

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
(PPGEM)

**A GEOESTATÍSTICA COMO FERRAMENTA PARA ESTIMAR O ROCK MASS RATING EM
MODELOS TRIDIMENSIONAIS**

Henri Yudi Vatanable

Dissertação para a obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre
2018

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
(PPGEM)

**A GEOESTATÍSTICA COMO FERRAMENTA PARA ESTIMAR O ROCK MASS RATING EM
MODELOS TRIDIMENSIONAIS**

Henri Yudi Vatanable

Engenheiro de Minas

Dissertação realizada no Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGEM), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Porto Alegre
2018

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Metalurgia Extrativa/Tecnologia Mineral, e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. André Cezar Zingano

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Diego Machado Marques

Prof. Dr. Jair Koppe

Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Coordenador do PPGEM

“You may never know what results come of your actions, but if you do nothing, there will be no results.”

Mahatma Gandhi

AGRADECIMENTOS

Primeiramente queria agradecer aos meus Pais, Lívio Vatanable e Natália Okamoto, por mais uma vez acreditaram e me proporcionarem apoio durante todos os momentos, incluindo este trabalho.

Não posso deixar de citar aqui a minha namorada, Vanessa Daniela Corba, tão importante em diversos momentos desta caminhada, onde conversas, ideias, afeto e sonhos, foram compartilhados e realizados.

Muito obrigado a coordenação e a todos os funcionários do PPGEM por estarem sempre prontos para auxiliar e por fazerem a diferença, sempre comprometidos em manter o bom nível deste programa de pós-graduação.

Expresso meu agradecimento à Prof. Vanessa Koppe pelas conversas e disponibilidade, sempre disposto a ajudar através de conselhos e debates acerca do tema.

Por fim gostaria de agradecer aos companheiros do laboratório de Mecânica de Rochas da UFRGS, em especial ao meu orientador André Cezar Zingano, que me ofereceu a oportunidade de realizar este trabalho, me acolhendo como um amigo e sempre disposto ajudar.

RESUMO

A caracterização geotécnica de maciços rochosos é um dos aspectos mais importantes para o sucesso de um empreendimento mineiro. Desta forma é preciso ter um investimento significativo para a aquisição de dados durante a fase de pesquisa mineral, bem como um grande esforço para manipular os dados obtidos. Para se determinar as propriedades de um maciço, é necessário estabelecer, primeiramente, as diferenças entre rochas intacta e maciço rochoso. O comportamento mecânico destas duas classes pode apresentar grandes diferenças quando analisadas em laboratório. Um dos métodos mais utilizados no ambiente mineiro para classificar o maciço rochoso é o Rock Mass Rating (RMR), sistema que consiste em ranquear os seguintes parâmetros: Rock Quality Designation (RQD), espaçamento entre fraturas, resistência a compressão simples (UCS), qualidade das descontinuidades e presença de água no maciço. Este trabalho tem por utilizar a geoestatística para primeiro se conhecer algumas das particularidades destas variáveis, tais como a não linearidade, o comportamento em diferentes direções e a união de diferentes populações e posteriormente usar as técnicas de krigagem para criar um modelo geotécnico tridimensional. A geoestatística nos permite obter uma estimativa mais precisa e ter um maior conhecimento da incerteza do fenômeno, entretanto o RMR, por não ser uma variável aditiva, não se pode aplicar diretamente o uso das técnicas de krigagem. Assim uma metodologia é proposta para se estimar cada um dos parâmetros, ranqueá-los de acordo com seus valores e por fim obter a classificação RMR através do somatório destes ranques. Os resultados são comparados com a geologia estrutural da região de estudo, para se analisar a relação desta com a qualidade do maciço. A metodologia proposta apresentou uma melhora significativa na qualidade de informações no local estimado e mostrou ser uma tentativa consistente para se criar um modelo geotécnico 3D.

Palavras-chave: Mecânica de Rochas, Classificação Geomecânica, *Rock Mass Rating*, Geoestatística, Krigagem.

ABSTRACT

The geotechnical characterization of rock masses is one of the most important aspects for the success of a mining enterprise. In this way, it is necessary to have a significant investment to acquire data during the mineral research phase and to make a great effort to manipulate and interpret the obtained data. In order to know a rock, it is necessary to establish the differences of properties between rock intact and rocky mass. The mechanical behavior of these two classes can present great differences when analyzed in the laboratory. One of the methods most used in the mining environment to classify the rock mass is the Rock Mass Rating (RMR) system, which consists of ranking the following parameters: Rock Quality Designation (RQD), fracture spacing, simple compression strength (UCS) quality of the discontinuities and presence of water in the massif. This work has to use geostatistics to first know some of the peculiarities of these variables, such as nonlinearity, behavior in different directions and the union of different populations and later to use kriging techniques to create a three - dimensional geotechnical model. The geostatistics allows us to obtain a more accurate estimate and to have a better knowledge of the uncertainty of the phenomenon, however, the RMR is not an additive variable, so cannot be directly applied the use of kriging techniques. Thus a methodology is proposed to estimate each of the parameters, rank them according to their values and finally obtain the RMR classification through the sum of these ranks. The results are compared with the structural geology of the study region, in order to analyze its relation with the quality of the rock mass. The proposed methodology presented a significant improvement in the quality of information at the estimated site and proved to be a consistent attempt to create a 3D geotechnical model.

Keywords: Rock mechanics, geotechnical classification, rock mass rating, geostatistic, kriging.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas da metodologia adotada o trabalho	19
Figura 2 - Martelo de Schmidt	22
Figura 3 - Gráfico de correlação Dureza Schmidt x UCS	23
Figura 4 – Método convencional de cálculo do RQD a partir de testemunho de sondagem	24
Figura 5 - Perfis típicos de rugosidade e respectivas designações.....	29
Figura 6 - Classificação do método Rock Mass Rating	33
Figura 7 - Variograma experimental e modelo variográfico	35
Figura 8 - Localização da área de estudo.....	39
Figura 9 - Mapa da Geologia Regional presentes no ESRG	40
Figura 10 - Mapa geológico da bacia do Camaquã.....	41
Figura 11 - Mapa geológico de estrutural da região de Minas do Camaquã	41
Figura 12 - Instalações para a realização das descrições geomecânicas	42
Figura 13 - Planilha padrão para a descrição geomecânica dos testemunhos	44
Figura 14 - Estereograma das fraturas presentes no maciço rochoso.....	45
Figura 15 - Gráfico roseta das fraturas presentes no maciço	46
Figura 16 - Estereograma da falhas presentes no maciço rochoso.....	46
Figura 17 - Gráfico roseta das falhas presentes no maciço.....	47
Figura 18 - Furos de sondagem digitalizados com legenda referente as litologias presentes no maciço.....	48
Figura 19 - Seções para a criação dos modelos geológicos (Vista Frontal)	50
Figura 20 - Seções para a criação dos modelos geológicos (Vista Lateral)	50
Figura 21 - Seções para a criação dos modelos geológicos (Vista Frontal)	51
Figura 22 - Sólidos representativo das litologias.....	51
Figura 23 - Modelo de blocos para as duas litologias principais.....	52
Figura 24 - Aderência entre modelo geológico x modelo de blocos	53
Figura 25 - Função condicional para gerar um banco de dados categóricos	55
Figura 26 - Histograma dos indicadores no arenito inferior - variável ESP.....	55
Figura 27 - Histograma dos indicadores no conglomerado - variável ESP	56

Figura 28 - Histograma dos indicadores no arenito inferior e conglomerado - variável RQD.....	56
Figura 29 - Histograma dos indicadores no arenito inferior e conglomerado - variável RUG.....	57
Figura 30 - Histograma dos indicadores no arenito inferior - variável UCS.....	57
Figura 31 - Histograma dos indicadores no conglomerado - variável UCS.....	58
Figura 32 - Variograma da maior direção do Indicador 1 da variável ESP no arenito inferior.....	59
Figura 33 - Variograma da menor e media direção do Indicador 1 da variável ESP no arenito inferior.....	59
Figura 34 - Variograma da maior direção do Indicador 2 da variável ESP no arenito inferior.....	60
Figura 35 - Variograma da menor e media direção do Indicador 2 da variável ESP no arenito inferior.....	60
Figura 36 - Variograma da maior direção do Indicador 3 da variável ESP no arenito inferior.....	61
Figura 37 - Variograma da menor e media direção do Indicador 3 da variável ESP no arenito inferior.....	61
Figura 38 - Variograma da maior, media e menor direção do Indicador 4 da variável ESP no arenito inferior.....	62
Figura 39 - Variograma Omni-direcional do Indicador 5 da variável ESP no arenito inferior.....	63
Figura 40 - Variograma da maior, media e menor direção do Indicador 1 da variável RQD no arenito inferior.....	64
Figura 41 - Variograma da maior, media e menor direção do Indicador 2 da variável RQD no arenito inferior.....	65
Figura 42 - Variograma Omni-direcional do Indicador 3 da variável RQD no arenito inferior.....	66
Figura 43 - Variograma Omni-direcional do Indicador 4 da variável RQD no arenito inferior.....	66
Figura 44 - Variograma Omni-direcional do Indicador 5 da variável RQD no arenito inferior.....	67

Figura 45 - Variograma da maior direção do Indicador 3 da variável RUG no arenito inferior	68
Figura 46 - Variograma da menor e media direção do Indicador 3 da variável RUG no arenito inferior	68
Figura 47 - Variograma Omni-direcional do Indicador 4 da variável RUG no arenito inferior	68
Figura 48 - Variograma Omni-direcional do Indicador 5 da variável RUG no arenito inferior	69
Figura 49 - Variograma da maior, media e menor direção do Indicador 4 da variável UCS no arenito inferior	70
Figura 50 - Variograma da maior, media e menor direção do Indicador 5 da variável UCS no arenito inferior	71
Figura 51 - Variograma Omni-direcional do Indicador 1 da variável ESP no conglomerado	72
Figura 52 - Variograma Omni-direcional do Indicador 2 da variável ESP no conglomerado	73
Figura 53 - Variograma maior direção do Indicador 3 da variável ESP no conglomerado	73
Figura 54 - Variograma menor e media direção do Indicador 3 da variável ESP no conglomerado.....	74
Figura 55 - Variograma Omni-direcional do Indicador 4 da variável ESP no conglomerado	74
Figura 56 - Variograma Omni-direcional do Indicador 5 da variável ESP no conglomerado	75
Figura 57 - Variograma maior direção do Indicador 1 da variável RQD no conglomerado	76
Figura 58 - Variograma menor e media direção do Indicador 1 da variável RQD no conglomerado.....	76
Figura 59 - Variograma maior direção do Indicador 2 da variável RQD no conglomerado	77
Figura 60 -Variograma menor e media direção do Indicador 2 da variável RQD no conglomerado.....	77

Figura 61 - Variograma Omni-direcional do Indicador 3 da variável RQD no conglomerado.....	78
Figura 62 - Variograma Omni-direcional do Indicador 4 da variável RQD no conglomerado.....	78
Figura 63 - Variograma Omni-direcional do Indicador 5 da variável RQD no conglomerado.....	79
Figura 64 - Variograma Omni-direcional do Indicador 3 da variável RUG no conglomerado.....	80
Figura 65 - Variograma Omni-direcional do Indicador 4 da variável RUG no conglomerado.....	80
Figura 66 - Variograma Omni-direcional do Indicador 5 da variável RUG no conglomerado.....	81
Figura 67 - Variograma maior direção do Indicador 4 da variável UCS no conglomerado	82
Figura 68 - Variograma menor e media direção do Indicador 4 da variável UCS no conglomerado.....	82
Figura 69 - Variograma maior direção do Indicador 5 da variável UCS no conglomerado	83
Figura 70 - Variograma maior direção do Indicador 5 da variável UCS no conglomerado	83
Figura 71 - Modelo de probabilidade para o indicador 1 e 2, respectivamente, da variável ESP no arenito inferior.....	85
Figura 72 - Modelo de probabilidade para o indicador 3 e 4, respectivamente, da variável ESP no arenito inferior.....	86
Figura 73 - Modelo de probabilidade para o indicador 5 da variável ESP no arenito inferior	87
Figura 74 - Modelo de probabilidade para o indicador 1 da variável RQD no arenito inferior	87
Figura 75 - Modelo de probabilidade para o indicador 2 e 3, respectivamente, da variável RQD no arenito inferior	88
Figura 76 - Modelo de probabilidade para o indicador 4 e 5, respectivamente, da variável RQD no arenito inferior	89

Figura 77 - Modelo de probabilidade para o indicador 3 e 4, respectivamente, da variável RUG no arenito inferior	90
Figura 78 - Modelo de probabilidade para o indicador 5 da variável RUG no arenito inferior	91
Figura 79 - Modelo de probabilidade para o indicador 4 da variável UCS no arenito inferior	91
Figura 80 - Modelo de probabilidade para o indicador 5 da variável UCS no arenito inferior	92
Figura 81 - Modelo de probabilidade para o indicador 1 da variável ESP no conglomerado	92
Figura 82 - Modelo de probabilidade para o indicador 2 e 3, respectivamente, da variável ESP no conglomerado.....	93
Figura 83 - Modelo de probabilidade para o indicador 4 e 5, respectivamente, da variável ESP no conglomerado.....	94
Figura 84 - Modelo de probabilidade para o indicador 1 e 2, respectivamente, da variável RQD no conglomerado	95
Figura 85 - Modelo de probabilidade para o indicador 3 e 4, respectivamente, da variável RQD no conglomerado	96
Figura 86 - Modelo de probabilidade para o indicador 5 da variável ESP no conglomerado	97
Figura 87 - Modelo de probabilidade para o indicador 3 da variável RUG no conglomerado.....	97
Figura 88 - Modelo de probabilidade para o indicador 4 e 5, respectivamente, da variável RUG no conglomerado	98
Figura 89 - Modelo de probabilidade para o indicador 4 e 5, respectivamente, da variável UCS no conglomerado	99
Figura 90 - Modelo final paras as variaveis ESP e RQD, respectivamente, para o arenito inferior	100
Figura 91 - Modelo final paras as variaveis RUG e UCS, respectivamente, para o arenito inferior	101
Figura 92 - Modelo final paras as variaveis ESP e RQD, respectivamente, para o conglomerado.....	102

Figura 93 - Modelo final para as variáveis RUG e UCS, respectivamente, para o conglomerado.....	103
Figura 94 - Histograma dos dados originais e blocos estimados da variável ESP	104
Figura 95 - Histograma dos dados originais e blocos estimados da variável RQD	105
Figura 96 - Histograma dos dados originais e blocos estimados da variável RUG.....	106
Figura 97 - Histograma dos dados originais e blocos estimados da variável UCS.....	107
Figura 98 - Seções 1 e 2, respectivamente, para o modelo do ESP	108
Figura 99 - Seções 3 e 4, respectivamente, para o modelo do ESP	109
Figura 100 - Seções 5 e 6, respectivamente, para o modelo do ESP	110
Figura 101 - Seções 1 e 2, respectivamente, para o modelo do RQD	111
Figura 102 - Seções 3 e 4, respectivamente, para o modelo do RQD	112
Figura 103 - Seções 5 e 6, respectivamente, para o modelo do RQD	113
Figura 104 - Seções 1 e 2, respectivamente, para o modelo do RUG	114
Figura 105 - Seções 3 e 4, respectivamente, para o modelo do RUG	115
Figura 106 - Seção 5 para o modelo do RUG.....	116
Figura 107 – Seção 1 para o modelo do UCS.....	117
Figura 108 - Seções 2 e 3, respectivamente, para o modelo do UCS.....	117
Figura 109 - Seções 4 e 5, respectivamente, para o modelo do UCS.....	118
Figura 110 - Função condicional para a classificação geomecânica (RMR)	121
Figura 111 - Modelo Geomecânico Final para o conglomerado	123
Figura 112 - Modelo Geomecânico Final para o arenito inferior	123
Figura 113 - Histograma das classes geomecânicas após a classificação RMR.....	124

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação do maciço rochoso usando valores de RQD.....	25
Tabela 2 - Classificação do espaçamento médio das descontinuidades.....	26
Tabela 3 - Classificação da persistência.....	27
Tabela 4 - Classificação da rugosidade das descontinuidades	28
Tabela 5 - Classificação da abertura de descontinuidade	30
Tabela 6 - Classificação do grau de alteração das rochas	31
Tabela 7 - Sumário estatístico das variáveis geomecânicas.....	49
Tabela 8 - Comparação entre os volumes dos sólidos e blocos.....	53
Tabela 9 - Modelo variográfico dos indicadores da variável ESP no arenito inferior	63
Tabela 10 - Modelo variográfico dos indicadores da variável RQD no arenito inferior. 67	
Tabela 11 - Modelo variográfico dos indicadores da variável RUG no arenito inferior. 69	
Tabela 12 - Modelo variográfico dos indicadores da variável UCS no arenito inferior . 72	
Tabela 13 - Modelo variográfico dos indicadores da variável ESP no conglomerado ... 75	
Tabela 14 - Modelo variográfico dos indicadores da variável RQD no conglomerado.. 79	
Tabela 15 - Modelo variográfico dos indicadores da variável RUG no conglomerado.. 81	
Tabela 16 - Modelo variográfico dos indicadores da variável UCS no conglomerado... 84	

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	METAS E OBJETIVOS.....	17
1.2	JUSTIFICATIVA	17
1.3	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	18
1.4	METODOLOGIA.....	18
1.5	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA.....	21
2.1.1	Resistência a compressão uniaxial (UCS)	21
2.1.1.1	Esclerômetro de <i>Schmidt</i>	22
2.1.1.2	Propriedades Físicas	23
2.1.2	Índice de qualidade da rocha (RQD)	24
2.1.3	Espaçamento	25
2.1.4	Condições das descontinuidades	27
2.1.5	Condição de água subterrânea	31
2.2	CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA – SISTEMA <i>ROCK MASS RATING</i> (RMR)	31
2.3	ABORDAGEM GEOESTATÍSTICA.....	34
2.3.1	Variáveis Regionalizadas	34
2.3.2	Variograma	34
2.3.3	Krigagem dos Indicadores	36
2.4	HISTÓRICO DA GEOESTATÍSTICA APLICADA A GEOTECNIA.....	37
3	ESTUDO DE CASO	39
3.1	LOCALIZAÇÃO	39
3.2	GEOLOGIA REGIONAL.....	40

3.3	GEOLOGIA LOCAL	40
3.4	MECÂNICA DE ROCHAS	42
3.4.1	Descrição Geomecânica.....	42
3.4.2	Orientação das descontinuidades.....	45
4	BANCO DE DADOS.....	48
4.1	AVALIAÇÃO E CONSTRUÇÃO DO BANCO DE DADOS	48
4.2	MODELAGEM GEOLÓGICA	49
4.3	MODELO DE BLOCOS.....	52
5	GEOESTATÍSTICA	54
5.1	ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS.....	54
5.1.1	Transformação dos dados numéricos para dados categóricos	54
5.2	ANÁLISE DA CONTINUIDADE ESPACIAL.....	58
5.2.1	Variografia	58
5.2.2	Estimativa.....	84
5.2.2.1	Krigagem do Indicadores.....	84
5.2.2.2	Validação da estimativa	104
6	CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DOS BLOCOS	120
6.1	APLICAÇÃO DO RMR AO MODELO ESTIMADO.....	120
6.2	RESULTADO DA CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DOS BLOCOS.....	122
7	CONCLUSÕES E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	125
8	RECOMENDAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	127
8.1	RECOMENDAÇÕES.....	127
8.2	TRABALHOS FUTUROS.....	127
	REFERÊNCIAS.....	128

Capítulo 1

1 INTRODUÇÃO

Na mineração toda atividade está diretamente ligada a rocha, seja ela em fase de pesquisa mineral, planejamento mineiro e práticas operacionais. O baixo nível de informações sobre este elemento da natureza pode ter um impacto negativo, ocasionando um menor aproveitamento das reservas minerais e problemas na segurança operacional, sendo a principal delas a instabilidade de taludes. Desta forma é necessário um investimento significativo para a aquisição de dados em fase de pesquisa mineral e um bom conhecimento para se manipular e interpretar estas informações, garantindo assim o sucesso econômico de qualquer empreendimento mineiro.

1.1 METAS E OBJETIVOS

Este trabalho tem como meta inicial quantificar e qualificar as informações geotécnicas obtidas em testemunhos de sondagem em um estudo de caso de um projeto mineiro em fase de pesquisa mineral. Como meta subsequente está o uso da geoestatística para se obter informações sobre o comportamento direcional e não-linearidade destas variáveis para se estimar modelos geotécnicos tridimensionais. Já a meta final do trabalho está em utilizar a metodologia de classificação geomecânica, neste caso o *Rock Mass Rating* (Bieniawski, 1973, 1976, 1989), para classificar os blocos de acordo com as classes de maciço rochoso e comprovar que o estudo pode melhorar o conhecimento sobre o maciço e contribuir com o planejamento e segurança operacional do projeto.

1.2 JUSTIFICATIVA

O maciço rochoso pode apresentar diferentes comportamentos de acordo com suas características, como por exemplo grau de alteração, resistência às tensões, presença de descontinuidades e água. Uma má avaliação geotécnica do maciço pode ocasionar problemas de estabilidade de taludes durante a fase operacional do empreendimento. No atual cenário da mineração, a técnica mais utilizada para a análise destes problemas é a modelagem numérica, baseadas em métodos como por exemplo,

o de elementos finitos (MEF), porém tudo aplicado a cenários bidimensionais e desta forma generalizando muito as características do maciço.

Este estudo tem por fim construir um modelo geotécnicos tridimensionais com o menor grau de incerteza possível para auxiliar nos processos de gestão de riscos geomecânicos e aumentar o aproveitamento dos recursos minerais combinado com uma máxima segurança operacional.

1.3 CONTEXTUALIZAÇÃO

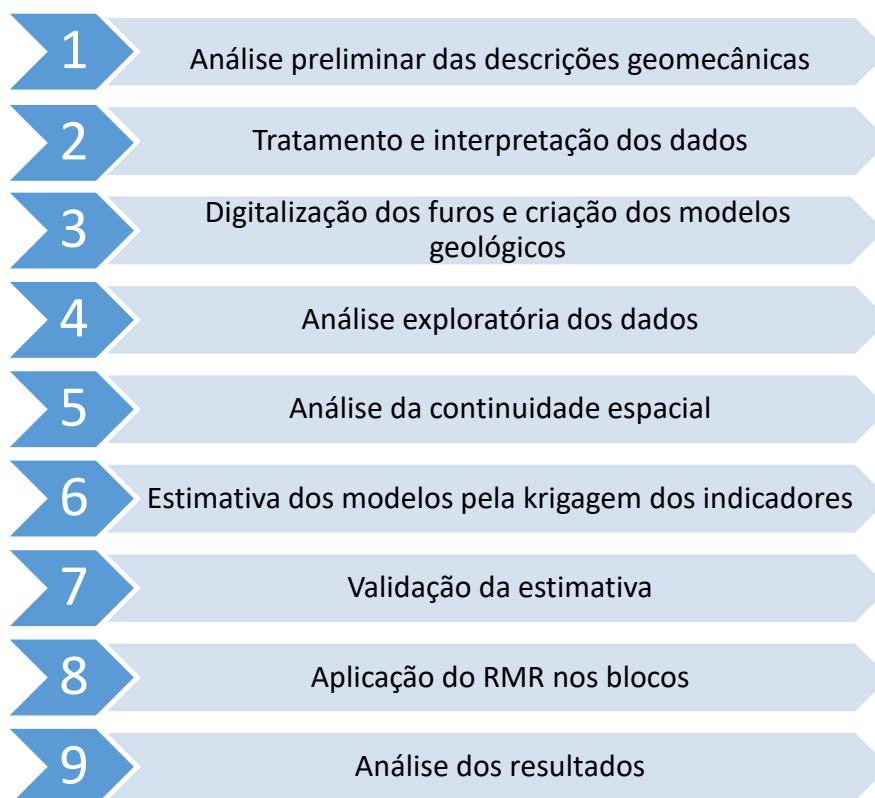
Como citado na justificativa do trabalho, na maioria dos empreendimentos mineiros a céu aberto, os dados obtidos na descrição geomecânica são simulados e inferidos por meio de interpretação de seções bidimensionais em softwares comerciais e assim perdendo muitas informações sobre o maciço rochoso. Com base nesse cenário, a utilização de modelos tridimensionais com estimativa das variáveis geomecânicas, vem sendo amplamente discutida no meio técnico como alternativa para melhorar o projeto de geometria de cavas, tornando-as mais adequadas, com maior segurança operacional e menor perda de recursos minerais.

1.4 METODOLOGIA

A metodologia adotada pode ser verificada na Figura 1. Inicialmente foram realizadas as descrições geotécnicas para se obter o máximo de informação dos parâmetros utilizados no método do *Rock Mass Rating*. Os dados então serão analisados e tratados no software Datamine Studio3®, permitindo a criação dos modelos geológicos e seus respectivos modelos de blocos. Com o uso do software Sgems®, será realizado a análise espacial das variáveis geotécnicas utilizadas no trabalho, obtendo os modelos variográfico utilizados nas estimativas dos modelos.

Posteriormente, os blocos serão ranqueados de acordo com a metodologia do RMR e os resultados validados pelas ferramentas que serão apresentadas ao longo do estudo.

Figura 1 - Etapas da metodologia adotada o trabalho



Fonte: Autoria própria

1.5 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre os conceitos fundamentais relacionado a classificação geotécnica, metodologia do RMR, critérios de ruptura, variografia, métodos de estimativa, ferramentas de validação dos resultados e um breve histórico da geoestatística aplicada à geotecnia. Tais conceitos serão vistos e aplicados durante todo o desenvolvimento do trabalho.

O capítulo 3 apresenta a descrição do estudo de caso, abordando os tópicos: localização, geologia regional, geologia local e mecânica de rochas. Este último tópico dará ênfase nas descrições geotécnicas realizadas nos testemunhos de furos de sondagem e análise da geologia estrutural, de acordo com as descontinuidades marcadas nesses testemunhos.

O capítulo 4 apresenta o processo de construção do banco de dados e análise exploratória dos dados. Posteriormente há a digitalização dos dados para o software

Datamine Studio3®. Nesse mesmo software será feita a criação dos modelos geológicos junto com seus respectivos modelos de blocos.

