

**Gabriella Amorim da Cruz**

**MODELAGEM GEOLÓGICA TRIDIMENSIONAL DE ARGILAS NO  
SOFTWARE SGEMS, SEGUNDO PERFIS DE SONDAGEM À  
PERCUSSÃO NO BAIRRO JARDIM BOTÂNICO (RJ)**

Trabalho de Conclusão de Curso  
(Geologia)

Rio de Janeiro  
2017



UFRJ

**Gabriella Amorim da Cruz**

**MODELAGEM GEOLÓGICA TRIDIMENSIONAL DE ARGILAS NO  
SOFTWARE SGEMS, SEGUNDO PERFIS DE SONDAÇÃO À  
PERCUSSÃO NO BAIRRO JARDIM BOTÂNICO (RJ)**

Trabalho Final do Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Geólogo.

Orientadores:

Luis Paulo Vieira Braga

Emílio Velloso Barroso

Rio de Janeiro

2017

Gabriella, Amorim da Cruz

**Modelagem geológica tridimensional de argilas no software SGEMS, segundo perfis de sondagem à percussão no Bairro Jardim Botânico (RJ)** / Gabriella Amorim da Cruz - - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2017.

xviii, 66 p. : il.; 30cm

Trabalho Final de Curso (Bacharelado em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2017.

Orientadores: Luis Paulo Vieira Braga, Emílio Velloso Barroso

1. Geoestatística. 2. Geologia de Engenharia – Trabalho de Conclusão de Curso. I. Luis, Paulo Vieira Braga. II. Emílio, Velloso Barroso. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia. III. Modelagem geológica tridimensional de argilas segundo perfis de sondagem à percussão no Bairro Jardim Botânico (RJ)

Gabriella Amorim Da Cruz

MODELAGEM GEOLÓGICA TRIDIMENSIONAL DE ARGILAS NO SOFTWARE  
SGEMS, SEGUNDO PERFIS DE SONDAÇÃO À PERCUSSÃO NO BAIRRO JARDIM  
BOTÂNICO (RJ)

Trabalho Final do Curso de Graduação em  
Geologia do Instituto de Geociências,  
Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ,  
apresentado como requisito necessário para  
obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientadores:  
Luis Paulo Vieira Braga  
Emílio Velloso Barroso

Aprovada em:  
Por:

---

Orientador 1: Luis Paulo Vieira Braga (UFRJ)

---

Orientador 2: Emílio Velloso Barroso (UFRJ)

---

Andréa Ferreira Borges (UFRJ)

---

Kátia Leite Mansur (UFRJ)

UFRJ  
Rio de Janeiro  
2017

UFRJ  
Rio de Janeiro  
2017

“Meus sonhos são tropeços,  
em cada queda me levanto,  
sei que as vezes me engano,  
mesmo assim sigo insistindo.

Busco um olhar por entre as montanhas,  
um horizonte vivo distante,  
mesmo que um dia eu me canse,  
saberei que valeu a pena.

Sonho, tropeço e sonho,  
o vento leva e traz de volta,  
mesmo em fase de maior revolta,  
continuarei sempre sorrindo...”

Rogério Correia

## Agradecimentos

Aos meus pais, Elis e Cenilton e minhas irmãs, Graciella e Carolina, por estarem ao meu lado me motivando a buscar meus sonhos com determinação durante toda essa longa caminhada que foi dura, cheia de dificuldades e provações e por terem me dado o mínimo necessário para que eu pudesse chegar aonde estou hoje. Pela educação e pelos ensinamentos severos em relação ao meu caráter que, hoje, fazem de mim uma pessoa digna.

Aos amigos que fiz pelo Rio de Janeiro, em especial Elias Ferraz, que é aquele amigo eterno que você pode contar em dias de sol e nublados. Às amigas de república que fizeram parte deste ciclo final, Gabriela Delaqua, Raíza Lima, Ludmila Alves, Amanda Alecrim, Maiara Pitanga, Lara Azevedo e Isabela Rosa, que trouxeram dias engraçados e fizeram com que a saudade de casa se transformasse em uma brisa leve e passageira.

Ao professor orientador Luis Paulo Braga, por sua atenção e disponibilidade total na busca de resultados para este projeto final de curso. Seus ensinamentos e “puxões de orelha”, que me ajudaram muito durante a fabricação deste trabalho e como pessoa. Também ao professor orientador Emílio Velloso Barroso, pela ajuda na obtenção dos dados, esclarecimento e por trazer a “luz” através da sua orientação no viés da geologia de engenharia.

À Fundação Geo-Rio, pela disponibilidade dos dados e em especial ao geólogo Nelson Paes, por ajudar no agrupamento e seleção dos dados da área de interesse. Seu auxílio foi de muita importância para o prosseguimento deste trabalho.

Aos professores da Geologia de um modo geral, pela dedicação e pela incessante busca de melhorias para o departamento. Sua perseverança e atenção em nós, alunos, nunca passou despercebida.

À UFRJ, pelo investimento em minha capacitação profissional, viabilizando campos, palestras, projetos científicos, semanas acadêmicas e Congressos da área, sendo sempre de vital importância durante todo o processo de aprendizado.

## Resumo

DA CRUZ, Gabriella Amorim. **Modelagem geológica tridimensional de argilas no software SGEMS, segundo perfis de sondagem à percussão no Bairro Jardim Botânico (RJ)**. Rio de Janeiro, 2017. xviii, 66 f. Trabalho Final de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

O objetivo deste estudo foi realizar a interpretação da distribuição da compacidade das argilas subsuperficiais, utilizando como base, dados de Sondagem à Percussão (SPT) da região do Jardim Botânico, bairro localizado na cidade do Rio de Janeiro (RJ). Para alcançar este objetivo, utilizou-se o programa SGeMS (Stanford Geostatistical Modeling Software), onde foram gerados dados estatísticos, a partir dos quais se obteve um modelo variográfico e parâmetros de krigagem para utilização do método de Simulação Sequencial Gaussiana. Foram feitas seções do modelo obtido, que foram comparadas com trabalhos pretéritos e observadas congruências entre os resultados obtidos, evidenciando a confiabilidade do programa e sua utilidade para análise espacial de sedimentos, importante para a Geologia de Engenharia.

Palavras-chave: Geoestatística; SGEMS; Jardim Botânico; Geologia de Engenharia; Sondagem à Percussão; SPT; Argilas.

## Abstract

**DA CRUZ, Gabriella Amorim. Three-dimensional geological modeling of clay on SGEMS, according to Standard Penetration Test profiles in Jardim Botânico Neighborhood (RJ).** 2017. xviii, 66 f. Trabalho Final de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

The objective of this study was to perform an interpretation of the compacity distribution of subsurface clay, using Standard Penetration Test (SPT) data from Jardim Botânico region, a Rio de Janeiro (RJ) neighborhood. To achieve this goal, it was used the Stanford Geostatistical Modeling Software (SGeMS), where statistics data were generated, from which a variographic model and kriging parameters were obtained for utilization of the Sequential Gaussian Simulation method. Sections from the obtained model were made, which were compared with previous papers and observed consistency, demonstrating the software reliability and its usefulness for espacial analysis of sediments, important for Engineering Geology.

**Keywords:** Geostatistics; SGeMS; Jardim Botânico; Engineering Geology; Standard Penetration Test; SPT; Clay

## Lista de figuras

Figura 1: Imagem mostrando o Bairro do Jardim Botânico, cidade do Rio de Janeiro (RJ).

(Fonte: Google Earth, retirada em 29/10/2017)

Figura 2: Domínios tectono-magmáticos do Estado do Rio de Janeiro. (Fonte: Projeto Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. CPRM, 2006)

Figura 3: Mapa apresentando os quatro domínios geomórficos para a região da Baixada de Jacarepaguá. (Fonte: Roncarati e Neves, 1976)

Figura 4: Curva de variação do nível relativo do mar nos últimos sete mil anos para o setor do litoral de Parati - Angra, e para o litoral inserido no Gráben Guanabara. (Fonte: SUGUIO et al., 1985)

Figura 5: Curva de variação do nível do mar definidas através da datação de radiocarbono. (Ângulo e Lessa, 1997)

Figura 6: Curva média de variação do nível relativo do mar para a região de Cabo Frio. (Fonte: Dias, 2009)

Figura 7: Nova curva para mudanças relativas do nível do mar para Cabo Frio e região de Armação de Búzios. Esta curva foi baseada em 21 paleoníveis: 10 paleoníveis gerados por (quadrados) e 11 paleoníveis de trabalhos anteriores (Dias, 2009) (triângulos). As amostras de concha estão representadas nos triângulos azuis. (Fonte: Jesus et al, 2017)

Figura 8: Domínios morfoestruturais propostos para o estado do Rio de Janeiro. (Fonte: Silva, 2002)

Figura 9: Mapa geológico escala 1:100.000 da Folha Baía de Guanabara SF23-Z-B-IV com *trends* e marcadores estruturais da área de estudo. (Fonte: CPRM, 2012)

Figura 10: Ilustração das ferramentas em seus devidos lugares, de forma a obter dados por teste de penetração padrão (SPT). (Fonte: CREA-MG, acessado em 27/09/2017)

Figura 11: Esquema ilustrativo para definição do Nspt.

Figura 12: Exemplo de Histograma (Fonte: <https://somentequidade.wordpress>).

Figura 13: Representação de modelo baseado em Funções Aleatórias. (Fonte: Braga, 2014)

Figura 14: Demonstração do modelo exponencial. (Fonte: Braga, 2014)

Figura 15: Apresentação das funcionalidades principais do software SGEMS. (Fonte: SGeMS Guide).

Figura 16: Exemplo de boletim de sondagem à percussão utilizado no trabalho. (Fonte: Dados Georio, CONCREMAT)

Figura 17: Exemplo de croqui de uma sondagem pertencente aos boletins de sondagem, que demonstra onde foram efetuados os testes. (Fonte: Dados Geo-Rio, SOLOTESTE ENGENHARIA).

Figura 18: Geolocalização dos dados cedidos pela Geo-Rio no Google Earth de acordo com os boletins fornecidos pela Geo-Rio, mostrando todos os dados, referentes aos bairros da Gávea e Jardim Botânico plotados. (Fonte: Google Earth, acessado em 23/09/2017)

Figura 19: Geolocalização dos dados no Google Earth demonstrando a elevação do terreno, de acordo com os boletins fornecidos pela Geo-Rio. Áreas de análise demarcadas, onde o quadrado amarelo é a área total que foi simulada primeiramente e o quadrado vermelho, a sub-área. (Fonte: Google Earth, acessado em 23/09/2017)

Figura 20: Demonstração de como foi efetuado o carregamento dos dados no SGEMS.

Figura 21: Propriedades iniciais definidas para melhor adequação dos dados do trabalho à visualização ideal pretendida neste trabalho.

Figura 22: Dados plotados dos boletins de sondagem em escala ideal para análise e com gráfico de SPT determinado, evidenciando uma de SPT de 0 a 34 na escala.

Figura 23: Demonstração da disposição da malha geral, criada de acordo com o início e o fim dos dados dos boletins de sondagem.

Figura 24: Demonstração da disposição da sub-malha, com o objetivo de aumentar a acurácia na análise geoestatística.

Figura 25: Histogramas gerados no SGEMS, selecionados na aba Análise de Dados.

Figura 26: Modelo esquemático e denominações dos parâmetros utilizados para geração de um variograma. (Fonte: Correia, 2010)

Figura 27: Passo à passo e parâmetros definidos para a geração dos variogramas utilizados.

Figura 28: Variograma omnidirecional referente à área total da malha trabalhada.

Figura 29: Parâmetros ajustados da variografia de modo a ajustar corretamente a função variograma.

Figura 30: Início do processo da geração da simulação utilizada, mostrando a entrada de dados necessário para tal. Note as duas malhas geradas.

Figura 31: Demonstração do passo a passo para gerar uma Simulação Sequencial Gaussiana no SGEMS.

Figura 32: Simulação da malha de toda a área, evidenciando-se o comportamento da simulação. No exemplo o corte selecionado corresponde à X:75, Y:47 e Z:3.

Figura 33: Aba Preferências em evidência, onde selecionamos as opções analíticas da simulação.

Figura 34: Simulação da sub-malha, onde evidencia-se maior acurácia na simulação, em comparação com a malha total.

Figura 35: Visão geral da localização do corte X:126, Y:27 e Z:0, para análise do índice de resistência (SPT) das argilas selecionadas. Na imagem do Google Earth, em amarelo está indicada a direção do corte no plano X/Z e do plano Y/Z.

Figura 36: Corte X:126, Y:27 e Z:0 da simulação da área total, para análise do índice de resistência dos valores de SPT das argilas selecionadas. Acima, encontram-se os planos escolhidos.

Figura 37: Imagem da disposição dos dados de SPT do Bairro Jardim Botânico. Em amarelo está demarcada a seção onde foi feito o corte X da malha maior da simulação gerada. Em preto está indicada a área da seção dos perfis litológicos gerados através da análise descritiva dos perfis de sondagem SPT.

Figura 38: Perfis esquemáticos das litofácies da região oeste da seção da área geral, criados a partir dos dados de perfis de sondagem SPT do Bairro Jardim Botânico (RJ). Observar que a escolha das cores de cada litologia são as mesmas descritas nos boletins de sondagem cedidos pela Geo-Rio.

Figura 39: Corte determinado por X: 11, Y: 4 e Z: 0, para demonstrar a variação do SPT nas argilas da sub-malha/subárea. A imagem Google Earth, mostra a localização dos dados SPT no Bairro Jardim Botânico e em amarelo a localização dos planos X/Z e Y/Z.

Figura 40: Corte X:11, Y:4 e Z:0 da simulação, da área da malha menor, para análise do índice de resistência (SPT) das argilas selecionadas. Note em roxo a direção de possíveis estruturas, identificadas pelas áreas mais profundas da malha em amarelo e vermelho.

Figura 41: Representação da paleosuperfície do embasamento cristalino ajustada às linhas sísmicas. Notar a orientação NE-SW dos principais paleovales e a presença preferencial de gás raso ao longo destes paleovales. (Fonte: Baptista et al., 2011)

Figura 42: Identificação da direção das estruturas cristalinas interpretadas através dos ecos gerados no artigo de apoio. (Fonte: Google Earth, acessado em 23/10/2017).

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1: Estados de compacidade e consistência dos materiais. (Fonte: ABNT, NBR 6484/01)

Tabela 2: Codificação da planilha de Compacidade e Consistência da Norma (6484/2001).

Tabela 3: Codificação dos tipos de sedimentos da área de estudo.

Tabela 4: Planilha geral dos dados de SPT compilada, mostrando os dados referentes ao bairro Jardim Botânico, Rio de Janeiro.

Tabela 5: Planilha dos valores de SPT das argilas do Bairro Jardim Botânico, utilizada no SGEMS para análise geoestatística.

Tabela 6: Planilha Excel dos dados spt da subdivisão da área que foi objeto de estudo.

## Lista de abreviaturas e siglas

**3D:** Tridimensional

**ABMS:** Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica

**ABNT:** Associação Brasileira de Normas Técnicas

**CPRM:** Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais - Serviço Geológico do Brasil

**FA:** Funções Aleatórias

**GEO-RIO:** Fundação Instituto de Geotécnica, órgão pertencente à Secretaria Municipal de Obras da Prefeitura do Rio de Janeiro

**(i):** Indicação de um grupo de dados que serão analisados

**N:** Abreviatura do índice de resistência à penetração do SPT, cuja determinação se dá pelo número de golpes correspondente à cravação de 30 cm do amostrador-padrão, após a cravação inicial de 15 cm, utilizando-se corda de sisal para levantamento do martelo padronizado.

**NBR:** Norma Brasileira

**Nspt:** Índice de Resistência à penetração do SPT, cuja determinação se dá pelo número de golpes durante o ensaio descrito na norma NBR 6484.

**SGEMS:** Stanford Geoestatistical Modeling Software

**SGSIM:** Sequential Gaussian Simulation

**SPT:** Standard Penetration Test (Teste de Penetração Padrão)

**SSG:** Simulação Sequencial Gaussiana

**UTM:** Universal Transversa de Mercator - Sistema de Coordenadas

**VR:** Variáveis Regionalizadas

## Sumário

Agradecimentos .....	viii
Resumo .....	ix
<i>Abstract</i> .....	x
Lista de figuras .....	xi
Lista de tabelas.....	xvi
Lista de abreviaturas e siglas.....	xvii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 LOCALIZAÇÃO E ACESSOS.....	3
3 CONTEXTO GEOLÓGICO.....	4
4 CONTEXTO TEÓRICO.....	14
4.1 Sondagem à Percussão.....	14
4.2 Geoestatística.....	18
4.2.1 Histograma.....	18
4.2.2 Funções aleatórias e modelos de Semivariograma.....	19
a) Variável Regionalizada (VR) .....	21
b) Modelo de Semivariograma Exponencial.....	21
c) Krigagem Ordinária.....	22
d) Simulação Geoestatística.....	22
4.2.3 Simulação Sequencial Gaussiana.....	23
4.2.4 SGeMS.....	23
5 METODOLOGIA E RESULTADOS.....	25
5.1 Seleção de dados.....	25
6 RESULTADOS.....	34
6.1 SGeMS.....	34
6.2 Histogramas.....	38
6.3 Variogramas.....	40

6.4 Simulação Sequencial Gaussiana.....	45
7 CONCLUSÃO.....	60
Bibliografia.....	63

## 1 INTRODUÇÃO

A fase da obtenção de dados da indústria da construção civil é caracterizada pela busca de redução de custos e aumento da precisão em seus métodos analíticos. As mudanças nas ciências estatísticas e geologia de engenharia, assim como a fixação de normas em aquisição e processamento de dados, contribuíram para o sucesso na predição de substratos e estruturas geológicas e consequente maior agilidade na conclusão de projetos tanto de empresas privadas quanto para fins acadêmicos.

Não obstante os avançados métodos geofísicos e geológicos atuais possam sugerir as mais promissoras das locações, é somente a realização de testes “*in situ*” que revelarão se os prognósticos serão ou não confirmados. Faz-se necessário identificar os vários tipos de rochas e sedimentos perfurados com a finalidade da constatação de qual material foi encontrado, quais camadas atravessadas e avaliar o valor comercial destas. A sondagem à percussão é uma das formas mais antigas de investigação do subsolo e também apresentou pouquíssimas evoluções nas últimas décadas. Aliado a uma análise geoestatística apurada é um método essencial para o aumento da precisão na interpretação geológica e, conseqüentemente, para o aumento da confiabilidade na fase de pesquisa.

Uma vez que se deseja analisar a subsuperfície de uma região pelo método da sondagem à percussão, pelo ensaio de SPT, este tem como função oferecer informações sobre as camadas constituintes do subsolo e suas profundidades (espessura e material), o nível do lençol freático, a capacidade de carga que o subsolo pode suportar em cada camada e o comportamento do mesmo ao receber essa carga (índice de resistência à penetração). Além disso, pode ser feita uma análise inicial de testemunhos e do material que está sendo trazido com a perfuração.

Por sua vez, quando se aplica a geoestatística na análise de dados, há interesse em obter um possível comportamento regionalizado daquele substrato geológico, para que se tenha uma ideia regionalizada daquele plano em análise, aumentando a confiabilidade da interpretação feita.

O SGEMS é um programa geoestatístico aberto, que possibilita agrupar estes dados de SPT em uma malha tridimensional e analisá-los de forma conjunta, correlacionando-os. Diversos aspectos estatísticos podem ser levados em conta, com destaque para o modelo estatístico de Semivariograma, que é baseado em Funções Aleatórias, onde cada ponto é representado por uma variável aleatória e o conjunto de todas estas é uma função aleatória

(Braga, 2014). Utiliza-se este modelo, para desenvolver uma simulação de um cenário para o comportamento geral destes dados de SPT, a fim de descrever sua espacialidade.

Dentre todo este espaço urbano da cidade do Rio de Janeiro, que evidentemente tem a maior concentração populacional do Estado e levando em conta sua geologia ímpar, marcada principalmente pela Serra do Mar, as variações do nível relativo do mar e as implicações estruturais de sua formação, faz-se necessário um estudo minucioso do subsolo, a fim de identificar as áreas boas para a expansão urbana, bem como áreas que precisam de prevenção e interdição por meio do governo para prevenção de acidentes. Não obstante, a região do bairro do Jardim Botânico tem um projeto de criação de uma futura linha de metrô que integrará a rede metroviária existente e auxiliará na mobilidade urbana das cidades.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho é conhecer a distribuição dos valores de SPT em uma área (Bairro do Jardim Botânico). Sua importância está na integração das informações que são pontuais em uma área onde há perspectiva do desenvolvimento de projetos grandes de engenharia, como por exemplo, uma nova linha de metrô.

## 2 LOCALIZAÇÃO E ACESSO

Localizada na Zona Sul da cidade do Rio de Janeiro, próximo aos bairros da Gávea e Lagoa (Figura 1) e ao Maciço da Tijuca, o bairro Jardim Botânico está situado próximo à Lagoa Rodrigo de Freitas e consiste majoritariamente de depósitos colúvio-aluvionares (Bigarella, 1971) e flúvio-marinhos siltico-argilosos ou argilo-silticos ou rudáceos, por vezes com presença de conchas, caracterizados comumente por depósitos oriundos de transgressões marinhas e de colapso (Roncarati e Neves, 1976). O Bairro tem uma área de aproximadamente 3 km de comprimento na direção E-W e aproximadamente 1 km na direção N-S.



Figura 1: Imagem mostrando o Bairro do Jardim Botânico, cidade do Rio de Janeiro (RJ). (Fonte: Google Earth, retirada em 29/10/2017)

A principal via de acesso da cidade do Rio de Janeiro para a área estudada é o Túnel Rebouças, a Rua Pacheco Leão ou mesmo a Rua Jardim Botânico, que ligam o bairro aos bairros adjacentes (Figura 1).

### 3 CONTEXTO GEOLÓGICO

O Estado do Rio de Janeiro, situado na Região Sudeste do País, está geotectonicamente contido na Província Mantiqueira, província estrutural definida por (Almeida, 1981). Essa entidade foi uma das províncias afetadas pelo Ciclo Orogênico Brasileiro (Neoproterozóico/Cambriano) na América do Sul.

A Faixa Ribeira, que é uma faixa móvel, data do Neoproterozóico (Almeida, 1973) e é onde o Estado do Rio de Janeiro está localizado. Portanto, o estudo da evolução tectono-metamórfica da Faixa Ribeira auxilia a entender a compartimentação tectônica dos terrenos que compõem a geologia do estado do Rio de Janeiro. Esta evolução orogênica, que é considerada como a mais nova no cenário das colagens brasileiras/pan-africanas do segmento crustal considerado (Heilbron, 1999), foi responsável pela deformação, metamorfismo, magmatismo e articulação dos diversos terrenos da região.

O arcabouço tectônico regional do Estado do Rio de Janeiro é composto por três Domínios tectono-magmáticos (Figura 2): Domínio Juiz de Fora / Paraíba do Sul; Domínio Serra do Mar e Domínio Região dos Lagos, além das coberturas Fanerozóicas/Cenozóicas (CPRM, 2006).

A área de trabalho está inserida no contexto da Baía de Guanabara (CPRM, 2012) e possui três Compartimentos Fisiográficos, a Serra do Mar, o Gráben Guanabara e as Cristas Litorâneas (CPRM, 2012). A região de estudo localiza-se no compartimento de Cristas Litorâneas que são formadas e estão situadas entre o Maciço da Tijuca e Serra da Carioca. As unidades litoestratigráficas metassedimentares da Folha Guanabara são divididas em Grupo São Fidélis e Andrelândia, sendo o Grupo São Fidélis (CPRM, 2012), onde a área de estudo está localizada (Figura 2). Esta tem como principais características, sua extensão, desde a foz do rio Grande nos arredores de São Fidélis, até as cabeceiras de drenagem nos divisores da Serra do Mar. Devido à sua variedade litológica, foi classificada como grupo e subdividida em diferentes unidades. Regionalmente é constituída por biotita gnaisses granatíferos, com silimanita e cordierita, podendo apresentar lentes de rochas calcissilicáticas, anfíbolitos e quartzitos feldspáticos (Heilbron, 1993).

