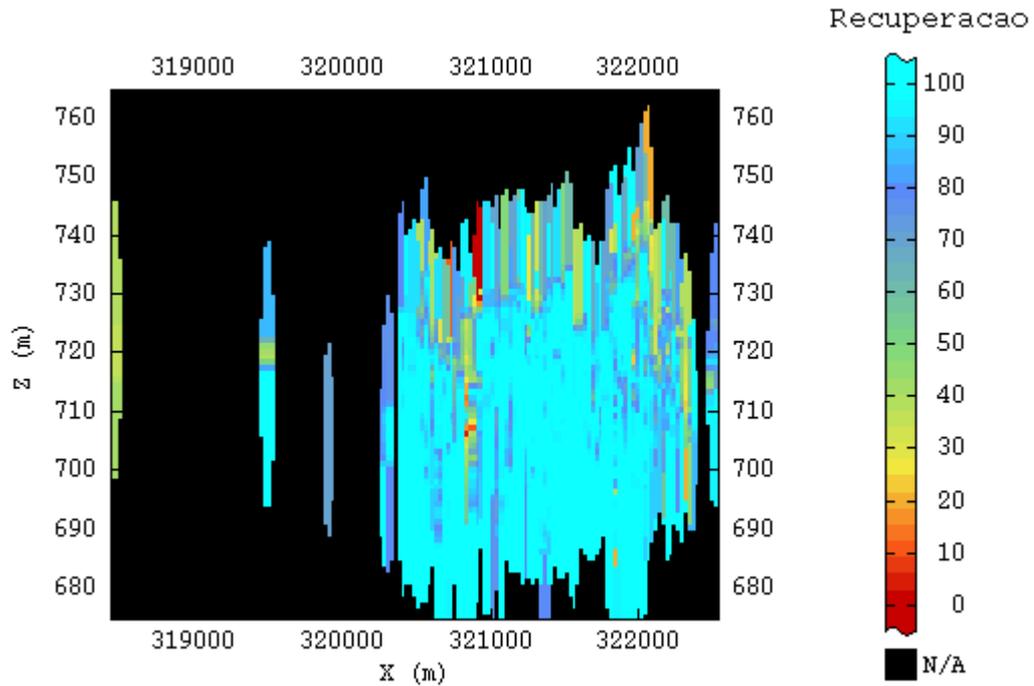


Figura 98 – Resultado da krigagem da variável recuperação.

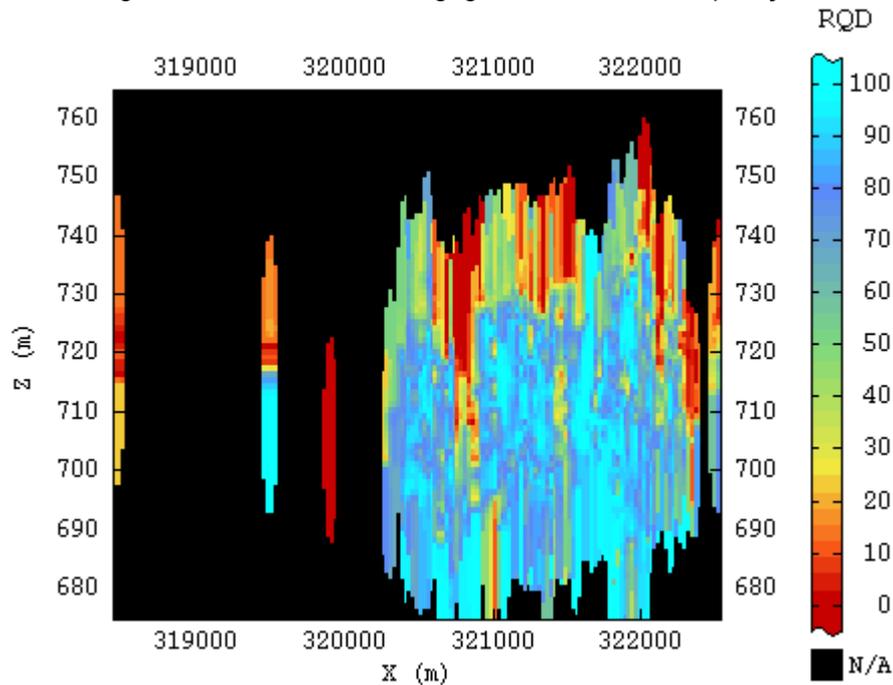


Figura 99 – Resultado da krigagem da variável RQD.

Observa-se, conforme esperado, que os valores de recuperação e RQD aumentam com a profundidade.

Pode ser observado também que, somente os valores de recuperação não são suficientes para avaliar a qualidade de um maciço, visto que existem trechos com valores altos de recuperação, mas onde os valores de RQD são baixos - de 0 a 25% - que classificariam a qualidade do maciço como muito pobre de acordo com Barton *et al.* (1974).

5.4.2 Variável Indicadora Areia e Argila

Os histogramas das variáveis indicadoras areia e argila evidenciam que 58,85% das 2.243 amostras de solo pertencem a classe das areias, que agrupam areias, areias siltsosas, areias argilosas, siltes arenosos e pedregulhos, e 41,15% das amostras pertencem a classe das argilas, que englobam argilas, argilas siltsosas, argilas arenosas e siltes argilosos.