O capítulo 5 apresenta a análise exploratória dos dados, onde se retira informações dos histogramas dos dados originais. Posteriormente, a análise de continuidade espacial dos dados será realizada pelo software Sgems®, possibilitando a variografia e a criação do modelo variográfico dos parâmetros a serem estimados pela krigagem dos indicadores. Por fim será realizada a validação e análise dos resultados.

O capítulo 6 apresenta a classificação geomecânica dos blocos, através da implementação da metodologia RMR, ranqueando as variáveis de acordo com suas classes. Por fim será realizada a validação visual e interpretação dos resultados.

O capítulo 7 discute os resultados obtidos na modelagem geotécnica tridimensional, comparando com os dados originais e a geologia estrutural do maciço rochoso.

Por fim, o capítulo 8 apresenta as conclusões obtidas por meio do estudo, mostrando a necessidade de se obter informações sobre o maciço durante a fase de pré-viabilidade de um projeto mineiro. Neste capítulo, também serão comentadas possíveis abordagens para trabalhos futuros.

Capítulo 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA

Serra e Ojima (2004) referem o maciço rochoso como um conjunto de blocos de rochas, justapostos e articulados, formado pela matriz rochosa, ou rocha intacta, constituinte dos blocos, e pelas superfícies que limitam estes, chamadas descontinuidades. Conforme as modificações e solicitações são aplicadas ao maciço, este vai se comportar de maneira diferente a fim de alcançar o equilíbrio estático de seus “blocos”, pois as características da rocha e das descontinuidades diferem de local para local. Desta forma é necessário estudar e conhecer estas particularidades, realizando um procedimento preliminar denominado Caracterização Geomecânica. Com o uso desta ferramenta, é possível se obter um modelo inicial de comportamento do maciço rochoso.

Uma ferramenta de caracterização geomecânica é o sistema RMR, que se baseia na avaliação de cinco parâmetros e um ajuste, sendo eles: Resistência a compressão uniaxial, Índice de qualidade de rocha, Espaçamento entre descontinuidades, Condições das descontinuidades, Condição de água subterrânea e Orientação das descontinuidades. Geralmente estes parâmetros são avaliados em afloramentos, ou paredes de escavação. Em laboratório, podem ser estimados em testemunhos de sondagem.

2.1.1 Resistência a compressão uniaxial (UCS)

Rocha intacta pode ser definida como a matriz rochosa livre de descontinuidades de grande escala (visíveis a olho nu), formada por minerais agregados entre si e que possui elevada coesão interna e resistência. O UCS (Uniaxial Compressive Strength ou Resistência a compressão uniaxial) é o parâmetro que define o valor máximo suportado pela rocha até ela perder suas características de rocha intacta. Quando as tensões aplicadas na rocha ultrapassam o UCS, o mesmo não se comporta de forma satisfatória, ou seja, perde a resistência a solicitações externas, ocorrendo o seu rompimento ou colapso. O UCS é atribuído como o limite de resistência da rocha, sendo necessário obtê-lo para a elaboração de projetos de engenharia.

A rocha pode entrar em colapso sobre efeito de esforços de flexão, cisalhamento, tração e compressão. Para determinar o UCS, ensaios de laboratório em amostras de rochas intactas podem ser feitos para avaliação desta propriedade, sendo os principais:

- Ensaio de compressão uniaxial com medida de deformações axiais e radiais para a obtenção da resistência à compressão uniaxial, módulo de Young e coeficiente de Poisson;
- Ensaio de compressão triaxial para a obtenção da envoltória de resistência, ângulo de atrito e coesão;
- Ensaio de compressão diametral para a determinação da resistência a tração;
- Ensaio de carga pontual para a estimativa da resistência a compressão uniaxial;
- Ensaio de dureza superficial através do Esclerômetro de *Schmidt* para a estimativa da resistência a compressão uniaxial.

2.1.1.1 Esclerômetro de *Schmidt*

Este ensaio tem como base a aplicação de um impacto através de uma massa de aço na superfície a ser ensaiada, a qual reage, sendo essa reação proporcional à sua dureza (Guerreiro, 2000). O uso do martelo de *Schmidt*, Figura 2, permite estimar a resistência pela medida de dureza de sua superfície, seguindo a NBR 7584 (1995). Essa medida é feita sem provocar a redução da capacidade resistente da amostra ensaiada e sem provocar danos superficiais relevantes, por isso este ensaio também é tratado como sendo não destrutivo.

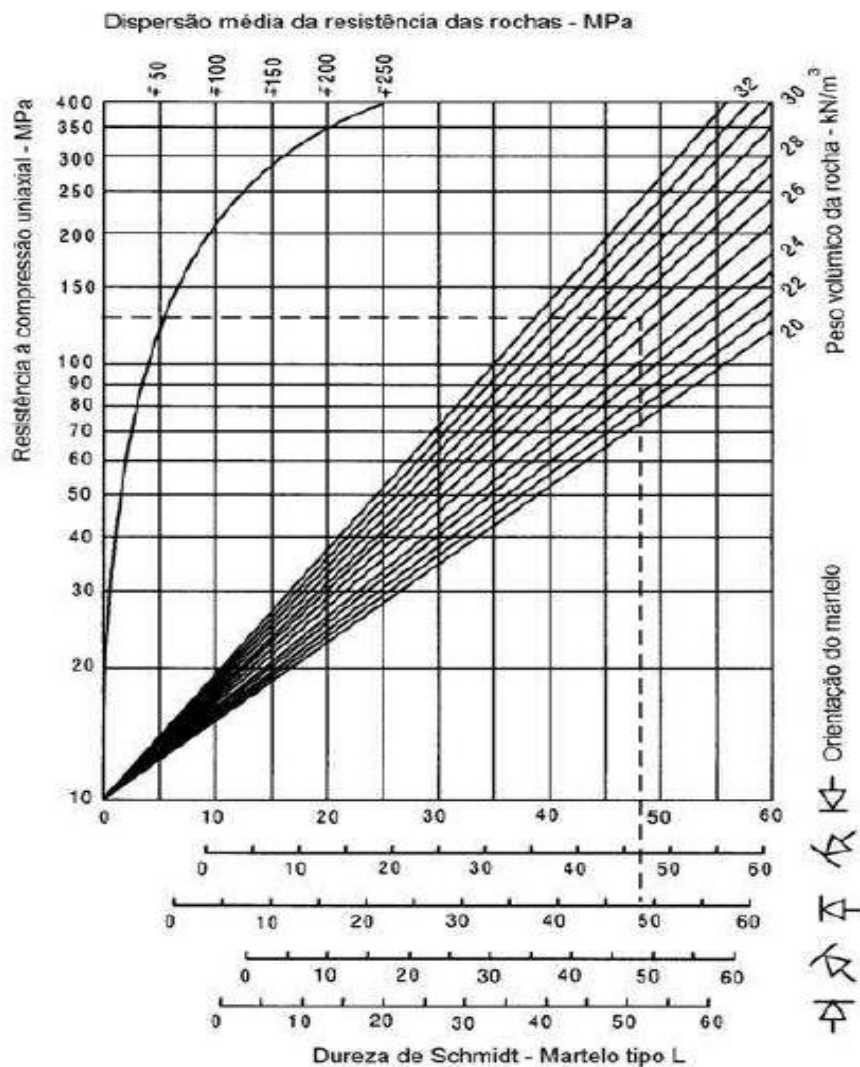
Figura 2 - Martelo de Schmidt



Fonte - Autoria própria

O resultado é obtido através da leitura da curva de correlação entre a dureza de *Schmidt* com a resistência à compressão simples, como pode ser vista na Figura 3.

Figura 3 - Gráfico de correlação Dureza Schmidt x UCS



Fonte - Lima e Menezes (2008)

2.1.1.2 Propriedades Físicas

Para se conseguir estabelecer o UCS da amostra a partir da dureza de Schmidt é necessário saber a densidade do material a ser ensaiado, desta forma a realização do ensaio de propriedades físicas para a obtenção destas informações é importante. Este ensaio tem por objetivo medir três parâmetros principais: densidade aparente (ρ_a), porosidade aparente (η_a) e absorção de água aparente (α_a). Os procedimentos para a realização do ensaio seguem a norma NBR 15845 (2010).

$$\rho_a = \left(\frac{M_{sec}}{M_{sat} - M_{sub}} \right) \times 1000 \quad (1)$$

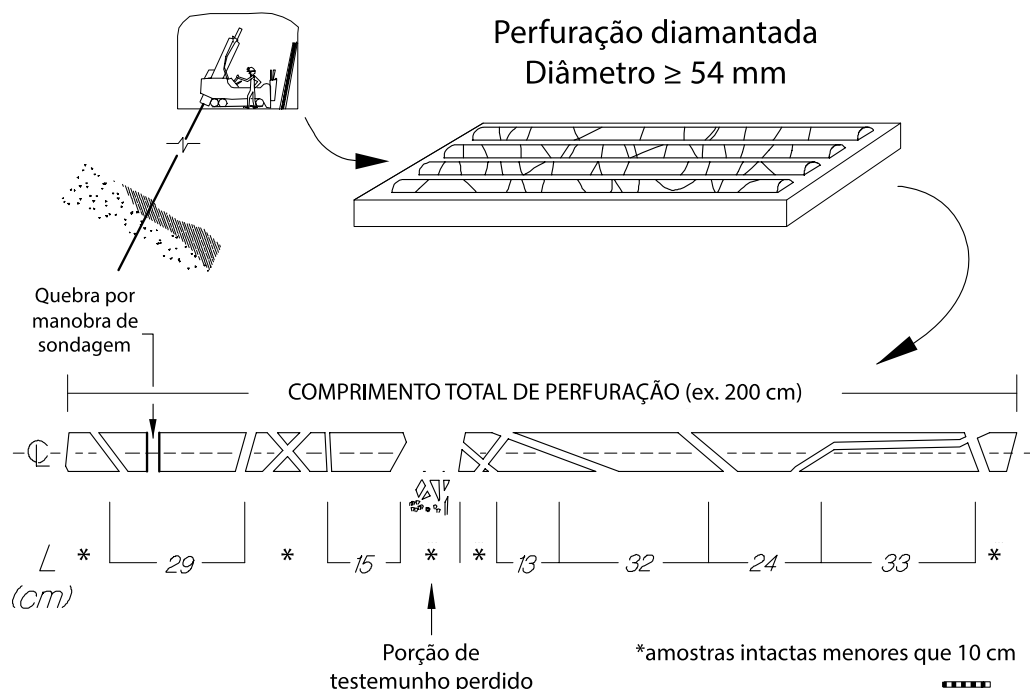
$$\eta_a = \left(\frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sat} - M_{sub}} \right) \times 100 \quad (2)$$

$$\alpha_a = \left(\frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sec}} \right) \times 100 \quad (3)$$

2.1.2 Índice de qualidade da rocha (RQD)

O RQD (*Rock Quality Designation*, ou Índice de Qualidade da Rocha) se baseia na quantidade de fraturas e na alteração da rocha, sendo verificado por meio de testemunhos de sondagem, velocidade sísmica e *scanlines* (Deere, 1968 *apud* Brady e Brown, 2005). O índice RQD, calculado a partir de testemunhos de sondagem, é o somatório do comprimento dos fragmentos de testemunho com comprimento igual ou maior a 10 cm, divididos pelo comprimento total do testemunho de uma sondagem com diâmetro NX (54 mm) e com barrilete duplo. A Figura 4 mostra a forma como as informações podem ser obtidas e a Equação 4 apresenta o cálculo do índice.

Figura 4 – Método convencional de cálculo do RQD a partir de testemunho de sondagem



Fonte - Modificado de Hutchinson e Diederichs (1996)

$$RQD = \frac{\sum L_i}{L_t} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

- RQD: Índice de qualidade da rocha (%);
- L_i : Fragmentos de testemunho de sondagem com tamanho ≥ 10 cm;
- L_t : Comprimento total do testemunho (cm).

Tendo por base os valores de RQD obtidos por meio da Equação 4, Deere (1969, *apud* Brady Brown, 2005) propôs a classificação do maciço rochoso em cinco grupos diferentes, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação do maciço rochoso usando valores de RQD

RQD (%)	Qualidade do maciço
0 - 25	Muito ruim
25 - 50	Ruim
50 - 75	Regular
75 - 90	Bom
90 - 100	Excelente

Fonte - Modificado de Brady e Brown (2005)

2.1.3 Espaçamento

O espaçamento das discontinuidades é determinado em termos da distância média entre as discontinuidades. A frequência (f_d), expressa em números de juntas por metro de linha de varredura, pode ser definida pela Equação 5.

$$f_d = \frac{N}{L} \quad (5)$$

Onde:

- N: Número de traços de discontinuidades intersectadas pela linha de varredura;
- L: Comprimento, em metros, da linha de varredura.

O espaçamento médio (E_d), ou a distância média entre as discontinuidades, é igual ao inverso da frequência, sendo expresso pela Equação 6.

$$E_d = \frac{1}{f_d} \quad (6)$$

A frequência das discontinuidades afeta a qualidade ou resistência do maciço rochoso como um todo. Mesmo a rocha mais resistente, quando intacta, é reduzida a uma massa pouco resistente quando afetada por juntas muito numerosas ou com espaçamento muito denso, ocasião em que o maciço adquire um comportamento mais próximo ao de materiais granulares. Por outro lado, quando o espaçamento é grande, o comportamento do maciço rochoso é fortemente influenciado pelas propriedades da rocha intacta, condicionado pelo tamanho dos blocos aumentando, portanto, a qualidade geotécnica do maciço rochoso. Em casos excepcionais, um pequeno espaçamento pode modificar o modo de ruptura de uma maciço, de translacional para circular, podendo até mesmo fluir em zonas extremamente cisalhadas. Nesses casos, a orientação das discontinuidades é de pequena importância, uma vez que a ruptura pode ocorrer tanto por rotação quanto por queda de pequenos pedaços de rocha.

O espaçamento não é necessariamente constante por todo o maciço. De um modo geral, as juntas podem apresentar espaçamento regular ou aleatório, ou então, apresentar uma distribuição em agrupamento. Em alguns casos, há uma tendência no sentido de agrupamento, ou seja, das juntas formarem enxames, em intervalos regulares. Muitos fatores contribuem para a definição do espaçamento, incluindo tipos litológicos, esforços tectônicos, sobrecargas e profundidade.

Tendo por base os valores de espaçamento obtidos por meio da Equação 6, a sociedade internacional de mecânica de rochas (ISRM, 1983), propôs a classificação do maciço rochoso em sete grupos diferentes, conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação do espaçamento médio das discontinuidades

Espaçamento (mm)	Termo
<20	Extremamente pequeno
20 – 60	Muito pequeno
60 – 200	Pequeno
200 - 600	Moderado
600 - 2000	Grande
2000 - 6000	Muito grande
> 6000	Extremamente grande

Fonte - ISRM (1983)

2.1.4 Condições das descontinuidades

As mais importantes características ou fatores mensuráveis das descontinuidades são a persistência, rugosidade, abertura, preenchimento e alteração do maciço rochoso. A resistência do maciço é tipicamente dependente de um ou mais desses fatores e as propriedades geotécnicas de maciços afetados por descontinuidades foram estudadas em detalhe por Bieniawski (1973).

A persistência é definida como a razão da área dos segmentos intactos pela área total da descontinuidade, sendo expressa em porcentagem. Na prática, é mais fácil medir o comprimento do traço da descontinuidade nos afloramentos, em vez da área, podendo obter uma medida de persistência (P) pela Equação 7.

$$P = \left(1 - \frac{C_{int}}{C_d}\right) \times 100 \quad (7)$$

Onde:

- C_{int} : Somatório dos comprimentos dos segmentos intactos ao longo da descontinuidade;
- C_d : Comprimento total do segmento da descontinuidade no afloramento.

Tendo por base os valores de persistência obtidos por meio da Equação 7, a sociedade internacional de mecânica de rochas (ISRM, 1983), propôs a classificação do maciço rochoso em cinco grupos diferentes, conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3 - Classificação da persistência

Persistência (m)	Termo
<1	Muito pequena
1 - 3	Pequena
3 - 10	Média
10 - 20	Grande
>20	Muito grande

Fonte - ISRM (1983)

A rugosidade das paredes de uma descontinuidade é uma característica potencialmente importante no comportamento de sua resistência ao cisalhamento, especialmente nos casos de juntas não preenchidas. A importância da rugosidade

diminui à medida que aumenta a abertura das descontinuidades e a espessura do material de preenchimento.

A rugosidade define-se, então, como uma medida das irregularidades e ondulações inerentes à superfície da descontinuidade em relação ao seu plano médio. De uma maneira geral, a rugosidade pode ser caracterizada pelas irregularidades superficiais de pequena escala e ondulações de grande escala (Brady e Brown, 2005) e descrita em termos de uma combinação de ambas (Wyllie e Mah, 2004).

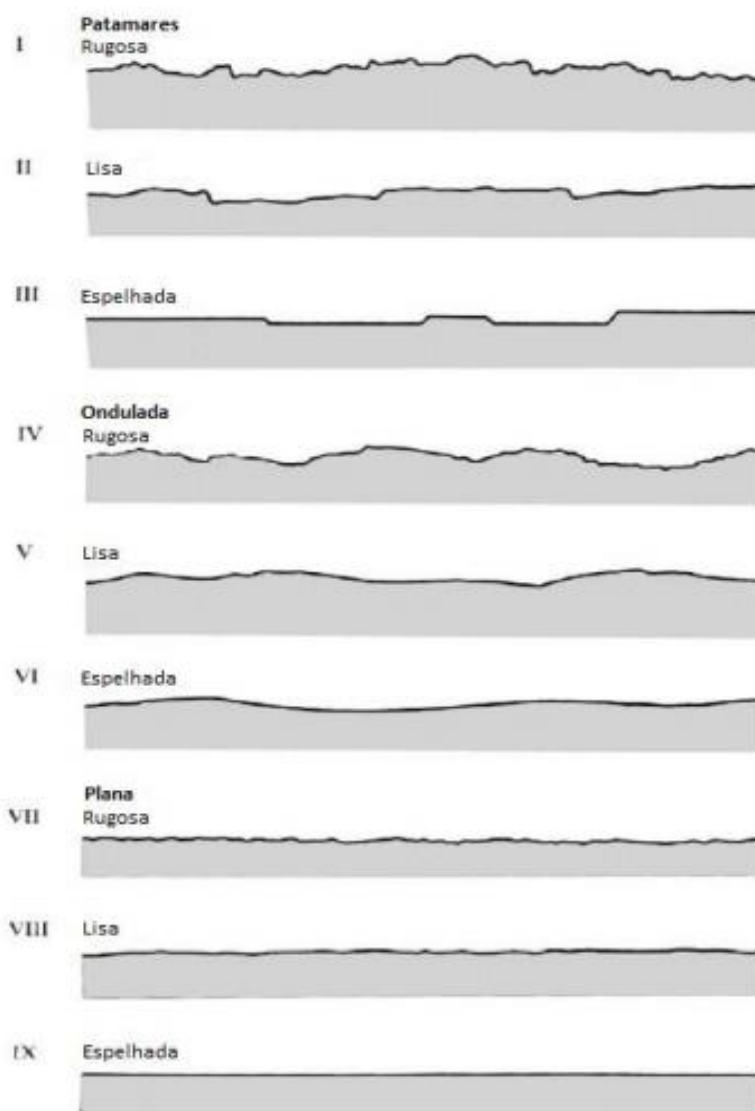
A sociedade internacional de mecânica de rochas (ISRM), sugere que os termos listados na Tabela 4 e ilustrado na Figura 5 podem ser usados para descrever a rugosidade em duas escalas: pequena escala (ensaios de laboratório) e escala intermediária (ensaios *in situ*). No entanto, curvaturas ou ondulações de larga escala podem se sobrepor sobre as escalas de rugosidades referidas (Brady e Brown, 2005).

Tabela 4 - Classificação da rugosidade das descontinuidades

Rugosidade	Classe
Rugosa ou irregular, em degraus	I
Lisa, em degraus	II
Espelhada, em degraus	III
Rugosa ou irregular, ondulada	IV
Lisa, ondulada	V
Espelhada, ondulada	VI
Rugosa ou irregular, plana	VII
Lisa, plana	VIII
Espelhada, plana	IX

Fonte - Modificado de Brady e Brown (2005)

Figura 5 - Perfis típicos de rugosidade e respectivas designações



Fonte - Modificado de ISRM, 1978 *apud* Brady e Brown (2005)

A abertura de uma junta é expressa em termos de distância média de afastamento dos blocos adjacentes ou o espaço entre as paredes das juntas. As juntas podem estar fechadas, mas se houver abertura, pode haver percolação de água, alteração das paredes e preenchimento, com profunda influência na resistência do maciço rochoso.

O espaço entre as paredes das juntas pode estar vazio, parcialmente preenchido ou completamente preenchido. O material de preenchimento pode ser argila, silte, areia, ou material mais grosseiro, resultante de fragmentação ao longo do plano de

ruptura. Tipicamente, os materiais de preenchimento mostram grandes variações nas características mecânicas, mas, no geral, apresentam baixa resistência ao cisalhamento. Em alguns casos, as juntas podem ser preenchidas por precipitações de minerais de sílica, que podem ser tão ou mais resistentes que a rocha das paredes das juntas, situação que tende a aumentar significativamente a resistência do maciço rochoso.

A abertura e/o espessura do preenchimento médio das descontinuidades podem ser classificados segundo a Tabela 5.

Tabela 5 - Classificação da abertura de descontinuidade

Abertura (mm)	Termo
zero	Cerrada
>0 – 2	Extremamente fechada
2 – 6	Muito fechada
6 - 20	Fechada
20- 60	Moderadamente fechada
60 - 200	Moderadamente aberta
> 200	Aberta

Fonte - Geological Society (1977)

O estado de alteração das rochas tem significativa influência nas propriedades geotécnicas dos maciços rochosos. O intemperismo físico dá origem a modificações no tamanho e número de descontinuidades presentes e o intemperismo químico é acelerado pela infiltração da água no subsolo.

A alteração hidrotermal de um maciço rochoso pode ocorrer em diferentes graus, sem guardar qualquer relação com a profundidade. Testemunhos de sondagem podem fornecer importantes dados acerca da alteração química em profundidade para uma correta avaliação das condições locais dos maciços rochosos. O impacto do intemperismo físico pode ser quantificado tomando-se medidas de campo como espaçamento e frequência das descontinuidades, enquanto o grau de intemperismo químico é menos susceptível a medições quantitativas.

Na descrição de testemunhos, a alteração pode ser registrada, mas a distribuição dos graus de alteração do maciço, pode ser apenas inferida de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6 - Classificação do grau de alteração das rochas

Grau de Alteração	Termo
W1	Rocha sã
W2	Rocha pouco alterada
W3	Rocha moderadamente alterada
W4	Rocha muito alterada
W5	Rocha completamente alterada (Solo)

Fonte - Modificado de ISRM (1981)

2.1.5 Condição de água subterrânea

O conhecimento da presença de água subterrânea e comportamento do lençol freático é fundamental para o planejamento de alguns aspectos do projeto de operação da mina, como a análise de estabilidade de taludes, rebaixamento do lençol freático e implementação de sistemas de drenagem.

A presença de água nas discontinuidades pode afetar negativamente a resistência do maciço, pois é responsável pela alteração química da rocha, diminuindo a coesão e ângulo de atrito. A presença de água no maciço pode ser classificada de acordo com a tabela presente no Apêndice A.

2.2 CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA – SISTEMA *ROCK MASS RATING* (RMR)

Os sistemas de classificação geomecânica dos maciços rochosos são sistemas empíricos. Com a utilização desses sistemas pode-se realizar estudos de estabilidade de taludes e cálculo dos fatores de segurança durante fase operacional.

As classificações são incorporadas no estudo geomecânico como uma importante ferramenta para a caracterização do maciço rochoso e para a correlação de dados de entrada para o dimensionamento e a verificação do comportamento das frentes de lavra, utilizando métodos numéricos ou analíticos.

Brady e Brown (2005) referem que os sistemas populares de classificação usados atualmente incluindo o GSI, o Sistema Q e o utilizado neste trabalho, o RMR, são baseados na determinação de ranques para o maciço rochoso dentro de uma faixa de valores, e que podem ser usados, também, para a estimativa de necessidade de suporte. O maciço é classificado de acordo com sua qualidade e ranqueados em diferentes classes, sendo que cada classe apresenta parâmetros de ruptura diferentes.

Bieniawski (1989) apresentou uma reformulação do sistema RMR, sendo esta, utilizada com sucesso em diversos estudos de caso no cenário da mineração. Esta versão tem por finalidade estimar a qualidade do maciço rochoso e se baseia em cinco parâmetros e um ajuste:

1. Resistência à compressão uniaxial (UCS);
2. Índice de qualidade da rocha (RQD);
3. Espaçamento das descontinuidades;
4. Condições das descontinuidades;
5. Condição de água subterrânea;
6. Orientação das descontinuidades (ajuste).

A aplicação deste sistema implica em dividir o maciço rochoso em diferentes regiões com mesmas características estruturais e classifica-las separadamente. Os limites destas regiões geralmente coincidem com alguma descontinuidade, como uma falha ou uma mudança de litologia.

O valor do RMR é obtido pelo somatório dos ranques de cada parâmetro, de acordo com a Figura 6 abaixo.