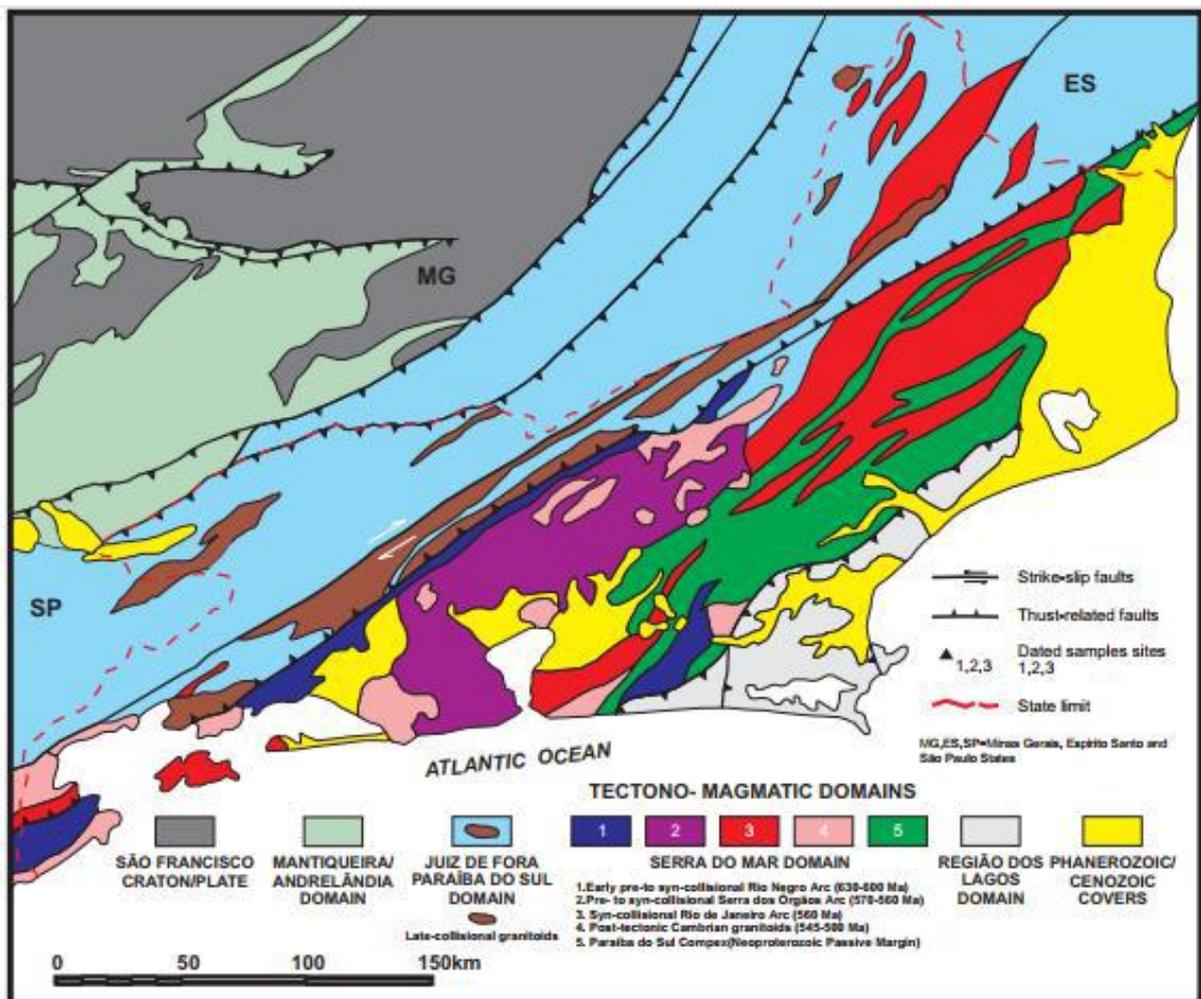


Figura 2: Domínios tectono-magmáticos do Estado do Rio de Janeiro. (Fonte: Projeto Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. CPRM, 2006)

A suíte Rio de Janeiro é uma unidade litoestratigráfica de ortognaisses sin a pós colisional, possuem uma característica peculiar, são ortognaisses grossos, bem foliados, chamados de gnaiss flacoidal, devido a forma amendoada dos cristais de microclina (CPRM, 2012).

A área do Jardim Botânico é relativamente correlacionável caracteristicamente à de Jacarepaguá, onde identifica-se quatro províncias geomorfológicas distintas (Roncarati e Neves, 1976). A primeira constitui-se em uma região montanhosa, formada por rochas do embasamento cristalino, que circunda a planície. Segue-se uma região de transição entre as montanhas e a planície denominada clinoplano periférico, formada a partir da coalescência de leques aluviais e por último, a planície, formada por depósitos sedimentares marinhos e lagunares. A planície divide-se em duas partes na região de Jacarepaguá. A primeira, mais

extensa, é limitada pelo clinopiano periférico e pela restinga interna. Nela se localizam as lagoas de Jacarepaguá, Camorim e Tijuca. A segunda planície estende-se entre as duas restingas e nela se situa a lagoa de Marapendi. As duas restingas são barreiras alongadas de constituição arenosa. A mais interna é mais larga e apresenta cotas máximas de 11 metros. A restinga externa atinge cotas de até 6 metros (Figura 3). As bases das duas barreiras assentam-se aproximadamente entre 3 e 4m acima do nível do mar (Maia et al., 1984).

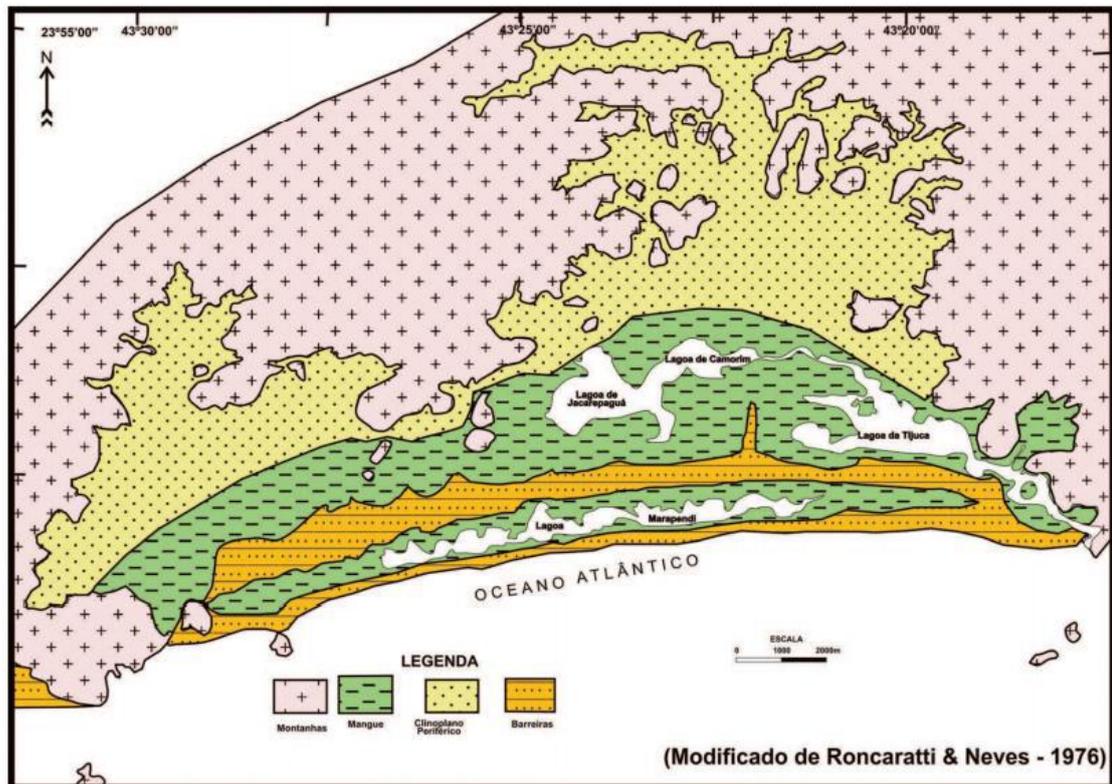


Figura 3: Mapa apresentando os quatro domínios geomórficos para a região da Baía de Jacarepaguá. (Fonte: Roncaratti e Neves, 1976)

As planícies costeiras são um domínio morfoestrutural nas bacias sedimentares cenozóicas, onde os sedimentos inconsolidados foram retrabalhados ao longo de ciclos transgressivos e regressivos durante o Quaternário (CPRM, 2012). Nesse contexto, surgem os estudos de variação do nível do mar, onde se estabeleceram correlações sobre sedimentologia, biologia e arqueologia no litoral do Brasil, chegando a reconstituição de antigos níveis marinhos. Foram construídas curvas de variação do nível do mar para diversos setores (Sugio et al., 1985). No Rio de Janeiro, entre Angra dos Reis e Parati, a curva referente à 2500 anos A.P ficou muito bem definida. Além disso, identificaram dois níveis marinhos máximos, um

deles levemente superior a 3m, entre 3600 e 3450 anos A.P. e o outro 4,8m há 5.200 anos A.P. Abaixo, temos a curva para Angra dos Reis (Suguio et al., 1985) (Figura 4).

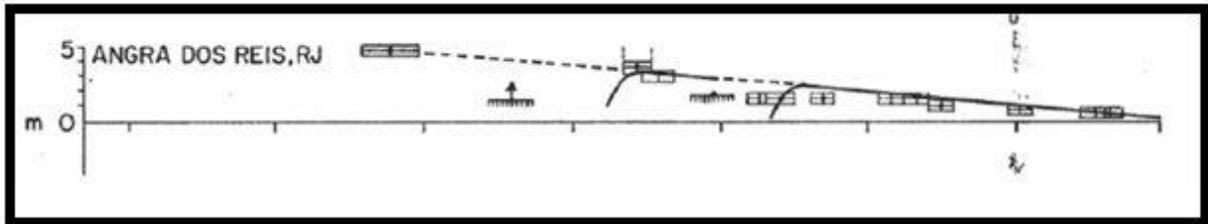


Figura 4: Curva de variação do nível relativo do mar nos últimos sete mil anos para o setor do litoral de Parati - Angra, e para o litoral inserido no Gráben Guanabara. (Fonte: SUGUIO et al., 1985)

Diferentemente das curvas propostas por Suguio e Martin (Suguio 1985), Ângulo e Lessa (1997) estabeleceram curvas alternativas, caracterizadas por uma descida contínua a partir do clímax holocênico até o nível do mar atual, determinada apenas com uma única evidência (Figura 5). Assim como Ângulo e Lessa (1997), a curva proposta por Dias (2009) para a região de Cabo Frio – Armação de Búzios situado no Estado do Rio de Janeiro (Figura 6), não indicam oscilações do nível do mar após o máximo atingido. Para determinar curvas eustáticas são necessárias diversas evidências, para que assim seja possível estabelecer as posições pretéritas do nível do mar (Araújo et al, 2015).

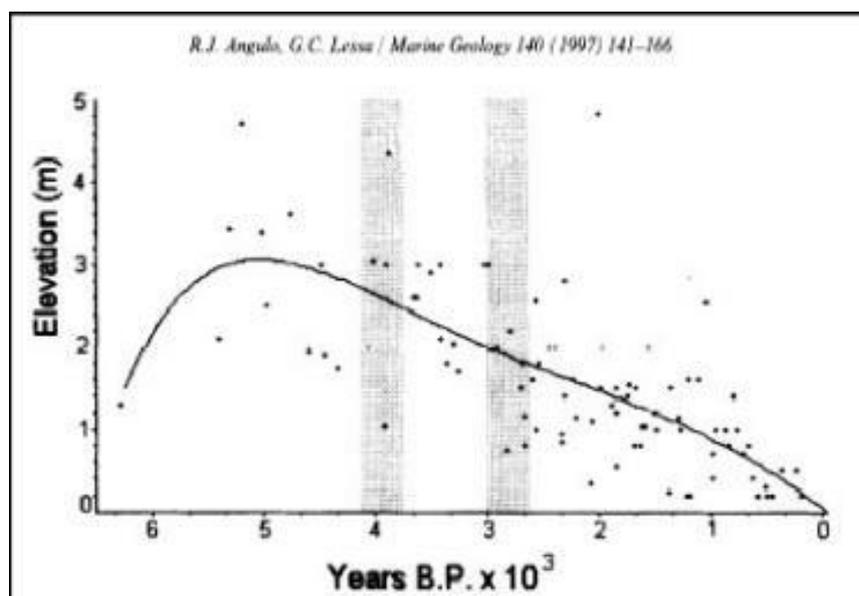


Figura 5: Curva de variação do nível do mar definidas através da datação de radiocarbono. (Ângulo e Lessa, 1997)

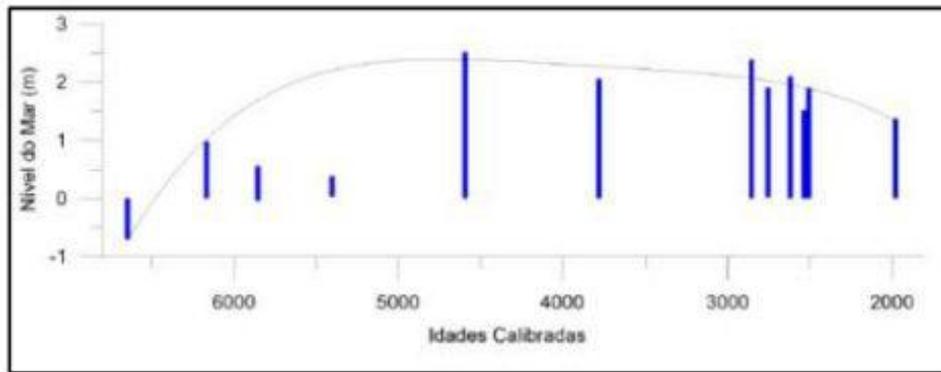


Figura 6: Curva média de variação do nível relativo do mar para a região de Cabo Frio. (Fonte: Dias, 2009).

O modelo mais recente de curva de variação do nível do mar, que leva em consideração tanto os paleoníveis propostos por Dias (2009), como novos paleoníveis gerados, desenvolve uma curva proposta para Cabo Frio, Arraial do Cabo e a região de Armação de Búzios, identifica três fases de variação. A primeira fase indica um nível do mar mais baixo que o atual, a segunda fase é marcada por uma consequente crescente deste nível e a terceira fase uma eventual queda do nível do mar novamente, com estabilização no nível em que encontramos no presente (Jesus et al, 2017) (Figura 7). O modelo evolutivo proposto no trabalho para Armação de Búzios, dividido em 3 fases, está em concordância com o mapa geológico de Martin et al. (1997) e sua distribuição dos depósitos Holocênicos.

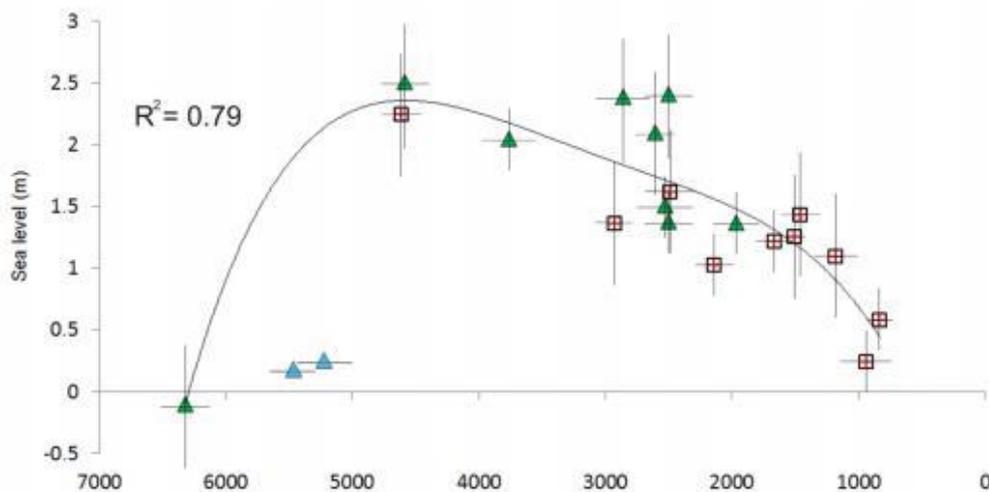


Figura 7: Nova curva para mudanças relativas do nível do mar para Cabo Frio e região de Armação de Búzios. Esta curva foi baseada em 21 paleoníveis: 10 paleoníveis gerados por (quadrados) e 11 paleoníveis de trabalhos anteriores (Dias, 2009) (triângulos). As amostras de concha estão representadas nos triângulos azuis. (Fonte: Jesus et al, 2017)

O modelo de sedimentação proposto para sedimentos recentes superficiais da baixada de Jacarepaguá, que está em congruência com a evolução geológica de outras cristas litorâneas no município do Rio de Janeiro. Os autores consideram 3 ciclos deposicionais distintos, separados por hiatos de erosão e não deposição (Roncarati e Neves, 1976).

O primeiro ciclo deposicional: o mais antigo, é composto por sedimentos de idade possivelmente Pliocênica. Há indícios texturais de terem sido depositados em ambiente continental e condições de clima semiárido. O modelo envolve leques aluviais, preenchendo depressões de uma topografia pretérita de vales fluviais profundamente entalhados em rochas do embasamento cristalino. Os leques aluviais tiveram seus agentes deposicionais em corridas de lama, enxurradas e fluxo de detritos.

Segundo ciclo deposicional: consiste em sedimentos de presumível idade Pleistocênica. As condições climáticas deduzidas por características texturais indicam clima originalmente úmido, que passa a semiárido e retoma a condições mais úmidas. A deposição de um complexo fluvial constituído por areias de canais fluviais, provavelmente do tipo entrelaçado, ao lado de argilas de planície de inundação.

Terceiro ciclo deposicional: compreende sedimentos de idade comumente aceita, como Holocênica. Este ciclo desenvolveu-se a partir de depósitos litorâneos de areias de fundo de enseada, que foram retrabalhadas durante a Transgressão Flandriana (Roncarati e Neves, 1976).

Abaixo (Figura 8), está ilustrado um mapa geológico dos domínios morfoestruturais do Estado do Rio de Janeiro e uma parte do mapa geológico da área de estudo baseado no Mapa da Folha Baía de Guanabara SF23-Z-B-IV (CPRM, 2012) (Figura 9). Observa-se que há predominância de depósitos colúvio-aluvionares, fluvio-marinhos, praias marinhos e/ou lagunares e antropogênicos. Como depósitos antropogênicos não são usados no presente trabalho, estes não serão descritos. Na parte Sudoeste da área aparecem rochas pertencentes à Suíte Rio de Janeiro e ao Grupo São Fidélis, mas que não foram estudadas nessa dissertação, pois o enfoque deste trabalho são sedimentos.

As principais características sedimentológicas destes tipos de depósitos que podem ser encontrados na área estudada são (Valeriano et al, 2012) (Figura 9):

- Colúvio- Aluvionares (Qca): areias com intercalações de argila, cascalho e restos de matéria orgânica, areias finas, estratificadas, moderadamente selecionadas, intercaladas com lentes de argilas; colúvios areno-argilosos; sedimentos finos, argilo-sílticos ou sílticos-argilosos, orgânicos; argilas plásticas; depósitos de tálus.
- Depósito fluvio-marinho (Qfm): sedimentos finos, síltico-argilosos ou argilo-sílticos, ricos em matéria orgânica; depósitos rudáceos associados à ambientes de leques fluviais; argilas acinzentadas de planície de inundação; areias de canais fluviais; interdigitação de sedimentos arenosos, argilosos e turfosos.
- Depósitos praias marinhos e/ou lagunares (Q2pml): areias de praia quartzosas, podendo conter lentes de cascalho e concentrações de minerais pesados e de fragmentos de conchas.
- Sedimentos Antropogênicos (Q2at): Sedimentos para criação de aterros, que possibilitam a expansão e acomodação urbana (Valeriano et al, 2012).

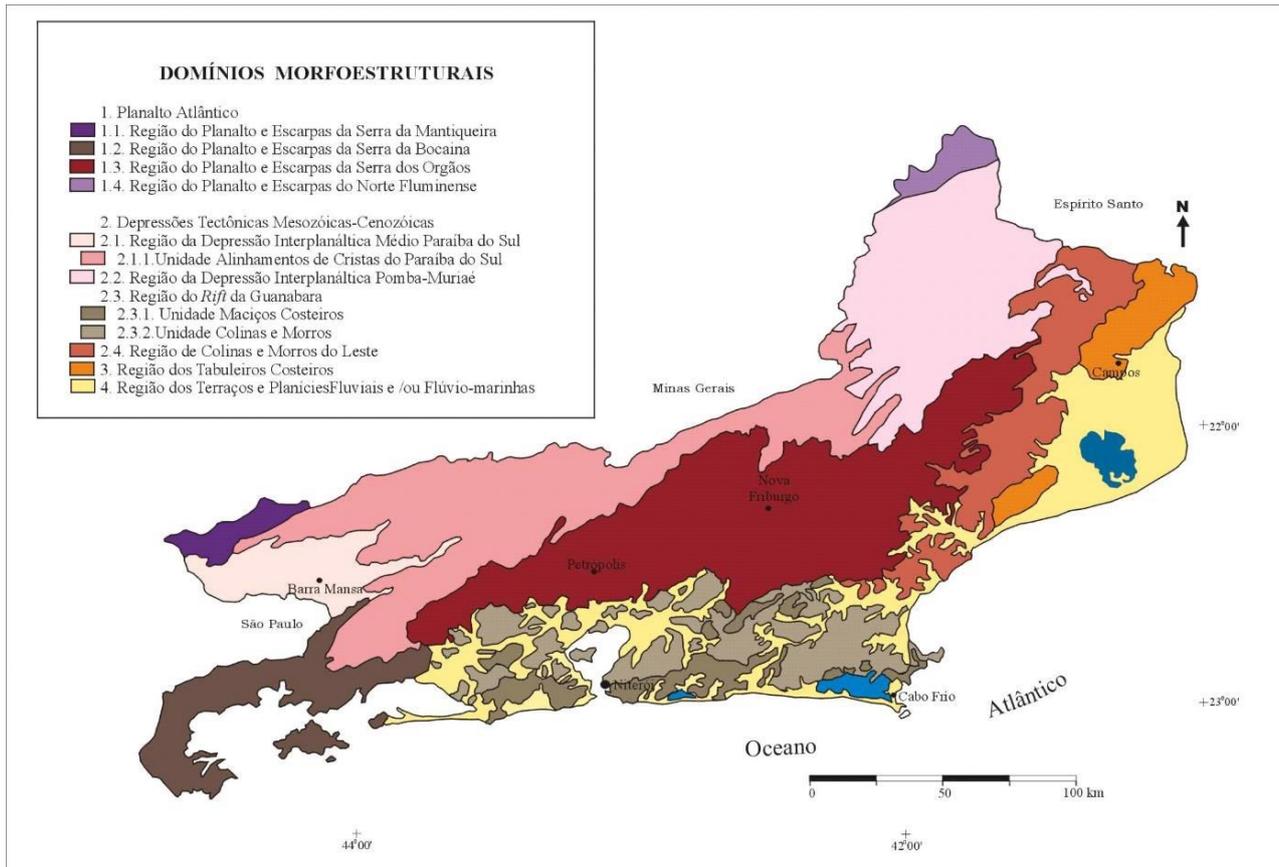


Figura 8: Domínios morfoestruturais propostos para o estado do Rio de Janeiro (Fonte: Silva, 2002)

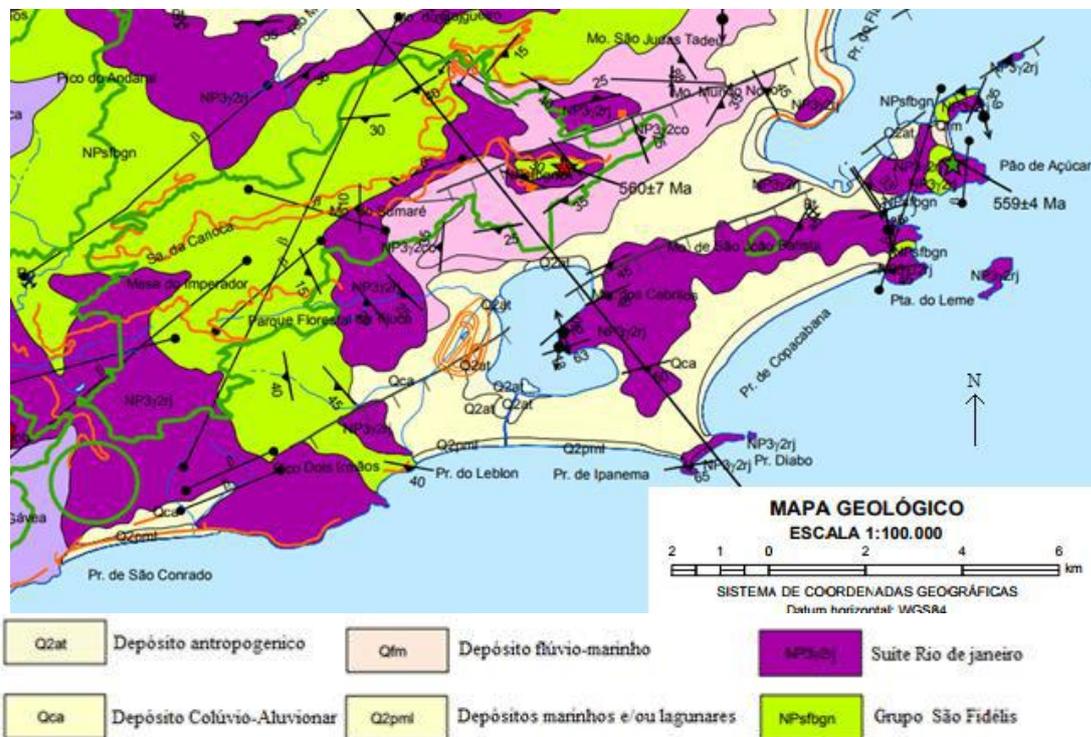


Figura 9: Mapa geológico escala 1:100.000 da Folha Baía de Guanabara SF23-Z-B-IV com trends e marcadores estruturais da área de estudo (Fonte: CPRM, 2012)

## 4 CONTEXTO TEÓRICO

### 4.1 Sondagem à Percussão

Os dados coletados durante os processos de sondagem garantem que o projeto da fundação será adequado à resistência do solo, prevenindo sub- ou superdimensionamento da fundação, patologias na construção ou até mesmo seu colapso. Uma sondagem adequada pode evitar gastos, já que, em geral, é mais custoso encontrar soluções para problemas durante a fase de construção do que durante a fase de projeto. Essas informações permitem que se defina o tipo de fundação mais indicado para determinado terreno ou mesmo que se decida por estudos geológicos mais aprofundados (PET CIVIL UFJF, 2015).