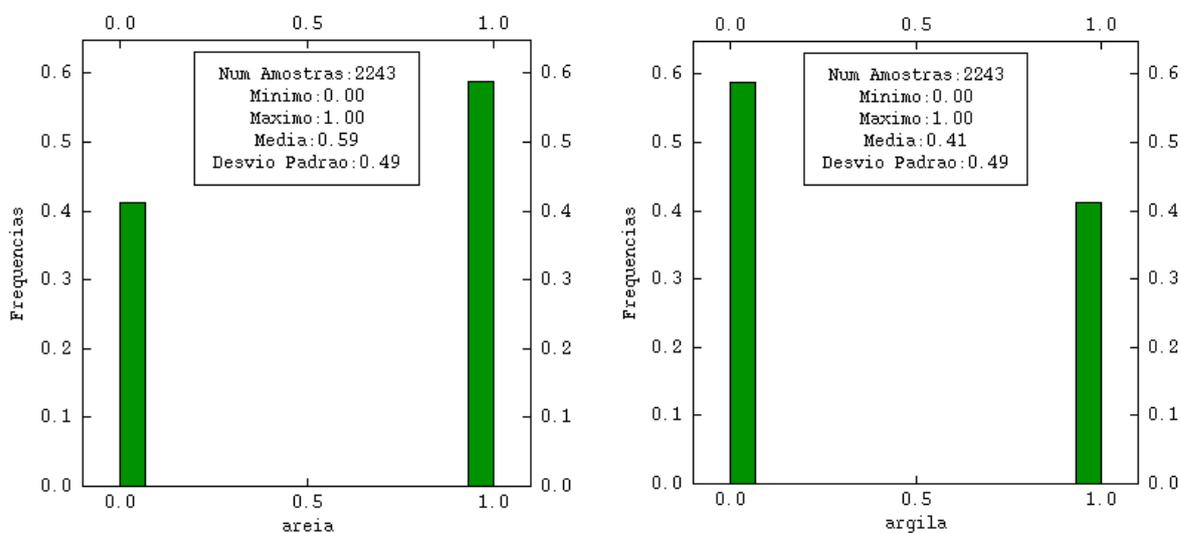


Figura 100 – Histogramas das variáveis indicadoras areia e argila.

Apresenta-se na Figura 101 o mapa base com o domínio no qual foi calculado o campo geométrico para as quatro direções durante a análise exploratória, as distâncias utilizadas foram 18 metros para a direção 0°, 40 metros para as direções 45° e 135° e 450 metros para a direção 90°.

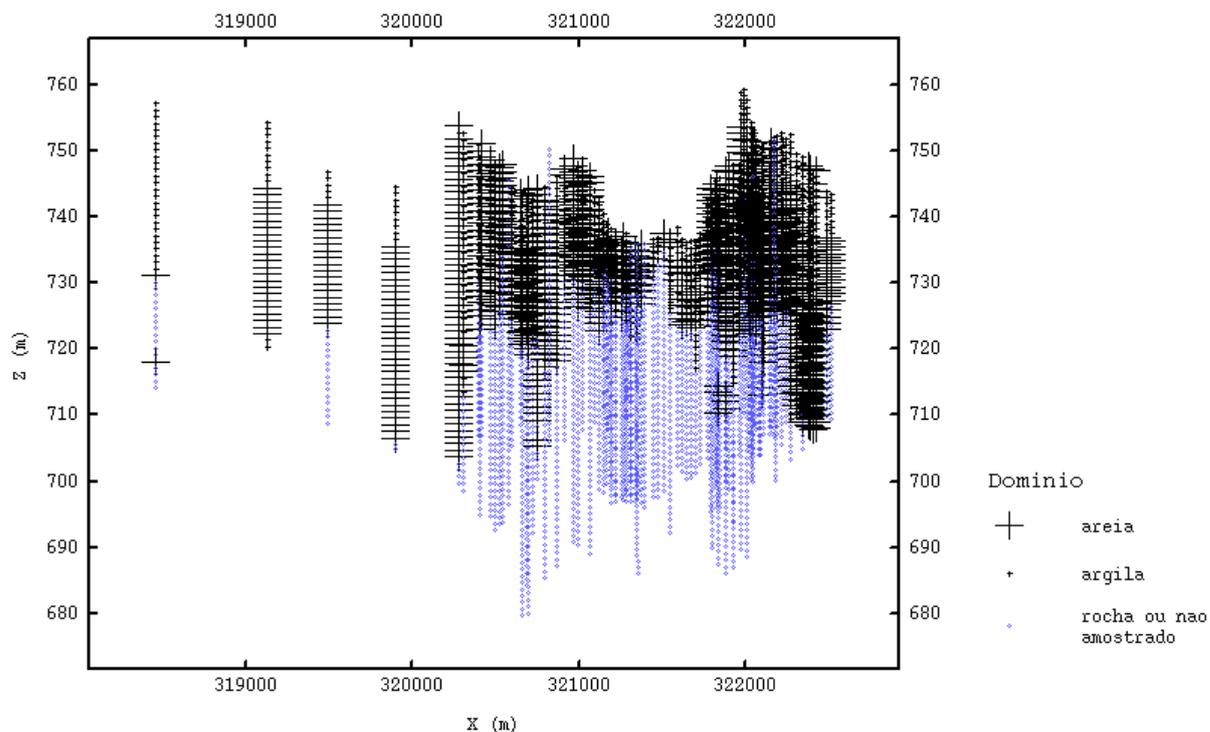


Figura 101 – Domínio das variáveis indicadoras areia e argila.