Figura 6 - Classificação do método Rock Mass Rating

A. CLASSIFICATION –PARAMETERS AND THEIR RATINGS									
Parameter			Range of values						
1	intact rock material	Point-load strength index					For this low range - uniaxial compressive test is preferred		
		Uniaxial comp. strength	>250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	< 1 MPa
		Rating	15	12	7	4	2	1	0
2	Drill core Quality RQD		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%		
	Rating		20	17	13	8	3		
3	Spacing of discontinuities		> 2 m	0,6 - 2 . m	200 - 800 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
	Rating		20	15	10	8	5		
	Condition of –discontinuities (See E)		Very rough –surfaces Not continuous Unweathered rock	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Highly weathered walls	Slickensided surfaces or Gouge < 5 mm thick or Separation 1-5 mm Continuous	Soft gouge >5 mm thick or Separation → 5 mm Continuous		
	Rating		30	25	20	10	0		
	Ground water	Inflow per 10 m tunnel length (l/m)	None	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		(Joint water press)/(Major principal σ)	0	< 0,1	0,1, - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5		
		General conditions	Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing		
		Rating	15	10	7	4	0		
B. RATING ADJUSTMENT FOR DISCONTINUITY ORIENTATIONS (See F)									
Strike –and dip orientations		Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very Unfavourable			
Ratings	Tunnels & mines	0	-2	-5	-10	-12			
	Foundations	0	-2	-7	-15	-25			
	Slopes	0	-5	-25	-50				
C. ROCK MASS CLASSES DETERMINED FROM TOTAL RATINGS									
Rating									
Class number		I	II	III	IV	V			
Description		Very good rock	Good rock	Fair rock	Poor rock	Very poor rock			
D. MEANING OF ROCK CLASSES									
Class number		I	II	III	IV	V			
Average stand-up time		20 yrs for 15 m span	1 year for 10 m span	1 week for 5 m span	10 hrs for 2,5 m span	30 min for 1 m span			
Cohesion of rock mass (kPa)		> 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100			
Friction angle of rock mass (deg)		> 45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	< 15			
E. GUIDELINES FOR CLASSIFICATION OF DISCONTINUITY conditions									
Discontinuity length (persistence)		< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m			
Rating		6	4	2	1	0			
Separation (aperture)		None	< 0,1 mm	0,1 - 1,0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm			
Rating		6	5	4	1	0			
Roughness		Very rough	Rough	Slightly rough	Smooth	Slickensided			
Rating		6	5	3	1	0			
Infilling (gouge)		None	Hard filling < 5 mm	Hard filling > 5 mm	Soft filling < 5 mm	Soft filling > 5 mm			
Rating		6	4	2	2	0			
Weathering		Unweathered	Slightly weathered	Moderately weathered	Highly weathered	Decomposed			
Ratings		6	5	3	1	0			
F. EFFECT OF DISCONTINUITY STRIKE AND DIP ORIENTATION IN TUNNELLING**									
Strike perpendicular to tunnel axis				Strike parallel to tunnel axis					
Drive with dip - Dip 45 - 90°		Drive with dip - Dip 20 - 45°		Dip 45 - 90°		Dip 20 - 45°			
Very favourable		Favourable		Very favourable		Fair			
Drive against –dip - Dip 45-90°		Drive against –dip - –Dip 20-45°		–Dip 0-20 - Irrespective of strike°					
Fair		Unfavourable		Fair					

* Some conditions are mutually exclusive . –For example, if infilling is present, the roughness of the surface will be overshadowed by the influence of the gouge. –In such cases use A.4 directly.

** Modified after Wickham et al (1972).

Fonte - Bieniawski (1979)

2.3 ABORDAGEM GEOESTATÍSTICA

Georges Matheron (1962), considerado o criador da Geoestatística, dizia que o ponto de partida para o desenvolvimento desta teoria foi devido á inabilidade da estatística clássica em considerar o aspecto espacial de um fenômeno, que constitui a feição mais importante em um estudo geológico. A geoestatística possui atualmente aplicações em diversos campos das Geociências, predominantemente na cartografia de variáveis originadas de um fenômeno que tenha continuidade no espaço, bem como, na geologia mineral para a avaliação dos mais diversos recursos naturais.

2.3.1 Variáveis Regionalizadas

Matheron (1963 e 1971) define que uma variável regionalizada é conceituada como uma função a qual possui um valor definido em cada ponto de um espaço Z.

Desta forma, regiões onde as amostras apresentam possibilidade de ter as mesmas propriedades, definem uma variável regionalizada. Outro aspecto definido pelo autor, seria que as variáveis regionalizadas apresentam duas propriedades contraditórias. A primeira seria a aleatoriedade, ocasionada por variações irregulares e imprevisíveis de um ponto a outro, a segunda seria o parâmetro estruturado, onde é definido pela continuidade espacial da variável.

2.3.2 Variograma

Segundo Yamamoto (1991) o variograma é uma ferramenta utilizada para representar quantitativamente a continuidade espacial de uma variável regionalizada e pode ser definida como sendo a esperança matemática do quadrado da diferença entre os valores de pontos no espaço, separados por uma distância h. Definido conforme a Equação 8:

$$2\gamma(h) = E[z(x_i) - z(x_{i+h})]^2 \quad (8)$$

De acordo com Matheron (1971), a forma com que o variograma cresce conforme o aumento da distância entre os pontos analisados, fornece informações sobre como se dá a perda progressiva da continuidade.

Esta continuidade espacial pode variar com as diferentes direções no espaço. O teor de um elemento pode apresentar o variograma dependente apenas da distância h entre os pontos, com alcance invariável, caso denominado de isotropia, ou apresentar alcances distintos ao longo de várias direções, caso em que a variável é anisotrópica (Soares, 2006).

A função básica do variograma é medir a variância de pares de amostras separados em múltiplas direções no espaço amostral. As distâncias entre os pares de amostras (h) são definidas como sendo múltiplos inteiros de um dado intervalo (Δh). Assim, para cada conjunto de pares é calculada a variância, de acordo com a Equação 9.

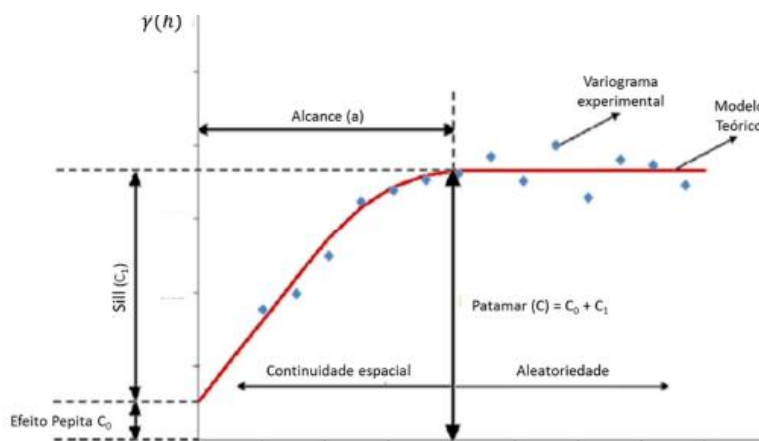
$$\gamma(h) = \frac{\sum_1^n [v(i+h) - v(i)]^2}{2n} \quad (9)$$

Onde:

- $\gamma(h)$: Variância dos pares dados separados pela distância h ;
- h : Distância entre os dados que formam um par;
- $v(i)$: Valor do dado na posição i ;
- $v(i + h)$: Valor do dado na posição $i+h$;
- n : Número de pares encontrados para cada distância h .

Os valores calculados podem ser representados graficamente em forma de variograma experimental e ajustados com um modelo, conforme a Figura 7.

Figura 7 - Variograma experimental e modelo variográfico



Fonte - Aula de Geoestatística, Prof.Dr. Elódio Sebem

Os componentes básicos do variograma experimental são: Alcance (a), Patamar (C) e Efeito Pepita (C_0).

O Alcance (a) é o valor da distância a partir da qual, naquela direção, os pares de valores $\nu(i)$ e $\nu(i + h)$ não apresentam correlação/dependência espacial.

O Patamar (C) do variograma é o valor no qual o variograma se estabiliza no campo aleatório, e é correspondente à variância da variável regionalizada (Yamamoto, 2001).

O Efeito Pepita (C_0) é o valor do variograma na origem ($h=0$). Em tese, o valor na origem deveria ser nulo, já que amostras tomadas no mesmo ponto deveriam possuir os mesmos valores da variável regionalizada (Yamamoto, 2001), mas geralmente tal fato não ocorre, devido a erros durante os processos de amostragem.

2.3.3 Krigagem dos Indicadores

Durante a fase de pesquisa em um empreendimento mineiro, o principal objetivo é obter um maior conhecimento sobre o depósito mineral e através da amostragem é possível consegui-lo. Entretanto só a amostragem não é capaz de quantificar e qualificar o volume total da população amostrada, assim é necessário estimar os atributos geológicos nos locais não amostrados.

O método mais utilizado para a estimativa de variáveis não lineares é a krigagem dos indicadores. Segundo Sinclair & Blackwell (2004), a krigagem dos indicadores é um procedimento de estimativa aplicado a variáveis binárias, codificadas em zeros e uns. Esta codificação é realizada de acordo com a posição dos dados originais em relação a um valor limite.

A finalidade da estimativa dos indicadores é atribuir uma probabilidade a um ponto ou bloco de valor desconhecido a partir de amostras próximas e do conhecimento sobre a continuidade espacial dos valores da variável dado pelo variograma. O procedimento de estimativa, de forma geral, baseia-se na combinação linear de amostras disponíveis. O banco de dados é categorizado de acordo com a Equação 10

$$i(u_a, z_k) = \begin{cases} 1, & z(u_a) \leq z_k \\ 0, & z(u_a) \geq z_k \end{cases} \quad (10)$$

Quando o teor da amostra é maior do que o valor do limite que se está analisando, a amostra tem seu valor transformado para 0. Quando o teor da amostra é menor ou igual ao limite estabelecido, a amostra tem o seu valor transformado para 1. A partir da transformação das amostras para um banco de dados categórico binário, é realizada a análise de continuidade espacial e conseqüentemente a estimativa por krigagem dos indicadores.

O resultado fornecerá para cada local estimado a probabilidade de se estar acima ou abaixo do limite estabelecido, e não mais um valor de teor. A classificação final do bloco será baseada na maior probabilidade do ponto estimado.

2.4 HISTÓRICO DA GEOESTATÍSTICA APLICADA A GEOTECNIA

O uso da geoestatística para modelar variáveis geotécnicas não é muito comum na indústria mineral, porém com a necessidade de se conhecer melhor o maciço e melhorar o aproveitamento da jazida mineral muitos trabalhos têm sido realizados, principalmente considerando o uso de técnicas de krigagem para a estimativa de variáveis distribuídas espacialmente.

Van de Wall e Ajalu (1997) utilizaram a krigagem de blocos para estimar os valores médios de dureza da rocha para definir uma estratégia de amostragem adequada para uma pedreira.

Ayalew *et al.* (2002) utilizou a geoestatística para primeiro determinar a variabilidade espacial do índice de qualidade da rocha (RQD) e descobrir a forte relação com o grau de alteração do maciço rochoso. Por fim, utilizou a krigagem ordinária para estimar o RDQ e associar o erro como medida de confiabilidade.

Redondo (2003) utilizou a krigagem dos indicadores para estimar o RQD obtido na descrição dos testemunhos de sondagem e utilizar os resultados como indicadores de qualidade do maciço, desta forma, permitindo se ter uma melhor avaliação econômica da jazida.

Oh *et al* (2004) integrou os dados de resistividade magnetotelúrico aos furos de sondagem para estimar os valores do RMR ao longo de um túnel de dois quilômetros. A técnica utilizada para a estimativa foi krigagem simples.

Stravropoulou *et al.* (2007) utilizou as informações geotécnicas obtidas durante fase de pesquisa mineral de um projeto de tunelamento para reproduzir a variabilidade espacial do RMR. A técnica utilizada foi a krigagem ordinária.

Kaewkongkaew *et al.* (2013) investigou a aplicabilidade e limitação de métodos geoestatísticos na previsão da qualidade do maciço rochoso utilizando o RMR. Eles usaram dados provenientes de dois estudos de caso diferentes, ambos localizados na Tailândia. A previsão, por krigagem ordinária, permitiu estimar valores de RMR que foram comparados com dados de observação de campo disponíveis a partir da escavação de túneis exploratórios.

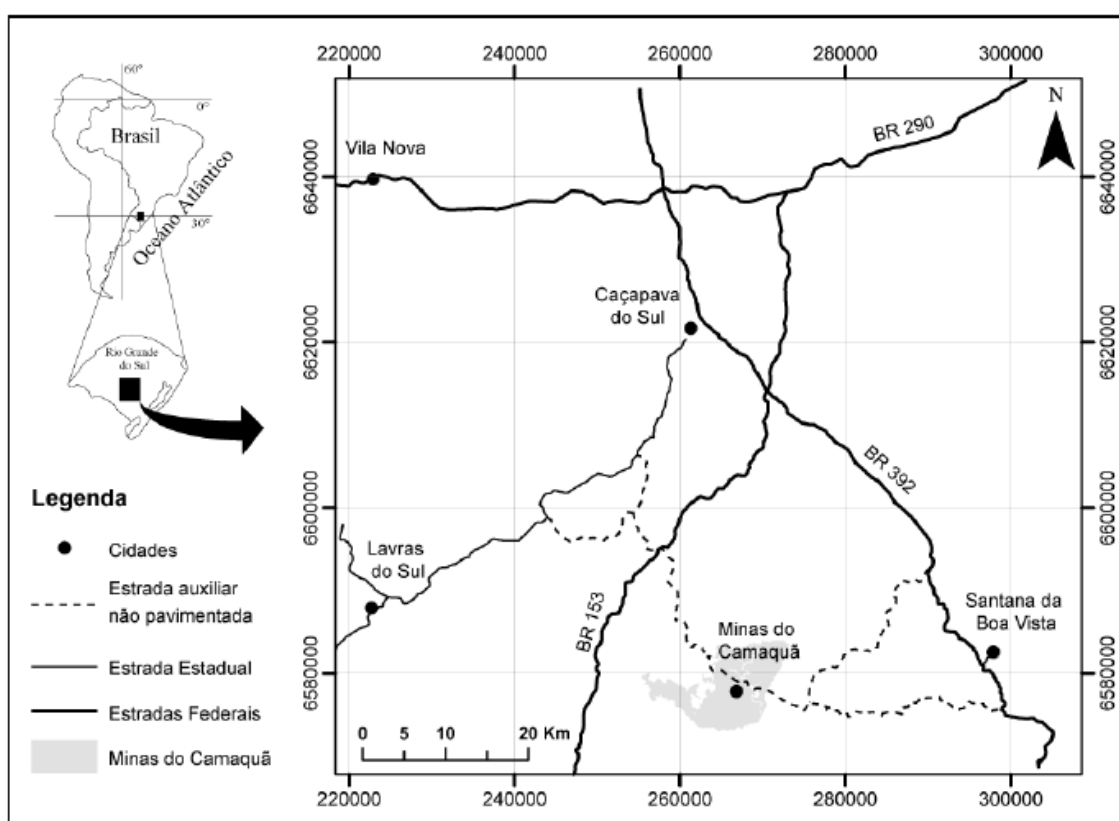
Capítulo 3

3 ESTUDO DE CASO

3.1 LOCALIZAÇÃO

As amostras para a realização dos trabalhos foram extraídas nas proximidades do antigo distrito mineiro Minas do Camaquã, Caçapava do Sul, RS. Esta é uma região onde muito estudos vêm acontecendo para a retomada das atividades de mineração. O alvo do estudo foi a área de afloramento da janela Bom Jardim e adjacências. O acesso para a região de Minas do Camaquã, saindo de Porto Alegre, começa pela rodovia BR-290 sendo necessário deslocar-se cerca de 230 km até o acesso a BR-153, onde toma-se a esquerda em direção a Caçapava do Sul, por cerca de 45 km e, finalmente, toma-se a RS-625 por mais 25 km, de acordo com a Figura 8

Figura 8 - Localização da área de estudo



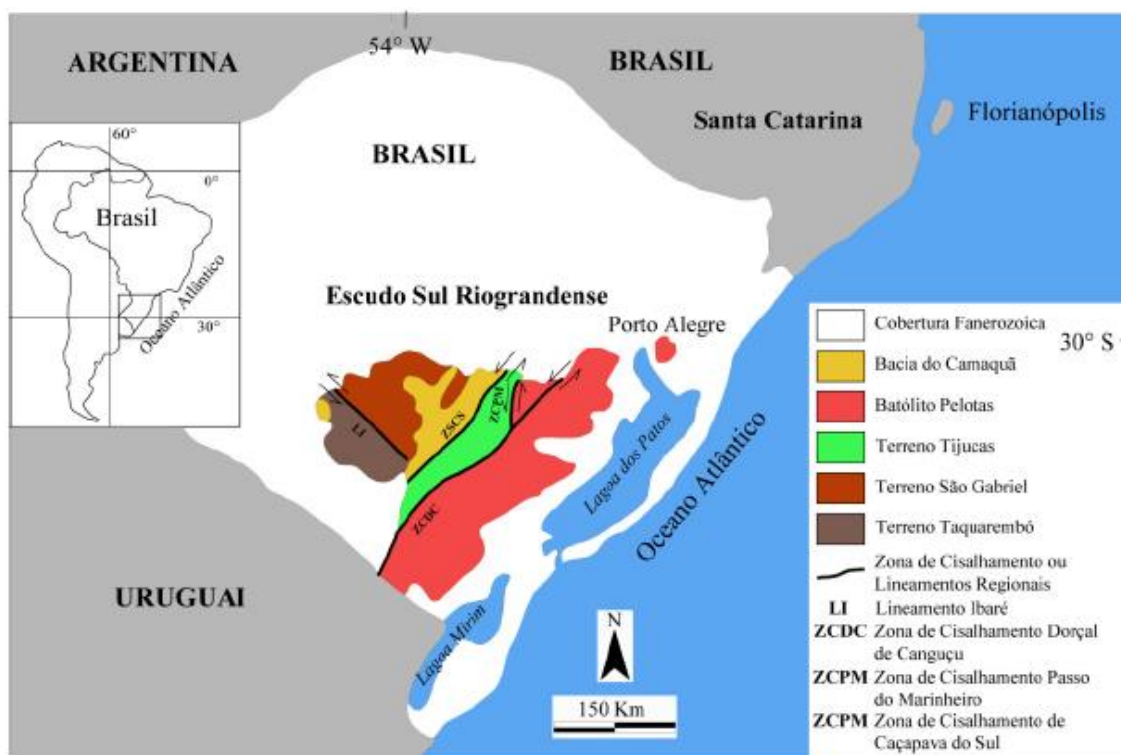
Fonte – Tectônica e Proveniência do Grupo Santa Bárbara, Região de Minas do Camaquã - RS

3.2 GEOLOGIA REGIONAL

A área de estudo está inserida no contexto geotectônico do Escudo Sul Riograndense (ESRG), o qual representa a porção mais ao sul do Brasil de ocorrência da Província Mantiqueira (Almeida, 1981).

O arcabouço tectônico do ESRG, ilustrado pela Figura 9, é formado por quatro grandes unidades geradas durante os períodos Neoproterozóico e Paleoproterozóicas que são: o Batólito Pelotas (BP), Terreno Tijucas (TT) e Terreno São Gabriel (TSG), que juntos formam o Cinturão Dom Feliciano, e o Terreno Taquarembó (TTa).

Figura 9 - Mapa da Geologia Regional presentes no ESRG



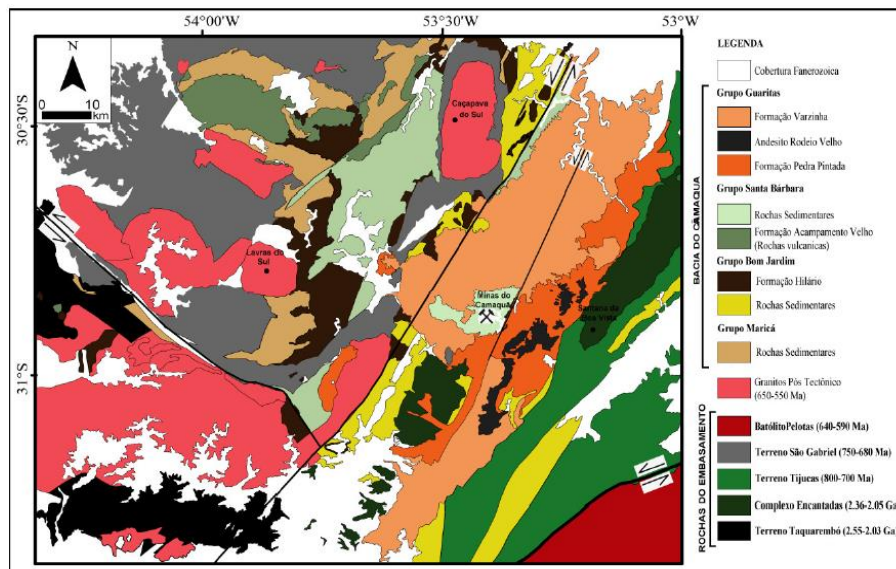
Fonte - Tectônica e Proveniência do Grupo Santa Bárbara, Região de Minas do Camaquã - RS

3.3 GEOLOGIA LOCAL

O distrito de Minas do Camaquã abrange a bacia do Camaquã que está localizada na porção central do ESRG. Sua sequência deposicional é marcada por depósitos vulcano-sedimentares com uma espessura aproximada de 6 a 7 mil metros. Muitas propostas estratigráficas já foram apresentadas para a Bacia do Camaquã ao longo dos

anos. De maneira geral a Bacia do Camaquã é subdividida em quatro grupos principais: Maricá, Bom Jardim, Santa Bárbara e Guaritas, de acordo com a Figura 10.

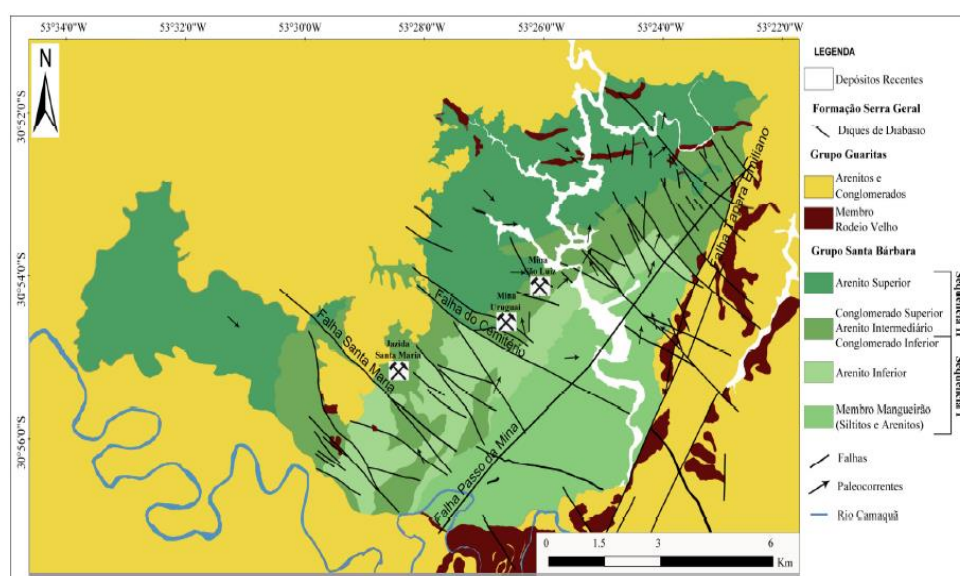
Figura 10 - Mapa geológico da bacia do Camaquã



Fonte - Tectônica e Proveniência do Grupo Santa Bárbara, Região de Minas do Camaquã - RS

A região onde o estudo foi desenvolvido, nomeada jazida Santa Maria, está incluída no grupo Santa Bárbara, que compreende uma sequência deposicional vulcano-sedimentar com aproximadamente 2500 m de espessura, onde as principais litologias presentes neste grupo são os arenitos e conglomerados, como pode ser visto na Figura 11.

Figura 11 - Mapa geológico de estrutural da região de Minas do Camaquã



Fonte - Tectônica e Proveniência do Grupo Santa Bárbara, Região de Minas do Camaquã - RS

3.4 MECÂNICA DE ROCHAS

Em todo e qualquer empreendimento mineiro é necessário obter informações sobre o maciço em que corpo mineral está inserido. Durante a fase de pesquisa mineral, grande parte do investimento é direcionado para os trabalhos de sondagem, pois são responsáveis em fornecer as amostras para análise dos teores em laboratório, porém cada vez mais, vem se aplicando também as técnicas de descrição geomecânica nos testemunhos de sondagem para se conhecer melhor as características de resistência da rocha e assim auxiliar as seguintes etapas de planejamento e operacionalização do projeto.

3.4.1 Descrição Geomecânica

Esta é uma técnica utilizada para se obter a maior quantidade de informações mecânicas do maciço durante fase de pesquisa mineral. Neste trabalho foi implementado o uso do RMR nos 54 furos sondagem realizados na campanha de amostragem na região de uma das possíveis cava do projeto, totalizando cerca de 11.000 metros amostrados, conforme as Figura 12.

Figura 12 - Instalações para a realização das descrições geomecânicas



Fonte - Autoria própria

Todos os furos seguiram a mesma metodologia de descrição:

1. A resistência a compressão simples foi estimada a partir do ensaio de martelo de Schmidt, como citado no tópico 2.1.1.1;
2. O RQD foi adquirido pela descrição em laboratório a partir dos testemunhos de sondagem, como citado no tópico 2.1.2;
3. O espaçamento também foi adquirido em laboratório a partir dos testemunhos de sondagem, como citado no tópico 2.1.3;
4. As condições das descontinuidades também foram analisadas em laboratório, porém para efeito de análise somente foi utilizado a rugosidade. A escolha da rugosidade como única variável a ser avaliada e ranqueada no RMR, se deu pela dificuldade de análise das demais e por serem variáveis que são obtidas de forma mais consistente em *Scanlines* e não em furos de sondagem, o procedimento para a análise de rugosidade segue o que foi citado no tópico 2.1.4;
5. As condições de água subterrânea não foram avaliadas e assim definido um valor constante de acordo com as classes do RMR.

Algumas variáveis apresentam comportamento direcional, como por exemplo o RQD e espaçamento. Assim, dependendo da direção e mergulho com que os furos foram realizados, os valores destas variáveis podem, provavelmente, mudar. Desta forma dos 54 furos de sondagem, somente os furos que apresentaram mesmas orientações (Azimute de 270° e mergulho de 60°) foram utilizados, totalizando 41 furos. A Figura 13 ilustra o modelo de planilha onde as informações eram coletadas.