A Sondagem à Percussão, realiza um ensaio chamado SPT (standard penetration test ou teste de penetração padrão), que consiste em um ensaio para reconhecimento e investigação de subsolos sendo de grande importância para a Geologia de Engenharia e a Engenharia Civil. Tem como princípio a perfuração e cravação dinâmica de amostrador-padrão, a cada metro, pelo qual se determina o índice de resistência à penetração ( $N_{spt}$ ) de diferentes camadas constituintes do subsolo e suas profundidades, o nível do lençol freático, a capacidade de carga que o subsolo suporta em cada camada e o comportamento do mesmo ao receber essa carga. Este ensaio é padronizado segundo a Norma Brasileira – NBR 6484:2001, que é aprovada pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), de caráter voluntário, e fundamentada no consenso da sociedade. Torna-se obrigatória quando essa condição é estabelecida pelo poder público. Toda a descrição da aparelhagem e processo descritos são baseados na NBR 6484/01.

A aparelhagem padrão determina equipamentos como caixa d'água ou tambor, com divisória para decantação; bomba d'água centrífuga; recipientes para amostras, trena, medidor de nível d'água, martelo padronizado, cabeças de bateria, barrilete amostrador padrão, trépano de lavagem, trado helicoidal e concha, tubos de revestimento, composição para perfuração ou cravação e a torre de roldana (Figura 10).

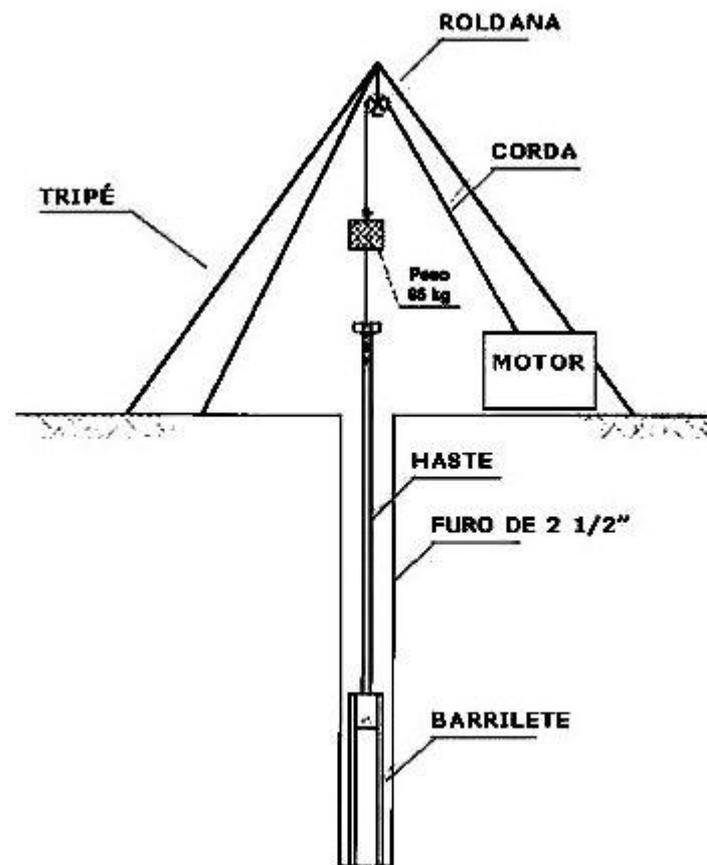


Figura 10: Ilustração das ferramentas em seus devidos lugares, de forma a obter dados por teste de penetração padrão (SPT). (Fonte: CREA-MG, acessado em 27/09/2017)

A realização da sondagem inicia-se com a perfuração vertical a trado helicoidal, até que se depare com o nível de água ou materiais resistentes. Atingindo alguma das situações possíveis, a perfuração deve continuar através do uso de um trépano (usado para fragmentar o material presente no fundo do furo) e circulação de água, procedimento chamado de lavagem. Para este presente trabalho, os testes começavam a partir de 1 a 3 metros de profundidade (de acordo com a profundidade encontrada de aterro) e alcançou uma profundidade máxima por volta dos 30 metros.

A cravação do trépano (Figura 10) no fundo do furo é realizada por repetidas quedas da coluna de perfuração (hastes e trépano). O martelo cai a 30 centímetros de altura em movimento de rotação, feito manualmente da superfície com uma cruzeta conectada ao topo da coluna de perfuração. A água é injetada no furo sob pressão pelos canais da haste. Tal água circula pelo furo e arrasta os resíduos da perfuração para a superfície. Quando as paredes do furo não se apresentam coesas, são utilizados tubos de revestimento.

Assim, para cada metro avançado, é efetuado o ensaio de penetração e sua devida anotação. No caso de penetração por batida, quando o solo está em condições normais (exemplo deste trabalho) é contado o número de golpes dados a cada 15cm em que se penetra o amostrador (3 intervalos de 15 cm, totalizando 45 cm) e crava-se o amostrador no fundo do furo, mede-se a resistência do solo, faz-se a coleta as amostras e as devidas anotações (Figura 11).

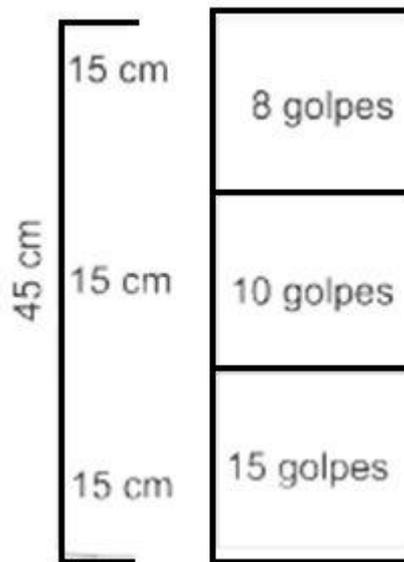


Figura 11: Esquema ilustrativo para definição do Nspt.

O amostrador é cravado por impacto de uma massa metálica com 65kg, caindo livremente a 75cm de altura. O índice de resistência à penetração (Nspt) é precisamente a quantidade de golpes necessários para a penetração dos últimos 30cm do amostrador no fundo do furo (Figura 11). Quando o solo for muito mole, é anotada a penetração do amostrador (em centímetros), ou seja, o quanto apenas o peso do amostrador afundou no solo.

Comumente, o teste é encerrado, quando atingido o substrato impenetrável ou quando se atinge a profundidade estabelecida pelo requerente. Na NBR 6484/01 ficam estabelecidos alguns critérios condicionais para se interromper a perfuração, como:

- Quando o número de golpes ultrapassar 30, em qualquer dos três segmentos;
- Um total de 50 golpes tiver sido aplicado durante toda a cravação, sem atingir os centímetros necessários para uma nova medição de Nspt;
- O amostrador padrão não avançar durante a aplicação de cinco golpes sucessivos do martelo.

Quanto ao processo de perfuração por circulação de água (associado aos ensaios penetrométricos), deve ser utilizado até onde se obtiver, nesses ensaios, uma das seguintes condições:

- Quando, em 3m sucessivos, se obtiver 30 golpes para penetração dos 15 cm iniciais do amostrador padrão;
- Quando, em 4 m sucessivos, se obtiver 50 golpes para penetração dos 30 cm iniciais do amostrador padrão;
- Quando, em 5 m sucessivos, se obtiver 50 golpes para penetração dos 45 cm do amostrador padrão.

Além disso, a NBR 6484/01 também estabelece os estados de compactidade e consistência dos materiais (Tabela 1):

SOLO	Índice de resistência a penetração - SPT	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)
	> 19	Dura(o)

Tabela 1: Estados de compactidade e consistência dos materiais. (Fonte: ABNT, NBR 6484/01)

Neste trabalho, nos boletins de sondagens pesquisados, as perfurações cessaram baseando-se na norma, ou até o alcance de materiais como rochas, matacões, seixos ou cascalhos de diâmetro grande.

## 4.2 Geoestatística

A geoestatística é um ramo da estatística muito importante para áreas como a Geologia, Engenharia de Minas e Engenharia de Petróleo, no que diz respeito ao auxílio no processo de avaliação de recursos minerais. Potencializada pelos avanços tecnológicos e desenvolvimento de softwares cada vez mais sofisticados, une conceitos estatísticos e matemáticos na geração de métodos geoestatísticos, diversificando assim, modelos analíticos para interpretação de dados (Braga, 2014).

### 4.2.1 Histograma

Histograma é uma representação gráfica (um gráfico de barras verticais ou barras horizontais) da distribuição de frequências (agrupamento das observações de uma variável em classes ou categorias) de um conjunto de dados quantitativos contínuos (Guimarães, 2004). O histograma pode ser um gráfico interpretado por valores absolutos, frequência relativa ou densidade. No caso de densidade, a frequência relativa do intervalo (i), ( $f_{ri}$ ), é representada pela área de um retângulo que é colocado acima do ponto médio da classe (i) (Figura 12).

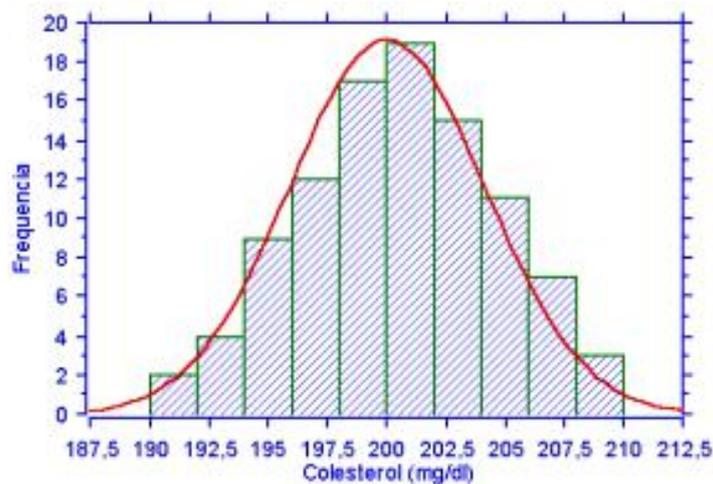


Figura 12: Exemplo de Histograma. (Fonte: <https://somentequalidade.wordpress.com>)

Consequentemente, a área total do histograma (igual a soma das áreas de todos os retângulos) será igual a 1. Assim, ao construir o histograma, cada retângulo deverá ter área proporcional à frequência relativa (ou à frequência absoluta, o que é indiferente) correspondente. No caso em que os intervalos são de tamanhos (amplitudes) iguais, as alturas

dos retângulos serão iguais às frequências relativas (ou iguais às frequências absolutas) dos intervalos correspondentes (Guimarães, 2004).

#### 4.2.2 Funções Aleatórias e modelos de Semivariograma

Modelos probabilísticos baseiam-se nos dados, ao contrário de modelos determinísticos, que levam em consideração a física do fenômeno. Enquanto modelos determinísticos fornecem apenas um valor, o uso de modelos probabilísticos possibilita a geração de vários valores possíveis, que são as simulações. De caráter objetivo, os dados comandam e os modelos seguem uma tendência lógica. Como a probabilidade tem esta característica, ela precisa ser associada e interpretada juntamente com a física do fenômeno, apresentando então ao invés de hipóteses, escolhas (Braga, 2014).

Então, para que a escolha do modelo seja ideal, precisa-se levar em conta fatores como:

- Decidir trabalhar com técnicas probabilísticas
- Informações sobre a natureza física do modelo; se atende a necessidade dos dados e se sua objetividade interna encaixa com a necessidade analítica (regionalização, homogeneidade, estacionariedade, anisotropia, etc.)
- Especificação – Inferência estatística

Para trabalhos em geoestatística, escolhe-se o modelo baseado em Funções Aleatórias. Este modelo tem como característica a suposição de que em cada ponto do espaço o fenômeno é representado por uma variável aleatória (Figura 13). O conjunto de todas essas variáveis é uma função aleatória, representada pela letra  $Z$  e indexada no espaço (Braga, 2014).

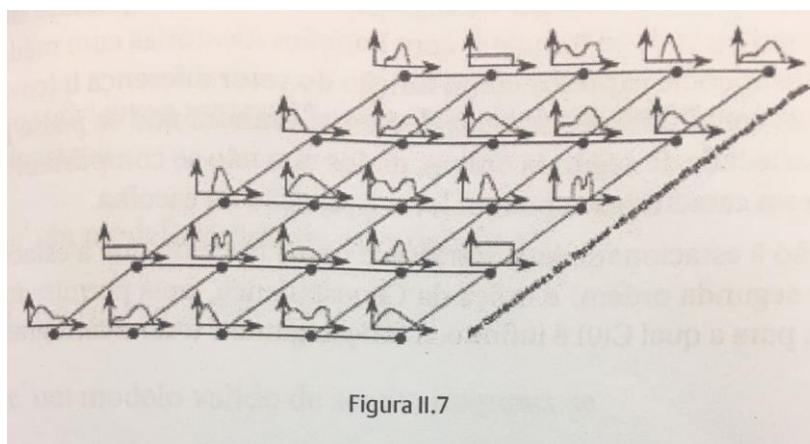


Figura 13: Representação de modelo baseado em Funções Aleatórias. (Fonte: Braga, 2014)

Função Aleatória é um vetor aleatório com dimensão infinita e não-enumerável. Para qualquer vetor aleatório de dimensão  $N$ , as funções de distribuição conjunta estão bem definidas ou então, são invariantes de translação (Andreotti, 2002).

$$Z(u)$$

$$[Z(u_1), \dots, Z(u_N)]$$

$$F(u_1, \dots, u_N, z_1, \dots, z_n) = Prob\{Z(u_1) \leq z_1, \dots, Z(u_N) \leq z_N\}$$

Devido a generalidade do modelo, é necessário supor hipóteses mais restritivas, como é o caso da estacionariedade.

$$F(u_1, \dots, u_n, z_1, \dots, z_n) = F(u_1 + h, \dots, u_n + h; z_1, \dots, z_n)$$

A escolha da estacionariedade vai permitir a inferência sobre um evento único – depósito mineral, reservatório etc. Embora não se possa provar a estacionariedade dos dados – pode-se rejeitar amostras que não provenham de uma população não estacionária. Ou seja, embora não se trate de uma hipótese, é uma decisão sujeita a contestação. A hipótese de estacionariedade vai permitir contornar a não repetibilidade no tempo, pela repetibilidade no espaço (Braga, 2014).

- Estacionariedade de Segunda Ordem (Covariograma)  $C(h)$ :

$$E\{Z(u)\} = m$$

$$C(u, u + h) = E\{Z(u).Z(u + h)\} - E\{Z(u)\}.E\{Z(u + h)\} = C(h)$$

$$\rho(h) = \frac{C(h)}{C(0)}$$

A Restrição à estacionariedade intrínseca (mais fraca do que a estacionariedade de segunda ordem) é típica da Geoestatística, pois permite trabalhar com funções aleatórias para o qual  $C(0)$  é infinito. A função gama é o semivariograma (Braga, 2014).

- Definição de Estacionariedade Intrínseca (Semivariograma):

$$E\{Z(u)\} = m$$

$$Var\{Z(u) - Z(u + h)\} = E\{[Z(u) - Z(u + h)]^2\} = 2\gamma(h)$$

Deve-se atentar que o covariograma é a medida de similaridade, enquanto o semivariograma é uma medida de dissimilaridade, onde  $\gamma(h) = C(0) - C(h)$ , quando  $C(0)$  é finita).

- Condição suficiente para ser Semivariograma  $\gamma(h)$ :

$$-\sum_{\alpha=1}^n \sum_{\beta=1}^n \lambda_{\alpha} \lambda_{\beta} \gamma(u_{\alpha} - u_{\beta}) \geq 0; \quad \forall u_{\alpha} \text{ e } \lambda_{\alpha} \text{ t.q. } \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} = 0$$

#### a) Variável Regionalizada (VR)

É uma função definida em um domínio limitado do espaço (Matheron, 1965). Grandeza Regional será um funcional, ou seja, grandeza cujo valor depende de todos os valores da VR. Assim, define-se média, semivariograma realizado, etc. O modelo probabilístico para a VR é o modelo de FA, sendo este, uma particular realização de uma FA (Braga, 2014).

Existem vários modelos de semivariograma, como utilizou-se o Modelo Exponencial no presente trabalho, este será descrito logo abaixo.

#### b) Modelo de Semivariograma Exponencial

O Modelo Exponencial padrão  $\gamma(|h|) = 1 - \exp\left(-\frac{|h|}{a}\right); h \geq 0$  tem como patamar igual a 1, embora não tenha alcance finito formalmente, na prática o alcance é considerado igual a  $3a$  (Figura 14). Diferentes elementos da família exponencial podem ser gerados variando-se o valor do patamar e do alcance (Braga, 2014).

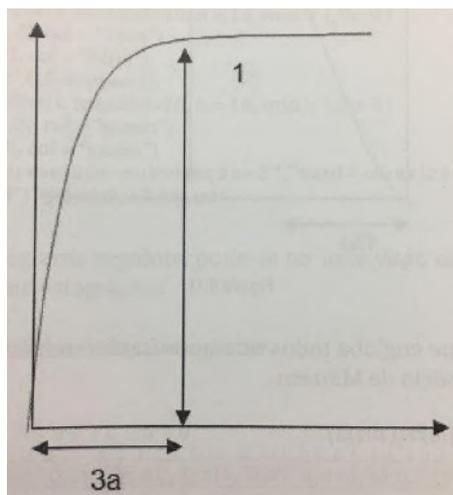


Figura 14: Demonstração do modelo exponencial. (Fonte: Braga, 2014)

### c) Krigagem Ordinária

A krigagem ordinária é um procedimento de estimação linear para uma variável regionalizada que satisfaz a hipótese intrínseca e procura minimizar, sem viés, o erro de estimação, ou seja, objetiva que o erro residual médio seja igual a zero. Na realidade, a minimização do erro de estimação constitui um dos principais objetivos no processo de estimação, uma vez que, possibilita auferir a sua qualidade. Além disso, a krigagem ordinária ainda tem como característica ser o melhor estimador, pelo fato de minimizar a variância dos erros (Sturaro, 1988).

Considerando que é difícil quantificar o erro e a variância para os pontos estimados, haja vista o desconhecimento dos valores reais, a krigagem ordinária faz uso do modelo de função aleatória, de base probabilística, que permite atribuir pesos às amostras usadas nas estimativas (Lima, 2006).

### d) Simulação Geoestatística

Leva em conta a distribuição de frequências e a distribuição espacial dos dados. Um método de simulação geoestatística deve atender a três condições básicas (Braga, 2014):

- Os valores simulados devem coincidir com os valores observados (condicionamento).
- O histograma dos valores simulados deve ser similar ao histograma das observações (assim como as demais estatísticas básicas). Em termos estatísticos, devem ser equivalentes.
- O semivariograma (ou o covariograma) dos valores simulados deve ser similar àquele dos valores observados. Em termos geoestatísticos, devem ser equivalentes.

### 4.2.3 Simulação Sequencial Gaussiana

A Simulação Sequencial Gaussiana (SSG) é o método mais direto para simular uma Função Aleatória Multigaussiana. As etapas da SSG são, nesta ordem, definir um caminho aleatório que passe uma vez por cada nó da malha, obter em cada nó visitado a krigagem da distribuição acumulada condicional. Após isso, simular um valor para este nó, acrescentar o valor simulado ao conjunto de observações e simulações, continuar até esgotar o número de nós a visitar, obter via transformação inversa os valores simulados na escala original, uma vez que tenham sido transformados em z-scores.

### 4.2.4 SGeMS

O SGeMS (Stanford Geostatistical Modeling Software) é um pacote computacional *open-source*, ou seja, de código aberto, criado com a finalidade de resolver problemas envolvendo variáveis espaciais regionalizadas. O programa fornece aos profissionais de geoestatística uma interface amigável, uma visualização 3D interativa e uma ampla seleção de algoritmos. Muito utilizado principalmente em áreas como a indústria de óleo e gás, engenharia civil e ambiental. No painel principal do software encontra-se (Figura 15):

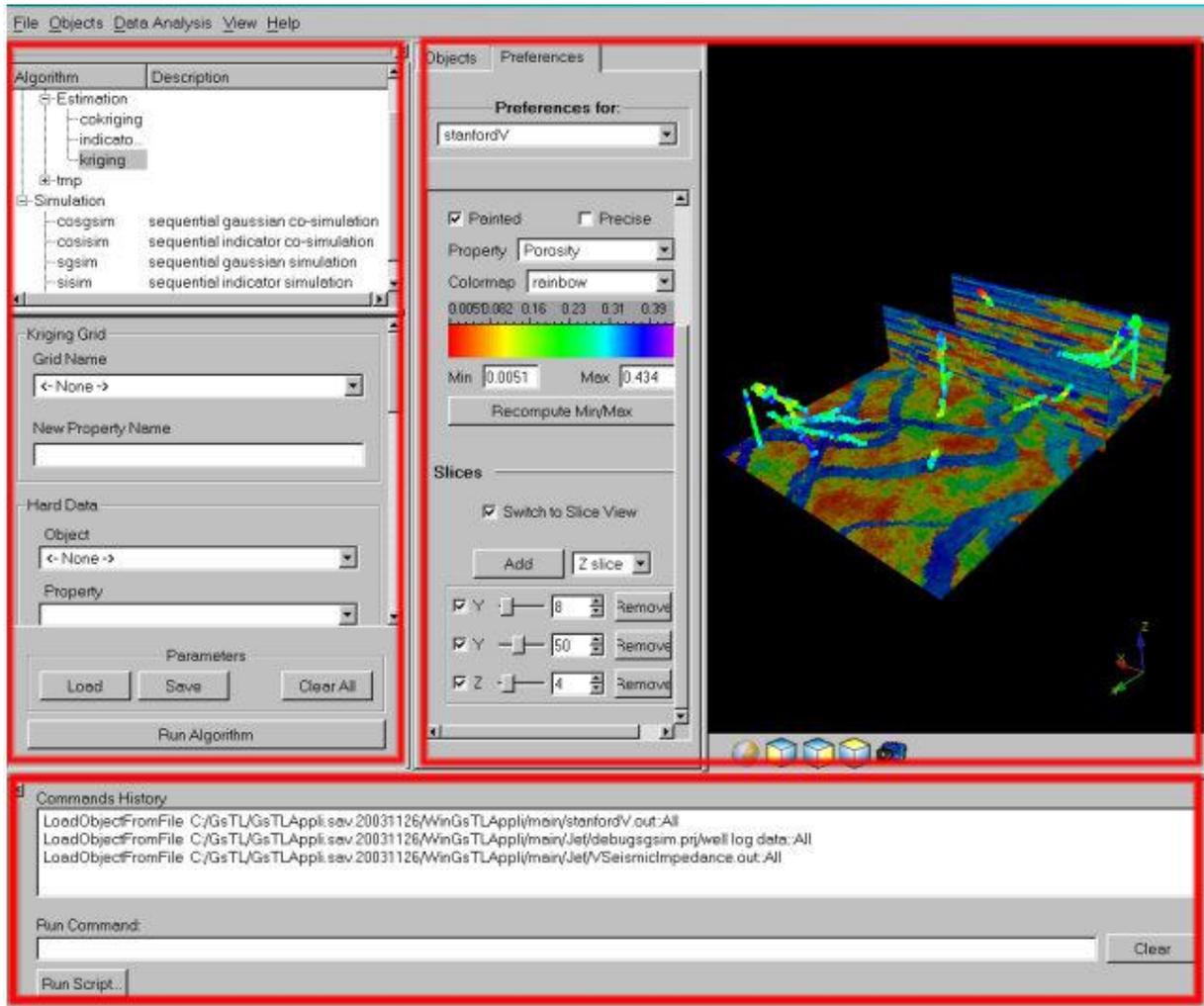


Figura 15: Apresentação das funcionalidades principais do software SGEMS. (Fonte: SGeMS Guide)

- **Painel de algoritmos:** Painel onde o usuário seleciona a ferramenta geoestatística desejada e conseqüente carregamento de dados. A parte superior desse painel mostra uma lista de algoritmos disponíveis, como por exemplo a Krigagem e a Simulação Sequencial Gaussiana. Quando um algoritmo dessa lista é selecionado, um formulário contendo a entrada de dados correspondentes aos parâmetros aparece abaixo da lista de ferramentas.
- **Painel de visualização:** Um ou vários objetos podem ser exibidos neste painel, onde há uma malha cartesiana e um conjunto de pontos, em um ambiente 3-D interativo. Opções de visualização, como mapas de cores, também são definidas no painel de visualização.
- **Painel de comando:** Não aparece imediatamente quando o software é iniciado, tem-se de inicializá-lo. Para momentos em que deseja-se digitar o comando por si próprio ao invés de algum pré-programado.