Os variogramas experimentais foram calculados com os parâmetros apresentados na Tabela 47:

Tabela 47 – Parâmetros utilizados para o cálculo do variograma experimental das variáveis indicadoras areia e argila.

Direção	Campo Geométrico (m)	Comprimento de Passo (m)	Número de Passos
0°	18	1	18
45°	40	20	7
90°	450	25	18
135°	40	20	7

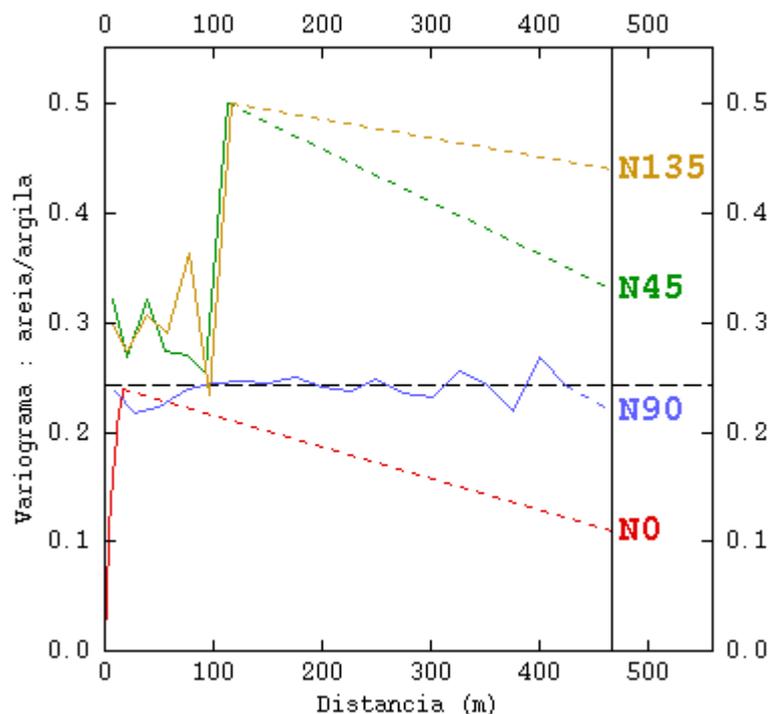


Figura 102 – Variograma experimental das variáveis indicadoras areia e argila.

Observando o variograma experimental apresentado na Figura 102, nota-se que ele apresenta anisotropia mista. A anisotropia aparece mais bem demarcada no par 0° e 90° . Por esse motivo e pela direção 0° ser a mais bem estruturada, foi escolhido o par 0° e 90° para ajuste do modelo teórico de variograma.

Apresenta-se na Figura 103 o variograma experimental e respectivo modelo ajustado. Os parâmetros utilizados para o ajuste encontram-se na Tabela 48.