Figura 13 - Planilha padrão para a descrição geomecânica dos testemunhos

DESCRIÇÃO GEOMECÂNICA DE SONDAGEM																	
Empresa:		Projeto: Santa Maria															
Alvo:		BRSMSMD0085															
Período Furação:		17/02/2016 À 22/02/2016															
Período Descrição:																	
Orientação Furo:		Azimute: 270 Resp. Furação: Willemita															
Inclinação:		60 Resp. Descrição:															
Profundidade Final:		207,8 Diâmetro: NQ															
De	Para	Intervalo	Rocha	Recuperação Total		RQD		Espaçamento (m)	Grau alteração	Numero_Fraturas fraturamen (m)	Grau fraturamen	Num.Familia	Tipo	Descontinuidades			Observações
				Comprimento Manobra	(m)	(%)	(%)							Profund. (m)	JRC	JCS	
0	0.55	SO MARROM	0.55	0.55	100.0	0.0	#DIV/0!	A5		F1							0,00 A 5,15 HQ
										F1							
										F1							
0.55	11.55	AR ROSA	11.00	9.95	90.5	8.35	0.24	A2	42.0	F5	3.0	BP	38	1.90	5	Manganês	11.5
										F1		FR	4	0.71	8		11.55
										F1							
11.55	22.00	AR VERMELHO	10.45	9.70	92.8	8.20	0.15	A2	65.00	F5	4.00	BP	57	11.64	6	Manganês	22
										F1		FR	8	11.75	8		20.45
										F1							
22.00	31.55	CM BEGE	9.55	9.45	99.0	9.23	0.27	A1	35.00	F5	3.00	BP	23	22.07	4		31.4
										F1		FR	12	24.08	5		24.08
										F1							
31.55	38.85	RT MARROM	7.30	7.20	98.6	6.55	0.24	A1	30.0	F5	3.0	BP	26	31.80	4		38.75
										F1		FR	4	31.62	8		38.45
										F1							
38.85	43.10	CM MARROM	4.25	4.25	100.0	4.25	0.33	A1	13.0	F4	3.0	BP	5	38.90	5		43.09
										F1		FR	8	39.35	8		41.98
										F1							
										F1							

Fonte - Autoria própria

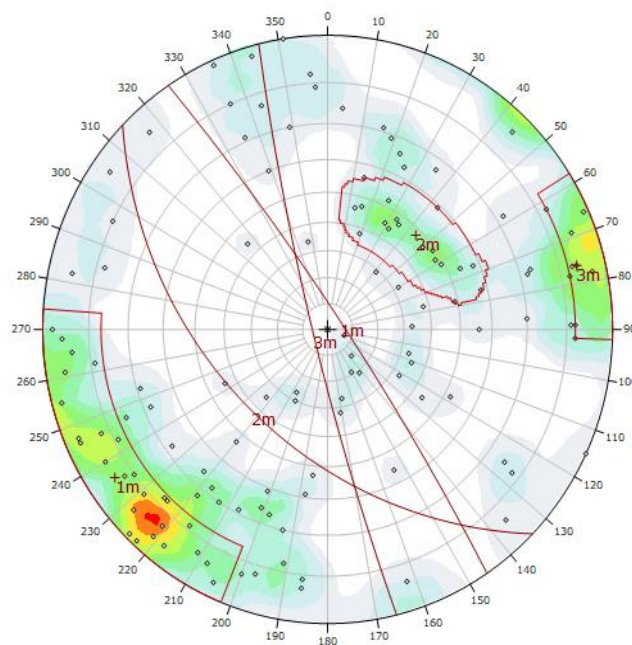
3.4.2 Orientação das discontinuidades

Um aspecto muito importante na hora de avaliar os parâmetros geotécnicos, é se conhecer a geologia estrutural da região, pois, teoricamente, as estruturas provenientes da movimentação das placas tectônicas e outros eventos são responsáveis pela variação destes parâmetros geomecânicos.

Regiões onde a concentração de falhas e fraturas é maior, tendem a criar um maciço de pior qualidade, ou seja, com uma resistência menor quando comparado a um maciço intacto. Desta forma os dados das estruturas obtidas durante a fase de descrição geomecânica foram importados no programa *Dips*® para se avaliar os estereogramas e marcar as famílias de discontinuidades.

A análise das fraturas se deram pela importação do azimute e mergulho no programa e como pode ser visto pela Figura 14, há três famílias de fraturas principais, sendo elas: Família 1 (Azimute 56° e mergulho 84°), Família 2 (Azimute 224° e mergulho 48°) e Família 3 (Azimute 256° e mergulho 84°).

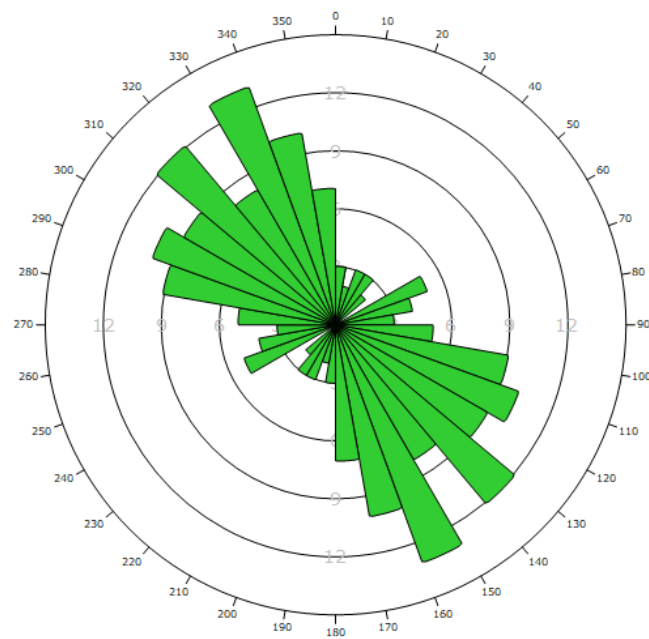
Figura 14 - Estereograma das fraturas presentes no maciço rochoso



Fonte - Autoria própria

O gráfico de roseta permite avaliar o *strike* aparente das fraturas, conforme a Figura 15 a seguir. É possível observar uma forte tendência na direção SE-140°.

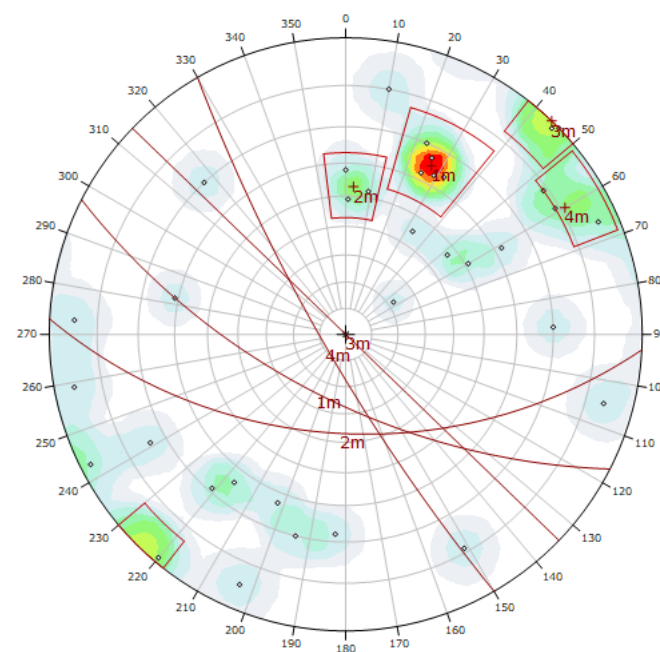
Figura 15 - Gráfico roseta das fraturas presentes no maciço



Fonte - Autoria própria

A análise das falhas se deram pela importação do azimute e mergulho no programa e como pode ser visto pela Figura 16, há quatro famílias de falhas principais, sendo elas: Família 1 (Azimute 207° e mergulho 65°), Família 2 (Azimute 183° e mergulho 53°), Família 3 (Azimute 224° e mergulho 90°) e Família 4 (Azimute 240° e mergulho 81°).

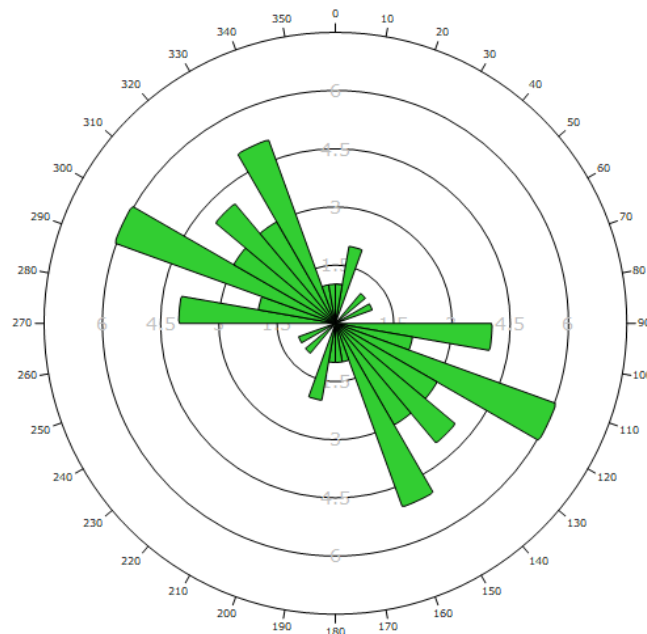
Figura 16 - Estereograma da falhas presentes no maciço rochoso



Fonte - Autoria própria

O gráfico de roseta das falhas, conforme a Figura 17 a seguir, mostra as descontinuidades com um *strike* aparente na direção SE-130°.

Figura 17 - Gráfico roseta das falhas presentes no maciço



Fonte - Autoria própria

Estes resultados permitem avaliar, posteriormente, se a geologia estrutural do maciço é limitante para o comportamento direcional das variáveis geomecânicas. Com o fim desta etapa se deu início a construção do banco de dados e digitalização do mesmo para análise exploratória e modelagem tridimensional dos modelos.

Capítulo 4

4 BANCO DE DADOS

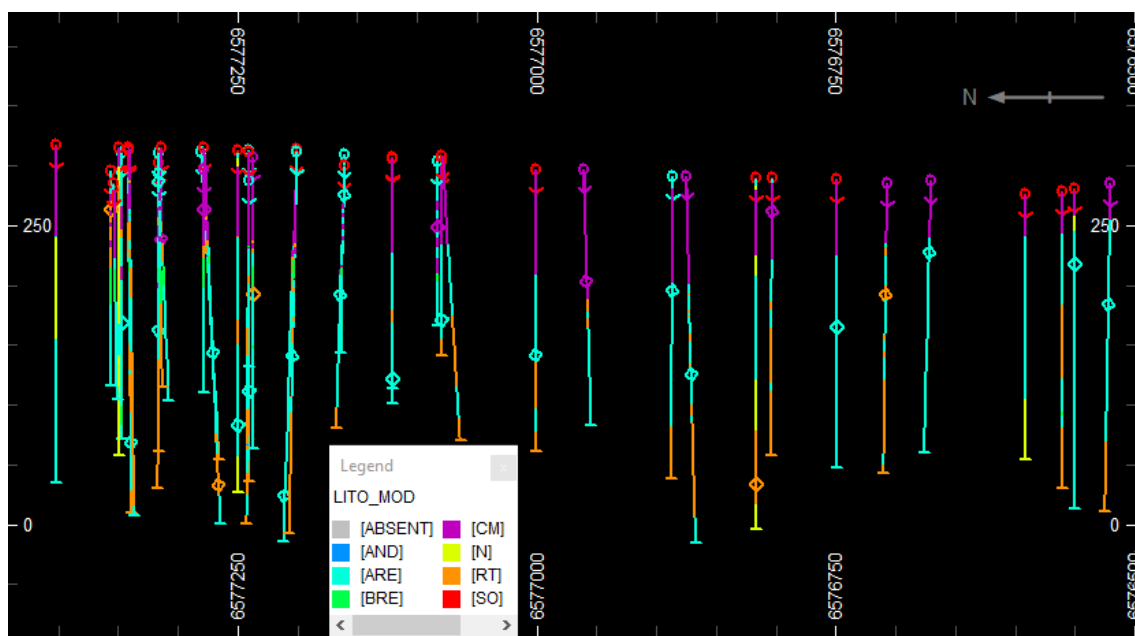
4.1 AVALIAÇÃO E CONSTRUÇÃO DO BANCO DE DADOS

Todas as informações obtidas durante as descrições geomecânica estavam em planilhas *Excel*® e para utilizar estes dados no programa *Datamine Studio3*® foi necessário manipular as planilhas para gerar os arquivos de entrada do programa, sendo eles:

1. Collar: Arquivo que contém as informações de boca de furo;
2. Survey: Arquivo com as informações de azimute e mergulho dos furos;
3. Lito: Arquivo com as informações de litologia;
4. Geomec: Arquivo contendo as informações adquiridas durante as descrições.

Com estes quatro arquivos é possível gerar os furos de sondagem em forma digitalizada. A legenda aplicada é referente as 5 litologias presentes no maciço rochoso e pode ser visualizada pela Figura 18 a seguir.

Figura 18 - Furos de sondagem digitalizados com legenda referente as litologias presentes no maciço



Fonte - Autoria própria

4.2 MODELAGEM GEOLÓGICA

A modelagem geológica foi realizada a fim de se gerar os envoltórios referentes as litologias e assim possibilitar a criação dos modelos de blocos para posterior estimativa dos parâmetros. Uma análise foi feita para avaliar a possibilidade de unir diferentes litologias, visto que algumas se encontravam muito dispersas e intercaladas com outras litologias.

Uma estatística básica foi aplicada em cada litologia e se comparou as médias e as variâncias de cada parâmetro, conforme a Tabela 7.

Tabela 7 - Sumário estatístico das variáveis geomecânicas

Espaçamento (m)	Média (m)	Variância
Arenito Inf	2.18	76
Arenito Sup	0.746	2.5
Brecha	0.68	0.68
Conglomerado	1.343	18.3
Ritmito	0.686	2.2

RQD (%)	Média (%)	Variância
Arenito Inf	89.6	250.8
Arenito Sup	71	682.9
Brecha	89.4	293.9
Conglomerado	82.7	480.9
Ritmito	85.8	378.9

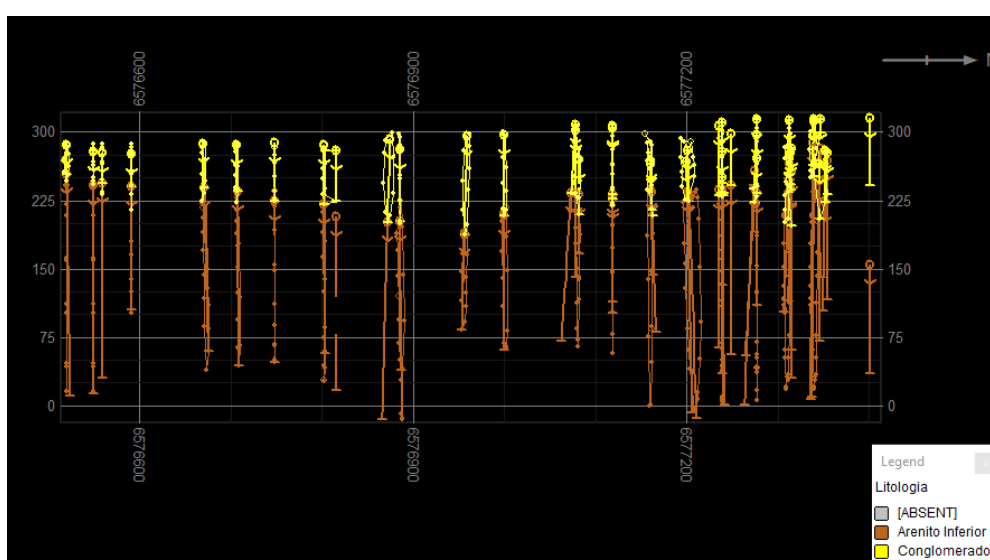
Rugosidade	Média	Variância
Arenito Inf	6.87	3.1
Arenito Sup	6.48	2.2
Brecha	7.8	2.7
Conglomerado	6.7	1.97
Ritmito	6.8	2.12

UCS (Mpa)	Média (Mpa)	Variância
Arenito Inf	26.8	41.5
Arenito Sup	18.9	22.9
Brecha	24.2	54.6
Conglomerado	22.8	42.8
Ritmito	26.8	63.9

Fonte - Autoria Própria

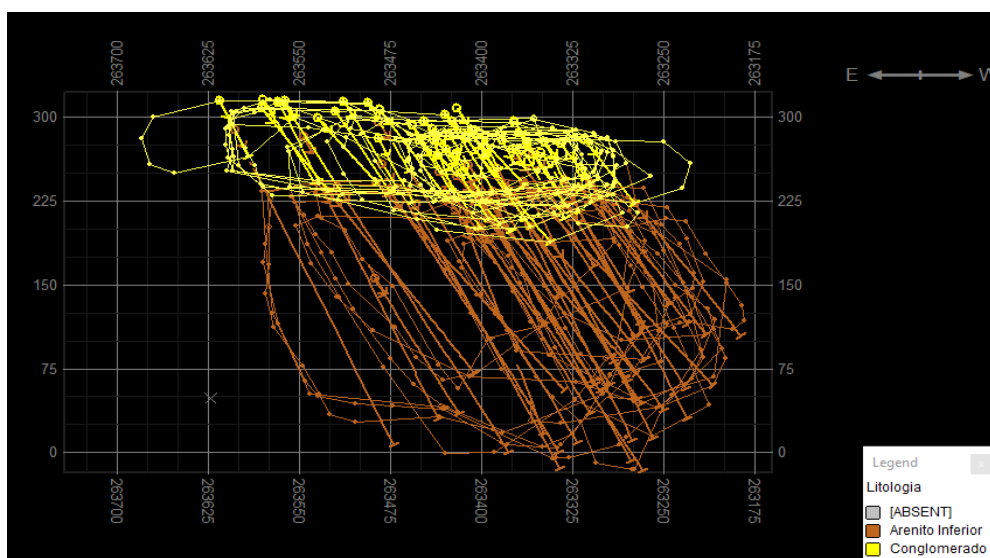
Os parâmetros de resistência a compressão simples e índice de qualidade de rochas, além da análise visual dos furos, foram levados em consideração para o agrupamento das litologias. As brechas e os ritmitos foram agrupados ao arenito inferior, além disso, o arenito superior não foi avaliado neste trabalho pois não apresentou amostras suficientes para uma gerar uma boa estimativa. Desta forma, a modelagem geológica se deu em duas litologias principais: conglomerado e arenito inferior. A metodologia das seções paralelas foi utilizada para a criação dos modelos geológicos, como mostra a Figura 19, Figura 20 e Figura 21.

Figura 19 - Seções para a criação dos modelos geológicos (Vista Frontal)



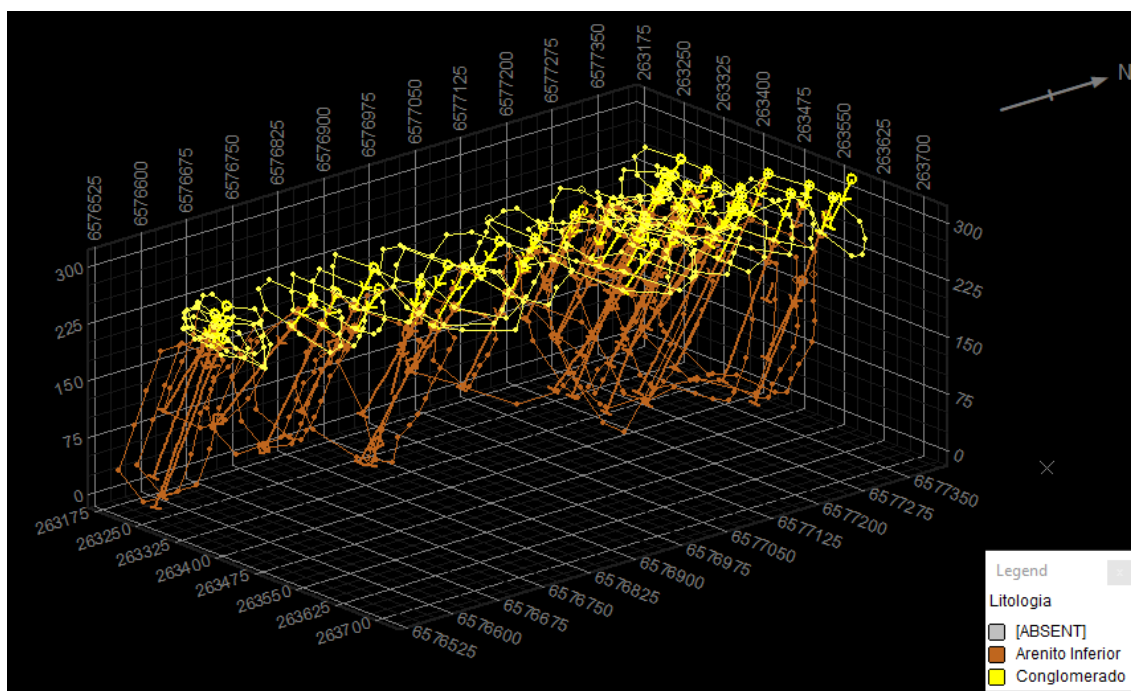
Fonte - Autoria própria

Figura 20 - Seções para a criação dos modelos geológicos (Vista Lateral)



Fonte - Autoria Própria

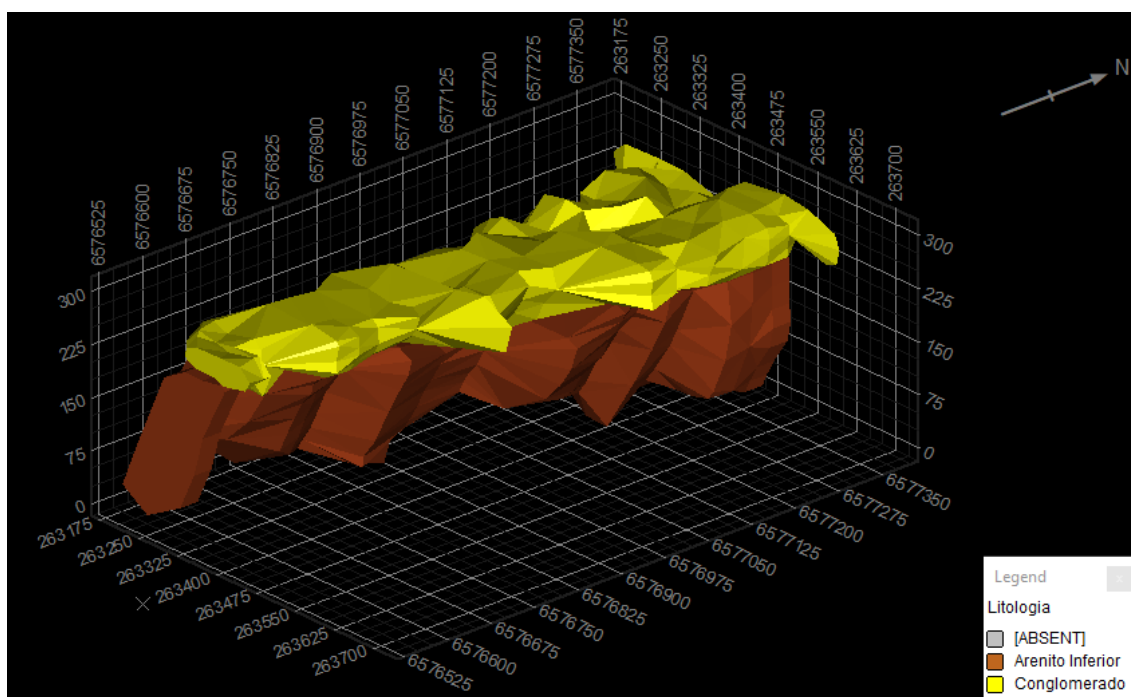
Figura 21 - Seções para a criação dos modelos geológicos (Vista Frontal)



Fonte - Autoria Própria

Após a criação das seções, foi feita a ligação delas para a criação dos sólidos que representam as litologias a serem analisadas ao longo do estudo, como mostra a Figura 22.

Figura 22 - Sólidos representativo das litologias



Fonte - Autoria própria

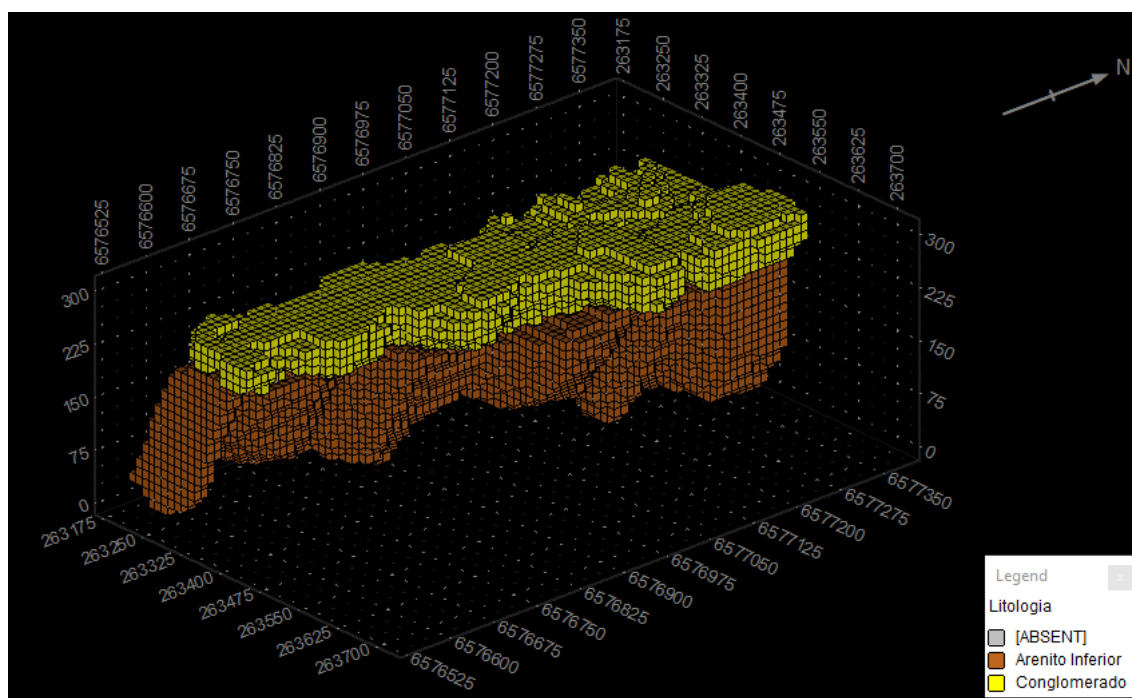
4.3 MODELO DE BLOCOS

A escolha da dimensão do bloco geralmente se baseia no espaçamento entre as amostras, e se escolhe um tamanho que varie entre $\frac{1}{2}$ e $\frac{1}{4}$ do espaçamento amostral. No caso deste estudo de caso, não havia um espaçamento regular definido, mostrando bastante irregularidade.