## **5 METODOLOGIA**

### **5.1 Seleção de dados**

Os dados utilizados foram adquiridos junto à Fundação Geo-Rio, órgão pertencente à Secretaria Municipal de Obras da Prefeitura do Estado do Rio de Janeiro. Estes, foram produzidos por diferentes empresas e consistem em arquivos PDF dos Bairros Jardim Botânico e Gávea, com a cópia do boletim de cada perfil de sondagem, suas devidas aquisições de SPT anotadas e descritas à mão pelo geólogo responsável (Figuras 16 e 17). Em cada boletim, consta o posicionamento das sondagens (com croquis), o endereço do serviço ou obra para o qual estavam sendo realizadas as sondagens, data, a descrição táctil visual, o nível de água, quando encontrado, cota da boca e a caracterização geotécnica a cada metro, com o índice de resistência (SPT) anotados, tanto no início quanto no fim da aquisição, de acordo com as normas NBR 6484 - Execução de Sondagens de Simples Reconhecimento do Solo e extinta NBR 7250 - Identificação e Descrição de Amostras de Solos Obtidas em Sondagens de Simples Reconhecimento dos Solos. Estes dados pertencem à várias empresas diferentes contratadas para este serviço ao longo dos anos.

Foram um total de 253 boletins de sondagem, de idades que variam entre 1950 e 1975, época em que as áreas eram divididas por lotes de terrenos.

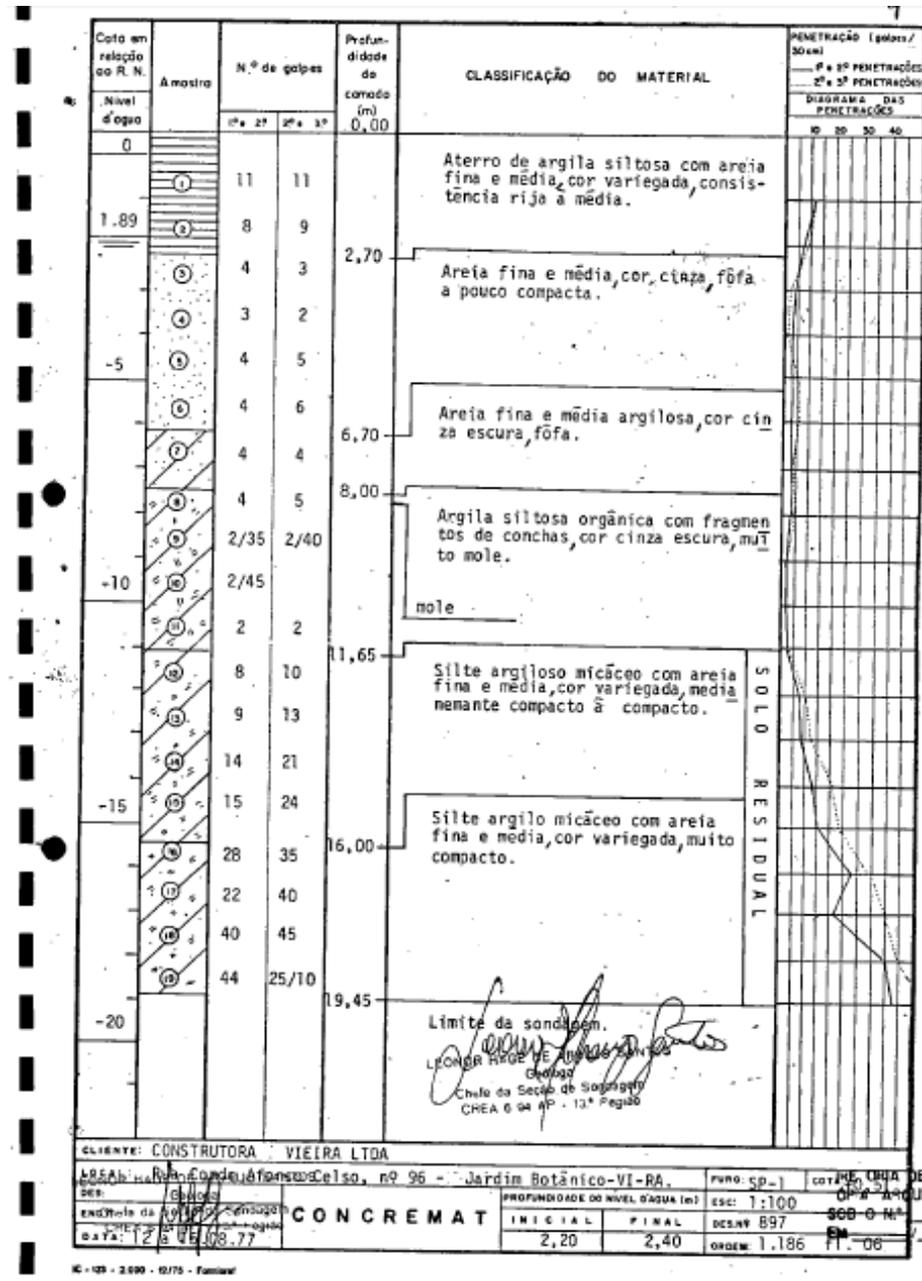


Figura 16: Exemplo de boletim de sondagem à percussão utilizado no trabalho. (Fonte: Dados Geo-Rio, CONCREMAT)

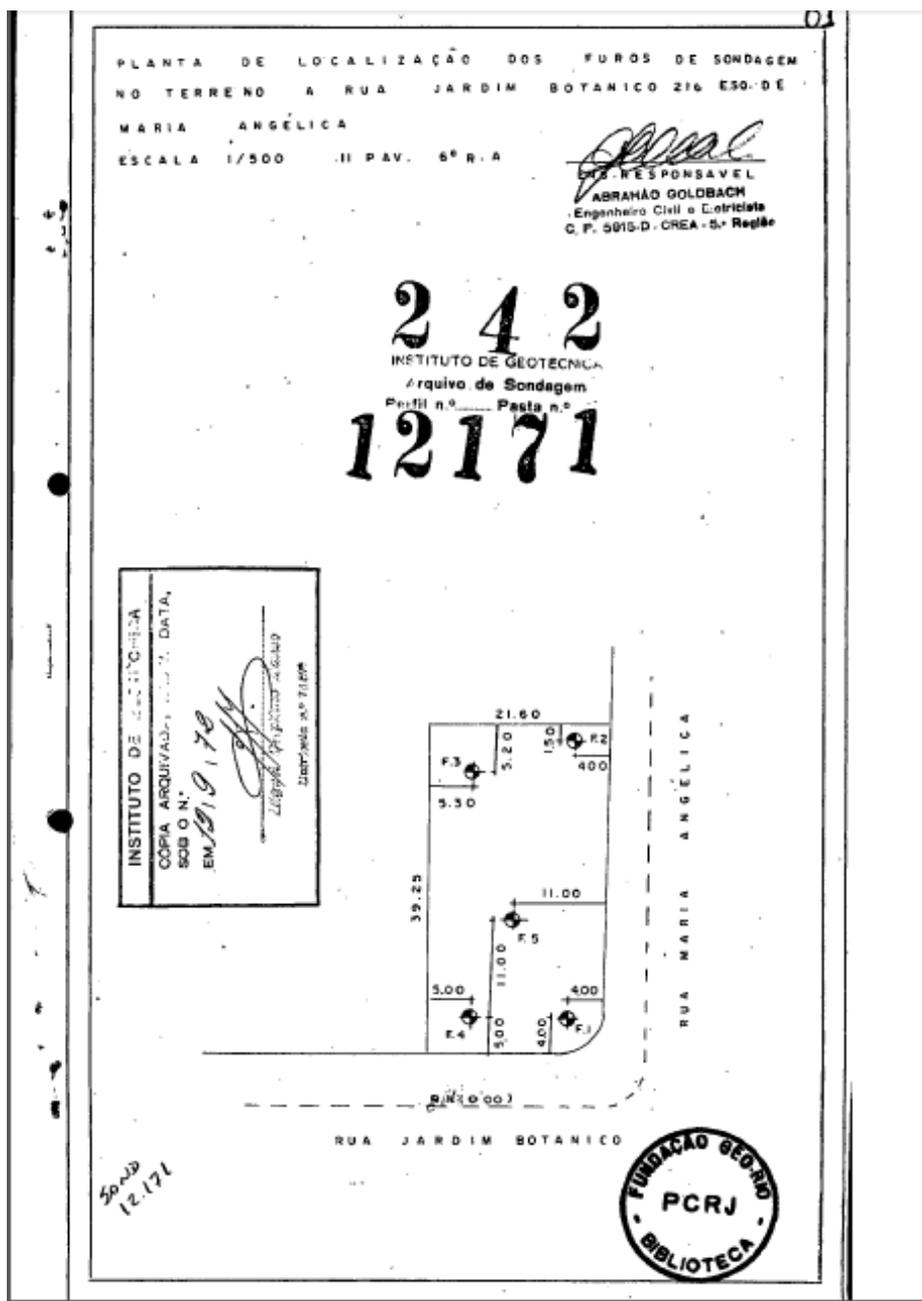


Figura 17: Exemplo de croqui de uma sondagem pertencente aos boletins de sondagem, que demonstra onde foram efetuados os testes. (Fonte: Dados Geo-Rio, SOLOTESTE ENGENHARIA)

Devido à época de aquisição, estes dados não continham o posicionamento preciso por meio de coordenadas (Figura 16), então, utilizou-se o Google Earth e suas ferramentas de precisão, que juntamente com a análise do croqui apresentado em cada documento (Figura 17), obteve-se a geolocalização de cada sondagem. Todos os dados encontram-se geolocalizados em coordenadas UTM e sistema geodésico de referência WGS84, adquiridos de forma meticulosa (Figura 18).



Figura 18: Geolocalização dos dados cedidos pela Geo-Rio no Google Earth de acordo com os boletins fornecidos pela Geo-Rio, mostrando todos os dados, referentes aos bairros da Gávea e Jardim Botânico plotados. (Fonte: Google Earth, acessado em 23/09/2017)

Para sistematizar os dados criou-se códigos para cada agrupamento de dados, conforme desenvolvido em (Alves, 2016), onde definiu-se códigos numéricos com o intuito de facilitar a linguagem na programação para melhor modelagem de dados. A tabela de compatibilidade e consistência da norma 6484/2001 foi codificada por números que variam de 1 até 10, além de letras (Tabela 2). Também foram criados códigos para os tipos de sedimentos contidos na área de estudo (Tabela 3).

COD	COD_L	COD_N	
FOFA	FO	1	AREIAS
POUCO COMPACTA	PCOMP	2	
MEDIANAMENTE COMPACTA	MCOMP	3	
COMPACTA	COMP	4	
MUITO COMPACTA	MUCOMP	5	
MUITO MOLE	MUMO	6	ARGILAS
MOLE	MO	7	
MÉDIA	ME	8	
RIJA	RI	9	
DURA	DU	10	

Tabela 2: Codificação da planilha de Compacidade e Consistência da Norma. (6484/2001)

CODIGO SEDIMENTO	
AREIA	1
ARGILA	2
SOLO RESIDUAL	3
SEDIMENTO ANTROPOGENICO	4
IMPENETRABEL	5

Tabela 3: Codificação dos tipos de sedimentos da área de estudo.

Uma vez os dados geolocalizados, tanto da Gávea quanto do Jardim Botânico (Figura 18), realizou-se toda a compilação manual de todos os dados para uma planilha Excel, para que esta fosse utilizada no SGEMS (Tabela 4). Além disso, desenvolveu-se uma triagem meticulosa com base na interpretação dos dados, pois alguns não estavam em concordância com o método vigente empregado na obtenção destes (muito antigos, relação de golpes discordante com a metodologia vigente) ou careciam de informação adicional (croqui, endereço).

Alguns erros descritivos de registro tornaram-se visíveis durante a modelagem, quando confrontados com dados vizinho. Quando se gerou modelos estatísticos, estes mostraram que poderia existir alguma incongruência na determinação do valor de SPT em relação ao tipo de material encontrado, o que foi confirmado com a leitura da descrição dos testemunhos. Sendo assim, tais dados também foram retirados, pois poderiam afetar na simulação feita pelo software SGEMS.

Como a classificação de resistência varia dentro de um mesmo intervalo tanto para argilas quanto para areias, fez-se necessária a escolha de apenas um tipo de sedimento, uma vez que a modelagem as consideraria uma mesma variável. Com base na maior quantidade de dados SPT referentes às argilas no bairro do Jardim Botânico, foi determinado este conjunto o alvo deste presente trabalho.

4216	5,9	6,9	7	30	POUCO COMPACTA				AREIA SILTOSA C/MICA E PEDREGULHO
4216	6,9	7,6	10	30	MEDIANAMENTE COMPACTA				AREIA SILTOSA C/MICA E PEDREGULHO
4216	7,6	8,6	13	30	MEDIANAMENTE COMPACTA				AREIA SILTOSA C/MICA E PEDREGULHO
4216	8,6	9,6	13	30	MEDIANAMENTE COMPACTA				AREIA SILTOSA C/MICA E PEDREGULHO
4216	9,6	10,6	14	30	MEDIANAMENTE COMPACTA				AREIA SILTOSA C/MICA E PEDREGULHO
4216	10,6	11,6	15	30	MEDIANAMENTE COMPACTA				AREIA SILTOSA C/MICA E PEDREGULHO
4216	11,6	12,5	24	30	COMPACTA				AREIA SILTOSA C/MICA E PEDREGULHO
3443	0	0,6	0	0	0	0	0		SEDIMENTO ANTRÓPOGÊNICO, MATA
3443	0,6	1,6	0	30	POUCO COMPACTA	PCOMP	2		AREIA MÉDIA E FINA, POUCO ARGILOSA, COM PEDREGULHOS, POUCO COMPACTA
3443	1,6	2,6	25	15	COMPACTA	COMP	4		AREIA MÉDIA E FINA, POUCO ARGILOSA, COM PEDREGULHOS, COMPACTA, COM
3443	2,6	3,65	34	15	MUITO COMPACTA	MUCOMP	5		AREIA MÉDIA E FINA, POUCO ARGILOSA, COM PEDREGULHOS, MUITO COMPACTA
3443	3,65	4,65	0	0	0	0	0		IMPENETRÁVEL, MATA
3429	0	1,5	0	0	0	0	0		SEDIMENTO ANTRÓPOGÊNICO, MATA
3429	1,5	2,5	3	30	FOFA				SEDIMENTO ANTRÓPOGÊNICO, MATA
3429	2,5	3,5	3	30	MOLE				ARGILA ARENOSA MARRON
3429	3,5	4,5	7	30	MÉDIA				ARGILA ARENOSA MARRON
3429	4,5	5,5	12	30	RIJA				ARGILA ARENOSA
3429	5,5	6,5	17	30	RIJA				ARGILA HT ARENOSA
3429	6,5	7,5	25	30	DURA				ARGILA HT ARENOSA
3372	0	1,1	12	30	MEDIANAMENTE COMPACTA	MCOMP	3		AREIA GROSSA E FINA, MUITO ARGILOSA - COM AM
3372	1,1	2,3	0	0	COMPACTA	COMP	4		ALTERAÇÃO DE ROCHA / AREIA GROSSA E FINA - POUCO ARG
3372	2,3	3,3	0	0	0	0	0		IMPENETRÁVEL, MATA
3329	0	0,13	0	0	0	0	0		SEDIMENTO ANTRÓPOGÊNICO, ARGILA COM MUITA
3329	0,13	0,6	0	0	0	0	0		SEDIMENTO ANTRÓPOGÊNICO, ARGILA COM MUITA
3329	0,6	1,6	15	15	RIJA				ARGILA COM AREIA MÉDIA E FINA, CONSISTÊNCIA
3329	1,6	2,6	10	30	MÉDIA				ARGILA COM AREIA MÉDIA E FINA, CONSISTÊNCIA
3329	2,6	3,6	11	30	RIJA				ARGILA COM AREIA MÉDIA E FINA, CONSISTÊNCIA
3329	3,6	4,6	11	30	RIJA				ARGILA COM AREIA MÉDIA E FINA, CONSISTÊNCIA
3329	4,6	5,6	6	30	MÉDIA				ARGILA COM AREIA MÉDIA E FINA, CONSISTÊNCIA
3329	5,6	7,3	12	30	RIJA				ARGILA COM AREIA MÉDIA E FINA, CONSISTÊNCIA

Tabela 4: Planilha geral dos dados de SPT compilada, mostrando os dados referentes ao bairro Jardim Botânico, Rio de Janeiro.

Após esta triagem inicial, ainda se subdividiu a planilha em relação à sedimentologia, pois apenas as argilas em subsuperfície seriam o enfoque deste trabalho. Então, separou-se as argilas dos dados onde se identificavam como aterro, matacões, solo residual de dureza extrema (valores de SPT acima de 50) e areias, da planilha geral do Jardim Botânico. Com isso, foi obtida a planilha das argilas do Jardim Botânico, que seria utilizada para a análise geoestatística (Tabela 5).

	A	B	C	D	E	F
49	10	-12.09	3	682788.19	7459556.35	
50	10	-13.29	2	682788.19	7459556.35	
51	11	-8.43	5	682815.67	7459528.05	
52	11	-9.43	2	682815.67	7459528.05	
53	11	-10.43	2	682815.67	7459528.05	
54	11	-11.08	2	682815.67	7459528.05	
55	12	-1.3	8	683033.77	7459685.34	
56	15	-14.8	2	682749.57	7459273.67	
57	15	-16.8	3	682749.57	7459273.67	
58	15	-17.8	5	682749.57	7459273.67	
59	15	-21.8	15	682749.57	7459273.67	
60	17	-2.27	4	683574.47	7459713.01	
61	19	-2.25	6	683749.39	7459644.37	
62	19	-3.25	6	683749.39	7459644.37	
63	19	-4.25	9	683749.39	7459644.37	
64	19	-5.45	6	683749.39	7459644.37	
65	19	-7.65	11	683749.39	7459644.37	
66	19	-8.65	6	683749.39	7459644.37	
67	19	-9.25	12	683749.39	7459644.37	
68	21	-2.31	1	683997.81	7459797.44	
69	21	-4.09	2	683997.81	7459797.44	
70	21	-10.45	9	683997.81	7459797.44	
71	21	-11.45	7	683997.81	7459797.44	
72	21	-12.33	7	683997.81	7459797.44	
	ARGJB0909		SUBARGJB1009	SUBARGJB1009T2	PRITENTATIVA	

Tabela 5: Planilha dos valores de SPT das argilas do Bairro Jardim Botânico, utilizada no SGEMS para análise geoestatística.

Complementarmente, visando uma análise geoestatística mais localizada e detalhada nos perfis de sondagem que estavam mais próximos uns dos outros, realizou-se ainda uma subdivisão da planilha e consequente geração de uma sub-área, buscando-se esta maior concentração e proximidade dos dados em uma determinada região, para utilização no SGEMS (Tabela 6). A localização dos dados e as respectivas áreas estão demarcadas abaixo (Figura 19).

	A	B	C	D	E
1	2	-8.25	12	682396.7	7459197.4
2	2	-9.55	13	682396.7	7459197.4
3	3	-3.39	9	682620.9	7459652.54
4	3	-4.49	10	682620.9	7459652.54
5	3	-5.49	13	682620.9	7459652.54
6	3	-6.49	11	682620.9	7459652.54
7	3	-7.49	11	682620.9	7459652.54
8	3	-8.69	9	682620.9	7459652.54
9	3	-9.59	8	682620.9	7459652.54
10	3	-13.44	3	682620.9	7459652.54
11	3	-14.29	4	682620.9	7459652.54
12	3	-15.29	2	682620.9	7459652.54
13	3	-16.29	4	682620.9	7459652.54
14	3	-17.69	4	682620.9	7459652.54
15	6	-15.55	6	682429.2	7459165.95
16	6	-16.55	4	682429.2	7459165.95
17	6	-17.55	2	682429.2	7459165.95
18	6	-18.55	2	682429.2	7459165.95
19	6	-19.95	2	682429.2	7459165.95
20	8	20	7	682668.5	7459515.64
21	8	18.8	13	682668.5	7459515.64
22	8	17.8	14	682668.5	7459515.64
23	8	16.8	11	682668.5	7459515.64
24	8	15.8	10	682668.5	7459515.64

ARGJB0909 SUBARGJB1009 SUBARGJB1009T2

Tabela 6: Planilha Excel dos dados SPT da subdivisão da área que foi objeto de estudo.