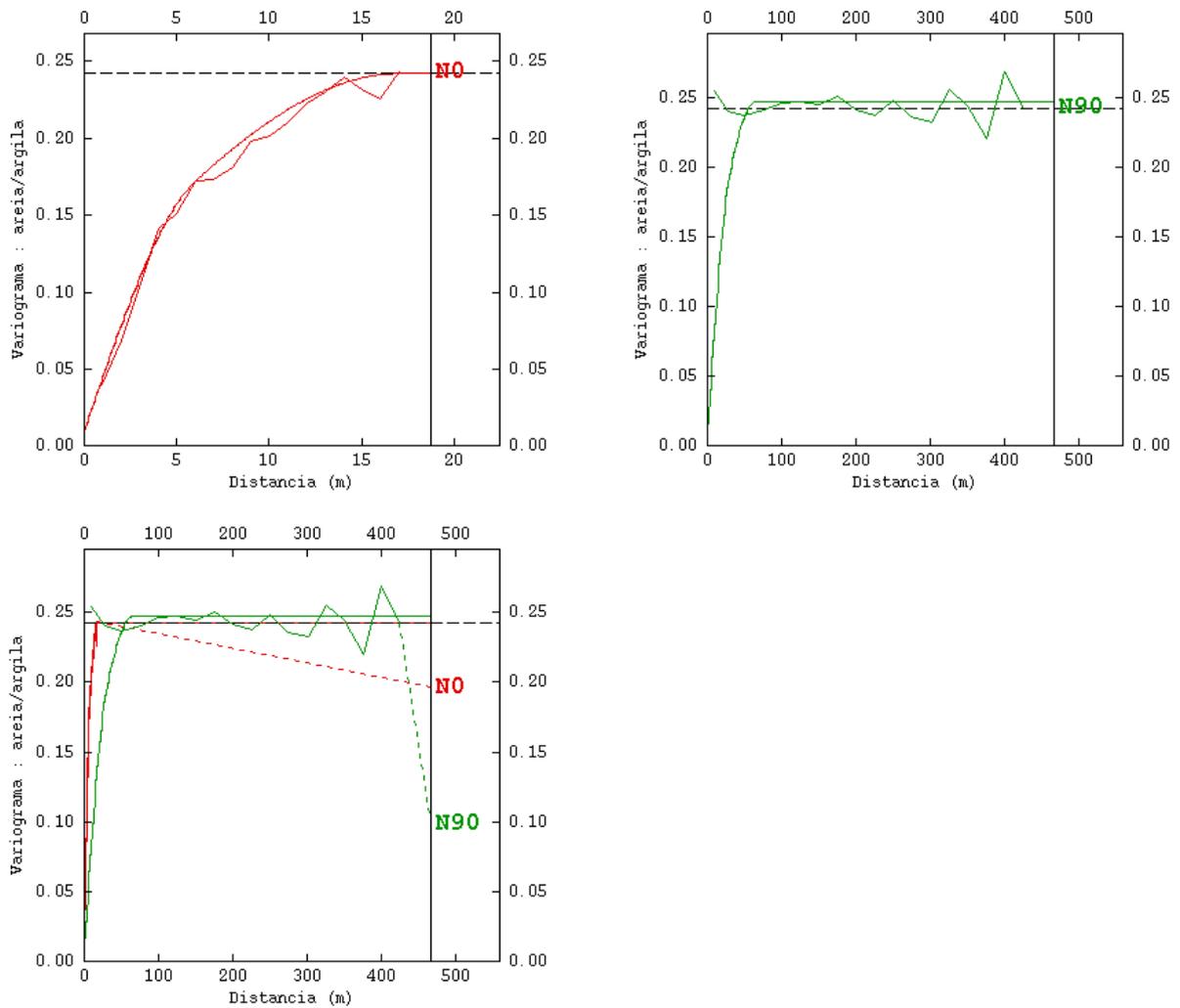


Figura 103 – Modelo de variograma para as variáveis indicadoras areia e argila.

Tabela 48 – Parâmetros utilizados para o ajuste do modelo teórico de variograma para as variáveis indicadoras areia e argila.

Modelo de variograma para a variáveis indicadoras areia e argila			
C0		0,01	
Tipo		Esférico	
Estrutura	1	2	3
C	0,09	0,142	0,05
amax	30	65	65
amin	6	17	∞
Rotação	N90	N90	N90

O modelo de variograma foi ajustado com quatro estruturas, sendo: C0 (efeito pepita igual a 0,01), C1 (modelo esférico rotacionado em 90° com amplitude de 7 m na direção 90° e de 6 m na direção 0° e patamar em 0,09), C2 (modelo esférico rotacionado em 90° com amplitude de 65 m na direção 90° e de 17 m na direção 0° e patamar em 0,142) e C3 (modelo esférico rotacionado em 90° com amplitude de 65 m

na direção 90° e infinita na direção 0° e patamar em 0,05). As estruturas C1, C2 e C3 foram rotacionadas na direção de 90° pois esta é a direção com maior amplitude.

Após os ajustes dos modelos teóricos de variograma, foram escolhidos os parâmetros de vizinhança conforme Tabela 49. Foram adotados os mesmos parâmetros utilizados para a variável SPT.

Tabela 49 – Parâmetros de vizinhança utilizados para as variáveis indicadoras areia e argila.

Parâmetros de vizinhança	
Número Mínimo de Amostras	2
Número de Setores Angulares Horizontais	4
Raio de busca máximo para a direção 0°	17
Raio de busca máximo para a direção 90°	65
Número Ótimo de Amostras por Setor	4

Definidos os parâmetros do modelo e de vizinhança, foram realizadas as estimativas por krigagem ordinária para ambas as variáveis, cujos resultados encontram-se representados nas Figuras 104 (areia) e 105 (argila).

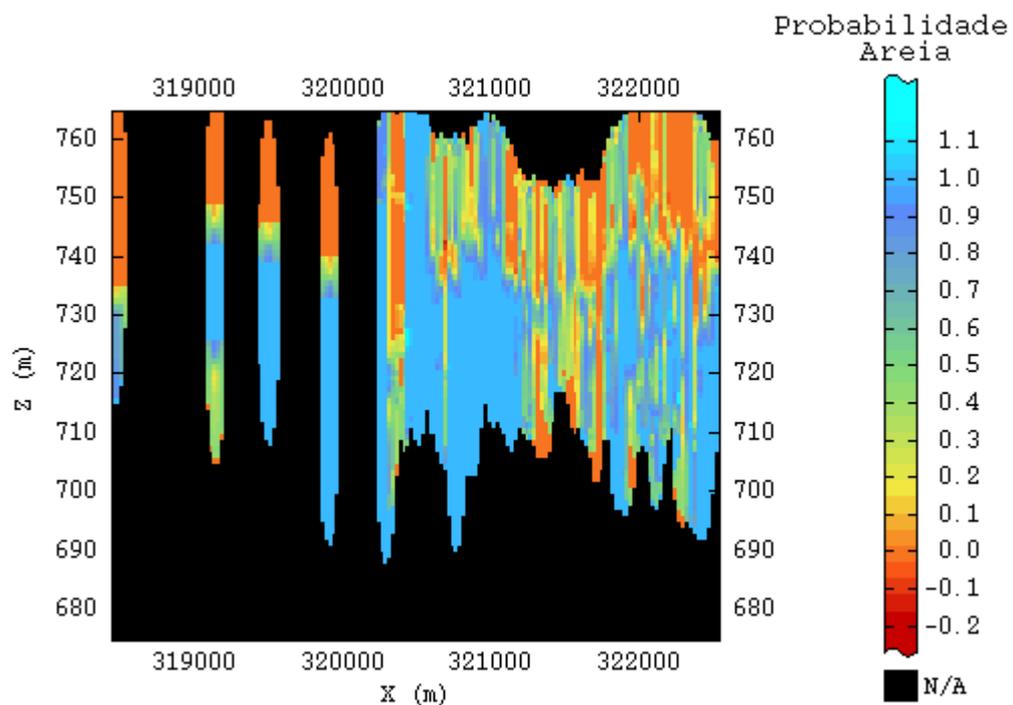


Figura 104 – Resultado da krigagem da variável indicadora areia. O resultado mostra a probabilidade de areia ocorrer ou não em determinado ponto do perfil.