O tamanho do bloco foi decidido então baseado na região onde a amostragem apresentou um maior adensamento, provavelmente devido a necessidade de averiguar os teores encontrados durante fase de pesquisa mineral. Nesta região o espaçamento médio amostral é de 50 metros e por estes motivos, o tamanho do bloco escolhido foi de 12.5x12.5x12.5.

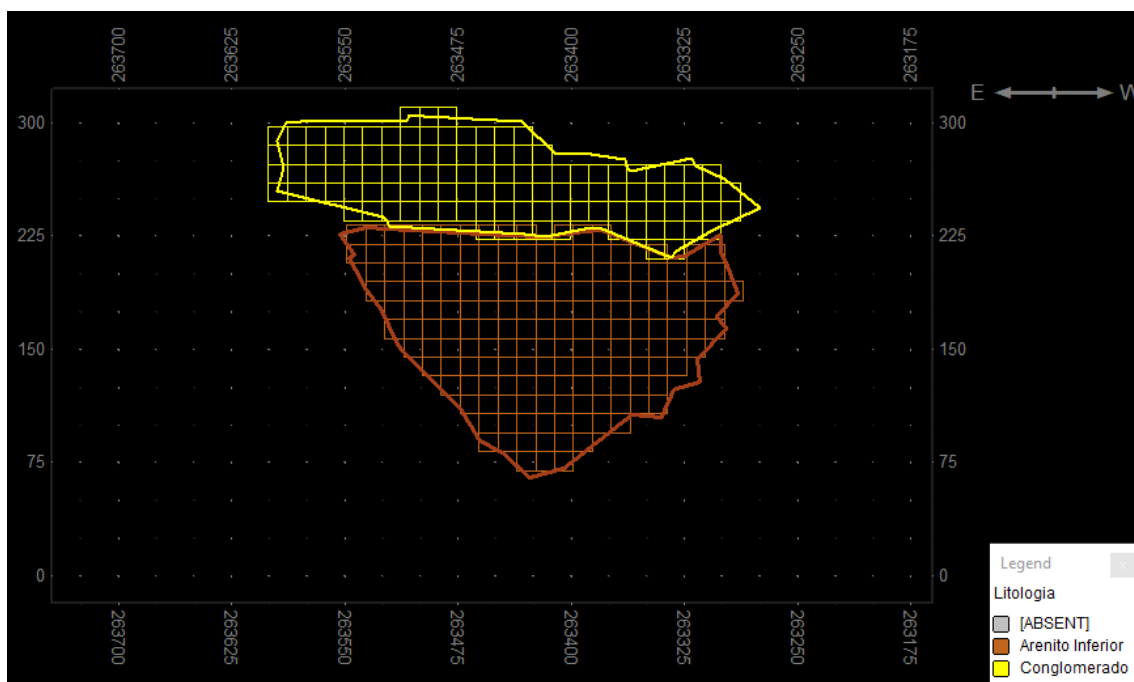
A Figura 23 mostra os modelos gerados para as duas litologias e a Figura 24 mostra a aderência dos blocos aos sólidos gerados.

Figura 23 - Modelo de blocos para as duas litologias principais



Fonte - Autoria própria

Figura 24 - Aderência entre modelo geológico x modelo de blocos



Fonte - Autoria própria

A Tabela 8 apresenta os volumes finais dos sólidos e dos modelos de blocos criados durante a modelagem geológica, é aconselhado que a diferença percentual entre os volumes não ultrapasse 10%, valores maiores que este podem apresentar uma má dimensão dos blocos ou um sólido que não comporte as dimensões escolhidas.

Tabela 8 - Comparação entre os volumes dos sólidos e blocos

Litologia	Volume Sólidos (m³)	Volume Blocos (m³)	Diferença (%)
Arenito Inferior	25.728.516	24.204.762	5,92
Conglomerado	10.352.936	9.984.375	3,56

Fonte - Autoria própria

Capítulo 5

5 GEOESTATÍSTICA

Nesta etapa do trabalho, os dados foram avaliados para se obter informações sobre a continuidade espacial de cada variável geotécnica. Foram utilizados os programas SGeMs[®] e GSlib[®] para a geração dos histogramas, variogramas experimentais e modelos variográficos.

5.1 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS

A estatística descritiva tem por objetivo descrever os dados de uma determinada população ou amostra para realizar conclusões a seu respeito, apresentando os dados de uma variável de forma ordenada, com a intenção de descrever o seu comportamento.

Uma das formas mais comuns de se apresentar um conjunto de dados é através da tabela de frequências e do seu correspondente gráfico, o histograma. Uma tabela de frequências nos mostra o quão frequentes são os valores de um conjunto de dados dentro de determinados intervalos ou classes. A informação mostrada nesta tabela pode ser representada graficamente através de um histograma. É comum o uso de uma largura constante de intervalos para que a altura de cada coluna do histograma seja proporcional ao número de amostras dentro de cada classe (Isaaks e Srivastava, 1989).

5.1.1 Transformação dos dados numéricos para dados categóricos

O primeiro passo para a utilização da krigagem dos indicadores, foi a transformação do banco de dados em dados categóricos através de indicadores. As classes criadas para a definir os indicadores seguem a Figura 6. A Figura 25 mostra a função condicional utilizada no processo.

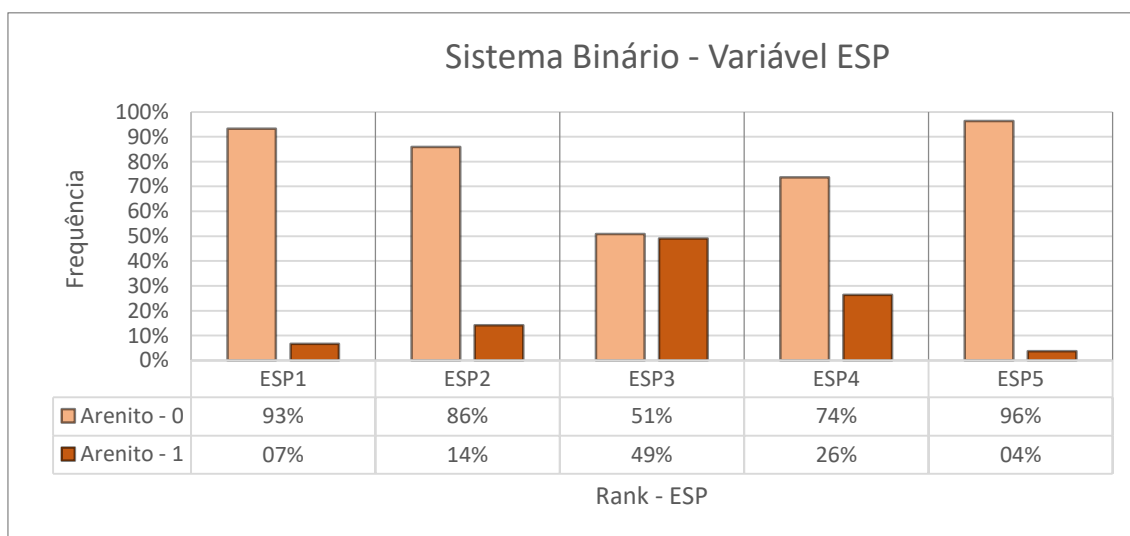
Com os indicadores definidos, foi possível utilizar do sistema binário para preparar o banco de dados para posterior utilização do mesmo na krigagem dos indicadores. Vale ressaltar que cada classe de indicador foi analisada separadamente, gerando assim variogramas e modelos variográficos diferentes para cada indicador. O resultado das transformações dos dados pode ser observado pelas Figura 26 a Figura 31.

Figura 25 - Função condicional para gerar um banco de dados categóricos

SE (RQD>90)	SE (UCS>250)
RQD_Rank=1	UCS_Rank=1
SE (RQD>75 AND RQD<=90)	SE (UCS>100 AND UCS<=250)
RQD_Rank=2	UCS_Rank=2
SE (RQD>50 AND RQD<=75)	SE (UCS>50 AND UCS<=100)
RQD_Rank=3	UCS_Rank=3
SE (RQD>25 AND RQD<=50)	SE (UCS>25 AND UCS<=50)
RQD_Rank=4	UCS_Rank=4
SE (RQD<=25)	SE (UCS>5 AND UCS<=25)
RQD_Rank=5	UCS_Rank=5
END	END
SE (ESP>2)	SE (RUGFR>16)
ESP_Rank=1	RUGFR_Rank=1
SE (ESP>0.6 AND ESP<=2)	SE (RUGFR>12 AND RUGFR<=16)
ESP_Rank=2	RUGFR_Rank=2
SE (ESP>0.2 AND ESP<=0.6)	SE (RUGFR>8 AND RUGFR<=12)
ESP_Rank=3	RUGFR_Rank=3
SE (ESP>0.06 AND ESP<=0.2)	SE (RUGFR>4 AND RUGFR<=8)
ESP_Rank=4	RUGFR_Rank=4
SE (ESP<=0.06)	SE (RUGFR>0 AND RUGFR<=4)
ESP_Rank=5	RUGFR_Rank=5
END	END

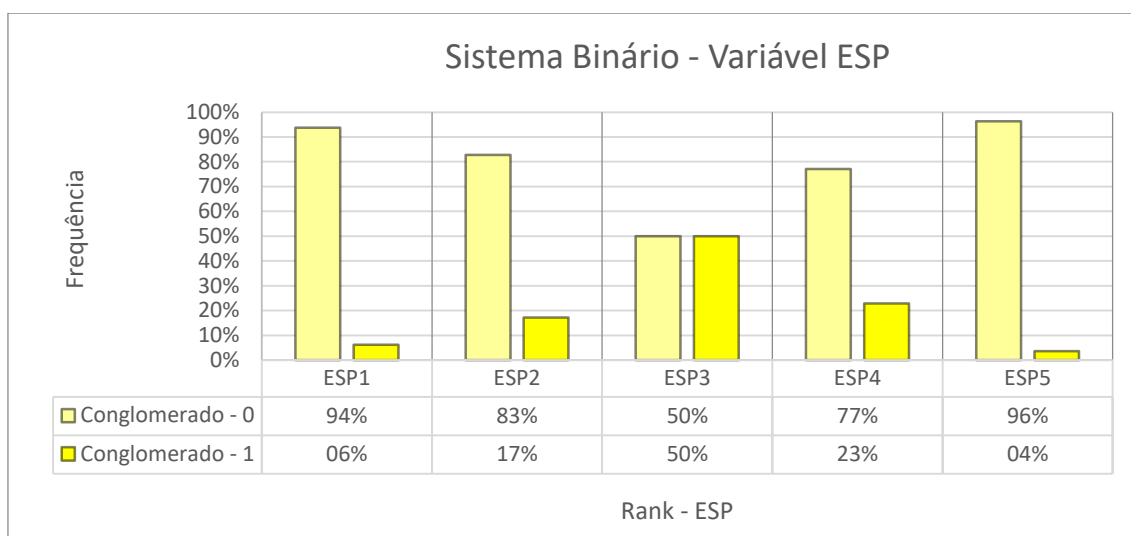
Fonte - Autoria Própria

Figura 26 - Histograma dos indicadores no arenito inferior - variável ESP



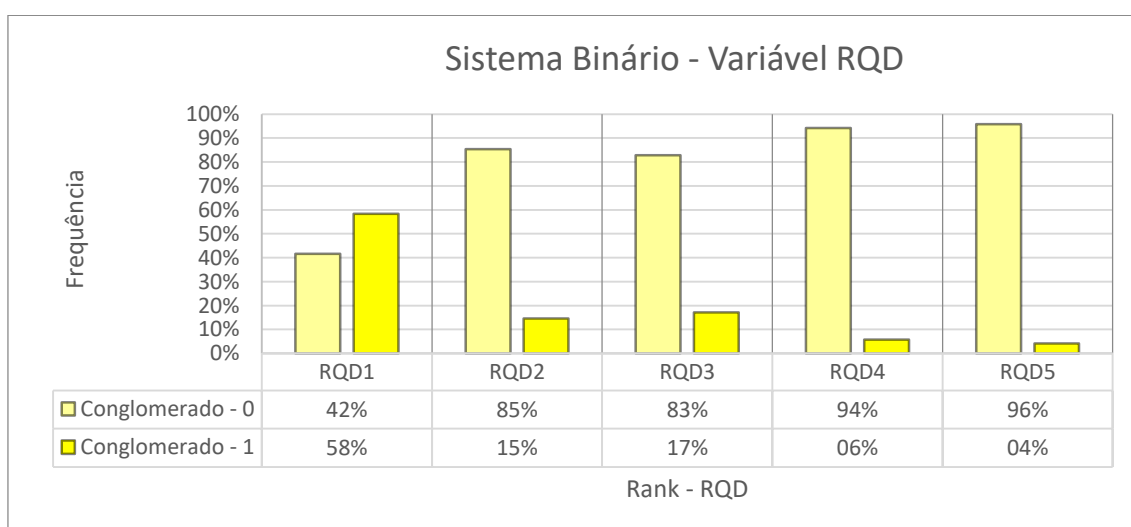
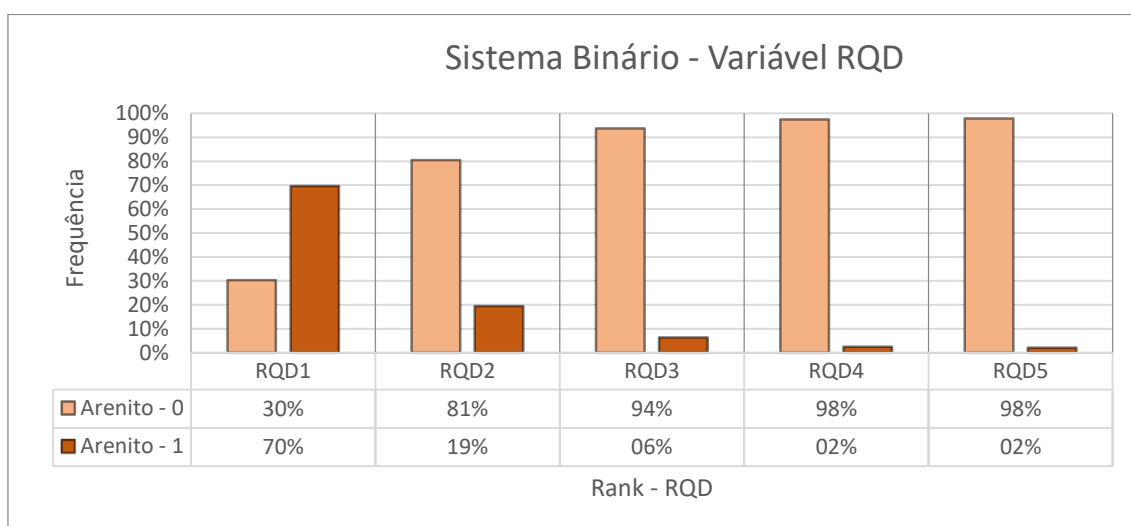
Fonte - Autoria Própria

Figura 27 - Histograma dos indicadores no conglomerado - variável ESP



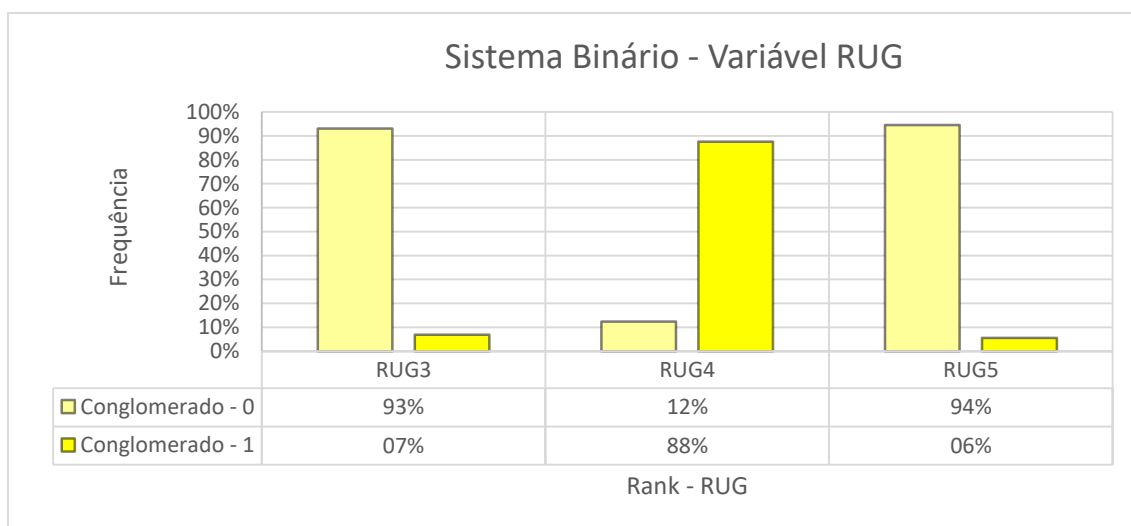
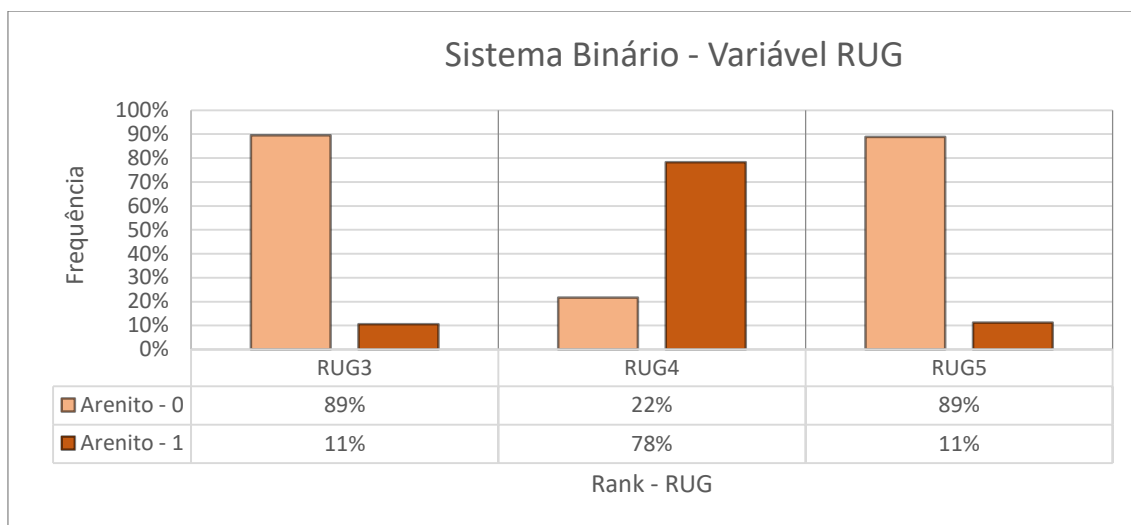
Fonte - Autoria Própria

Figura 28 - Histograma dos indicadores no arenito inferior e conglomerado - variável RQD



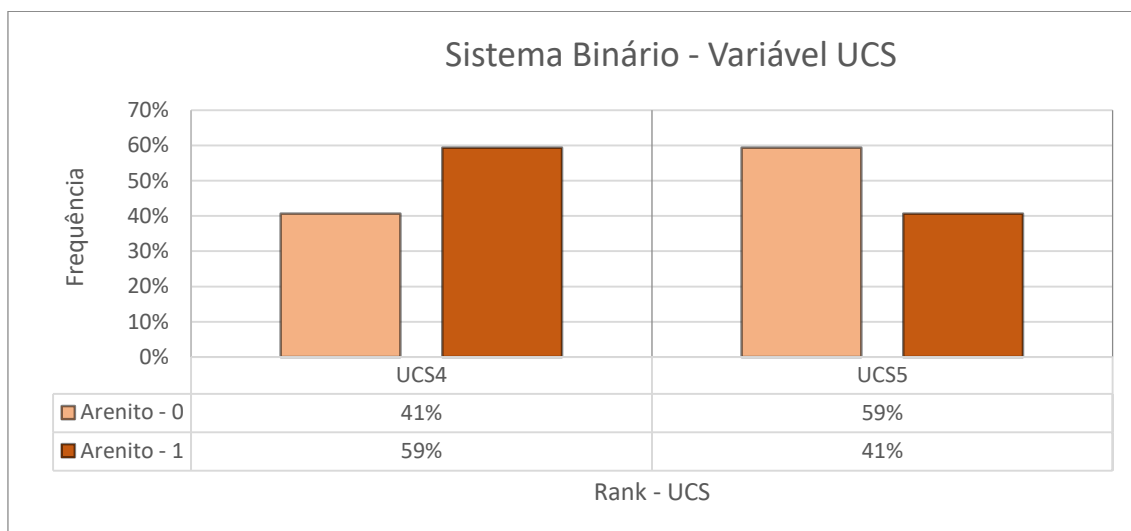
Fonte - Autoria Própria

Figura 29 - Histograma dos indicadores no arenito inferior e conglomerado - variável RUG



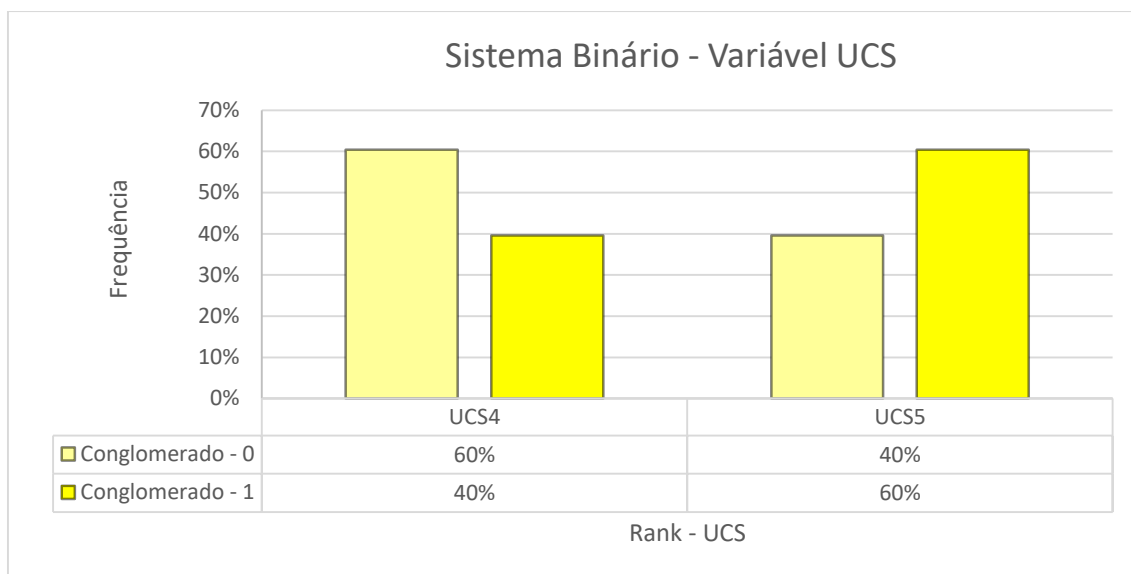
Fonte - Autoria Própria

Figura 30 - Histograma dos indicadores no arenito inferior - variável UCS



Fonte - Autoria Própria

Figura 31 - Histograma dos indicadores no conglomerado - variável UCS



Fonte - Autoria Própria

Finalizado a etapa de transformação dos dados, foi feita a importação do banco no software SGeMS® para a análise da continuidade espacial dos indicadores e a criação dos variogramas, juntos com seus respectivos modelos variográficos.

5.2 ANÁLISE DA CONTINUIDADE ESPACIAL

A análise da continuidade espacial tem por objetivo observar o comportamento do fenômeno ao longo da área de estudo. Devido à formação geológica dos depósitos minerais, é esperado que estes possuam alguma relação espacial de continuidade que os tenha formado.

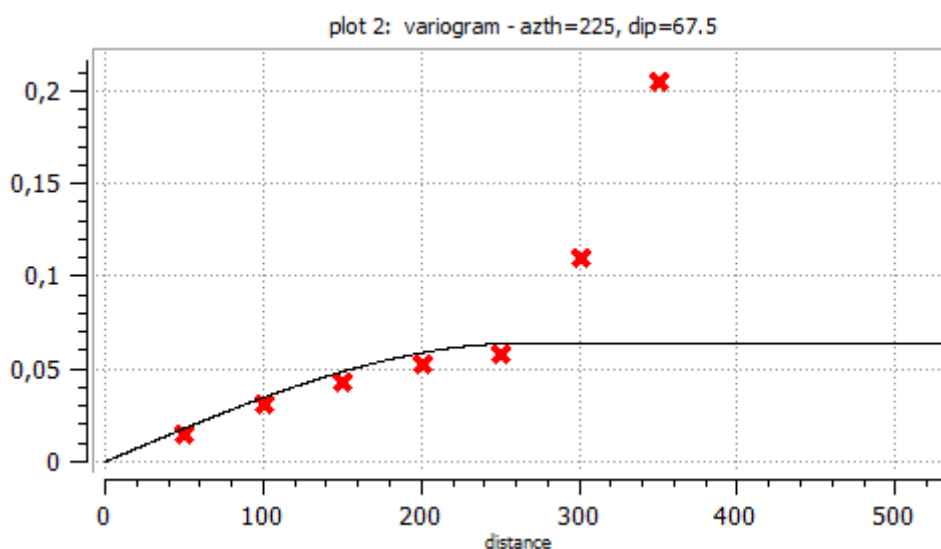
5.2.1 Variografia

Para a análise da continuidade espacial dos indicadores foi utilizado o variograma, considerando o banco de dados das litologias separadamente. Desta forma, obteve-se quarenta e nove variogramas experimentais e seus respectivos modelos variográficos. A busca se deu em oito azimutes principais (N0, N23, N45, N67, N90, N112, N135 e N157) para encontrar a maior direção aparente. A partir desta direção, foi realizada a varredura ao longo do mergulho para encontrar a maior direção verdadeira. Com o azimute e mergulho do eixo de maior direção, foi feita a varredura no plano perpendicular à maior direção para encontrar as direções de média e menor continuidade.