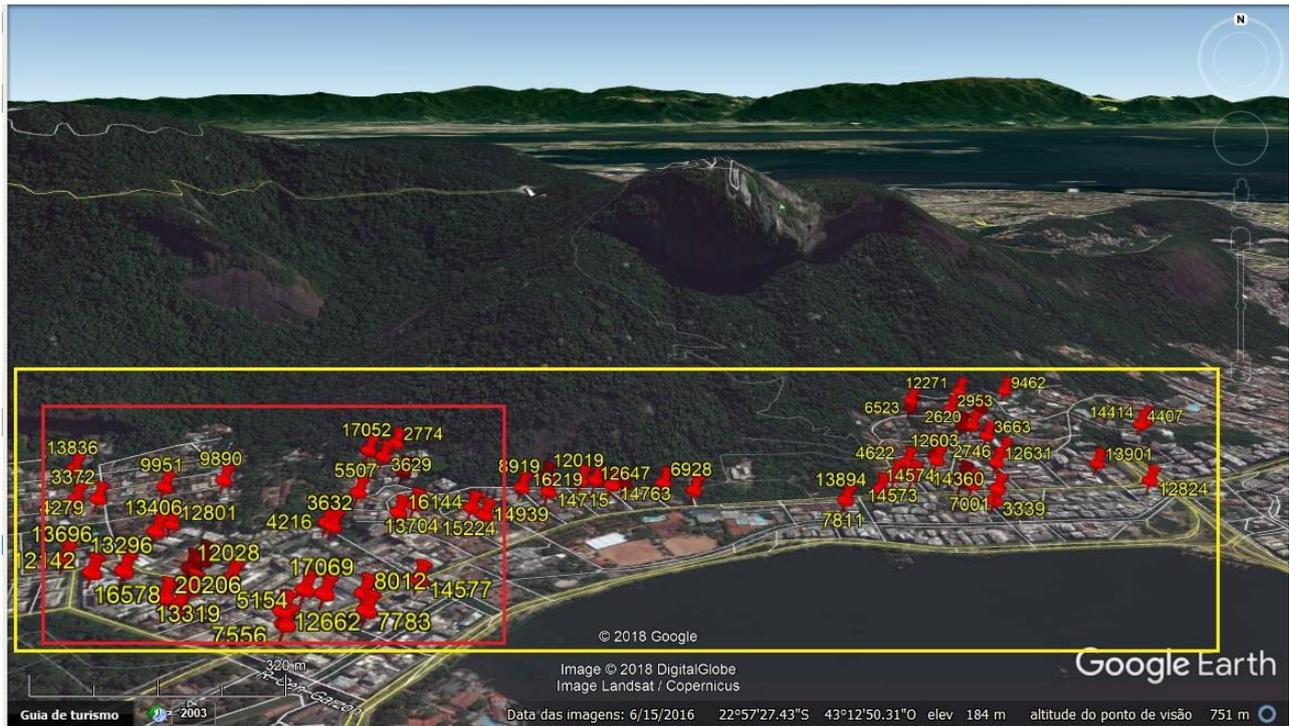


Figura 19: Geolocalização dos dados no Google Earth demonstrando a elevação do terreno, de acordo com os boletins fornecidos pela Geo-Rio. Áreas de análise demarcadas, onde o quadrado amarelo é a área total que foi simulada primeiramente e o quadrado vermelho, a subárea. (Fonte: Google Earth)

## 6 RESULTADOS

### 6.1 SGeMS

Após a fase de sistematização das informações e criação do banco de dados a ser analisado, foi utilizado o software SGeMS para a análise geoestatística. A partir da planilha Excel, é gerado um arquivo no formato *.txt*, compatível com o software. Os dados foram carregados, determinando-se o formato POINT SET, definindo-se onde estavam os eixos X,Y,Z e então, dado o comando de execução da leitura dos dados (Figura 20).

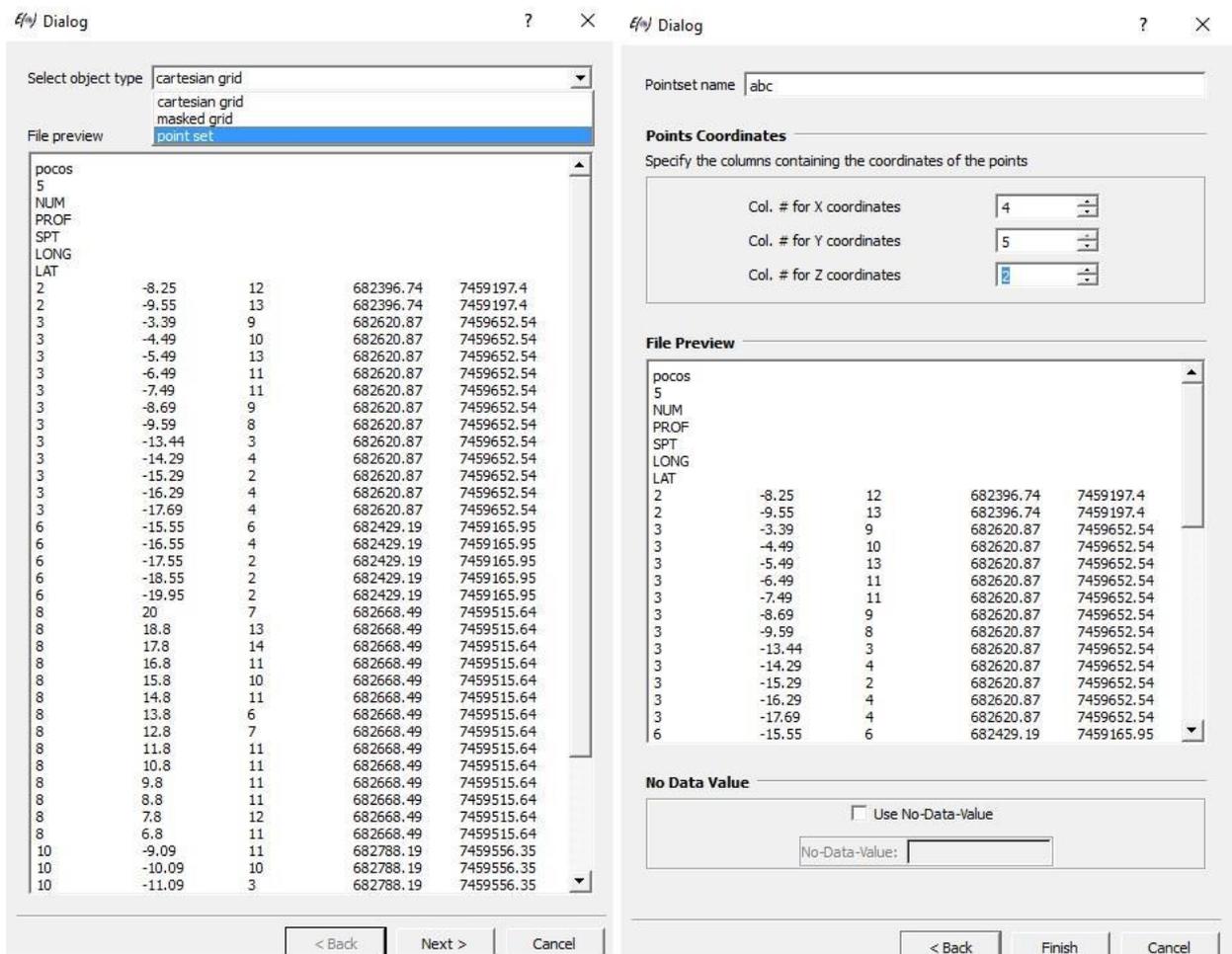


Figura 20: Demonstração de como foi efetuado o carregamento dos dados no SGeMS.

Para melhor visualização dos dados de maneira generalizada, foram selecionadas as seguintes preferências, para que se tornasse mais fácil a interpretação dos dados carregados (Figuras 21 e 22):

- Z-scaling = 4, exagero da escala vertical, associado assim ao eixo Z;
- Barra de Legenda = SPT com pintura *rainbow*, variável esta que será analisada, onde as cores mais frias indicam menores valores de SPT e as cores quentes maiores valores de SPT existentes na tabela que foi carregada no programa;
- Point Size = 4, tamanho relativo de cada ponto

Ressalta-se que esta escala de tamanho dos pontos pôde ser mudada durante o trabalho, para que se encontrasse a ideal para análise dos resultados da simulação.

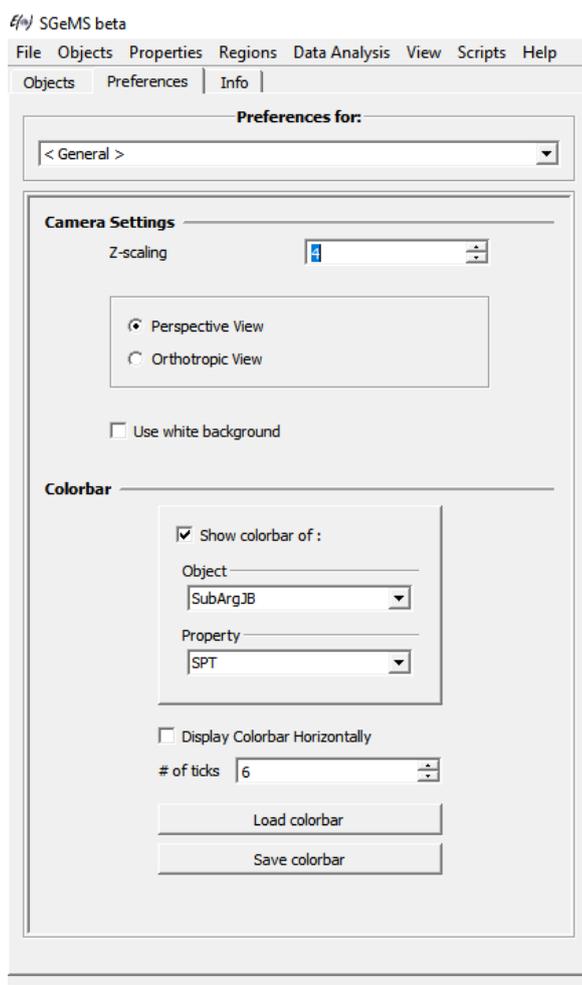


Figura 21: Propriedades iniciais definidas para melhor adequação dos dados do trabalho à visualização ideal pretendida neste trabalho.

Definidas as preferências, os dados foram apresentados (Figura 22):



Figura 22: Dados plotados dos boletins de sondagem em escala ideal para análise e com gráfico de SPT determinado, evidenciando uma de SPT de 0 à 34 na escala.

Posteriormente, para que a análise geoestatística fosse viável, fez-se necessária a criação de uma malha que abrangesse todos os dados plotados. Sendo assim, de acordo com os números máximos e mínimos das coordenadas X, Y e Z foi determinada uma malha (Figura 23), que estivesse o mais próximo possível dos limites dos dados para, uma vez feita a simulação geoestatística, esta gerasse variáveis aleatórias de forma mais acurada possível. Após criação desta malha que abrange todos os dados, criou-se também uma sub-malha (Figura 24), a fim de desenvolver uma segunda simulação mais detalhada, por estar em um espaço menor e ter dados mais próximos.

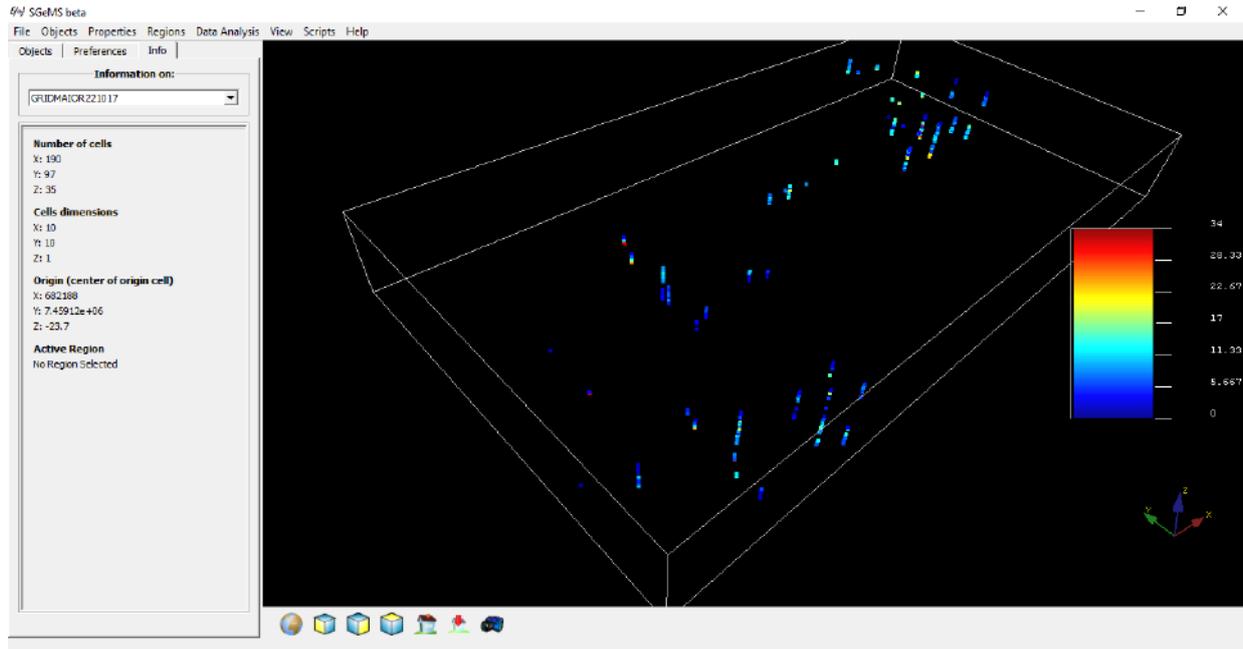


Figura 23: Demonstração da disposição da malha geral, criada de acordo com o início e o fim dos dados dos boletins de sondagem.

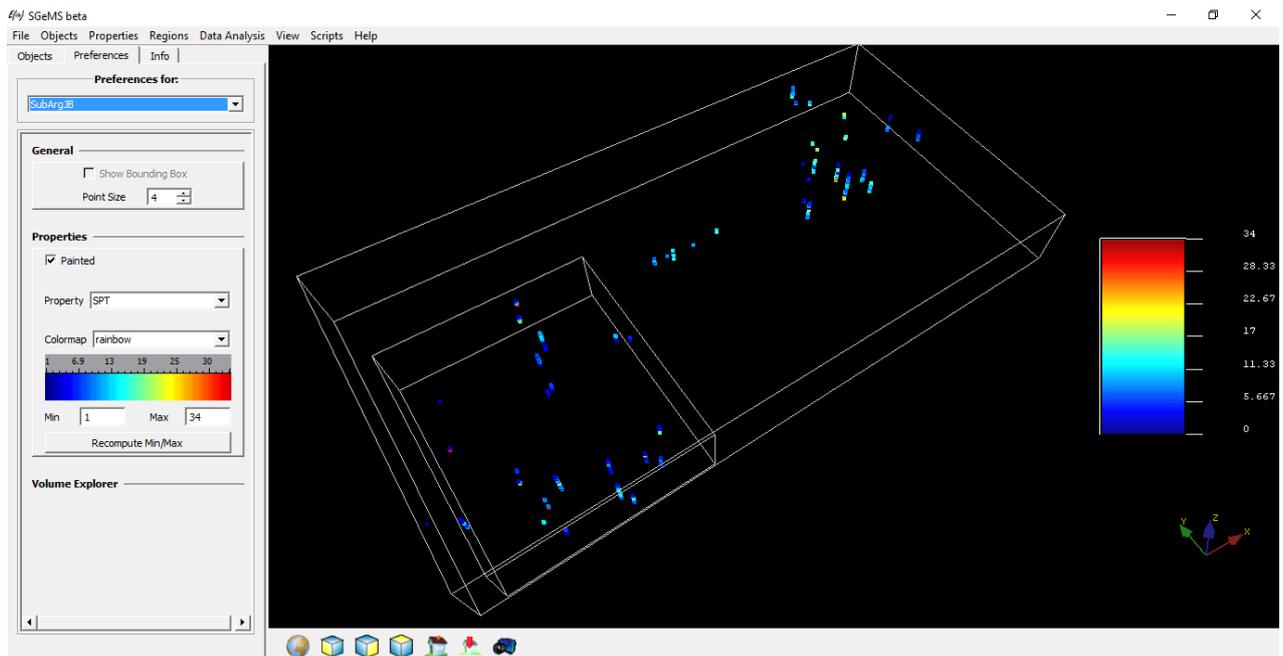


Figura 24: Demonstração da disposição da sub-malha, com o objetivo de aumentar a acurácia na análise geoestatística.

## 6.2 Histogramas

Como o SGEMS é um programa geoestatístico, pode-se gerar um histograma (Figura 29), que é uma ferramenta estatística utilizada para uma análise qualitativa dos dados plotados. É importante salientar, que mesmo que neste trabalho tenha-se subdividido a malha em uma área menor, para melhor modelagem na simulação sequencial gaussiana, por se tratarem de dados selecionados com o mesmo critério geológico levados em consideração (argilas subsuperficiais), as duas malhas terão seus histogramas e consequentemente variogramas, coincidentes, ou seja, parecidos analiticamente. Sendo assim, foca-se apenas a interpretação geoestatística na malha maior, por conter a totalidade dos dados e ter assim mais confiabilidade interpretativa. Abaixo temos o resultado do Histograma para a área maior (Figura 25).

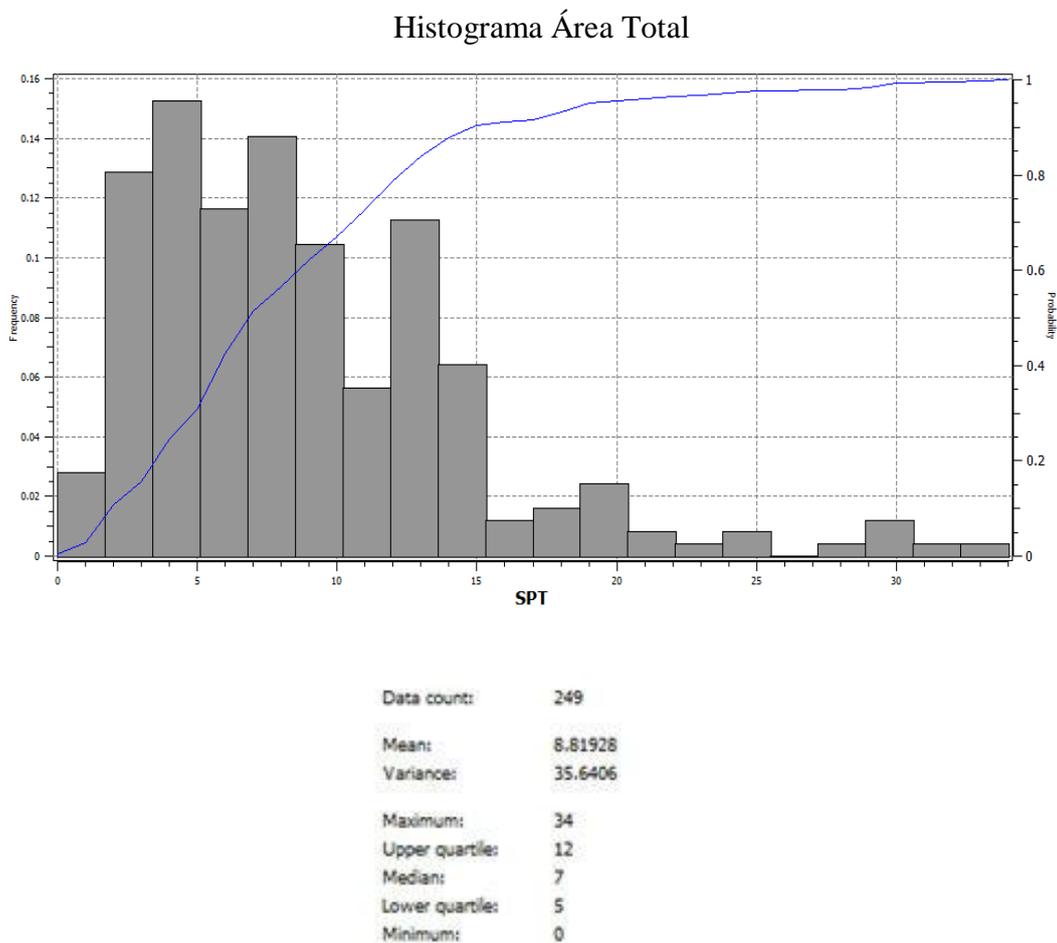


Figura 25: Histogramas gerados no SGEMS, selecionados na aba Análise de Dados.

Gerou-se então o Histograma (Figura 25), onde verifica-se uma relação entre a Frequência e os valores de SPT, representados pelo gráfico de colunas, além da Probabilidade, representada pela curva azul, de Distribuição Cumulativa de Frequência. Este apresenta um padrão unimodal, onde está evidenciado a relação intrínseca entre os dados, uma característica de qualidade, pois demonstra existir um limite de especificação e que este é controlado durante o processo, de modo que satisfaça a esta mesma especificação, que é exatamente a análise desta argila subsuperficial que tem total ligação parental de formação e evolução. Observa-se assimetria à direita e sua característica leptocúrtica (coeficiente de achatamento ou curtose), que mostra que maior é a concentração de valores em torno da média, existindo uma maior frequência de dados com valores de SPT mais baixos (argilas com índices de resistência menor), com maior pico de classe de frequência em argilas moles, com valores de SPT aproximadamente em 4.

Apresenta também, pelo menos três picos principais e maiores de classes de frequência evidenciados, com valores de SPT, respectivamente e aproximadamente, em 4 (argila mole), em 8 (argila média) e em 13 (argila rija) e ainda se nota que estes picos maiores são marcados exatamente por apresentarem logo em sequência, picos de classes de frequência bem mais baixos, demarcando de forma significativa os três tipos de substratos principais encontrados na área. Em classes de frequências menores, há um aparecimento de argilas mais duras, com SPT >19, que demonstram haver um material argiloso em estado mais consolidado. Para completar, a curva ascendente à direita da distribuição cumulativa de frequência mostra uma maior inclinação no trecho de SPT < 15, indicando a probabilidade de ocorrência de dados com SPT em valores menores em comparação com dados de SPT maiores. Recordar-se novamente, que somatório das áreas de todas as barras do histograma é igual à unidade.

### 6.3 Variogramas

Para gerar os variogramas referentes às 2 malhas pré-selecionadas, segue-se o mesmo passo-à-passo explicitado (Figura 27): Definem-se os dados que serão utilizados e os parâmetros número de classes (*number of lags*), tamanho da classe (*lag separation*), tolerância da classe (*lag tolerance*), direção (*azimuth, dip*), tolerância angular (*tolerance*), limite de direção (*bandwidth*), e limite superior e inferior (*head cut off* e *tail cut off*) (Figura 26).

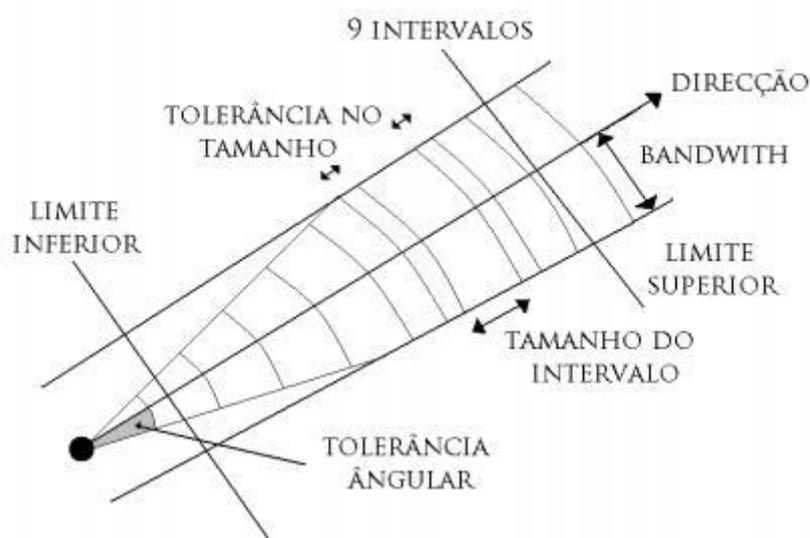


Figura 26: Modelo esquemático e denominações dos parâmetros utilizados para geração de um variograma (Fonte: Correia, 2010).

Como foi analisado apenas SPT, em *Head and Tail* repete-se apenas a única variável que será utilizada. Foram testadas várias combinações de números de classes, separação de classe, tolerância de classe, até que fossem gerados variogramas que investigassem a variável de forma satisfatória. Os parâmetros que possibilitaram melhor visualização e análise dos dados, segundo suas características de espaciais, foram: número de classes 40, separação de classe 2 e tolerância de classe 1 (Figura 27).

Figure 27 shows the step-by-step configuration of variogram parameters in the 'SPT vs. SPT' software. The interface is divided into three main sections: grid selection, lag parameters, and direction parameters.

**Grid Selection:**

- Radio buttons:  Compute variograms from scratch,  Load existing experimental variograms
- Choose grid and properties:
  - Grid Name: ArgilaJB
  - Head Property: SPT
  - Tail Property: SPT

**Lags Parameters:**

- Number of lags: 40
- Lag separation: 2
- Lag tolerance: 1

**Directions Parameters:**

- Number of directions: 1

**Diagram:** A diagram illustrating the lag separation and tolerance. It shows a line segment with a tolerance 'tol' and a separation 'separation'.

**Table:**

	azimuth	dip	tolerance	bandwidth	measure type	head indic. cutoff	tail indic. cutoff
1	90	0	90	100	variogram		

Figura 27: Passo à passo e parâmetros definidos para a geração dos variogramas utilizados.