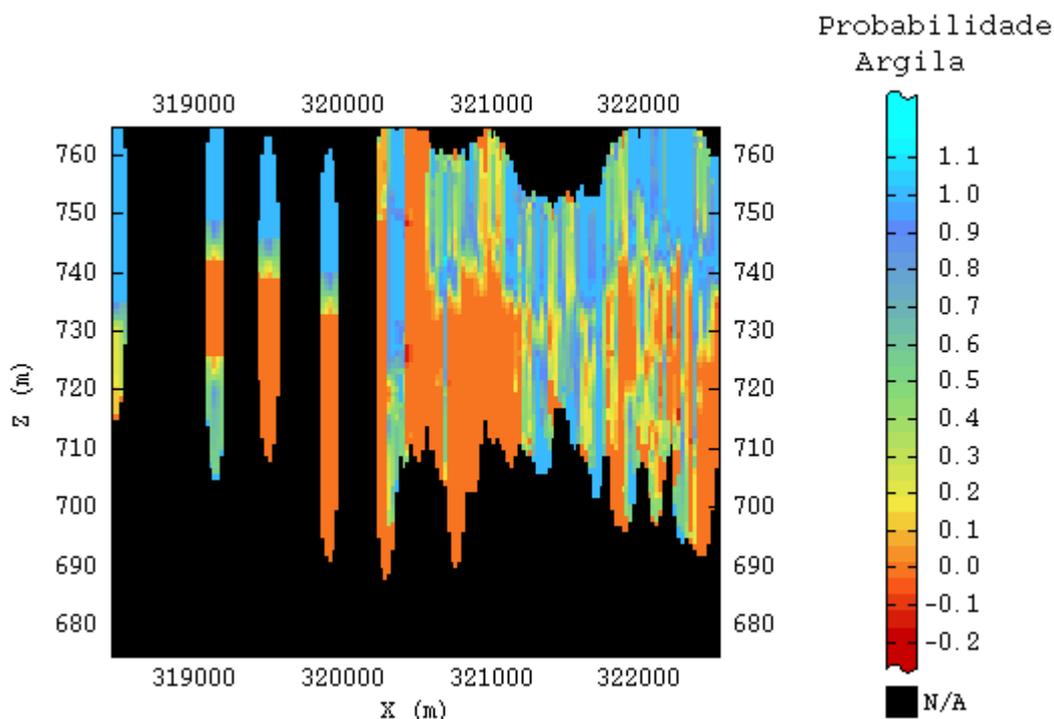


Figura 105 – Resultado da krigagem da variável indicadora argila. O resultado mostra a probabilidade de argila ocorrer ou não em determinado ponto do perfil.

Observando os resultados acima, é possível afirmar que as argilas, nesse trecho da Linha 4 Amarela do Metro, encontram-se concentradas mais na superfície, enquanto as areias, são encontradas em maior profundidade.

Quando os resultados da krigagem indicadora são correlacionados aos resultados da krigagem dos valores de SPT, é possível afirmar que, conforme esperado, as areias possuem um valor SPT maior que o das argilas e é possível verificar o estado de compactidade e consistência das areias e argilas, de acordo com NBR 7250, ao se comparar os resultados da estimativa da probabilidade de presença de areia e presença de argila com os resultados de SPT obtidos em 5.4.1.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram obtidos resultados de krigagem do topo rochoso da bacia de São Paulo por dois métodos. No primeiro método a bacia foi estudada como um todo, em um único domínio, e utilizando neste caso a krigagem de resíduos devido à natureza não estacionária da variável. No segundo método a bacia foi estudada em partes, sendo essa dividida em seis domínios e, neste caso, foi utilizada a krigagem ordinária, não sendo necessária a utilização da krigagem de resíduos pois, ao se dividir a bacia em partes, a variável passou a apresentar natureza estacionária. Essa mudança no

comportamento da variável se dá, provavelmente, pela estrutura bacia: um *hemi-graben* basculado para NNW com blocos de rocha de diferentes cotas topográficas delimitados por falhas. Quando tais blocos são analisados como um único domínio, pode ser observada uma tendência na variável, e quando são analisados como domínios diferentes, a tendência não pode ser observada.

Ambos os métodos resultaram em estimativas muito semelhantes, sendo o segundo método muito mais trabalhoso que o primeiro, já que neste foram realizadas seis análises, diferentemente do primeiro método, no qual foi realizada somente uma análise, com a retirada da tendência dos dados.