Quando a variável apresentou um comportamento isotrópico, ou seja, a magnitude do vetor distância permaneceu constante em todas as direções de busca e apresentou simetria na sua variabilidade, ela foi modelada a partir do semivariograma omnidirecional, onde a tolerância direcional é grande o suficiente para tornar a influência da direção muito pequena.

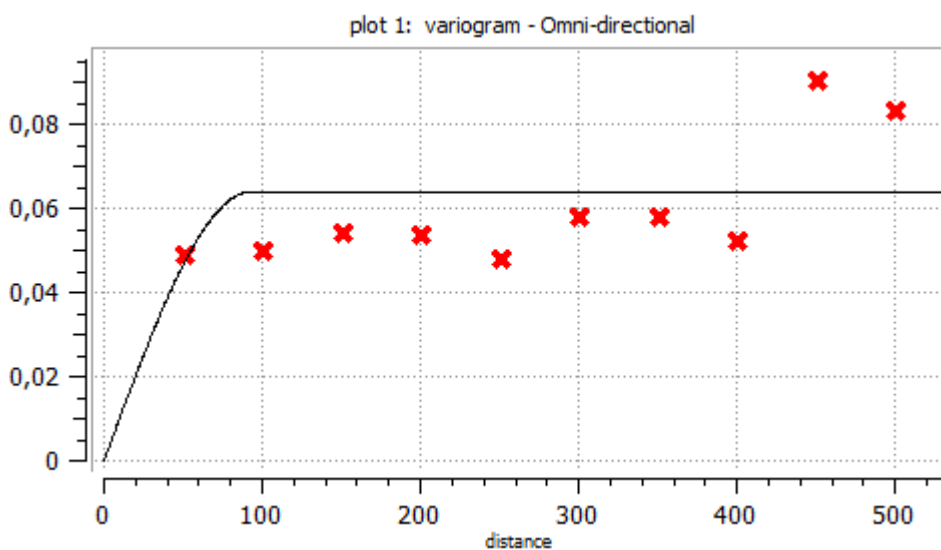
Os variogramas dos indicadores do ESP no arenito inferior podem ser observados nas Figura 32 a Figura 39. A Tabela 9, mostra o sumário com as direções e as estruturas presentes nos modelos variográficos para cada indicador.

Figura 32 - Variograma da maior direção do Indicador 1 da variável ESP no arenito inferior



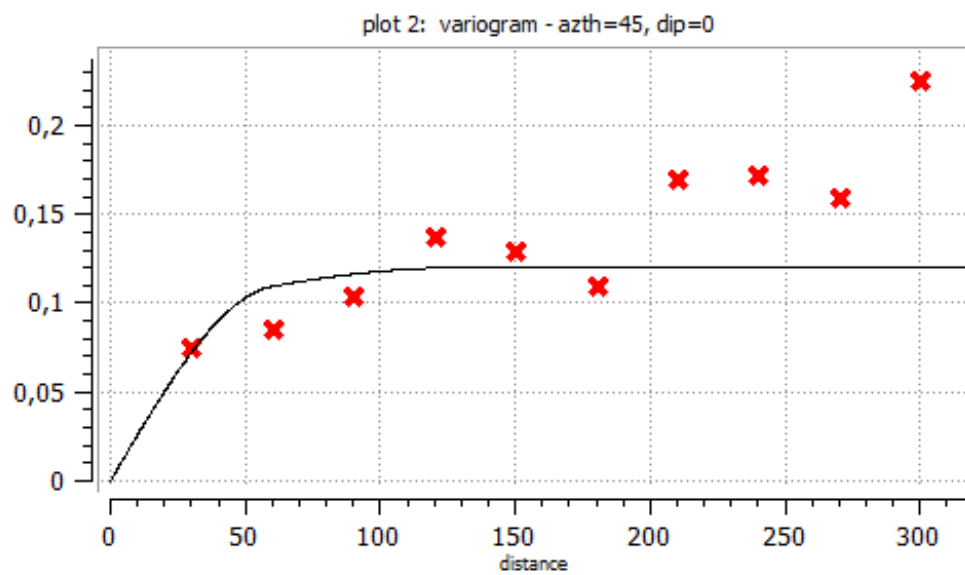
Fonte - Autoria Própria

Figura 33 - Variograma da menor e media direção do Indicador 1 da variável ESP no arenito inferior



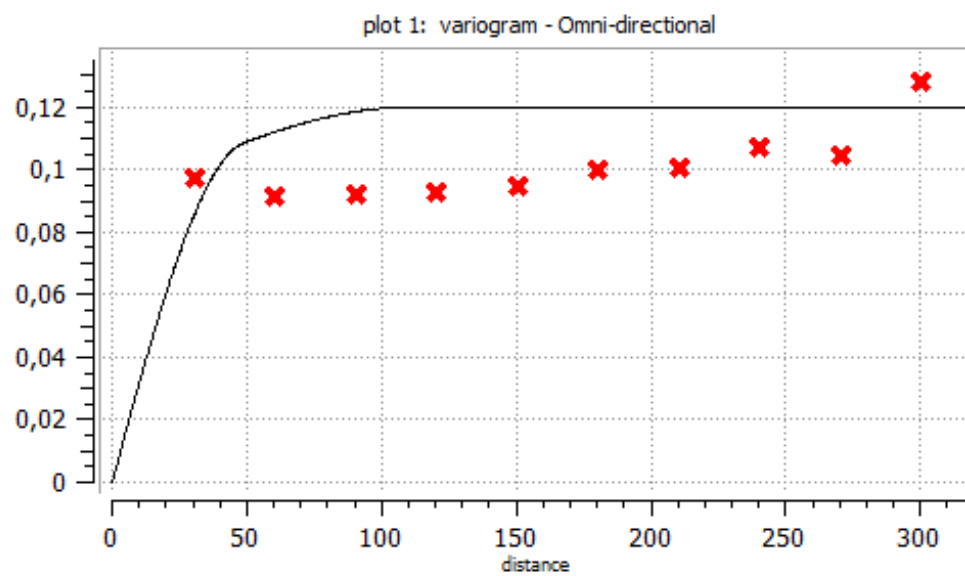
Fonte - Autoria Própria

Figura 34 - Variograma da maior direção do Indicador 2 da variável ESP no arenito inferior



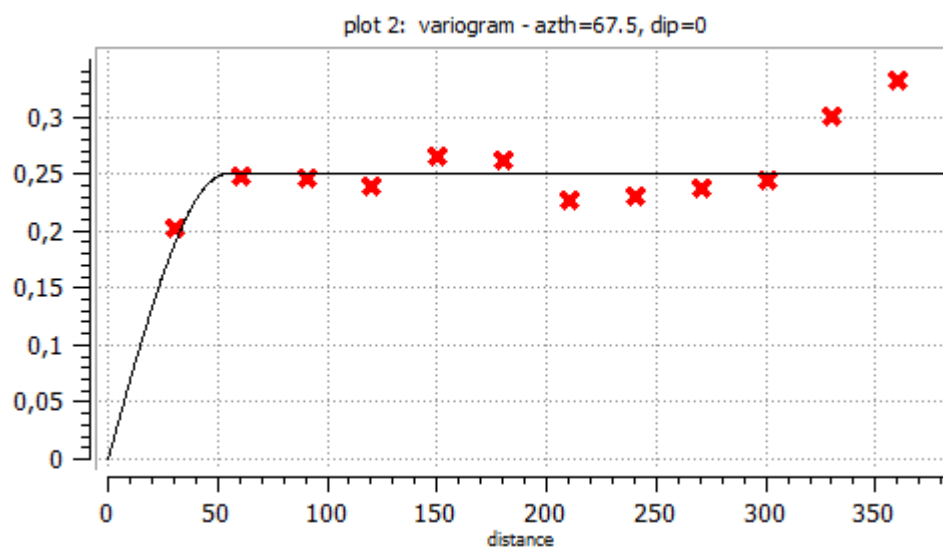
Fonte - Autoria Própria

Figura 35 - Variograma da menor e media direção do Indicador 2 da variável ESP no arenito inferior



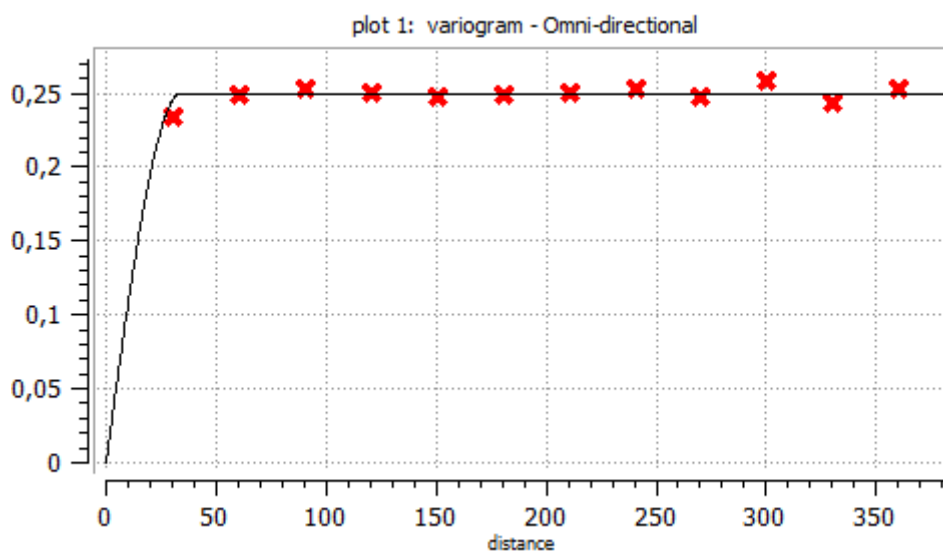
Fonte - Autoria Própria

Figura 36 - Variograma da maior direção do Indicador 3 da variável ESP no arenito inferior



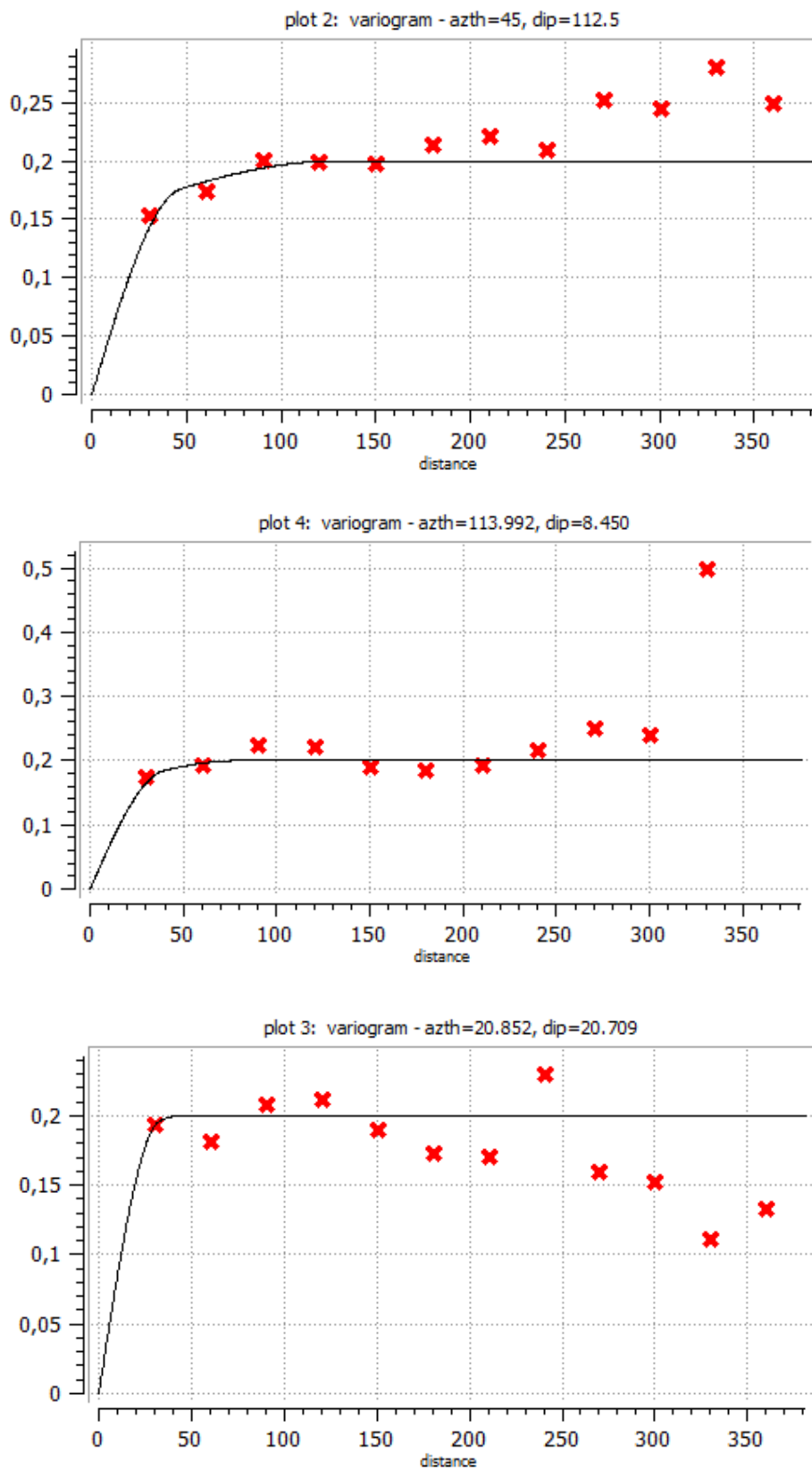
Fonte - Autoria Própria

Figura 37 - Variograma da menor e media direção do Indicador 3 da variável ESP no arenito inferior



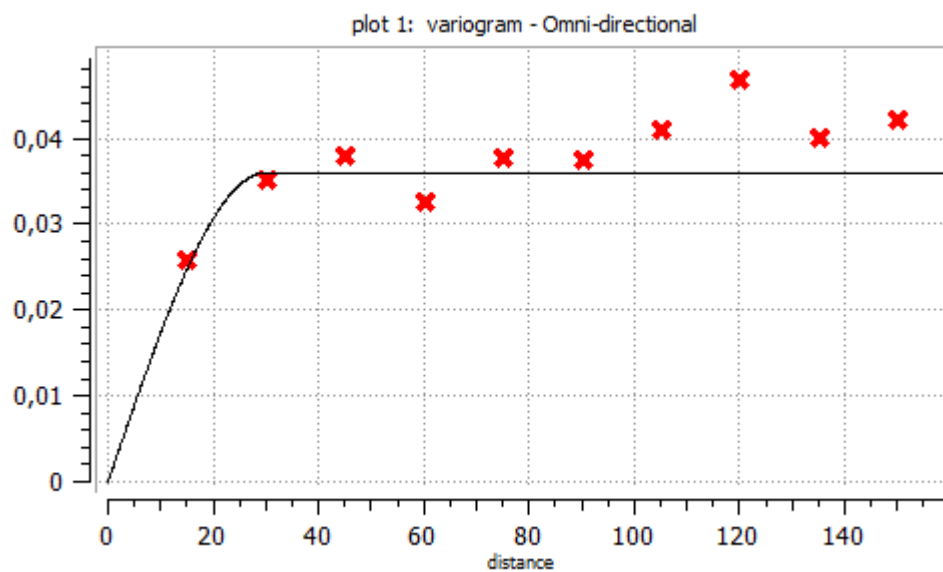
Fonte - Autoria Própria

Figura 38 - Variograma da maior, media e menor direção do Indicador 4 da variável ESP no arenito inferior



Fonte - Autoria Própria

Figura 39 - Variograma Omni-direcional do Indicador 5 da variável ESP no arenito inferior



Fonte - Autoria Própria

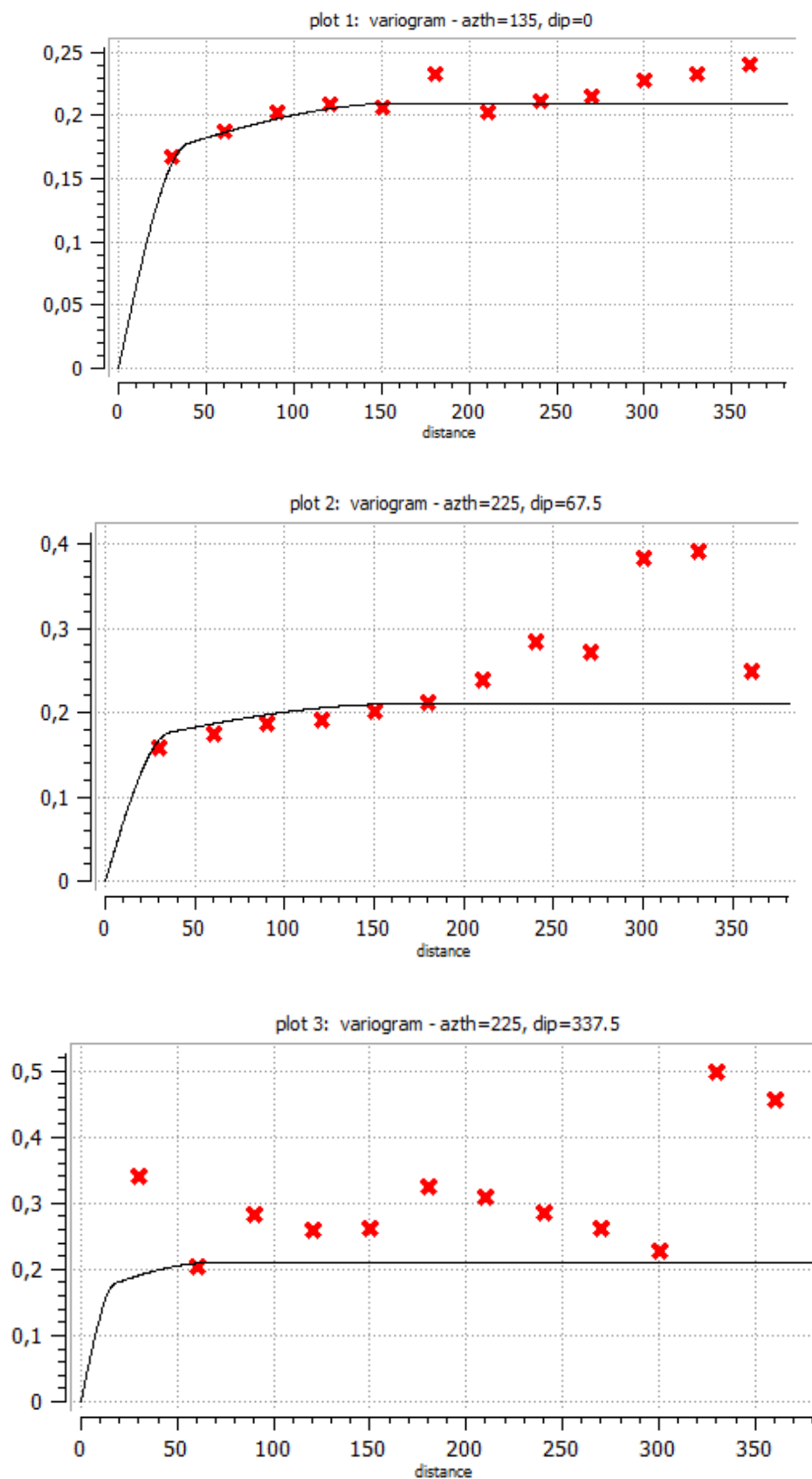
Tabela 9 - Modelo variográfico dos indicadores da variável ESP no arenito inferior

Espaçamento	Arenito Inferior							
	Indicador	Azimute (°)	Dip (°)	Rake (°)	Sill	Alcance 1 (m)	Alcance 2 (m)	Alcance 3 (m)
1	1	225	67,5	0	0,064	265	90	90
2	2	45	0	112,5	0,09	60	42	36
					0,03	130	100	60
3	3	67,5	0	157,5	0,25	55	30	30
4	4	45	112,5	157,5	0,15	50	40	30
					0,5	130	80	45
5	5	67,5	0	157,5	0,036	30	30	30

Fonte - Autoria Própria

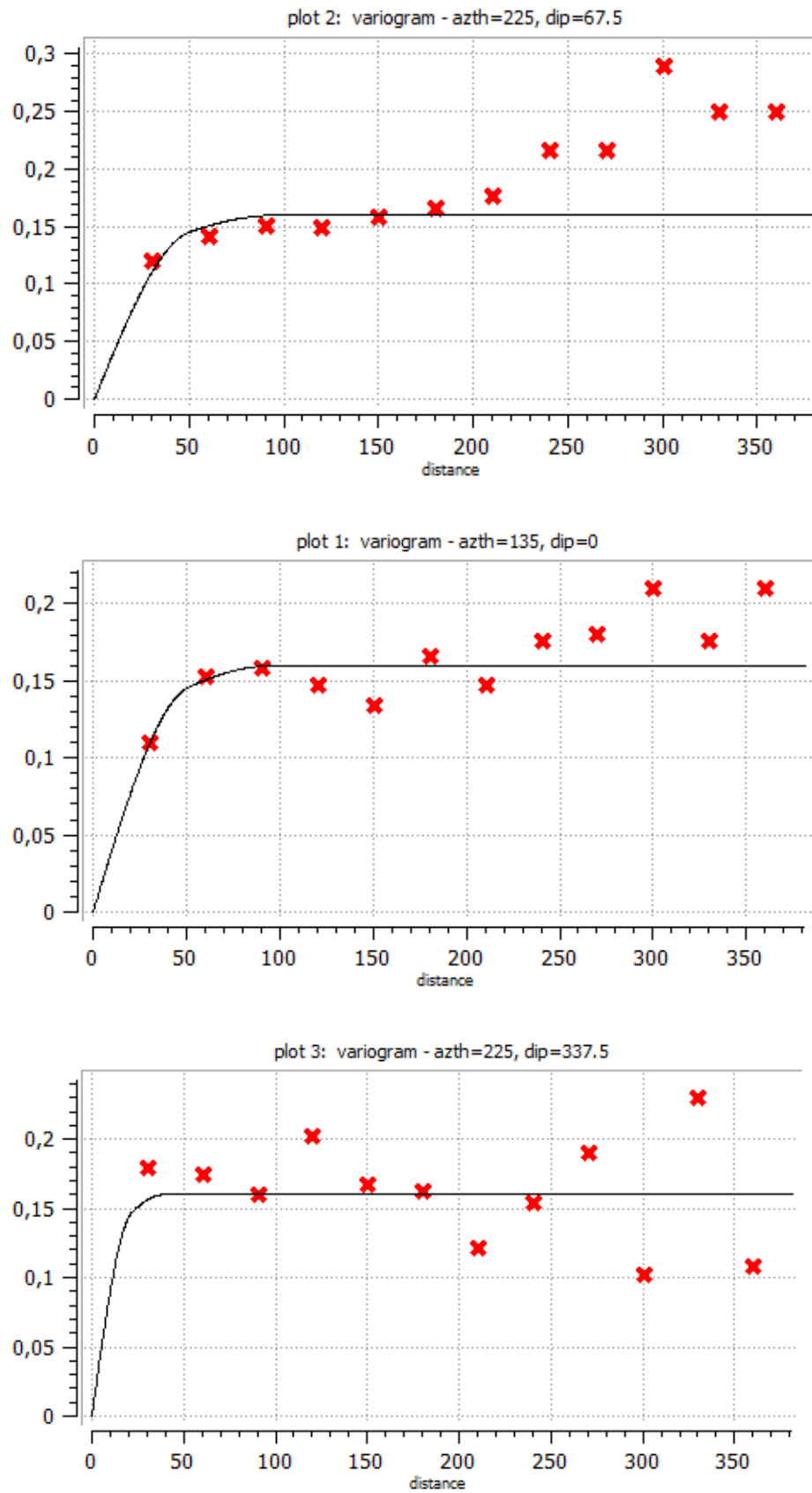
Os variogramas dos indicadores do RQD no arenito inferior podem ser observados nas Figura 40 a Figura 44 . A Tabela 10, mostra o sumário com as direções e as estruturas presentes nos modelo vario gráficos para cada indicador.