Uma vez gerados, alguns exemplos de variogramas anisotrópicos (diferentes em cada direção) se mostraram difusos e pouco representativos, o que fez com que neste trabalho apenas fosse utilizado o modelo de variograma omni-direcional de tolerância 90 e de azimute 90. A escolha deste modelo foi feita levando em consideração a concentração das amostras em profundidade (orientação vertical), que é tão importante quanto sua espacialidade neste trabalho. Além disso, este modelo possibilita uma análise espacial da relação entre as distâncias

da variável SPT, quando tornada a influência da posição/direção muito pequena (Figura 27). Como dito anteriormente, como os variogramas são similares, caracteriza-se neste trabalho, apenas o variograma da área total.

No variograma da área total (Figura 28), para maior adequação ao comportamento variográfico próximo à origem, foi utilizado um Efeito Pepita (*Nugget Effect*) ou Variância Aleatória = 12, para que a função utilizada se aproximasse do início da concentração dos dados, mostrando o valor da função variograma na origem (distância=0). A existência deste efeito evidencia uma descontinuidade da origem, identificando uma microvariabilidade amostral e/ou erro amostral. O Sill é o valor do Patamar e dado que as amostras estão bem distribuídas, utiliza-se o valor da variância encontrado no Histograma gerado pelo Sgems anteriormente (Figura 29).

A função que melhor se adequou ao variograma gerado foi a função exponencial, que tem como objetivo descrever o comportamento espacial dos dados e demonstrar os valores da função variograma para uma dada distância. Os ranges de adequação da função variograma dos dados são respectivamente, max=80, med=25 e min=19 (Figura 29). Para uma variografia omni-direcional, não se faz necessária a aplicação de ângulos para a adequação da função à análise dos dados.

O campo estruturado (que está entre o Efeito Pepita e a amplitude da função, isto é, onde a função atinge seu Patamar e conseqüentemente inicia-se seu campo aleatório) é identificado entre os intervalos, 12 do Efeito Pepita e o valor máximo da variância espacial, em aproximadamente 47, onde entramos no campo aleatório e a função estabiliza-se. A amplitude nos dá um significado preciso da noção tradicional de extensão da zona de influência e mostra a distância a partir da qual os dados passam a ser independentes, refletindo o grau de homogeneidade entre eles, tendo em vista que quanto maior a amplitude, maior a homogeneidade dos dados e que esta, separa os dados correlacionáveis dos independentes.

Analisando o variograma experimental obtido, podemos observar que a zona de influência é relativamente pequena e conseqüentemente o grau de homogeneidade dos dados também, evidenciando uma heterogeneidade significativa. Possivelmente, esta heterogeneidade indica conjuntos de argilas diferentes, ou seja, de diferentes ciclos de deposição.

O campo aleatório, onde as amostras são mais independentes entre si também fornece base para a interpretação acima. Ainda efetuando interpretação visual da variografia, observa-se novamente, em congruência com o que foi visto no Histograma gerado anteriormente, três principais conjuntos de dados de argila e estas apresentam um comportamento bem demarcado, como se houvesse alternância de sequências, ou ciclicidade, conforme a profundidade e a distância aumentam entre elas. Este comportamento com marco periódico e que parecem ondas, ou zonas, é típico de camadas de substratos bem variável, ou até evidencia descontinuidades, como pulsos de diferentes deposições destas argilas com características distintas, formadas ao longo do tempo geológico. Como o variograma experimental apresenta um campo estruturado, ou seja, não é totalmente aleatório, foi possível determinar o modelo de variabilidade espacial dos dados e assim, utilizar o método de Simulação Sequencial Gaussiana como método de interpolação de dados para avaliar o comportamento das argilas.

### Variograma Área Total

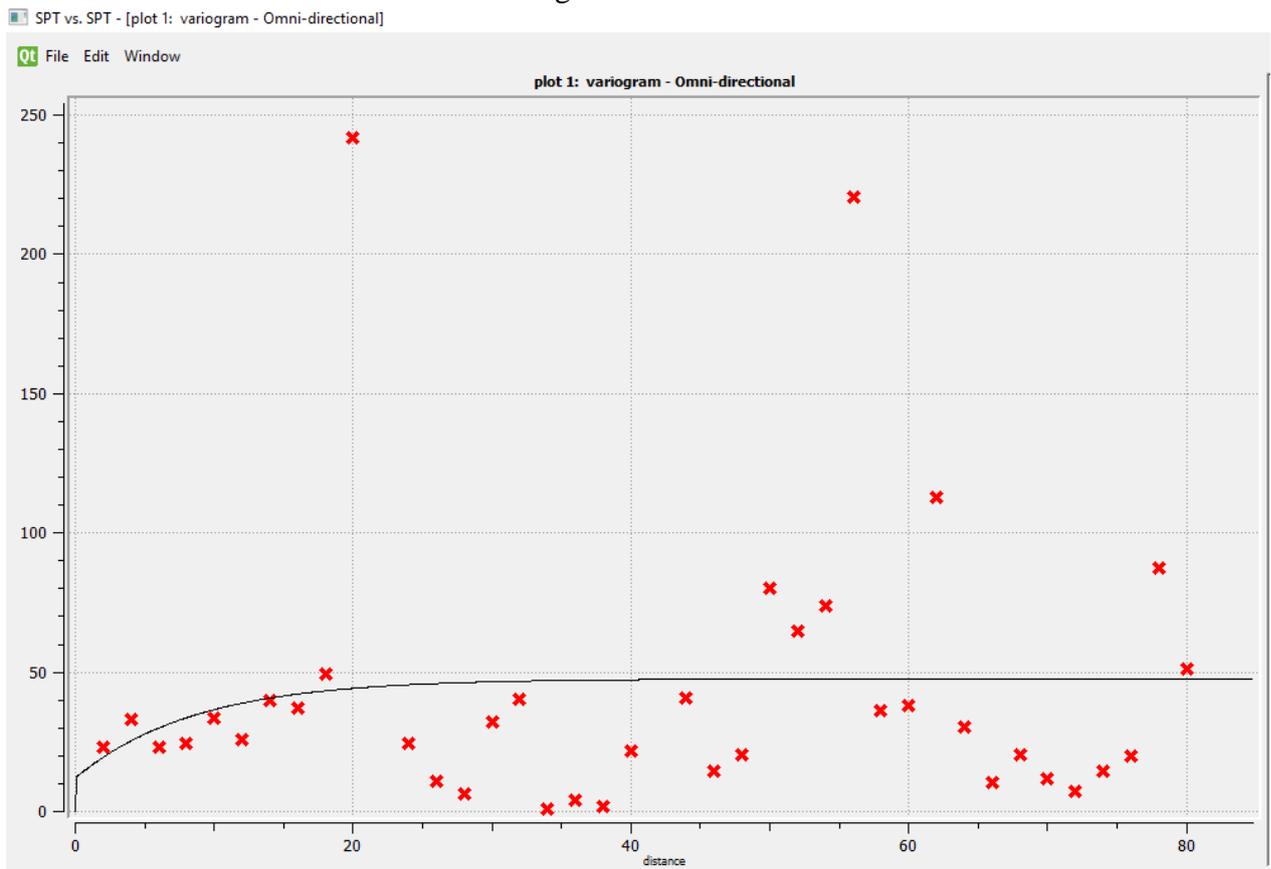


Figura 28: Variograma omnidirecional referente à área total da malha trabalhada.

**Variogram Model**

Nugget Effect 12

Nb. of Structures 1

**Structure 1**

Sill (Contribution) 5.6406

Type Exponential

Ranges

Max 80 Reset

Med 25 Reset

Min 19 Reset

Angles 0 0 0

Figura 29: Parâmetros ajustados da variografia de modo a ajustar corretamente a função variograma.

## 6.4 Simulação Sequencial Gaussiana

Novamente, levando em consideração a espacialidade dos dados e sua quantidade, agora analisados seu histograma e variograma, foi considerada a Simulação Sequencial Gaussiana o melhor método possível para analisarmos espacialmente como seria o comportamento da variável SPT, segundo estimativa sobre os nós de cada uma das malhas no qual cada um deles está condicionado aos restantes simulados anteriormente. Como mostrado abaixo (Figura 30), selecionamos a opção de simulação *Sgsim* (*Sequential Gaussian Simulation*), onde serão todos dados geoestatísticos gerados anteriormente (Figura 31).

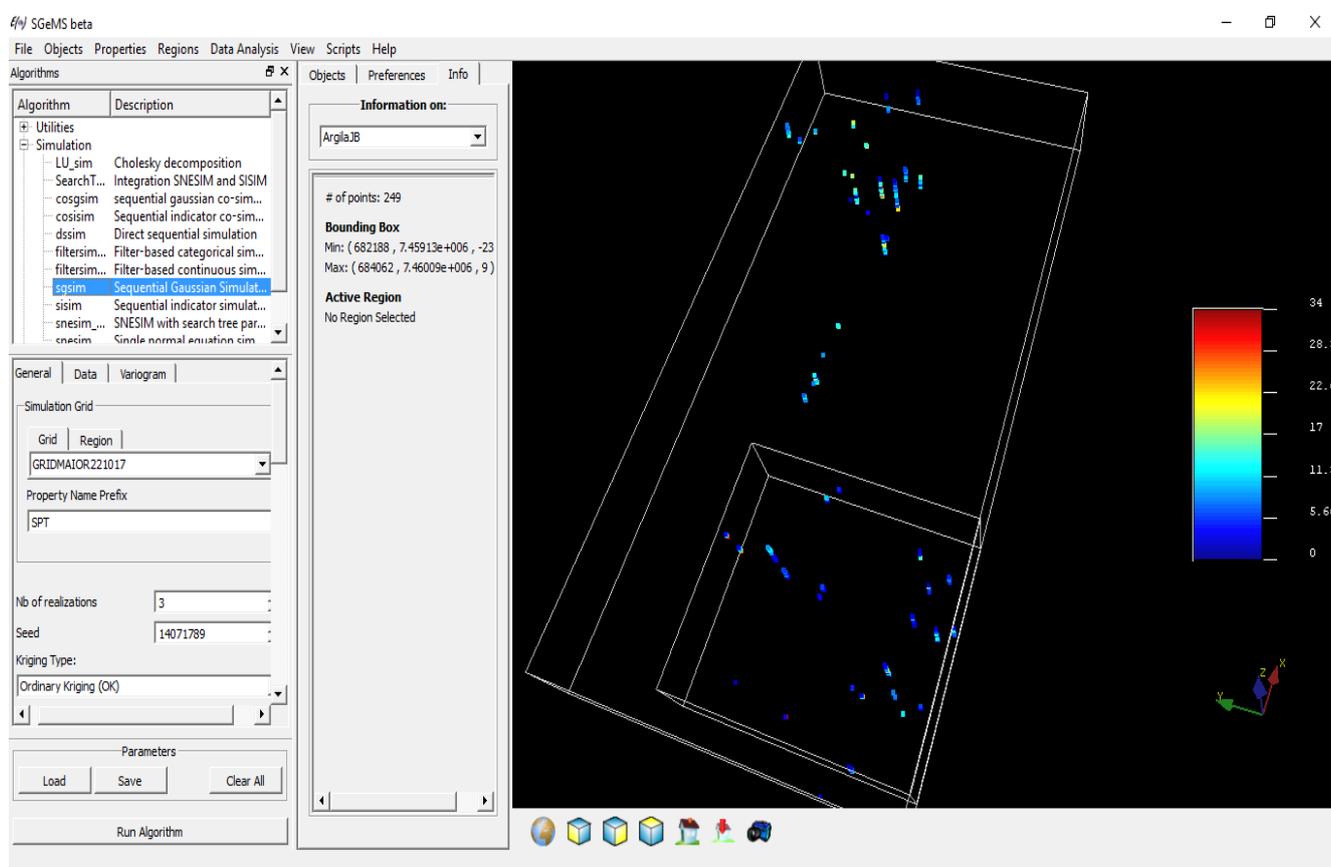


Figura 30: Início do processo da geração da simulação utilizada, mostrando a entrada de dados necessário para tal. Note as duas malhas geradas.

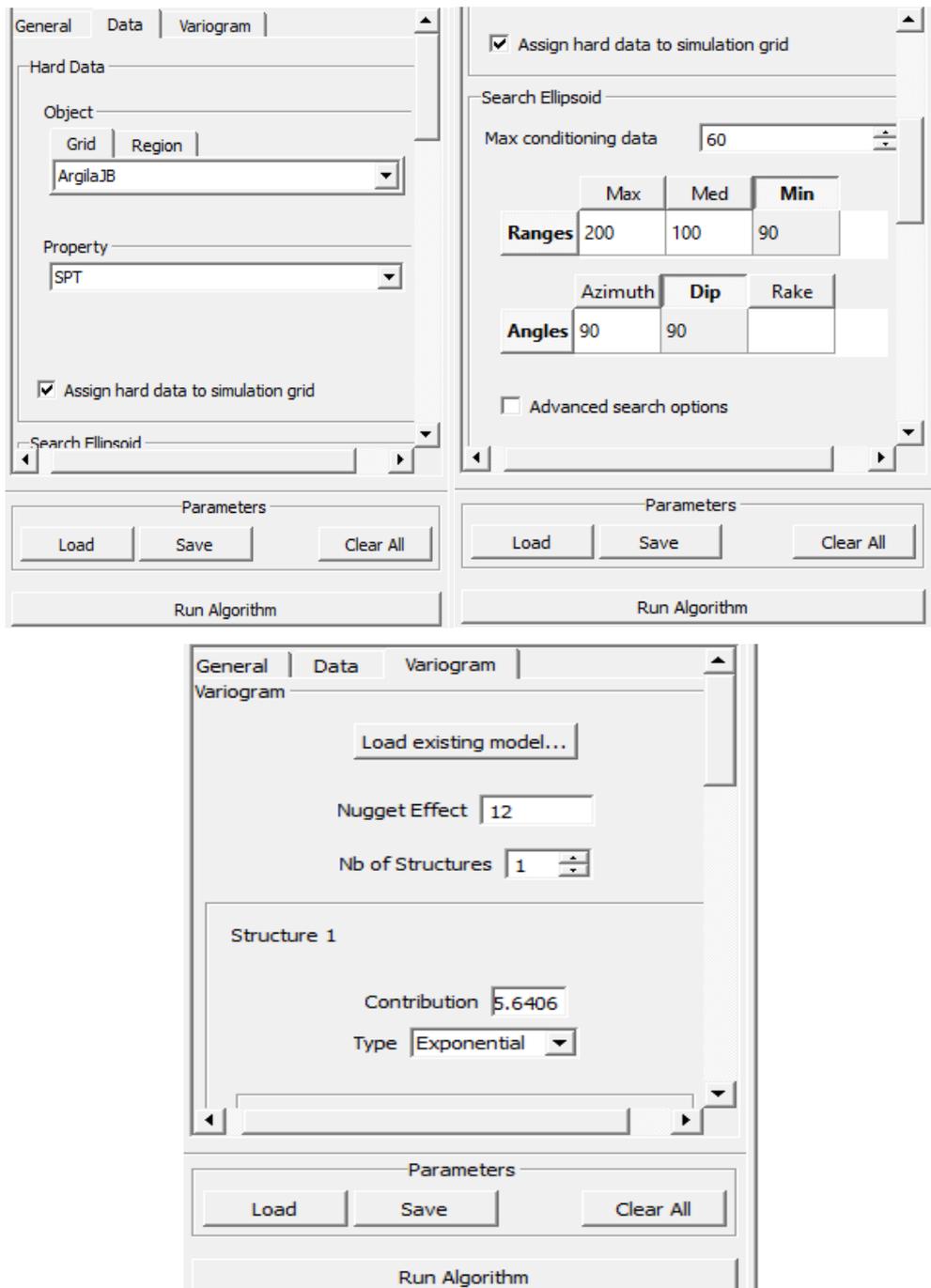


Figura 31: Demonstração do passo à passo para gerar uma Simulação Sequencial Gaussiana no SGEMS.

Na aba Geral (Figura 31), determina-se a malha onde os dados serão simulados, o nome da propriedade, a quantidade de simulações que serão geradas e ainda visualizamos a semente, que é o nó aleatório onde começa-se a geração das variáveis aleatórias, sendo esta então, considerada a identificação da simulação. Na aba Dados, determinam-se o pacote de dados que serão simulados, onde neste trabalho foram utilizados dois diferentes; um contendo apenas os

dados da sub-malha e outro os da malha geral. Também se determina a variável que será considerada, sendo esta o SPT. Os parâmetros do Elipsóide de Procura, que consiste exatamente em determinar a área onde os dados serão analisados, serão: 60 de condicionamento máximo de dados, com *Ranges* max=200, med=100 e min=90, onde levamos em consideração o tamanho da Malha e os ângulos de 90 de Azimute e 90 de Dip, levando-se em consideração que os dados têm concentração principalmente de forma verticalizada (Figura 31).

Na aba Variograma, carrega-se o modelo variográfico produzido anteriormente para cada conjunto de dados criados. Foram feitas 3 realizações de simulação para cada malha criada, onde foi escolhida, por análise visual, a que melhor se ajustou a realidade dos dados dos boletins de sondagem. Na aba Preferências, selecionada logo após a geração das simulações, e uma vez escolhida a simulação que seria utilizada no presente trabalho, com o uso da opção Volume Explorer, podem-se selecionar diferentes seções dentro da malha, para que seja feita uma melhor análise do comportamento da variável em qualquer direção. Temos uma seção de cada malha selecionada logo abaixo (Figuras 32 e 34). Na aba Preferências (Figura 33), pode-se examinar os *ranges* alcançados pela simulação e selecionar os cortes X, Y e Z, de forma a percorrer a malha como um todo, atentando-se para o fato de que a unidade do corte equivale a proporção escolhida na malha. Um exemplo que pode ser usado é o eixo y, que na malha maior são 97 unidades, pois são 97 células x 10 de tamanho de cada célula, que gera uma malha de 970 metros, que é aproximadamente o espaçamento entre a maior e a menor coordenada de y, como foi visto anteriormente na criação da malha.

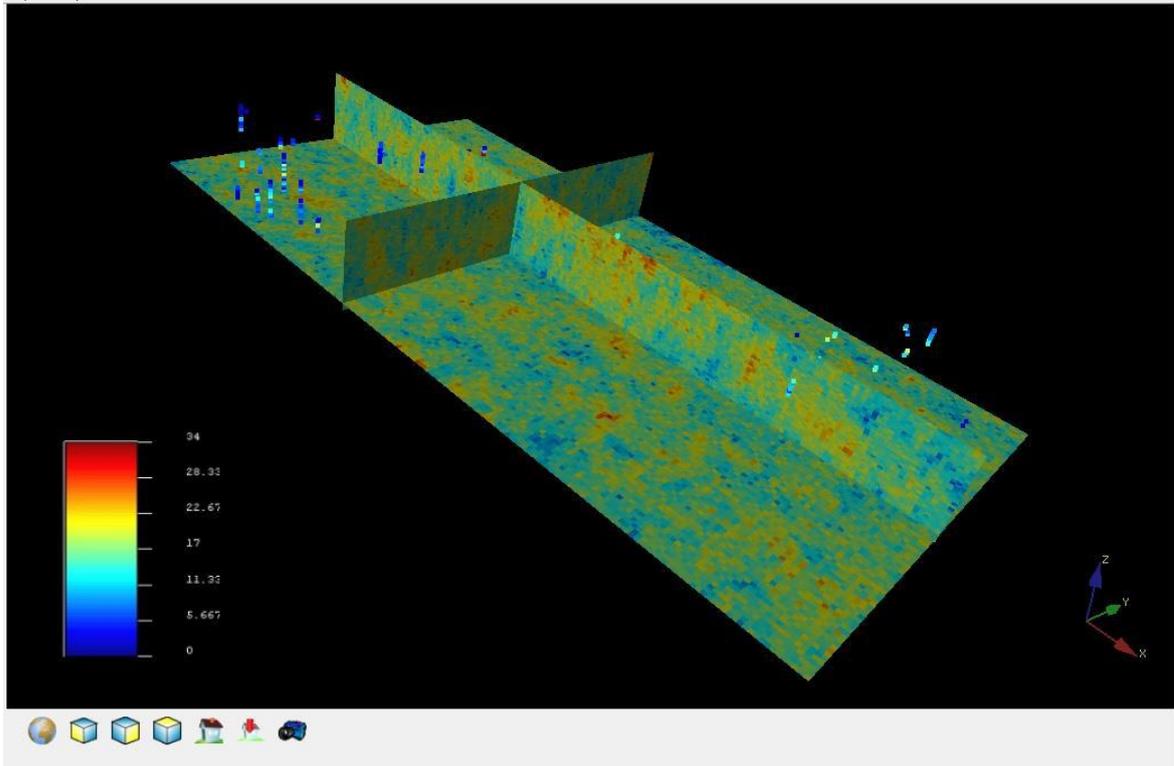


Figura 32: Simulação da malha de toda a área, evidenciando-se o comportamento da simulação. No exemplo o corte selecionado corresponde à X:75, Y:47 e Z:3.

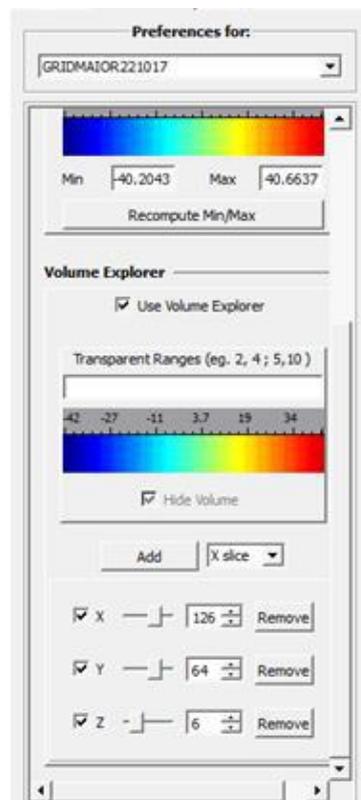


Figura 33: Aba Preferências em evidência, onde selecionamos as opções analíticas da simulação.

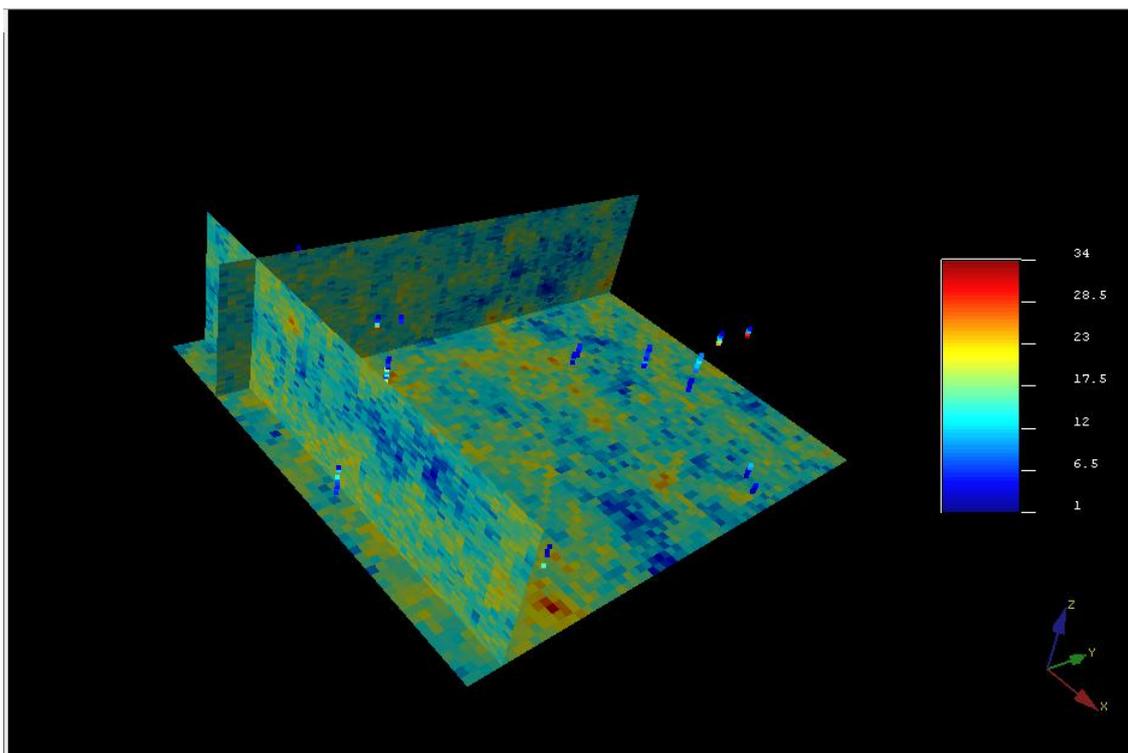


Figura 34: Simulação da sub-malha, onde evidencia-se maior acurácia na simulação, em comparação com a malha total.