Este trabalho também teve como resultados a estimativa das espessuras dos sedimentos e do solo de alteração de rocha da bacia. Os sedimentos foram calculados a partir da krigagem ordinária das espessuras de sedimento de cada poço, já o solo de alteração de rocha, por não apresentar um variograma estruturado, foi calculado pelo método do inverso da potência da distância das espessuras do solo de alteração de rocha de cada poço. Nas estimativas da espessura dos sedimentos pôde ser observado que os valores de espessura e os resultados de cota do topo rochoso se correlacionam inversamente: quanto menores os valores de cota do topo rochoso, maiores são os valores de espessura dos sedimentos. Já as estimativas da espessura do solo de alteração de rocha, ficou evidenciado que o solo de alteração é pouco espesso e de certa forma, constante, dentro da bacia, e que ele ocorre em maior espessura fora da bacia, no seu embasamento.

Foram realizadas, ainda, estimativas por krigagem de variáveis indicadoras referentes aos sedimentos, solo de alteração e rocha. Os sedimentos, solos de alteração de rocha e rochas foram calculados através da krigagem ordinária das variáveis indicadoras. Pôde ser observado, conforme esperado, que quanto menor a cota, maiores são as probabilidades de ocorrência de rocha e menores as probabilidades de ocorrência de sedimentos.

Por fim, utilizando-se de dados da Linha 4 Amarela do metrô da cidade de São Paulo, foram calculados, a partir de krigagem ordinária, perfis de estimativa de valores de SPT, de Recuperação e de RQD, além da krigagem das variáveis indicadoras areia e argila. Observou-se, conforme esperado, que os valores de SPT aumentam com a profundidade. Pôde ser observado também que os valores de recuperação e RQD também aumentam com a profundidade e que os valores de recuperação não são suficientes para avaliar a qualidade do maciço, visto que existem trechos com valores

altos de recuperação onde os valores de RQD são baixos - de 0 a 25% - que classificariam a qualidade do maciço como muito pobre de acordo com Barton *et al.* (1974). Também pôde ser observado nesta parte do trabalho que as argilas, nesse trecho da Linha 4 Amarela do Metro, encontram-se concentradas mais na superfície, enquanto as areias, são encontradas em maior profundidade e que, conforme esperado, as areias possuem um valor SPT maior que o das argilas. É possível, a partir desses resultados, verificar o estado de compactidade e consistência das areias e argilas ao se comparar os resultados da estimativa da probabilidade de presença de areia e presença de argila com os resultados de SPT.

Este trabalho mostra como é possível utilizar diferentes técnicas geoestatísticas aplicadas a um grupo de dados geológicos e geotécnicos, tendo como resultado o melhor entendimento e utilização de tais dados.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F.F.M. 1955. As Camadas de São Paulo e a Tectônica da Serra da Cantareira. Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia. São Paulo, v.4, p.23-40.
- ALMEIDA, F.F.M 1967. Origem e Evolução da Plataforma Brasileira. Boletim do Departamento Nacional de Produção Mineral, Divisão de Geologia e Mineralogia. Rio de Janeiro, nº241, 36 p.
- ARMSTRONG, M. 1998. Basic linear geostatistics. Berlin, Springer-Verlag, 153 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS 2020. Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio. NBR – 6484 (Segunda edição) Rio de Janeiro. 28 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS 1982. Identificação e descrição de amostras de solos obtidas em sondagens de simples reconhecimento dos solos. NBR – 7250. Rio de Janeiro. 3 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL 2013. Manual de Sondagens, Boletim nº3, 5ª Edição, São Paulo, 203 p.
- BARNES, M.P. 1980. Computer-Assisted Mineral Appraisal and Feasibility. New York, Soe. Min. Eng. 167p.
- BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, J. 1974. Engineering Classification of Rock Masses for Design of Tunnel Support. Rock Mechanics, v. 6, p.189-236.
- BERGMANN, M. 1988. Caracterização estratigráfica e estrutural da sequência vulcanosedimentar do Grupo São Roque na região de Pirapora do Bom Jesus,

- Estado de São Paulo. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 155 p.
- BIGARELLA, J. J.; SALAMUNI, R. 1958. Estudos preliminares na Série Açungui. VIII. A Formação Votuverava. Curitiba, Instituto de História Natural, Boletim Geologia v.2, 6 p.
- BUBENICEK, A.; HASS, A. 1969. Method of Calculation of the Iron Ore Reserves in The Lorraine Deposit. *In: A Decade of Digital Computing in The Mineral Industry, 1969 International Symposium on Computer Applications and Operations Research in the Mineral Industry. The American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, New York, p.179-210.*
- CAMPOS NETO, M.C.; BASEI, M.A.S. 1983. Evolução estrutural brasileira do nordeste de São Paulo: dobramentos superpostos e esboço estratigráfico e tectônico. *In: SBG, Simpósio Regional de Geologia, 4, São Paulo, v.1, p.61-78.*
- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM. 2006. Mapa Geológico do Estado de São Paulo: Breve descrição das unidades litoestratigráficas aflorantes no Estado de São Paulo. Escala 1:750000. 173p.
- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM. 2019. Mapa Geológico Integrado da Região Metropolitana de São Paulo. Escala 1:250000.
- COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO – CMSP. 1994. Memorial justificativo dos parâmetros geotécnicos do Projeto Básico da Linha 4 - Amarela. RT-4.10.00.00/4C3-002, elaborado por Promon Engenharia. São Paulo.
- COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO – CMSP. 2011. Relatórios Geológico-Geotécnicos do Projeto Básico da Linha 6 - Laranja. RT-6.24.00.00/4C3-001, RT-6.16.00.00/4C3-001, RT-6.08.00.00/4C3-001 e RT-6.04.00.00/4C3-001, elaborados por Sistran Engenharia, Intertechne Consultores S.A., Consórcio Opus-Vetec e EBEL – Empresa Brasileira de Engenharia de Infraestrutura. São Paulo.
- CORREA, S.M.B.B. 2003. Probabilidade e Estatística. Puc Minas, Belo Horizonte, 116p.
- COUTINHO, J.M.V. 1980. Relações Litológicas e Estruturais da Bacia de São Paulo com o Pré-Cambriano Circunvizinho. *In: Aspectos geológicos e geotécnicos da Bacia Sedimentar de São Paulo. ABGE/SBG-SP, São Paulo, p.15-23.*