Figura 40 - Variograma da maior, media e menor direção do Indicador 1 da variável RQD no arenito inferior



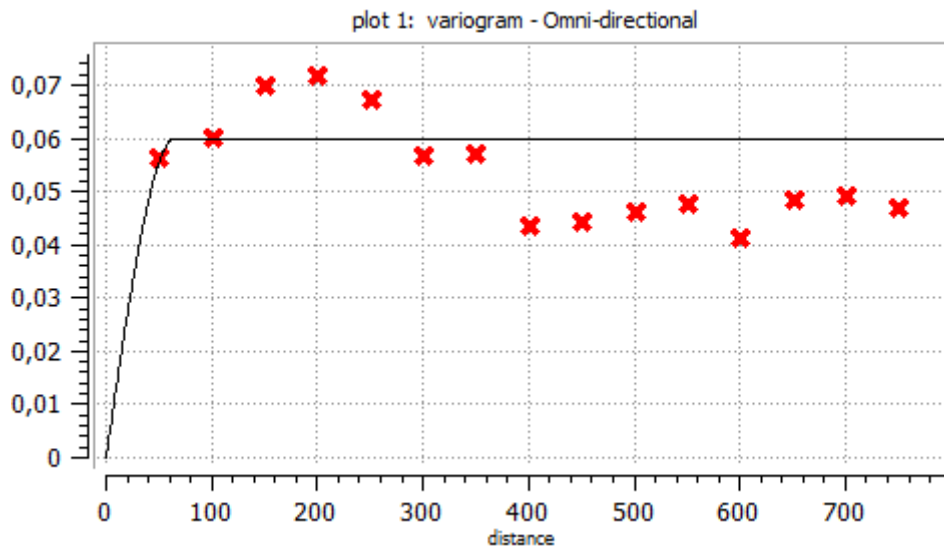
Fonte - Autoria Própria

Figura 41 - Variograma da maior, media e menor direção do Indicador 2 da variável RQD no arenito inferior



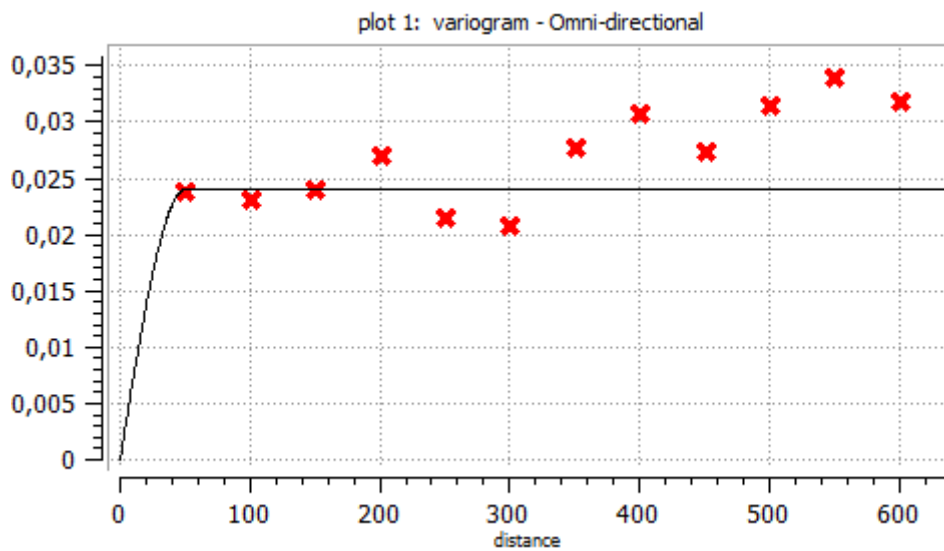
Fonte - Autoria Própria

Figura 42 - Variograma Omni-direcional do Indicador 3 da variável RQD no arenito inferior



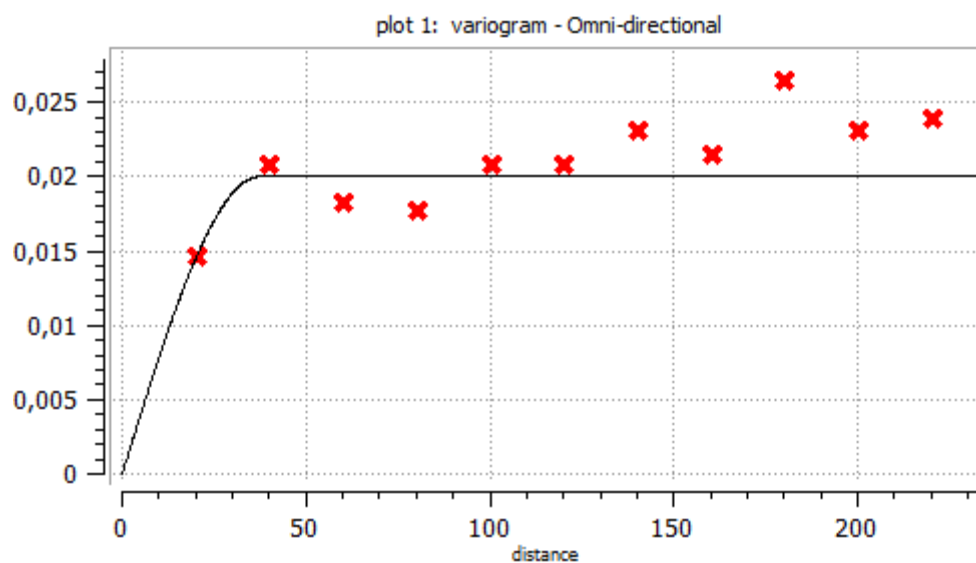
Fonte - Autoria Própria

Figura 43 - Variograma Omni-direcional do Indicador 4 da variável RQD no arenito inferior



Fonte - Autoria Própria

Figura 44 - Variograma Omni-direcional do Indicador 5 da variável RQD no arenito inferior



Fonte - Autoria Própria

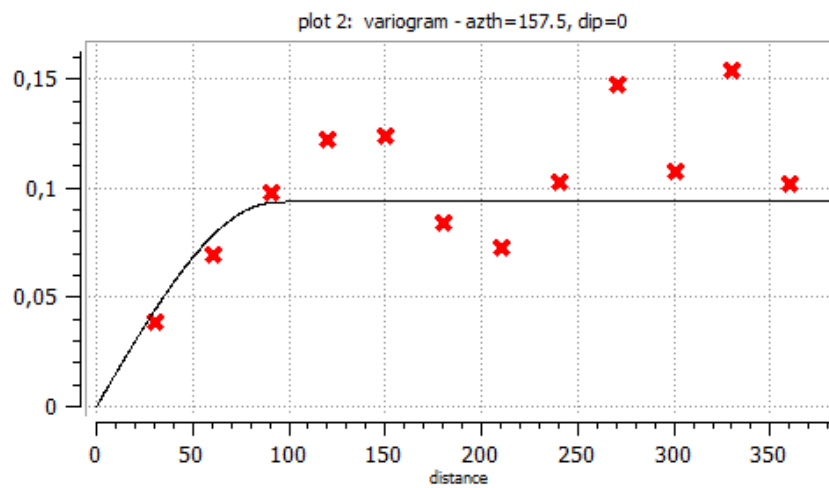
Tabela 10 - Modelo variográfico dos indicadores da variável RQD no arenito inferior

RQD	Arenito Inferior						
	Indicador	Azimute (°)	Dip (°)	Rake (°)	Sill	Alcance 1 (m)	Alcance 2 (m)
1	135	0	67,5	0,16	40	40	25
				0,06	165	165	70
2	135	0	67,5	0,11	51	51	25
				0,05	100	100	40
3	135	0	67,5	0,06	85	85	85
4	135	0	67,5	0,024	50	50	50
5	135	0	67,5	0,02	38	38	38

Fonte - Autoria Própria

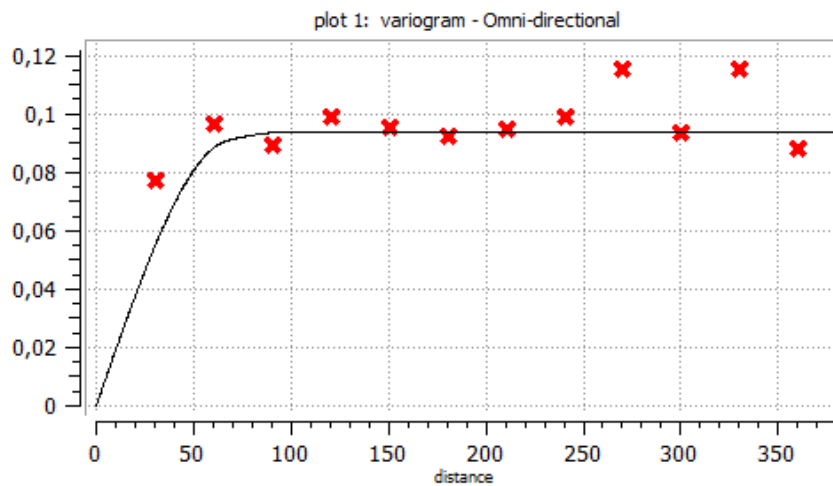
Os variogramas dos indicadores da RUG no arenito inferior podem ser observados nas Figura 45 a Figura 48. A Tabela 11 - *Modelo variográfico dos indicadores da variável RUG no arenito inferior* mostra o sumário com as direções e as estruturas presentes no modelos variográficos para cada indicador.

Figura 45 - Variograma da maior direção do Indicador 3 da variável RUG no arenito inferior



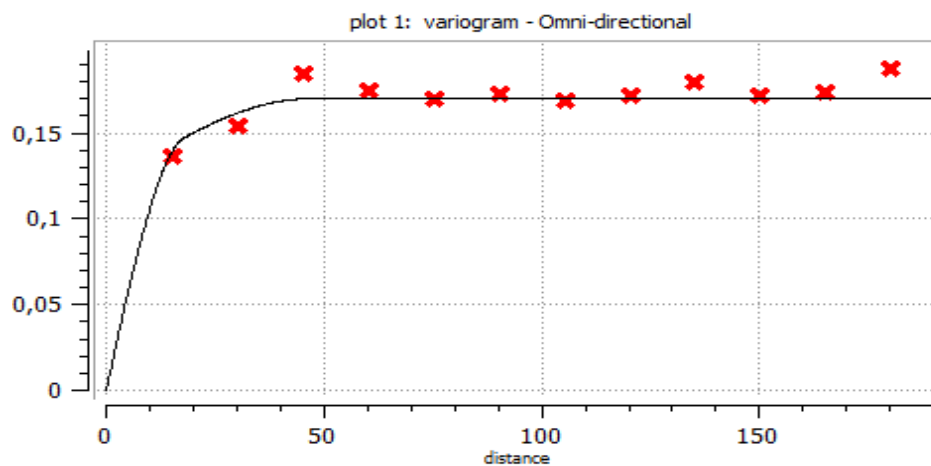
Fonte - Autoria Própria

Figura 46 - Variograma da menor e media direção do Indicador 3 da variável RUG no arenito inferior



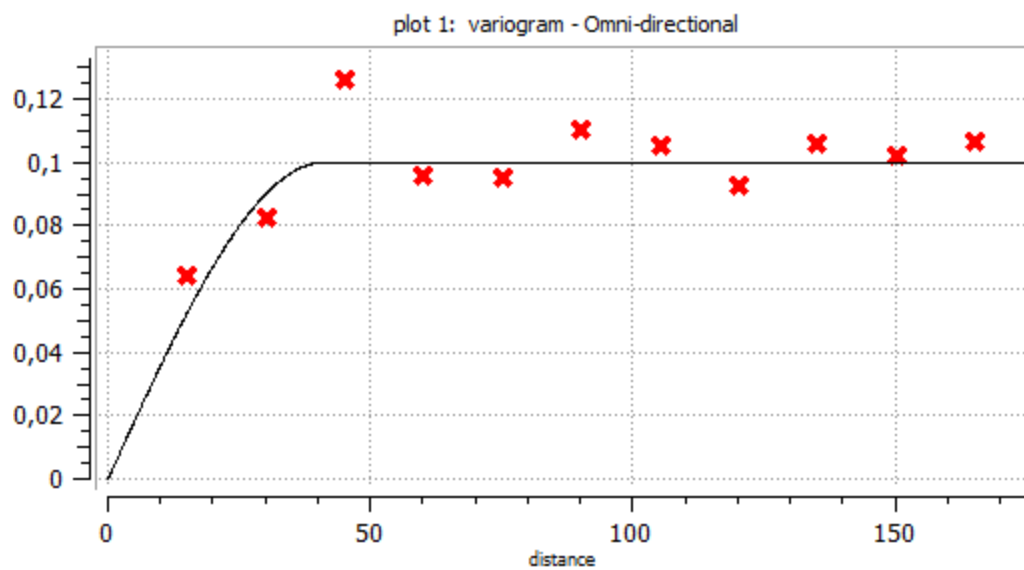
Fonte - Autoria Própria

Figura 47 - Variograma Omni-direcional do Indicador 4 da variável RUG no arenito inferior



Fonte - Autoria Própria

Figura 48 - Variograma Omni-direcional do Indicador 5 da variável RUG no arenito inferior



Fonte - Autoria Própria

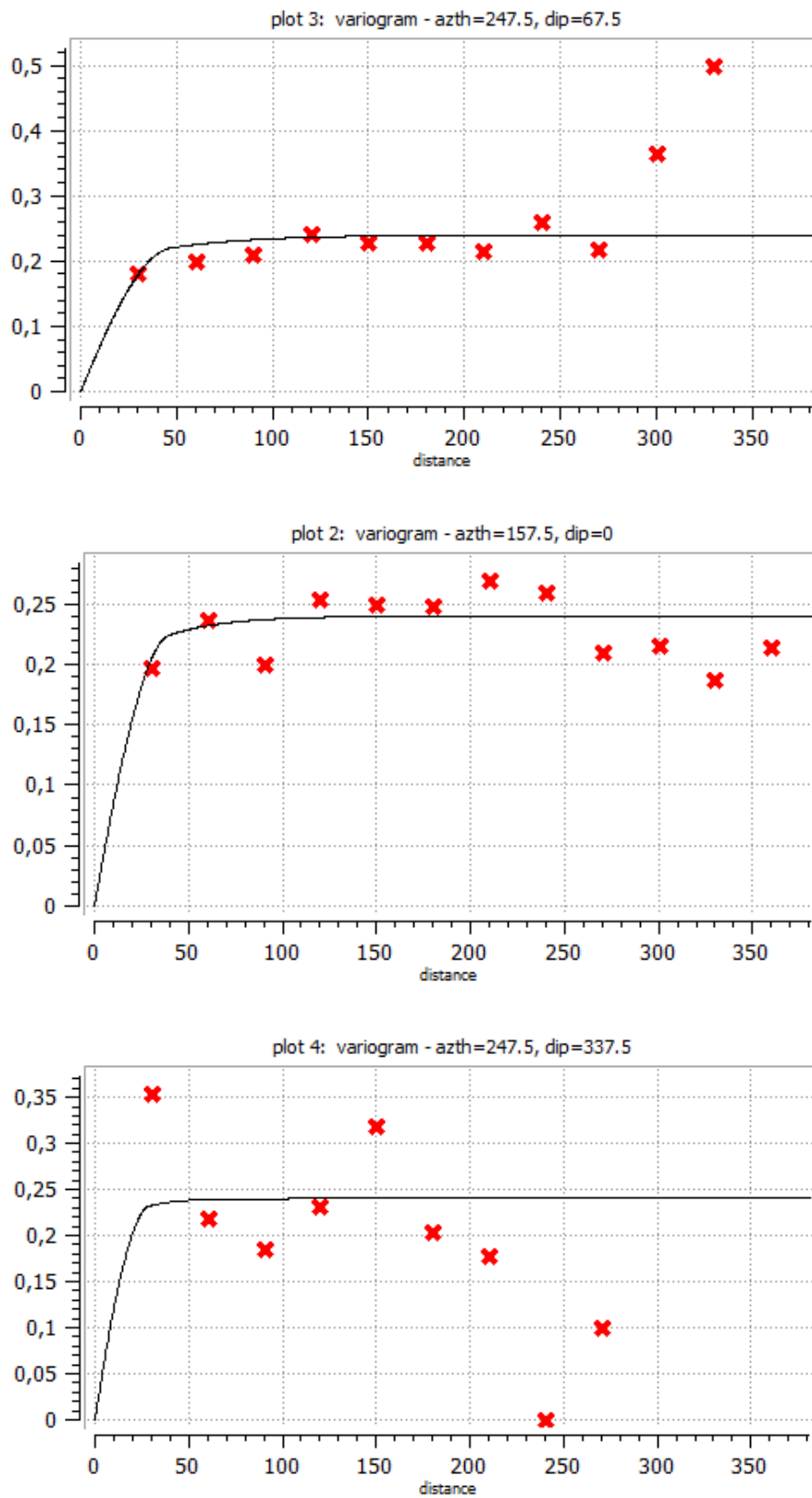
Tabela 11 - Modelo variográfico dos indicadores da variável RUG no arenito inferior

RUG	Arenito Inferior						
	Indicador	Azimute (°)	Dip (°)	Rake (°)	Sill	Alcance 1 (m)	Alcance 2 (m)
3	157,5	0	67,5	0,074	90	36	36
				0,02	115	80	80
4	157,5	0	67,5	0,12	18	18	18
				0,05	48	48	48
5	157,5	0	67,5	0,1	42	42	42

Fonte - Autoria Própria

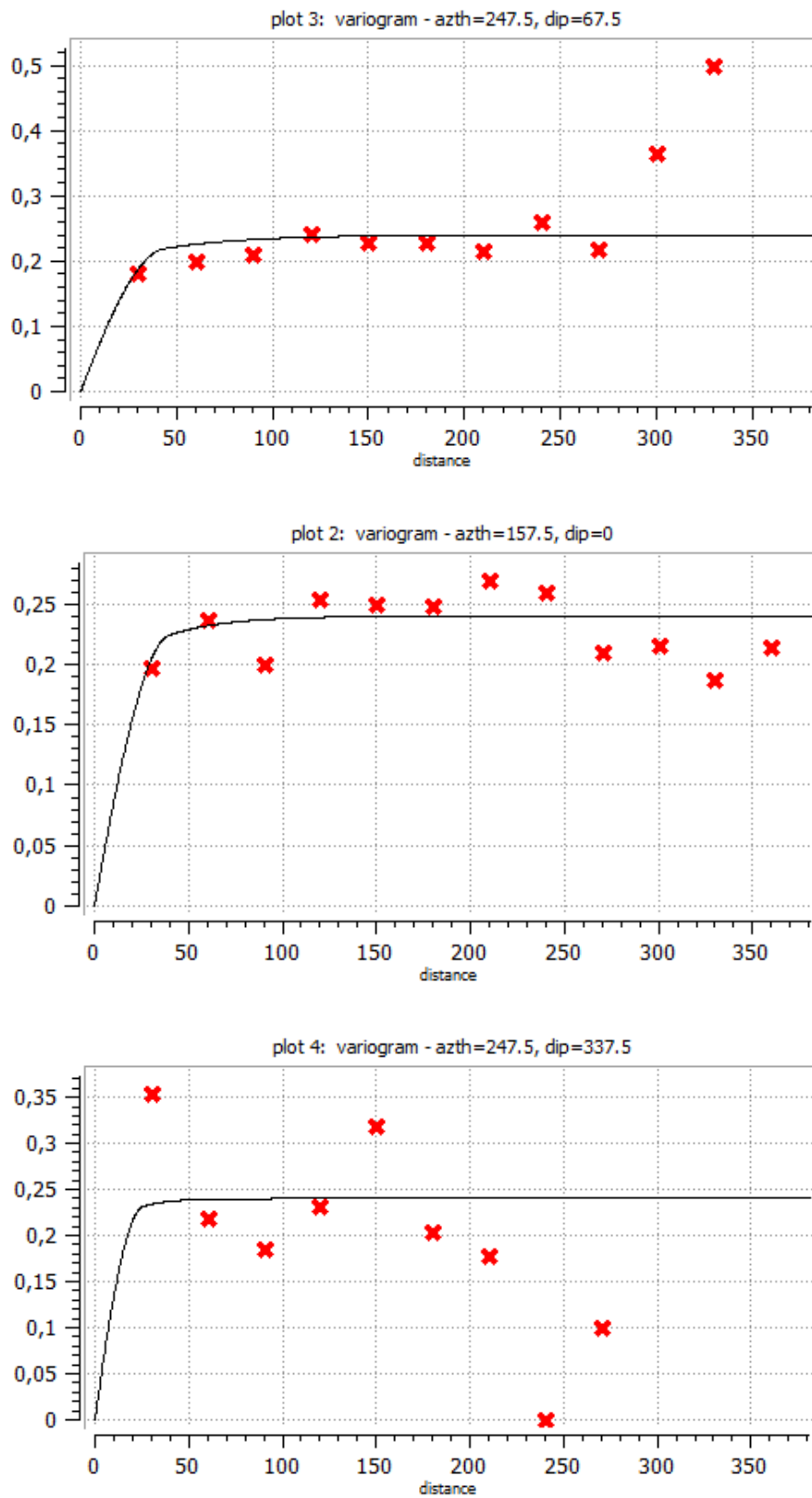
Os variogramas dos indicadores da UCS no arenito inferior podem ser observados nas Figura 49 e Figura 50. A Tabela 12 mostra o sumário com as direções e as estruturas presentes no modelo variográfico para cada indicador.

Figura 49 - Variograma da maior, media e menor direção do Indicador 4 da variável UCS no arenito inferior



Fonte - Autoria Própria

Figura 50 - Variograma da maior, media e menor direção do Indicador 5 da variável UCS no arenito inferior



Fonte - Autoria Própria

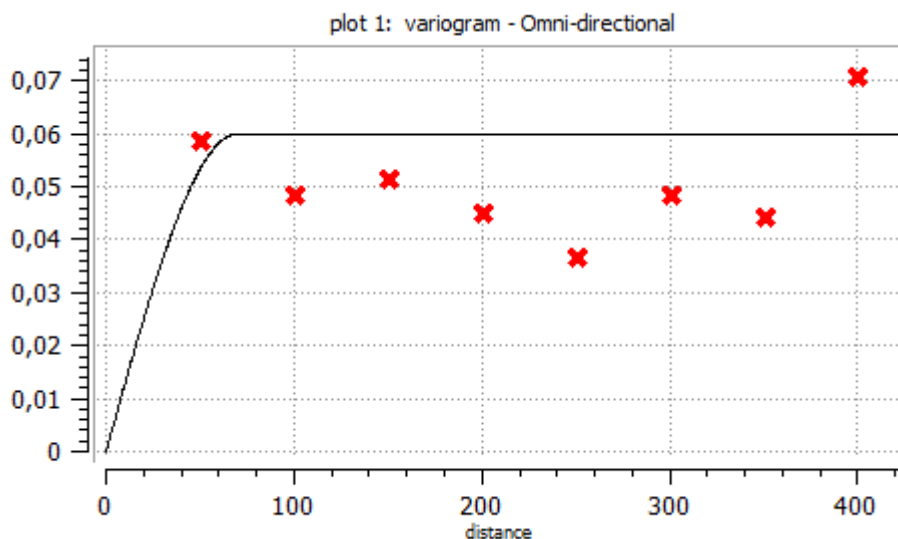
Tabela 12 - Modelo variográfico dos indicadores da variável UCS no arenito inferior

UCS	Arenito Inferior						
	Indicador	Azimute (°)	Dip (°)	Rake (°)	Sill	Alcance 1 (m)	Alcance 2 (m)
4/5	247,5	67,5	0	0,18	50	45	30
				0,06	130	90	45

Fonte - Autoria Própria

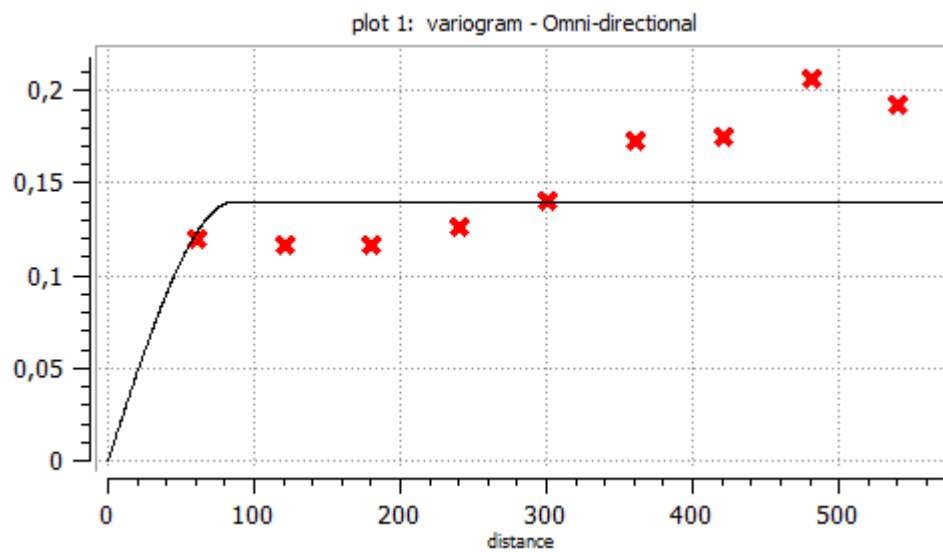
Os variogramas dos indicadores do ESP no conglomerado podem ser observados nas Figura 51 a Figura 56. A Tabela 13 mostra o sumário com as direções e as estruturas presentes no modelos variográficos para cada indicador.