Pode-se observar que na Figura 32, há uma simulação um pouco mais difusa e aleatória, se comparada à Figura 34, ocasionada pelo tamanho da malha e a quantidade de dados processados. Isto acontece devido a espacialidade relativamente grande dos dados simulados. Contudo, ainda assim, conseguimos visualizar onde os dados estão concentrados, um comportamento congruente com os valores SPT existentes naquela área, mesmo tendo em vista que a simulação gaussiana sempre tende a extrapolar os valores extremos, fazendo com que em regiões que não aparecem dados, sejam gerados nós em tons vermelhos.

De acordo com o intuito de se fazer uma análise mais aprofundada de certas regiões simuladas, considerando que a simulação é gerada ao longo de toda a malha e esta não está adequada à topografia da região, buscou-se uma maior adequação da simulação aos dados dos boletins de sondagem e seu respectivo relevo, fazendo com que fosse utilizado posteriormente o programa Corel Draw. Assim, juntamente com a análise topográfica da localidade dos perfis de sondagem, foi feito manualmente no Corel Draw e em cada direção de um corte específico pré-selecionado visualmente, seções em cada par de eixos da malha (Figura 35).

## MALHA TOTAL/ ÁREA MAIOR

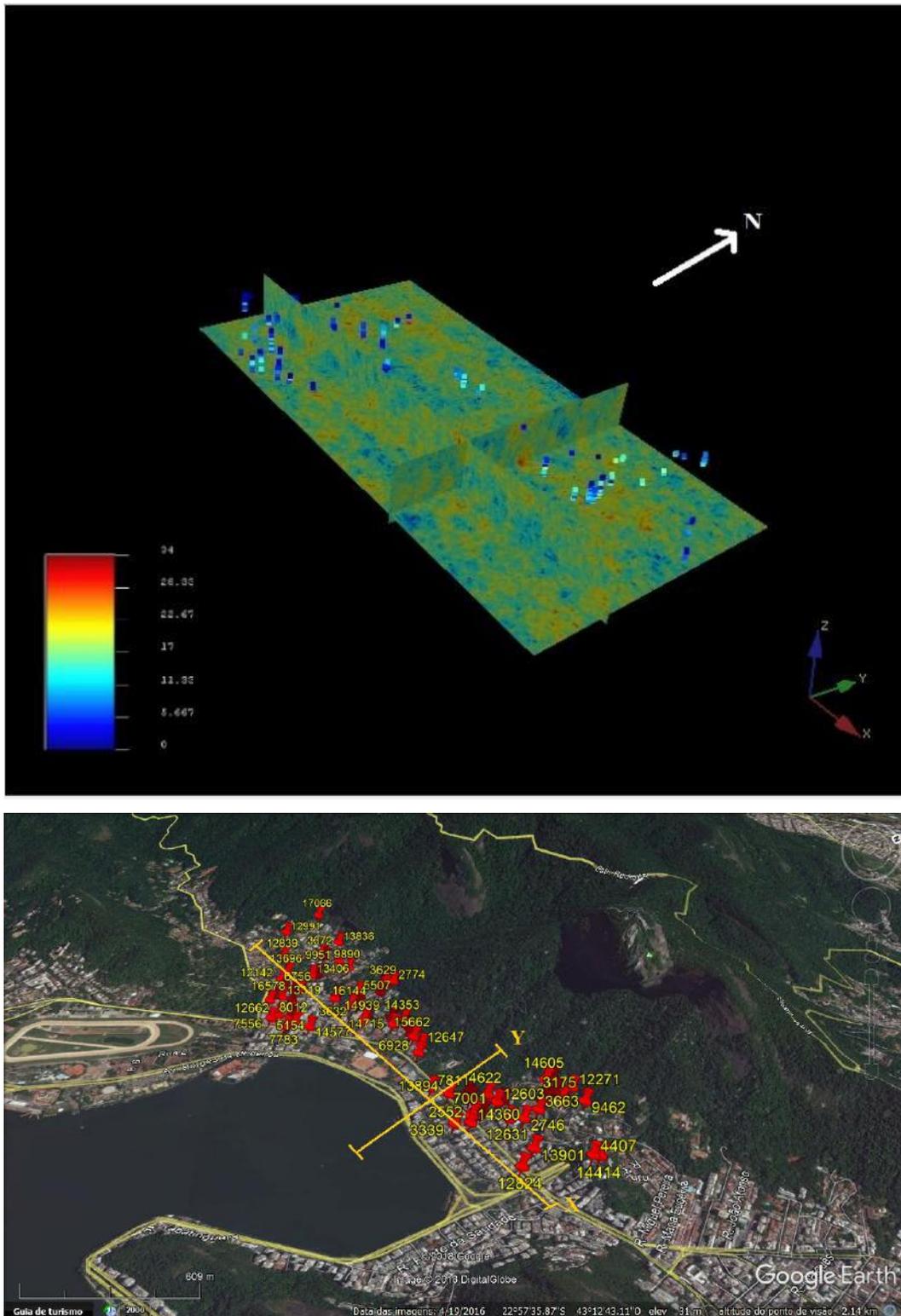


Figura 35: Visão geral da localização do corte X:126, Y:27 e Z:0, para análise do índice de resistência (SPT) das argilas selecionadas. Na imagem do Google Earth, em amarelo está indicada a direção do corte no plano X/Z e do plano Y/Z da seção.

Foram selecionados cortes diversos de cada malha (área total e subárea) e feita a análise do comportamento das argilas em cada malha, sempre tendo em vista que há extrapolação da escala no eixo Z da simulação e conseqüentemente da seção, para melhor visualização deste comportamento (Figura 36).

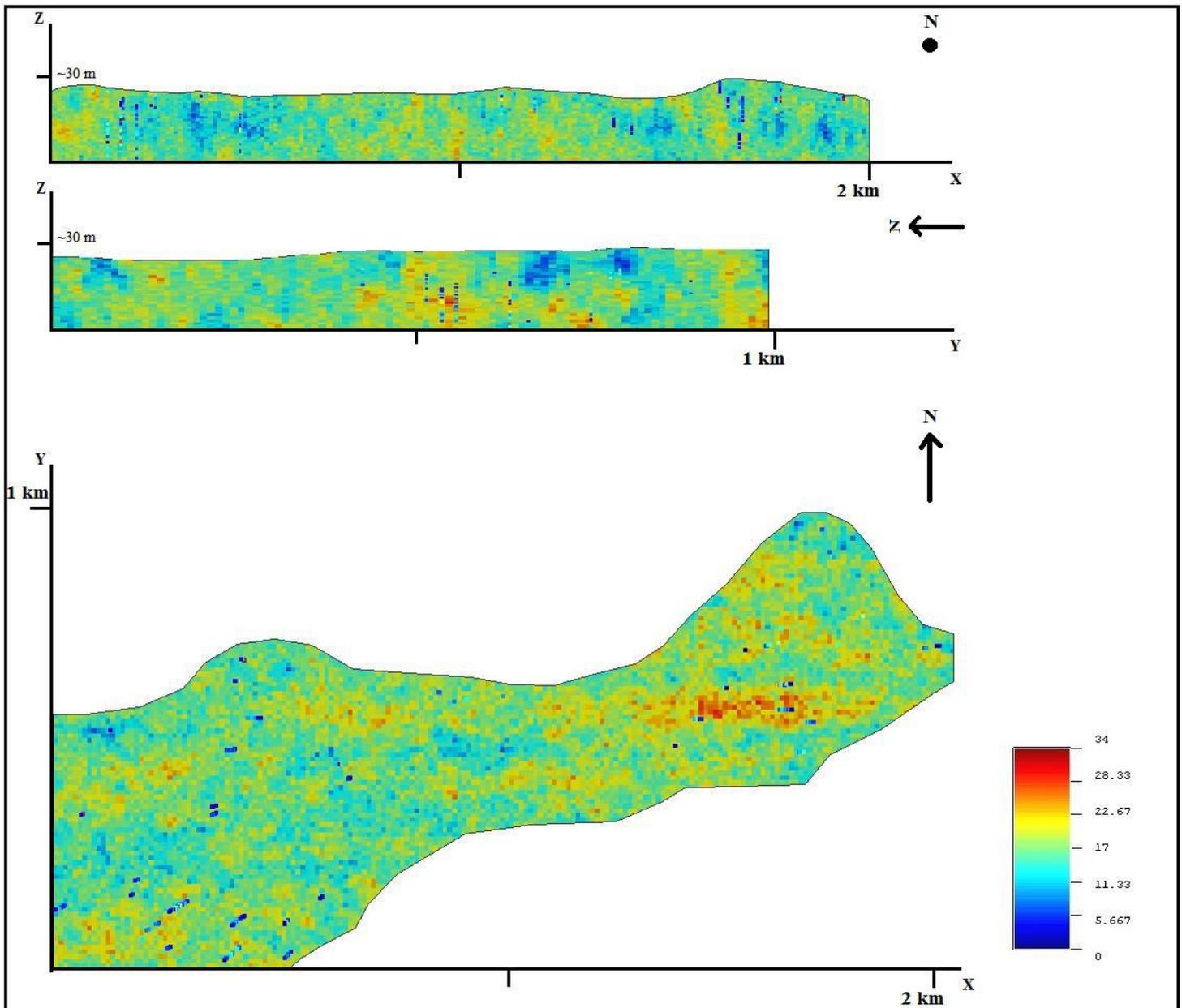


Figura 36: Corte X:126, Y:27 e Z:0 da simulação da área total, para análise do índice de resistência dos valores de SPT das argilas selecionadas. Acima encontram-se os planos escolhidos.

Na malha total (Figura 36), os dados variam em uma profundidade de aproximadamente 30 metros (eixo z). Ao longo do eixo x, eles percorrem uma extensão de aproximadamente 1900 metros e ao longo do eixo y eles chegam à aproximadamente 970 metros. No corte acima

escolheu-se no plano X/Y, contornar apenas a área onde estão concentrados os dados, devida a extensão da malha e para que fosse evidenciado que à nordeste há uma maior concentração de argilas com consistência mais rijas e duras e indicando, provavelmente, uma presença de material residual nas cotas mais profundas das amostras. Essa característica do modelo entra em congruência com a Folha Baía de Guanabara SF.23-Z-B-IV (Figura 9), onde evidencia-se a proximidade dos dados com a Suíte Cordeiro e Suíte Rio de Janeiro, identificados em tons de violeta no mapa.

No plano X/Z (Figura 36), observa-se um leve indício de duas áreas de maior concentração de argilas mais moles, que indicam duas regiões onde é provável que ocorram maiores recalques, ou seja, deslocamentos verticais após os carregamentos, de argilas mais finas, seguidas lateralmente de áreas com argilas mais médias/duras ou maior presença de areia e que provavelmente, sofreram influência lagunar, paralelamente à influência de drenagens (aporte de sedimentos fluviais) no passado geológico. Este indicativo mostra que, na região, deve-se ter uma maior preocupação com fundações.

No plano Y/Z (Figura 36), pode-se observar, agora mais nitidamente, duas áreas de maior concentração de argilas, separadas, supostamente por um material mais rígido. Também se mostra evidente a necessidade de um maior cuidado da Construção Civil nestas áreas, uma vez que se percebe que a uma concentração significativa e até relativamente profunda de argilas mais moles e com menor interdigitação com valores maiores de SPT, o que possivelmente representariam areias.

Quando analisa-se os dois perfis em conjunto, percebe-se pelo menos duas diferentes deposições de sedimentos mais finos; uma mais profunda em Y/Z e outra mais superficial em X/Z. É cabível a interpretação e até a associação com os trabalhos desenvolvidos em Jacarepaguá, que identificam os principais ciclos de sedimentação (Roncarati e Neves, 76) e o trabalho de (Sugiuo et al., 1985) que desenvolve um modelo representativo para a curva de variação relativa do nível do mar, uma vez que consegue-se perceber duas áreas de maior sedimentação de material mais mole, provavelmente separados, ou por uma de material argiloso mais duro, com presença de conchas e pedregulhos, ou areais, correlacionando-se assim, com ciclo de transgressão marinha, sendo a fase onde houve a deposição dos sedimentos mais finos, o marco da regressão posterior.

Como forma de suplantar a análise feita da simulação, foi criada, aproximadamente na mesma seção da simulação acima (utilizando maior número de perfis próximos ao corte), perfis esquemáticos, dispostos aproximadamente em ordem oeste à leste, das litofáceis argilosas em

relação aos valores de SPT encontrados, na concentração de dados à noroeste da Lagoa Rodrigo de Freitas (Figura 37).



Figura 37: Imagem da disposição dos dados de SPT do Bairro Jardim Botânico. Em amarelo está demarcada a seção onde foi feito o corte X da malha maior da simulação gerada. Em preto está indicada a área da seção dos perfis litológicos gerados através da análise descritiva dos perfis de sondagem SPT.

Sendo todo o material sedimentar composto por diferentes argilas, ou seja, mesma granulometria, deu-se prioridade na caracterização de cor e na consistência das mesmas (Figura 38). Podemos observar a aparição de argilas ricas em conchas e valvas em níveis mais profundos, reforçando a interpretação de marco de avanço da água do mar, no período de transgressão marinha ou início de regressão, se nos guiarmos pelos próximos depósitos registrados nos perfis e análise da simulação. Registram-se materiais argilo-arenosos de coloração avermelhada de espessura variavelmente baixa e materiais predominantemente areno-argilosos de coloração que oscila entre o castanho e o amarelo-alaranjado (Figura 38), que se assemelha muito a descrição das 2 fases de colúviação holocênica descritas por (Meis e Amador, 1974). Apesar de conseguirmos fazer uma interpretação geológica consistente, deve-se atentar que a quantidade de dados é baixa e para que chegássemos a uma interpretação ideal, precisaríamos de mais perfis realizados.

Por estas razões interpretativas descritas acima, que trouxeram uma coesão entre a análise geoestatística e a história geológica da área, que decidiu-se subdividir a área de estudo em uma porção menor, para que fosse possível uma análise ainda mais acurada (Figura 39).

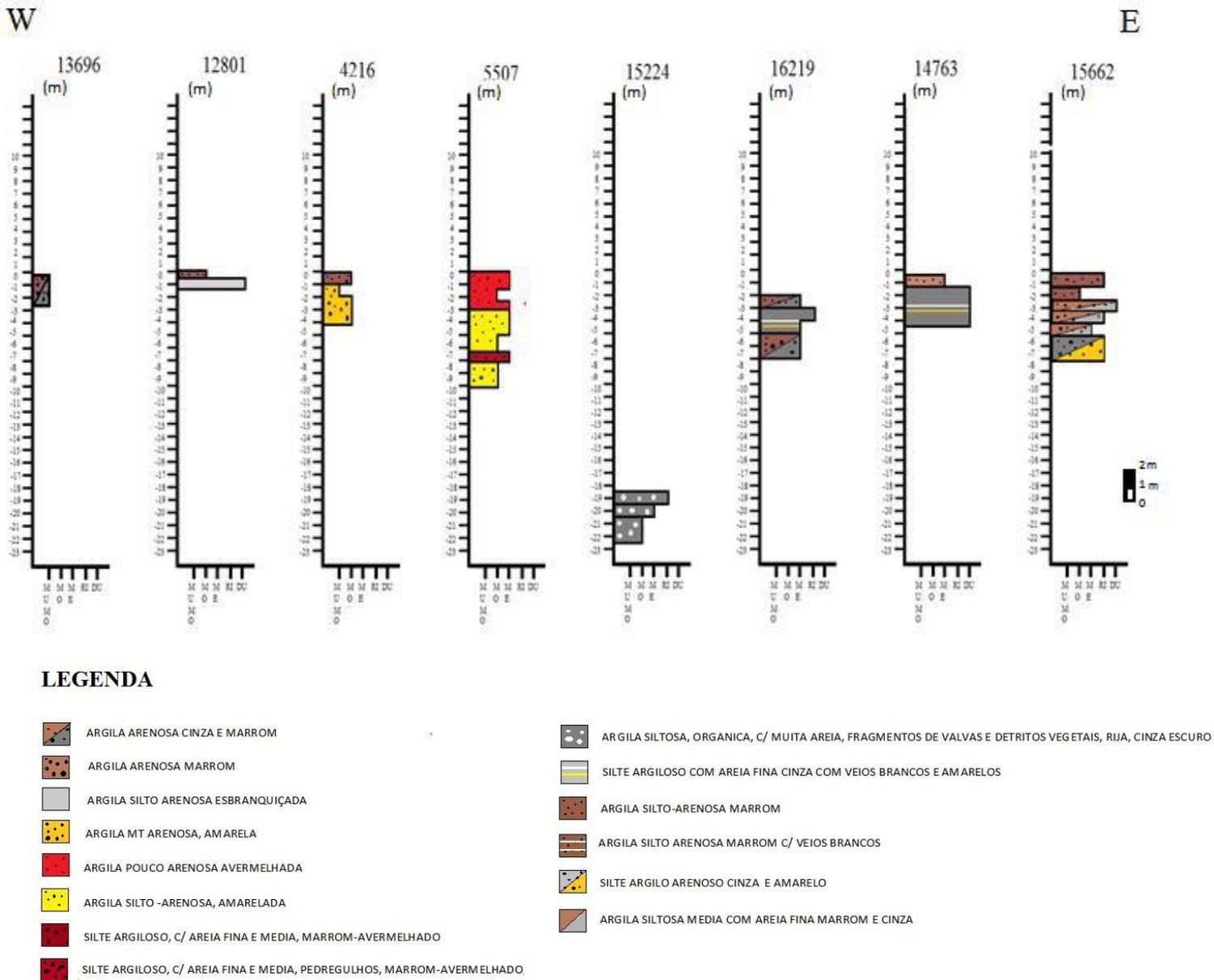


Figura 38: Perfis esquemáticos das litofácies da região oeste da seção da área geral, criados a partir dos dados de perfis de sondagem SPT do Bairro Jardim Botânico (RJ). Observar que a escolha das cores são as mesmas descritas nos boletins de sondagem cedidos pela Geo-Rio.

## SUB-MALHA/ SUBÁREA

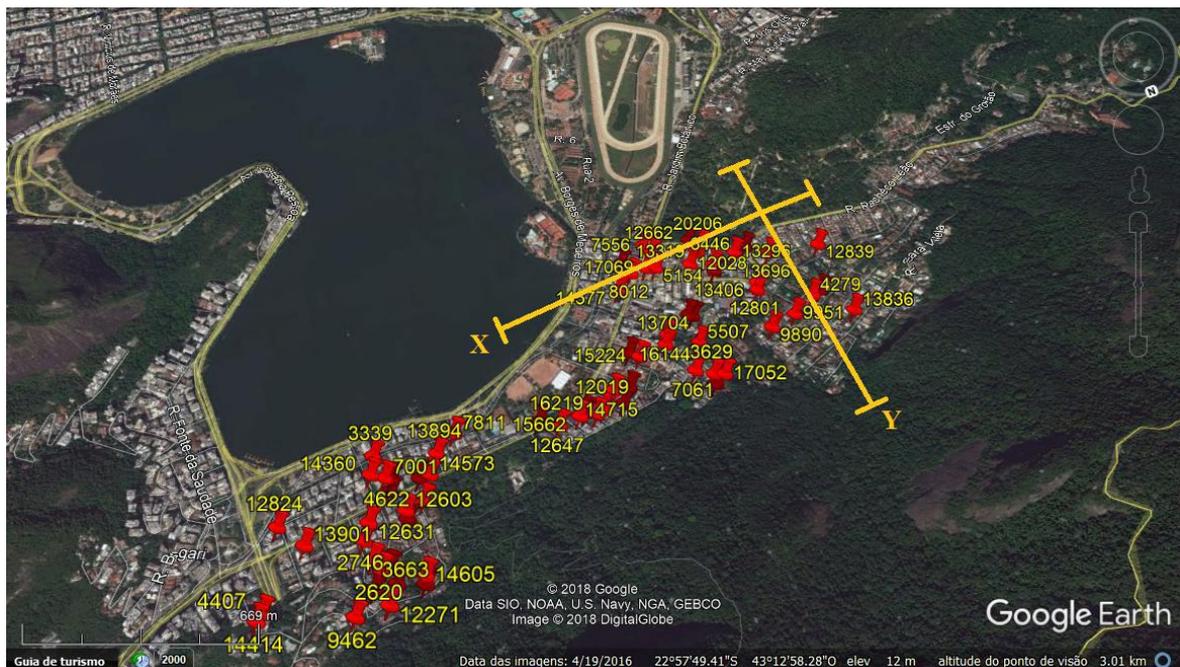
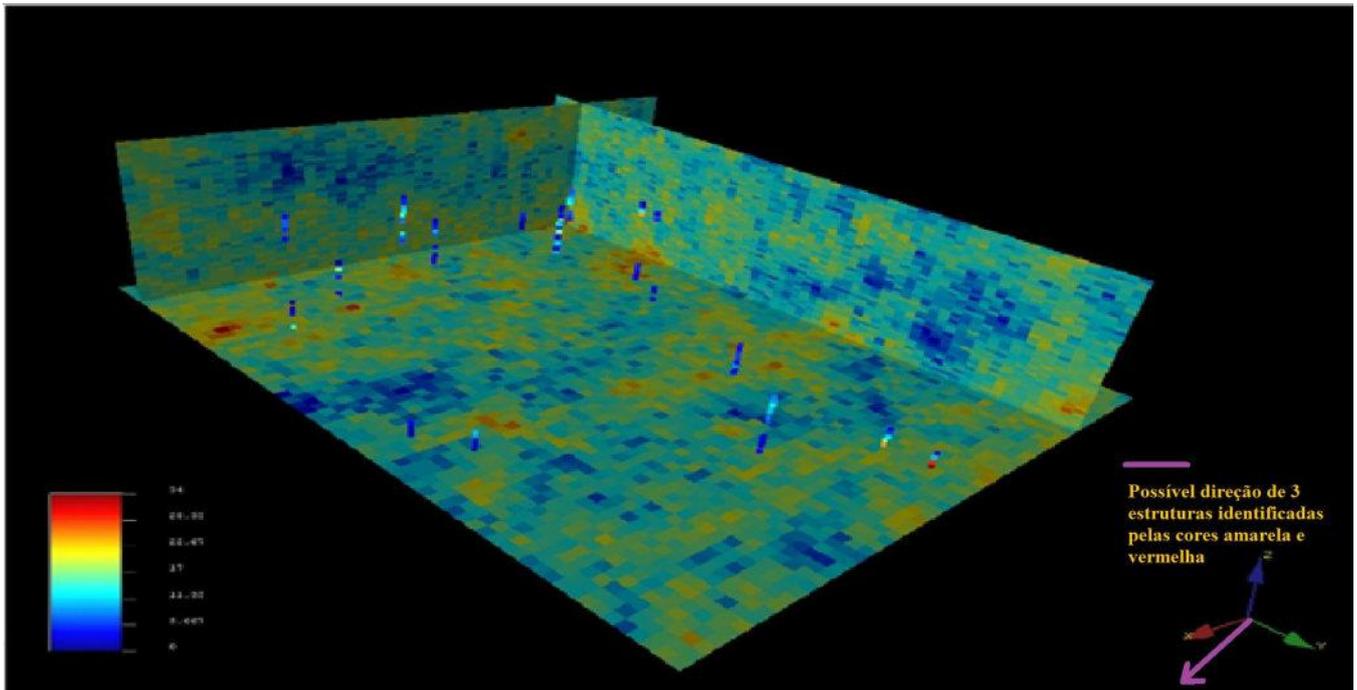


Figura 39: Corte determinado por X: 11, Y: 4 e Z:0, para demonstrar a variação do SPT nas argilas da sub-malha/subárea. A imagem Google Earth, mostra a localização dos dados SPT no Bairro Jardim Botânico e em amarelo a localização dos planos X/Z e Y/Z.

Após todo o processo para geração da simulação desta área menor, o resultado obtido está demonstrado na Figura 39, onde também foram selecionados cortes para melhor análise e

interpretação, tendo em vista que os dados variam em uma profundidade de aproximadamente 30 metros (eixo z), mostrado logo abaixo na Figura 40.