- DAVIS, J. C. 2002. Statistics and data analysis in geology. Third Edition. New York, John Wiley & Sons, 639 p.
- DEERE, D.U. & DEERE, D.W. 1988. The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice. *In: Rock Classification Systems for Engineering Purposes*. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p. 91-101.
- DEUTSCH, C.V. 2002. Geostatistical reservoir modeling. New York, Oxford University Press, 376 p.
- FERNANDES, A.J.; CAMPOS NETO, M.C.; FIGUEIREDO, M.C.H. 1990. O Complexo Embu no leste do estado de São Paulo: limites e evolução geológica. *In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia*, 36, Natal, v.6, p.2755-2763.
- FIORI, A.P. & CARMIGNANI, L. 2009. Fundamentos de Mecânica dos Solos e das Rochas, Aplicações na Estabilidade e Taludes. Editora UFPR, Curitiba, 602 p.
- GOOGLE EARTH-MAPAS. <https://maps.google.com>. Consulta realizada em 08/10/2020.
- GUERRA, P. A. G. 1988. Geoestatística Operacional. DNPM, Brasília, 145 p.
- GURGUEIRA, M.D. 2013. Correlação de dados geológicos e geotécnicos na Bacia de São Paulo. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 76p.
- HASUI, Y.; CARNEIRO, C.D.R.; COIMBRA, A.M. 1975. The Ribeira Folded Belt. *Revista Brasileira de Geociências*, v.5, p.257-266.
- HASUI, Y. 1975. Evolução polifásica do Pré-cambriano a oeste de São Paulo. *Boletim IG, Instituto de Geociências, USP*, v. 6, p.95-108.
- HASUI, Y.; CARNEIRO, C.D.R.; BISTRICH, C.A. 1978. Os granitos e granitoides da Região de Dobramentos Sudeste no Estado de São Paulo. *In: Congresso Brasileiro de Geologia*, 30, Recife, v.6, p.2594-2608.
- HASUI, Y.; CARNEIRO, C.D.R. 1980. Origem e evolução da Bacia de São Paulo. *In: Mesa redonda: aspectos geológicos e geotécnicos da Bacia Sedimentar de São Paulo. Publicação Especial. ABGE/SBG*, São Paulo, p. 05-13.
- HASUI, Y.; DANTAS, A. S. L.; CARNEIRO, C. D. R.; BISTRICH, C. A. 1981. O embasamento Pré-Cambriano e Eopaleozoico em São Paulo. *In: INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DE SÃO PAULO. Mapa Geológico do Estado de São Paulo*, escala 1.500.000. São Paulo, IPT, v.1, p.12-45.
- HEILBRON, M.; PEDROSA SOARES, A.C.; CAMPOS NETO, M.; SILVA, L.C.; TROW, R.A.J.; JANASI, V.C. 2004. A Província Mantiqueira: *In: MANTESSO-NETO, V.;*

- BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C.D.R.; NEVES, B.B.B. Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. Beca, São Paulo, p. 203-234.
- IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO
1981. Mapa Geológico do Estado de São Paulo. Escala 1:500.000. São Paulo: Publicação IPT, nº1184, Monografias, nº 6.
- IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO
1989. Estudo e Implementação de Novas Técnicas e Desenvolvimento de Programas em Geoestatística: Aplicações em Geologia. São Paulo: Relatório IPT, nº 27.799, 98p.
- JANASI, V. de A.; ULBRICH, H.H.G.J. 1991. Late Proterozoic granitoid magmatism in the state of Sao Paulo, southeastern Brazil. *Precambrian Research*, v.51, p.351-374.
- JOURNEL, A.G. 1980. The lognormal approach to predicting local distributions of selective mining unit grades. *Mathematical Geology*, v.12, p.285-303.
- JOURNEL, A.G. 1983. Non-parametric estimation of spatial distribution. *Mathematical Geology*, v.15, p.445-468.
- JULIANI, C. 1992. O embasamento pré-cambriano da Bacia de São Paulo. *In: Problemas geológicos e geotécnicos na Região Metropolitana de São Paulo*, ABAS/ABGE/SBG-SP, São Paulo, p.3-20.
- JULIANI, C. & BELJAVSKIS, P. 1995. Revisão da litoestratigrafia da Faixa São Roque/Serra do Itaberaba (SP). *Revista do Instituto Geológico*, v.16, p.33-58. *Problemas geológicos e geotécnicos na Região Metropolitana de São Paulo*. São Paulo, p.3-20.
- KUTNER, A.S. & BJORNBERG, A.J.S. 1997. Contribuição para o conhecimento geológico-geotécnico da Bacia de São Paulo: litotipos, notação estratigráfica e feições estruturais relevantes. *Revista Engenharia*, v.522, p.65-73.
- MATHERON, G. 1963. *Principles of Geostatistics*. *Economic Geology*, v. 58, p.1246-1266.
- MELO, M.S.; PONÇANO, W.L.; MOOK, W.G.; AZEVEDO, A.E.G. 1987. Datações C14 em sedimentos da Grande São Paulo. *In: Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário*, 1, Porto Alegre, Anais, p.427-436.

- MONTEIRO, M.D.; GURGUEIRA, M.D.; ROCHA, H.C. 2012. Geologia da Região Metropolitana de São Paulo. *In: Twin Cities – Solos das cidades de São Paulo e Curitiba*. ABMS, São Paulo, p.15-44.
- MONTICELI, J.J. & TRESSOLDI, M. 2013. Diretrizes para Classificação de Sondagens: 1ª tentativa. ABGE - Associação Brasileira de Engenharia e Ambiental, São Paulo, 118p.
- NEUMAN S. P.; JACOBSON, E. A. 1984. Analysis of nonintrinsic spatial variability by residual kriging with application to regional groundwater levels. *Mathematical Geology*, v.16, n.5, p.499-521.
- OLIVEIRA, S. B. 2008. Estudos geoestatísticos aplicados a um depósito magmático de Ni-Cu. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 93p.
- PIRES, F. A. 1988. Uma nova concepção para os ambientes do Grupo Açungui, na região de Iporanga e Apiaí, Sul de São Paulo. *In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia*, 35, Belém, v.2, p.606-616.
- RICCOMINI, C. 1989. O *Rift* Continental do Sudeste do Brasil. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 256 p.
- RICCOMINI, C. & COIMBRA, A.M. 1992. Geologia da bacia sedimentar. *In: Solos da cidade de São Paulo*, p.37-94.
- RICCOMINI, C; SANT'ANNA, L.C.; FERRARI, A.L. 2004. Evolução Continental do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil. *In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C.D.R.; NEVES, B.B.B. Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Beca, São Paulo, p.385-405.
- ROCHA, M.M.; LOURENÇO, D.A.; LEITE, C.B.B. 2007. Aplicação de Krigagem com Correção do Efeito de Suavização em Dados de Potenciometria da Cidade de Pereira Barreto – SP. *Geologia USP Série Científica*, São Paulo, v.7, n.2, p.37-48.
- RODRIGUEZ, S.K. 1998. Geologia urbana da Região Metropolitana de São Paulo. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 171 p.
- SADOWSKI, G.R.1984. Estado da Arte do Tema: Geologia Estrutural de Grandes Falhamentos. *In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia*, 33, Rio de Janeiro, v.4, p.1767-1793.

- SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D.A.; DERZE, G.R.; ASMUS, H.E. 1984. Geologia do Brasil. Brasília, DNPM, 435 p.
- SINCLAIR, A. J. & BLACKWELL, G. H., 2002. Applied Mineral Inventory Estimation. Cambridge University Press, Cambridge, 381 p.
- SPIEGEL, M.R. 1967. Esperança Matemática. *In*: SPIEGEL, M.R. 1967, Estatística, McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 580p.
- SUGUIO, K.; RICCOMINI, C.; SALLUN, A.E.M.; SALLUN FILHO, W.; ARONCHI NETO; P. 2010. Provável Significado Geológico de Idades LOE (Luminescência Opticamente Estimulada) da Formação Itaquaquecetuba, SP. Revista do Instituto de Geociências, Geologia USP, Série Científica, São Paulo, 10, nº 3, p.49-56.
- TAKIYA, H.; PELOGGIA, A.U.G.; TOKUTAKE, L.R.; CAMPOS, J.E.; OGAWA, A.T.; KOGA, H.; MISAWA, W.J.; RICCOMINI, C. 1989. Arcabouço estrutural da Bacia de São Paulo. *In*: Workshop: Geologia da Bacia de São Paulo. São Paulo. Coletânea das Comunicações. IG-USP/SBG-SP, p. 16-27.
- TAKIYA, H. 1991. Aplicação dos métodos quantitativos espaciais a dados geológicos da Bacia de São Paulo. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 109 p.
- WACKERNAGEL, H. 2003. *Multivariate Geostatistics: An Introduction with Applications 3rd edition*, 387 p.
- YAMAMOTO, J. K.; BETTENCOURT, J.S.; MONTANHEIRO; T.J. 2001. Análise Estatística. *In*: YAMAMOTO, J. K. 2001, Avaliação e Classificação de Reservas Minerais, Edusp, 226 p.
- YAMAMOTO, J. K. 2001. Análise Geoestatística. *In*: YAMAMOTO, J. K. 2001, Avaliação e Classificação de Reservas Minerais, Edusp, 226 p.
- YAMAMOTO, J.K., MAO, X.M., KOIKE, K., CROSTA, A.P., LANDIM, P.M.B, HU, H.Z., WANG, C.Y., YAO, L.Q. 2012. *Mapping an Uncertainty Zone Between Interpolated Types of a Categorical Variable. Computers and Geosciences*, v.40, p.146-152.
- YAMAMOTO, J.K., LANDIM, P.M.B. 2013. Geoestatística: Conceitos e Aplicações, Oficina de Textos, São Paulo, 215 p.