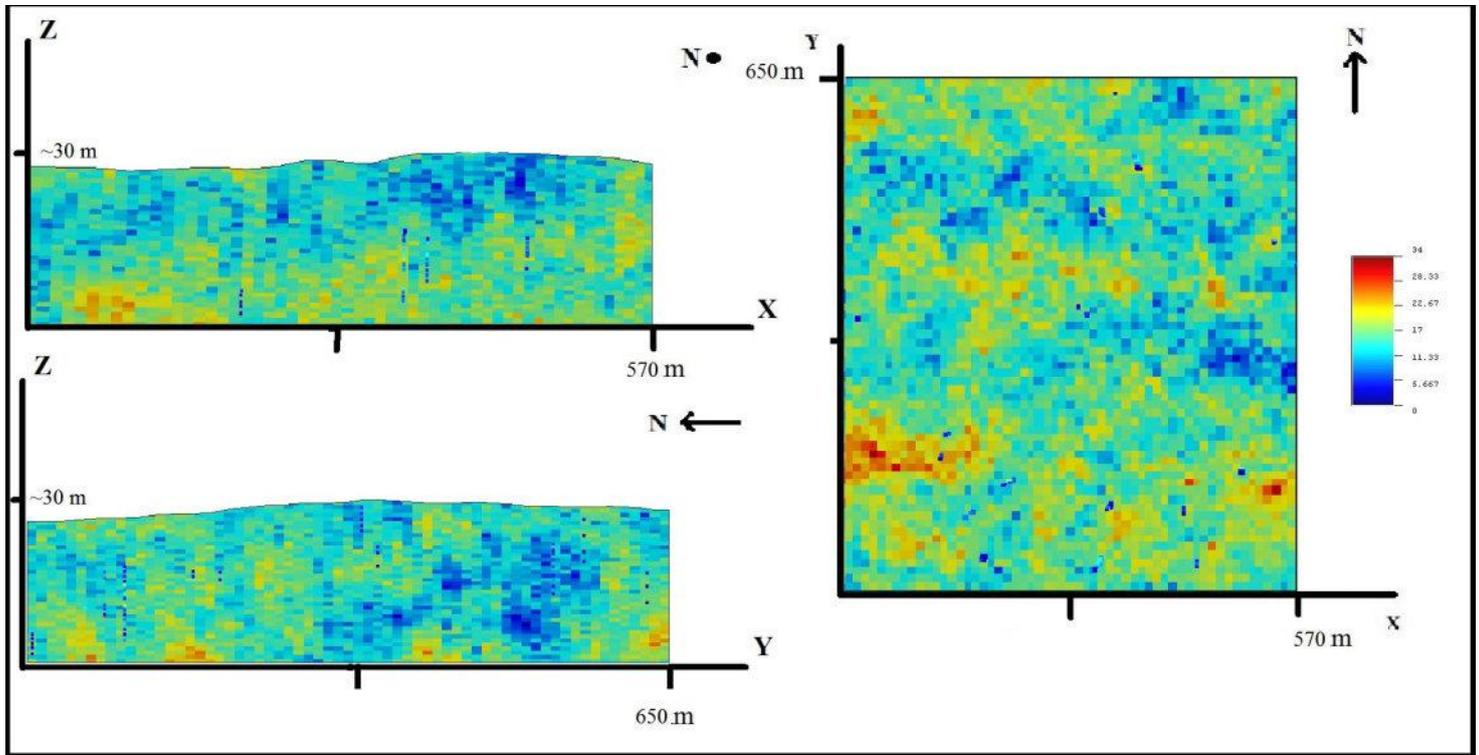


Figura 40: Corte X:11, Y:4 e Z:0 da simulação, da área da malha menor, para análise do índice de resistência (SPT) das argilas selecionadas. Note em roxo a direção de possíveis estruturas, identificadas pelas áreas mais profundas da malha em amarelo e vermelho.

Ao longo do eixo x, eles percorrem uma extensão de aproximadamente 560 metros e ao longo do eixo y eles chegam a aproximadamente 650 metros.

Primeiramente, podemos observar que temos uma melhor visualização espacial do comportamento do substrato, uma vez que se unem os resultados com os conhecimentos geológicos pré-adquiridos. Com isso, aumenta-se a confiabilidade e diminui-se o erro quando se utiliza de método de variáveis aleatórias em geoestatística.

A partir do plano X/Z (Figura 40), percebe-se que, novamente, na parte superficial da região, há concentrações de valores de SPT baixos, argilas moles primeiramente e intercalações de argilas moles/médias conforme aumenta a profundidade. Também consegue-se perceber que há uma leve inclinação destes depósitos na direção oeste, com um leve aumento dos valores de SPT em profundidade antes de voltar a baixar, aonde podemos associar essa volta a valores baixos à sedimentação do começo da Lagoa Rodrigo de Freitas.

Quando se analisa o plano X/Y (Figura 40), percebe-se três áreas de concentrações de valores de SPT mais altos, correspondentes a uma argila mais rija e em algumas regiões, duras. Conforme avança-se na direção Y, nota-se que imediatamente após estes valores de SPT mais altos simulados, onde estão valores de SPT mais baixos, até em algumas áreas, definidas como moles. Com isso, com uma visão geral desta seção, identifica-se que, aparentemente, existem pelo menos três regiões cíclicas desta intercalação entre valores altos de SPT e valores baixos simulados. Se considerarmos estas regiões de valores mais altos de SPT (maior consistência) como estruturas, estas estão com uma orientação aproximadamente NE-SW (Figura 42), onde a direção destas está demarcada nos eixos pela cor roxa.

No plano Y/Z (Figura 40), também se têm a aparição de três intervalos, que parecem equidistantes e relativamente cíclicos entre si, em congruência com o plano X/Y. Uma região profunda com concentração de baixos valores de SPT simulados, seguido de uma região com altos valores, se observados de Sul à Norte é identificada, em congruência com o plano X/Z, também identificando um possível substrato argiloso mais consistente antes de decrescer de novo em direção à Lagoa Rodrigo de Freitas.

Uma vez feita estas interpretações da simulação gerada e das seções da subárea selecionada, pode-se correlacioná-las à interpretação de ecos gerados, e conseqüente criação de ecocaráteres, nomeados e determinados por Baptista et al., 2011, tendo características definidas através da análise dos resultados dos ecos registrados pelas linhas sísmicas do artigo em questão, que teve como objetivo, caracterizar a distribuição sedimentar da Lagoa Rodrigo de Freitas através de sísmica de alta resolução.

No artigo citado, identificam-se ecocaráteres, sendo o primeiro de areias superficiais próximo ao Jardim de Alah em subsuperfície. Como o presente trabalho só seleciona as argilas da região, os valores extremos simulados, podem sim, serem correlacionados também com areias, o que se assemelharia aos valores altos de SPT superficiais no plano X/Z, que se encontra no extremo oeste da mesma.

O segundo ecocaráter também é correlacionável com este trabalho, o qual identifica regiões lamosas profundas de aproximadamente 16 metros e estruturas cristalinas do tipo pão de açúcar (Figura 41) com orientação aproximadamente NE/SW (Baptista et al., 2011), o que tem coesão com a interpretação da simulação da subárea acima (estrutura indicada pelo vetor em roxo na Figura 39 e em azul na Figura 42), uma vez que também observamos estas estruturas pretéritas com profundidades semelhantes às encontradas no artigo citado. Se considerarmos os valores de SPT altos como argilas residuais provenientes deste embasamento cristalino, como

observamos na comparação da Figura 40 acima, com a Figura 41 e a Figura 42 abaixo, esta coerência na interpretação é evidenciada.

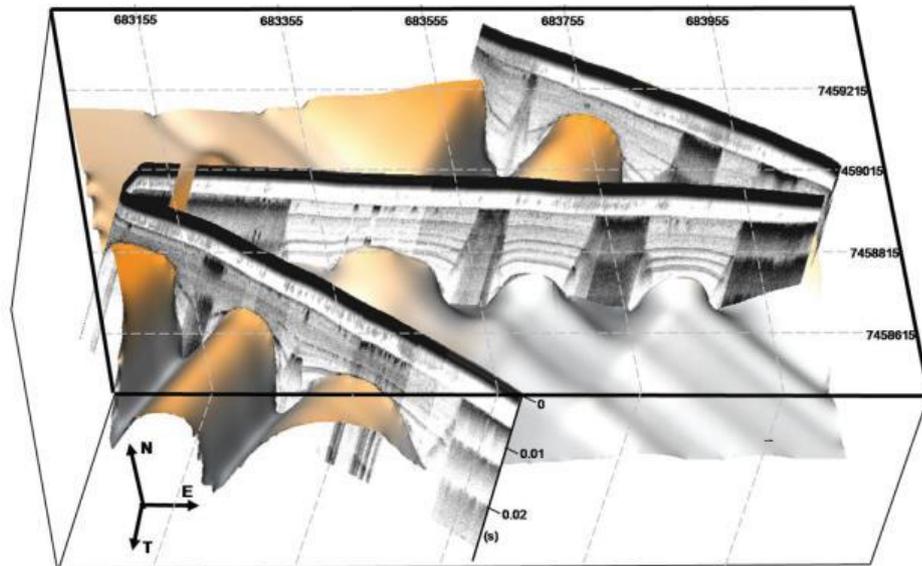


Figura 41: Representação da paleosuperfície do embasamento cristalino ajustada às linhas sísmicas. Notar a orientação NE-SW dos principais paleovales e a presença preferencial de gás raso ao longo destes paleovales.

(Fonte: Baptista et al., 2011)

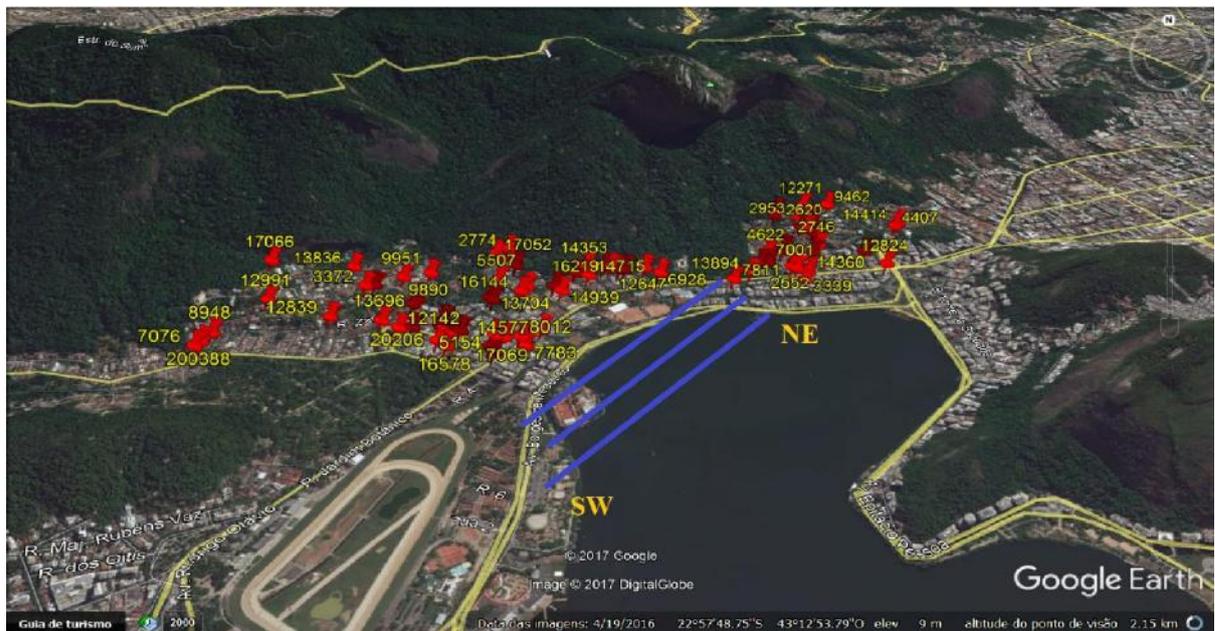


Figura 42: Identificação da direção das estruturas cristalinas interpretadas através dos ecos gerados no artigo de apoio. (Fonte: Google Earth, acessado em 23/10/2017)

Deve-se atentar que tais análises foram desenvolvidas através de modelagem de material argiloso, uma vez que a variável SPT, quantitativamente é definido de forma semelhante, tanto para argilas quanto para areias. Sendo assim, deve-se considerar a possibilidade de existência de camadas mais arenosas entre as de argila aqui estudadas.

## 7 CONCLUSÃO

Este Trabalho Final de Curso teve um papel importante na área de Geologia de Engenharia e Geotecnia, quando se considera que foi feito um trabalho de catalogação, sistematização e montagem de um banco de dados digital com descrições sedimentológicas, geomecânicas e os respectivos valores de Sondagem a Percussão, sendo estes geolocalizados e suas respectivas cotas, para a região de subsuperfície, que é uma escala de detalhe, dos Bairros do Jardim Botânico e Gávea. Sua importância é caracterizada principalmente pela união destes dados, que só existiam em boletins escaneados e armazenados em órgão governamental.

A geoestatística aplicada como forma de interpolação dos dados e consequente modelagem através de variáveis aleatórias para analisar a distribuição das argilas mostrou-se eficiente, uma vez que foram obtidos resultados cabíveis de interpretação geológica e sua convergência com trabalhos pretéritos. Tal característica traz confiabilidade e fortalece a usabilidade dos métodos estatísticos voltados para a área geológica. Além disso, deve-se salientar a importância da análise descritiva dos substratos em campo, uma vez que se necessita deste para a interpretação geológica. A sinergia entre as duas áreas, a geológica e a geoestatística é de vital importância.

Quanto à disposição dos perfis, sua área é considerada de detalhe, e como os dados em profundidade são bem próximos, pode-se gerar uma simulação pelo método de Simulação Sequencial Gaussiana considerada satisfatória, corroborando a predileção deste método para trabalhos com estas características. A subdivisão da malha e seu sucesso em uma análise ainda mais detalhada do substrato, demonstra o melhor aproveitamento deste método nesta situação supracitada.

Como para a região do Jardim Botânico têm-se poucos trabalhos de caracterização geotécnica e tendo em vista que num futuro próximo, tem-se um projeto para uma linha de metrô que passará pela área, o trabalho fez avançar o conhecimento do comportamento geomecânico das argilas da região, uma vez que a sondagem à percussão, permite obter índices de resistência para metro avançado pela sonda.

Foi possível perceber que para uma boa análise geoestatística, os dados precisam ter uma relação parental e deve-se salientar a importância da análise descritiva dos substratos em campo, uma vez que se necessita deste para a interpretação geológica. Uma pré-seleção dos dados e constante atenção aos resultados é de suma importância, para que sejam identificadas

falhas até mesmo descritivas dos sedimentos analisados. Mesmo a geoestatística tendo sua origem puramente matemática, ela é capaz de nos apresentar erros, pela sua característica analítica de gerar modelos que consideram não somente o dado como algo pontual, mas sim a relação espacial deste com o próximo e assim sucessivamente, sendo este o princípio das variáveis aleatórias. Através dos métodos utilizados, conseguimos caracterizar a região.

Por meio da interpretação do Histograma e do Variograma, podemos observar pelo menos 3 variações marcantes de consistência das argilas, que correlacionando com períodos de deposição bem marcados estariam de acordo com os ciclos deposicionais pleistocênicos e/ou holocênicos descritos por Roncarati e Neves (1976) e Meis & Amador (1974). Seguindo os trabalhos desses autores, como trata-se de argilas primeiramente ricas em conchas, que afinam em um momento e voltam a engrossar em direção ao topo, estas estariam provavelmente descrevendo o final da transgressão marinha e início da regressão marinha, marcados por ambientes de calmaria, como planícies de inundação, deposição lagunar e até leques aluviais de fundo lagunar, provavelmente evoluindo para aporte de sedimentos fluvio-marinhos, correlacionados com drenagens o que estaria de acordo com os próprios registros das litofáceis da área estudada, uma vez que aparecem depósitos silto-argilosos com interdigitação de areias. Também se identificam dados nestes gráficos, que fogem da caracterização geral, considerados estes, como possivelmente, oriundos de um material que ainda guarda características de solo residual.

Através da Simulação Sequencial Gaussiana dos perfis esquemáticos criados e tendo em vista esta heterogeneidade dos dados, foi possível identificar uma área superficial de valores de SPT baixos, argilas moles, identificando áreas onde deve-se ter maior cuidado em desenvolvimento de construções pelas empresas da área de Construção Civil. Também foram identificados bolsões estruturais de deposição de argilas moles em maior profundidade, seguido por uma aparente elevação dos valores de SPT em direção à Lagoa Rodrigo de Freitas, tendo estes bolsões, por volta de 16 ~ 18 metros. Três regiões paralelas, zonais de profundidade com valores de SPT muito altos, indicando também estruturas com direção NE-SW, provavelmente caracterizada pelo solo residual, que demarca o início do substrato cristalino com estrutura em forma de pão de açúcar, sendo esta forma encontrada em toda a cidade do Rio de Janeiro, em macro e microformas.

Apesar do modelo ter permitido uma interpretação geológica adequada, uma maior quantidade de dados possibilitaria uma modelagem mais precisa e consequente melhor definição de áreas de maior concentração de argilas moles, importante para o

estudo geotécnico de empresas. Deve-se também observar, que como dito anteriormente, o o modelo é puramente matemático e que sem que haja uma seleção pretérita de dados de forma qualitativa, a heterogeneidade dos dados não permitirá uma interpretação geológica.

Como a finalidade deste trabalho foi a caracterização apenas das argilas da região e como os parâmetros de avaliação dos índices de resistência (SPT) são iguais tanto para argilas quanto para areias e não poderiam ser usados uniformemente pelo SGEMS, os dados referentes às areias da região do Jardim Botânico foram compilados, mas não utilizados, possibilitando uma análise completa das litofáceis superficiais em um trabalho posterior.

## Bibliografia

- ABGE. Manual de Sondagens. Abge em Revista, São Paulo, v. 4º edição, n. 3, p. 1 – 73, Janeiro 1999.
- ALMEIDA F.F.M., AMARAL G., CORDANI U.G., KAWASHITA K. 1973. The Precambrian evolution of the South America cratonic margin south of the Amazon River. In: Nairn E.M., Stehli F.G. (eds.). The Ocean basins and margins. New York, Plenum, p. 411-446.
- ALVES, C. N. (2016). Modelagem Geológica e Geomecânica Tridimensional dos Sedimentos da Região de Ipanema e Leblon, Rio de Janeiro. Tese (Mestrado) - Instituto de Geociências, UFRJ, Rio de Janeiro, 2016.
- ANDRIOTTI, J. L. S. Notas de Geoestatística. Acta Geológica Leopoldensia, Leopoldo, XXV, n. 55, p. 3 – 14, maio 2002. Citado 3 vezes nas páginas 27, 28 e 31.
- ANGULO, R.J., LESSA, G.C., 1997. The Brazilian sea-level curves: a critical review with emphasis on the curves from the Paranaguá and Cananéia regions. Marine Geology, 140, 141-166.
- ARAÚJO, J. C.; DIAS, F. F.; BARROS, S. R. S.; FRAZ, B.. Variações do nível do mar na planície de Jacarepaguá diferentes escalas de tempo e suas transformações ambientais. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, Aquidabã, v.6, n.2, p.76-90, 2015.
- BAPTISTA NETO JA., SILVA CG., DIAS GTM e FONSECA EM. Distribuição Sedimentar da Lagoa Rodrigo de Freitas Através de Sísmica de Alta Resolução. Revista Brasileira de Geofísica, Vol. 29(1), 2011.
- BIGARELLA, J. J. Wind pattern deduced from dune morphology and internal structures. Boletim Paranaense de Geociências, Curitiba, 1971. 28/29: 21 fig.

BRAGA, L. P. V. Introdução à geoestatística: com programas em R. 1º. ed. Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais, 2014.

CPRM. Geologia e Recursos Minerais da Folha Baía de Guanabara SF.23-Z-B-IV, Estado do Rio de Janeiro . Belo Horizonte, 2012.

CORREIA, P. Modelação e Estimação: Uma introdução a Geoestatística. Numist/IST – Núcleo de Minas do Instituto Superior Técnico.Lisboa, 2010.

6484, N. Solo: Sondagens de Simples Reconhecimento com SPT – Método de Ensaio – NBR 6484. Rio de Janeiro, 2001.

DIAS, F.F., 2009. Variações do Nível Relativo do Mar na Planície Costeira de Cabo Frio e Armação dos Búzios - RJ: Reconstrução Paleoambiental Holocênica e Cenários Futuros. Doctoralthesis. Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 145 p.

HEILBRON, M.; PIRES, F.R.M.; VALERIANO, C.; BESSA, M. 1993. Litoestratigrafia, evolução tectono-metamórfica e magmatismo no Pré-Cambriano do Setor Sudeste do município do Rio de Janeiro. In: SBG/Núcleos RJ/SP, SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 3, Rio de Janeiro.

HEILBRON, M.; VALERIANO, C.M.; TUPINAMBÁ, M.; ALMEIDA, J.C.H. 1999. An evolutionary tectonic model for the central segment of Ribeira Belt: from the Transamazonian collage to Gondwana amalgamation. In: SBG, SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 7, Lençóis. Anais, 58-61.

LIMA, E. 2006. Mini-curso Geoestatística aplicada ao estudo de solos. In: SRGSR, 3º SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO. 3, Aracaju-Sergipe.

MAIA, M.; MARTIN, L.; FLEXOR, J.-M.; AZEVEDO, A.. Evolução holocênica da planície costeira de Jacarepaguá (RJ). In: CBG, CONGRESSO NACIONAL DE GEOLOGIA, 33, Rio de Janeiro, 1984. Anais, 105-111.

MARTIN, L.; SUGUIO, K.; FLEXOR, J.-M.; DOMINGUEZ, J.M.L. 1997. Geologia do Quaternário costeiro do litoral norte do estado do Rio de Janeiro e do Espírito Santo. Belo Horizonte, CPRM/FAPESP, 101p.

MEIS, M. R. M. e AMADOR, E. S. - Note on weathered arkosic beds. J. Sed. Petrol, 1974.  
PERLA B. J.; FÁBIO F. D.; RAQUEL A. M.; KITA C. D. M.; JOSÉ S. S.; DANIEL Q. Holocene paleo-sea level in southeastern brazil: an approach based on vermetids shells. Journal of Sedimentary Environments 2 (1), 35-48, 2017.

PET CIVIL UFJF. Sondagem de solos: ensaio a percussão (SPT). Disponível em: <<https://blog.mettzer.com/referencia-de-sites-e-artigos-online/>> Acesso em: 23 de agosto de 2017.

RONCARATI, H.; NEVES, L. E. Estudos Geológicos Preliminares dos Sedimentos Recentes Superficiais da Baixada de Jacarepaguá – Município do Rio de Janeiro – RJ. . Rio de Janeiro, 1976.

SGEMS NICOLAS R, ALEXANDRE B & JIANBING W. Applied Geostatistics with SGeMS: A Users' Guide. Cambridge University Press, Cambridge, 2009.

SILVA, Luiz Carlos da; SILVA, Hélio Canejo da (Orgs.). Geologia do Estado do Rio de Janeiro: texto explicativo do mapa geológico do Rio de Janeiro. Brasília: CPRM, 2001. 1 CD-ROM. (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil-PLGB).

SILVA L.C., RAMGRAB G.E., PERROTA M.M., LEITE C.A., WILDNER W. 2002a. Geologia, Tectônica e Recursos Minerais da Província Mantiqueira: sistema de informações geográficas-SIG e Mapa na Escala 1:2.500.000. In: L.A. Bizzi, C. Schobbenhaus, F.J. Baars, J.H. Gonçalves, I.D.M. Delgado, M.B. Abram, R. Leão Neto, G.M.M. Matos, J.O.S. Santos, L.C. Silva, R.M. Vidotti (coord.) Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil:

Sistema de Informações Geográficas – SIG e Mapas na Escala 1:2.500.000. Brasília, CPRM-DNPM, 1 DVD-ROM.

STURARO, J.R. Estudo do comportamento espacial de variáveis geológicas e hidrogeológicas da área urbana de Ribeirão Preto-SP. 1988. 131 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. (orient. Prof. Dr. Paulo Milton Barbosa Landim).

SUGUIO kenitiro et al. Flutuações do nível relativo do mar durante o Quaternário superior ao longo do litoral brasileiro e suas implicações na sedimentação costeira. Revista Brasileira de Geociências, são paulo, v. 1, n. 15, p. 273 – 286, mes 1985.

VALERIANO, C. (coord). 2012. Nota Explicativa da Folha Baía de Guanabara 1:100.000. CPRM-UERJ. PRONAGEO. CD-ROM.