Figura 51 - Variograma Omni-direcional do Indicador 1 da variável ESP no conglomerado



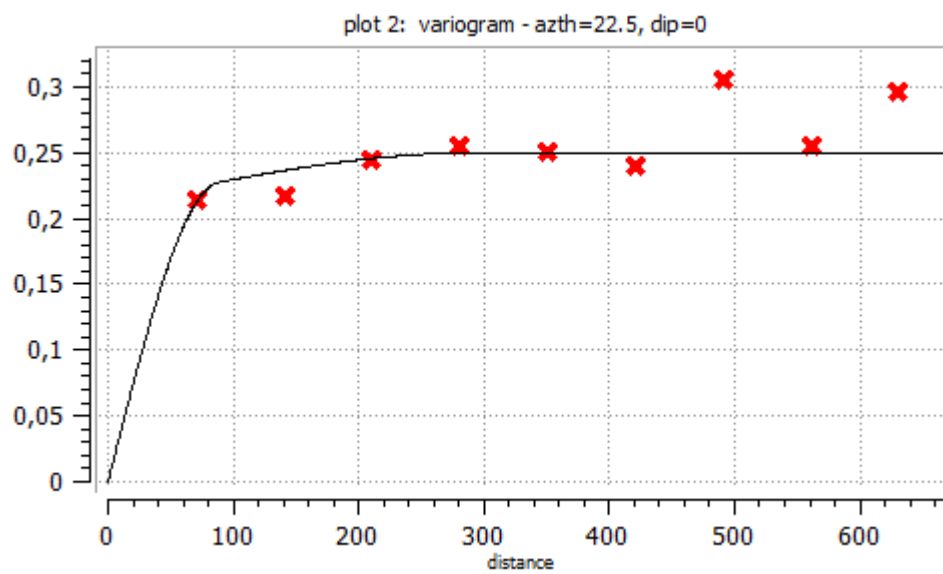
Fonte - Autoria Própria

Figura 52 - Variograma Omni-direcional do Indicador 2 da variável ESP no conglomerado



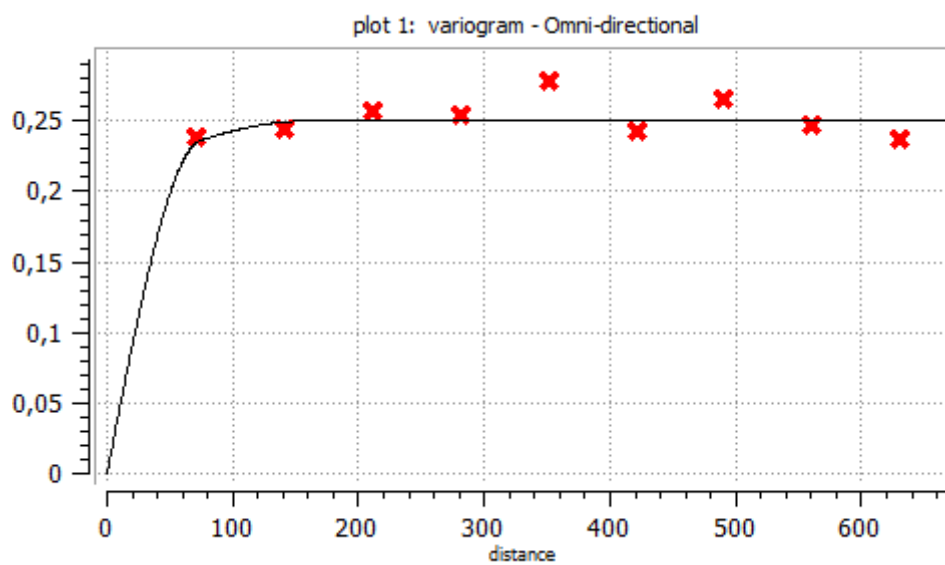
Fonte - Autoria Própria

Figura 53 - Variograma maior direção do Indicador 3 da variável ESP no conglomerado



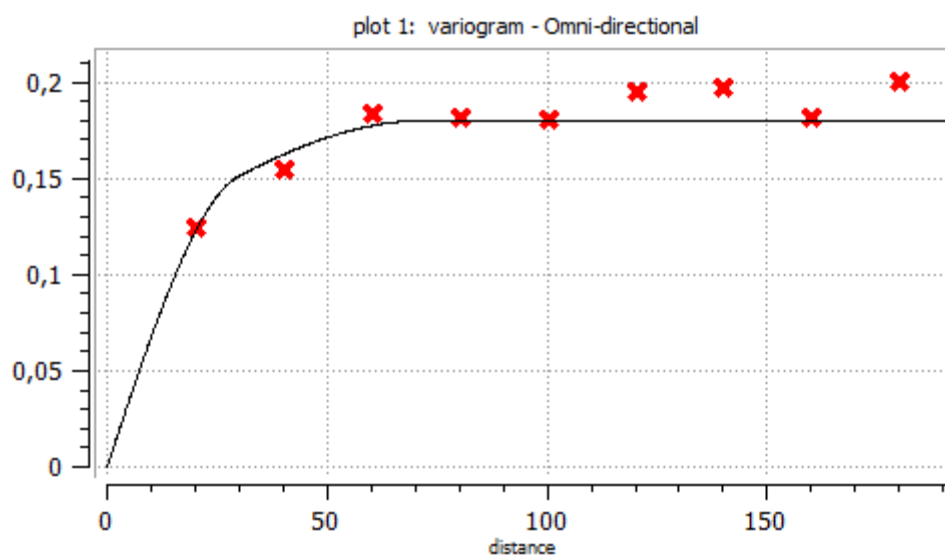
Fonte - Autoria Própria

Figura 54 - Variograma menor e média direção do Indicador 3 da variável ESP no conglomerado



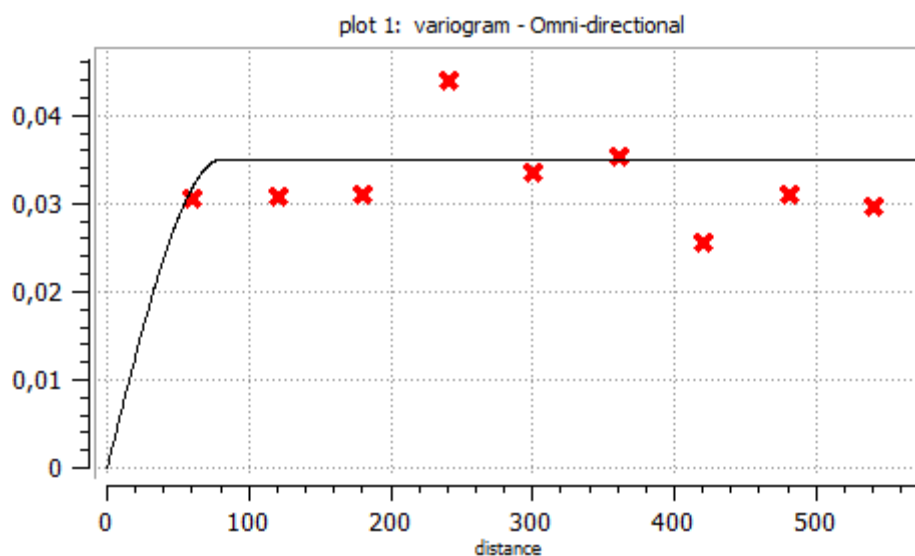
Fonte - Autoria Própria

Figura 55 - Variograma Omni-direcional do Indicador 4 da variável ESP no conglomerado



Fonte - Autoria Própria

Figura 56 - Variograma Omni-direcional do Indicador 5 da variável ESP no conglomerado



Fonte - Autoria Própria

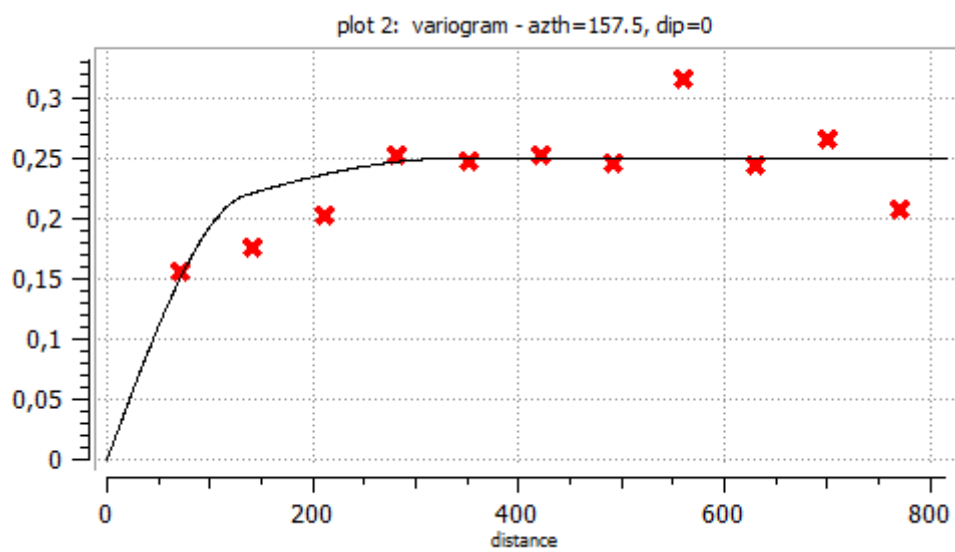
Tabela 13 - Modelo variográfico dos indicadores da variável ESP no conglomerado

ESP	Conglomerado						
	Indicador	Azimute (°)	Dip (°)	Rake (°)	Sill	Alcance 1 (m)	Alcance 2 (m)
1	157,5	0	0	0,06	70	70	70
2	157,5	0	0	0,14	90	90	90
3	22,5	0	0	0,21	90	45	45
				0,04	300	70	70
4	157,5	0	0	0,11	30	30	30
				0,07	72	72	72
5	157,5	0	0	0,035	80	80	80

Fonte - Autoria Própria

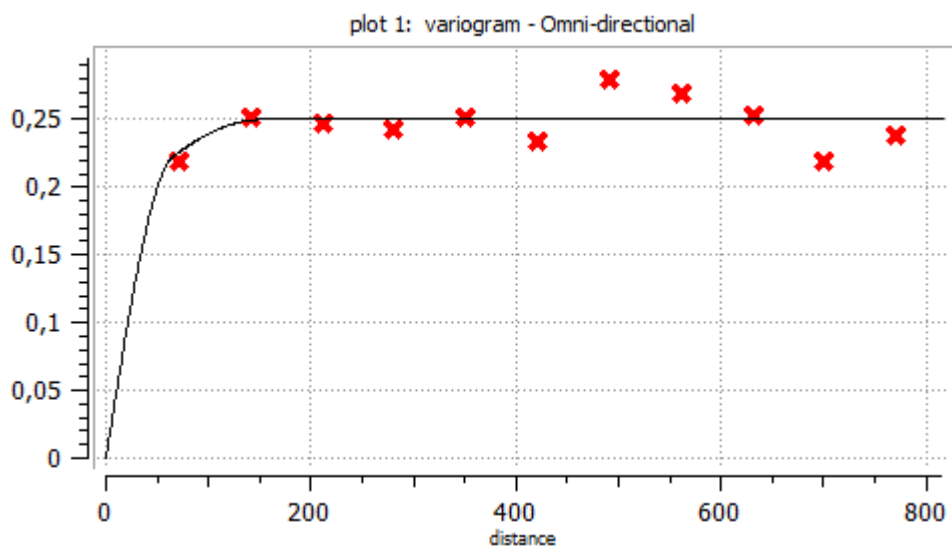
Os variogramas dos indicadores do RQD no conglomerado podem ser observados na Figura 57 - Variograma maior direção do Indicador 1 da variável RQD no conglomerado a Figura 63. A Tabela 14 Tabela 13 mostra o sumário com as direções e as estruturas presentes no modelos variográficos para cada indicador.

Figura 57 - Variograma maior direção do Indicador 1 da variável RQD no conglomerado



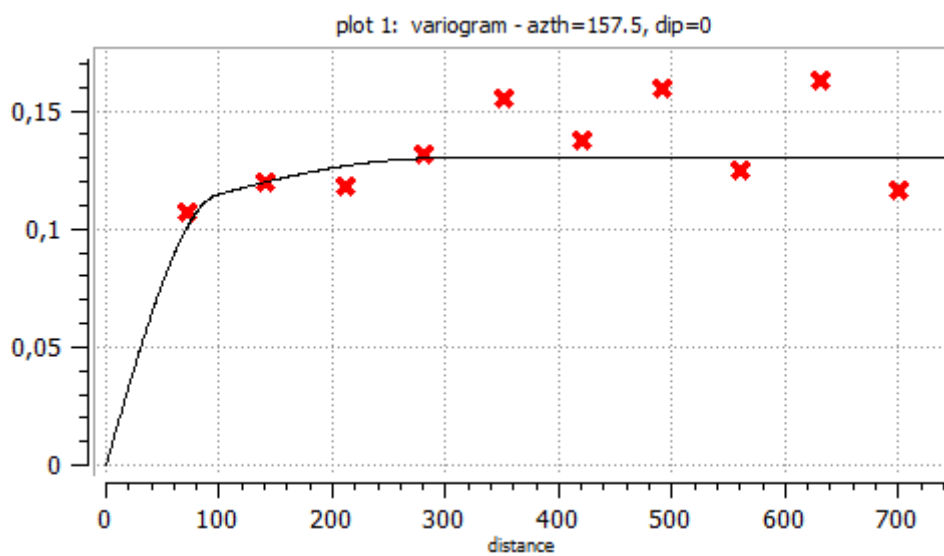
Fonte - Autoria Própria

Figura 58 - Variograma menor e media direção do Indicador 1 da variável RQD no conglomerado



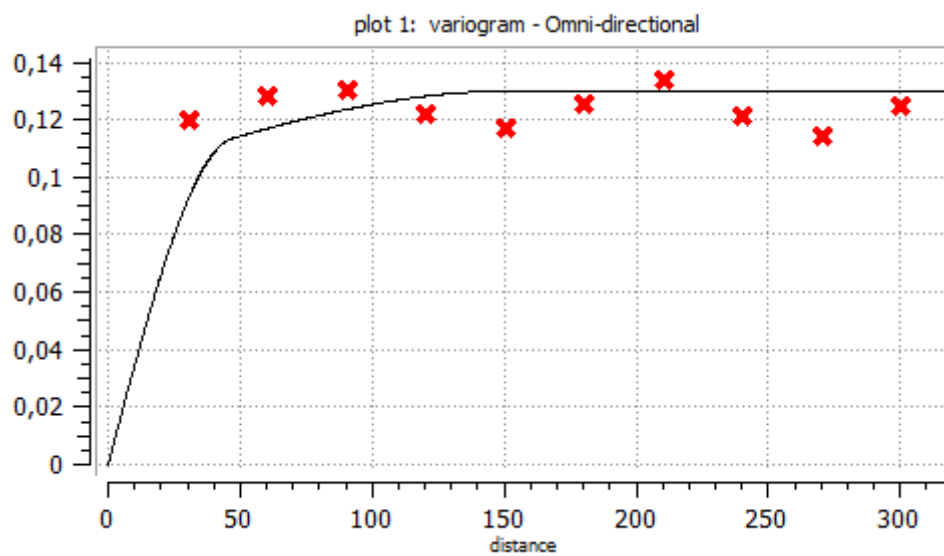
Fonte - Autoria Própria

Figura 59 - Variograma maior direção do Indicador 2 da variável RQD no conglomerado



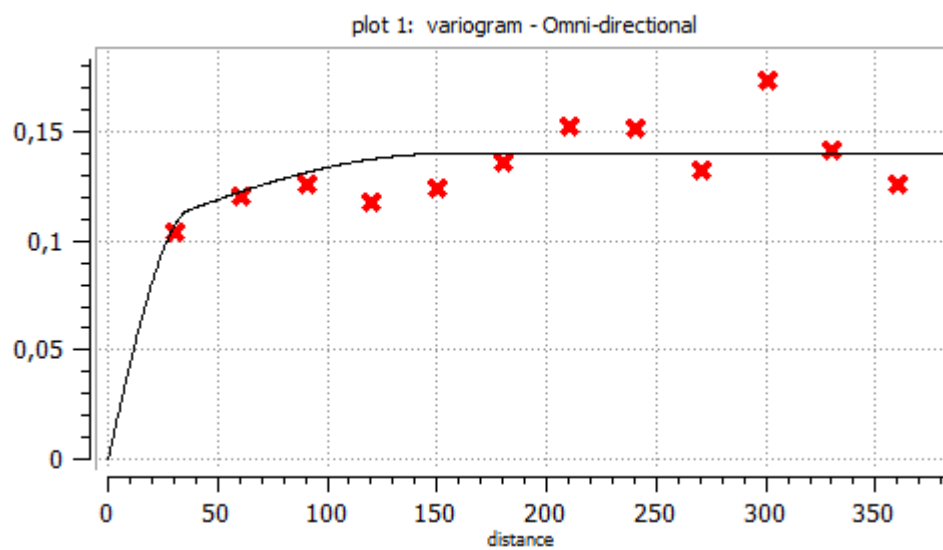
Fonte - Autoria Própria

Figura 60 - Variograma menor e media direção do Indicador 2 da variável RQD no conglomerado



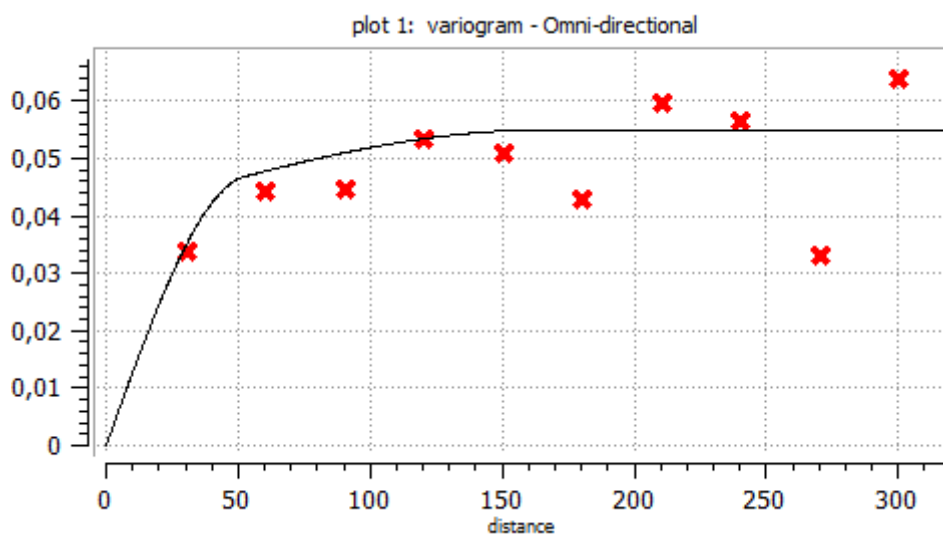
Fonte - Autoria Própria

Figura 61 - Variograma Omni-direcional do Indicador 3 da variável RQD no conglomerado



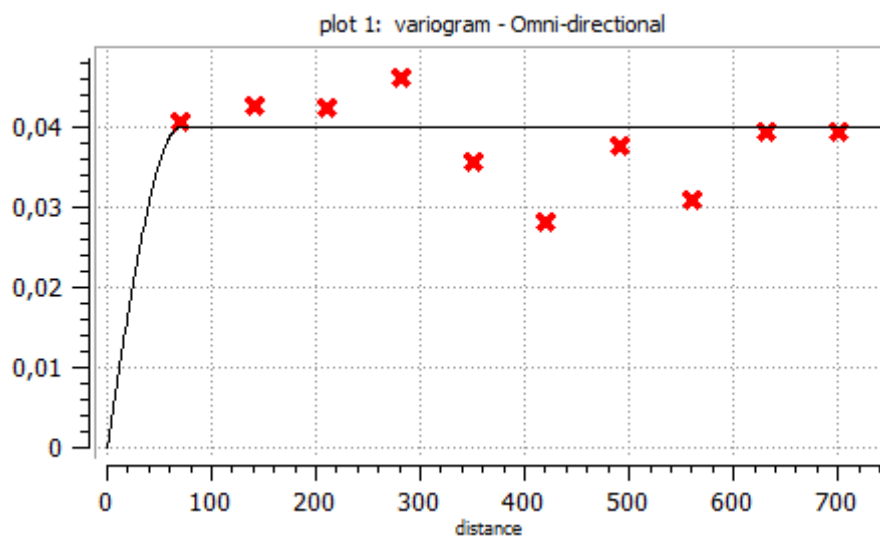
Fonte - Autoria Própria

Figura 62 - Variograma Omni-direcional do Indicador 4 da variável RQD no conglomerado



Fonte - Autoria Própria

Figura 63 - Variograma Omni-direcional do Indicador 5 da variável RQD no conglomerado



Fonte - Autoria Própria

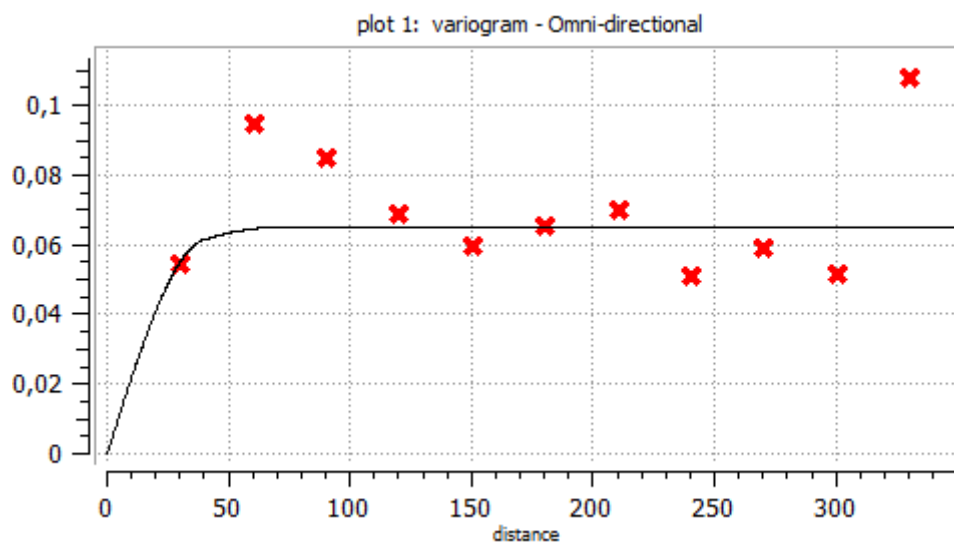
Tabela 14 - Modelo variográfico dos indicadores da variável RQD no conglomerado

RQD	Conglomerado						
Indicador	Azimute (°)	Dip (°)	Rake (°)	Sill	Alcance 1 (m)	Alcance 2 (m)	Alcance 3 (m)
1	157,5	0	0	0,06	70	70	70
2	157,5	0	0	0,14	90	90	90
3	22,5	0	0	0,21	90	45	45
				0,04	300	70	70
4	157,5	0	0	0,11	30	30	30
				0,07	72	72	72
5	157,5	0	0	0,035	80	80	80

Fonte - Autoria Própria

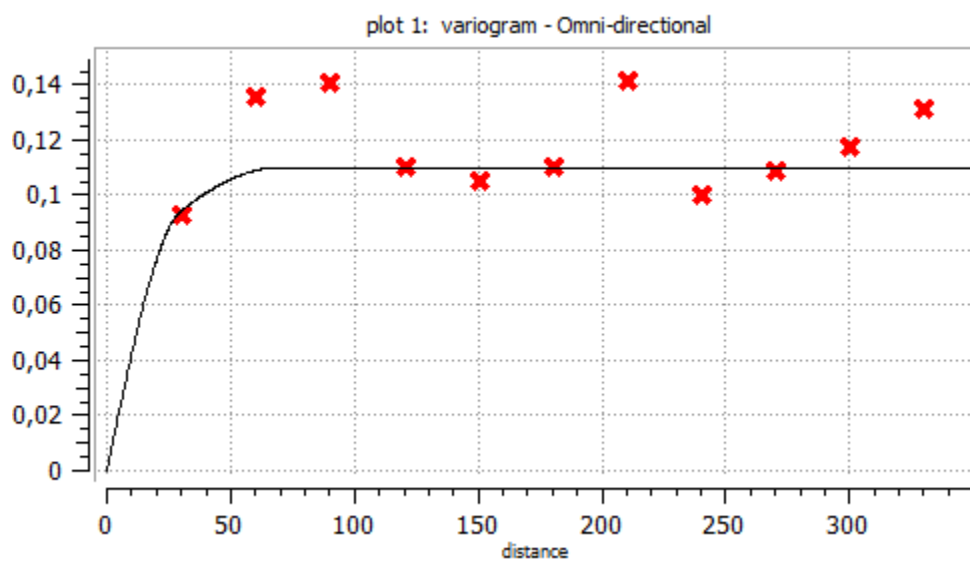
Os variogramas dos indicadores do RUG no conglomerado podem ser observados nas Figura 64 a Figura 66. A Tabela 13 Tabela 15 mostra o sumário com as direções e as estruturas presentes no modelos variográficos para cada indicador.

Figura 64 - Variograma Omni-direcional do Indicador 3 da variável RUG no conglomerado



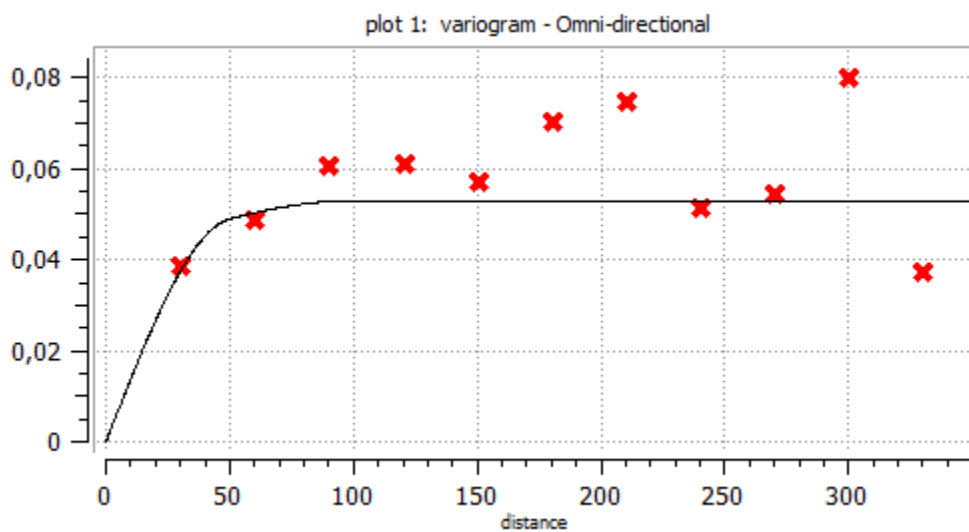
Fonte - Autoria Própria

Figura 65 - Variograma Omni-direcional do Indicador 4 da variável RUG no conglomerado



Fonte - Autoria Própria

Figura 66 - Variograma Omni-direcional do Indicador 5 da variável RUG no conglomerado



Fonte - Autoria Própria

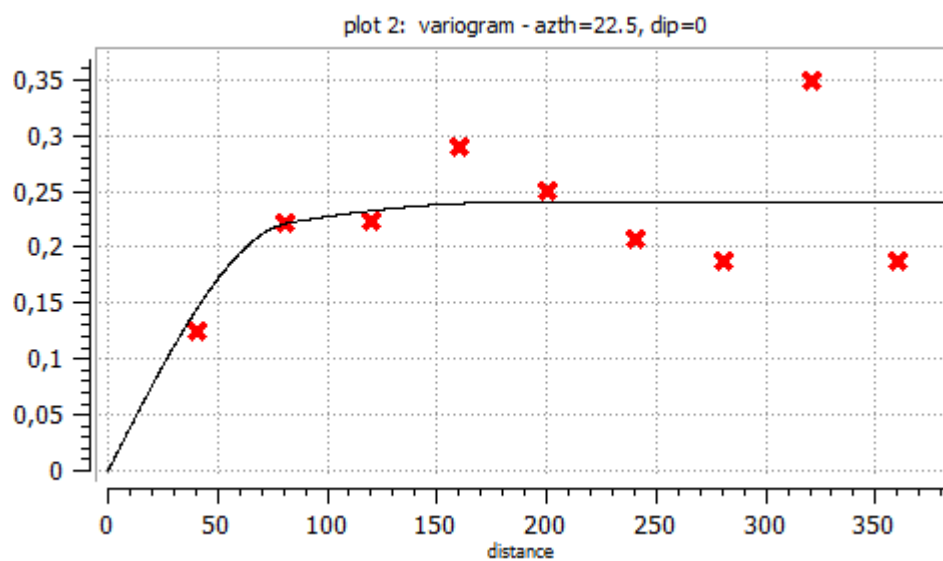
Tabela 15 - Modelo variográfico dos indicadores da variável RUG no conglomerado

RUG	Conglomerado						
	Azimuth (°)	Dip (°)	Rake (°)	Sill	Alcance 1 (m)	Alcance 2 (m)	Alcance 3 (m)
3	157,5	0	0	0,11	30	30	30
				0,04	70	70	70
4	157,5	0	0	0,05	40	40	40
				0,015	70	70	70
5	157,5	0	0	0,04	50	50	50
				0,013	100	100	100

Fonte - Autoria Própria

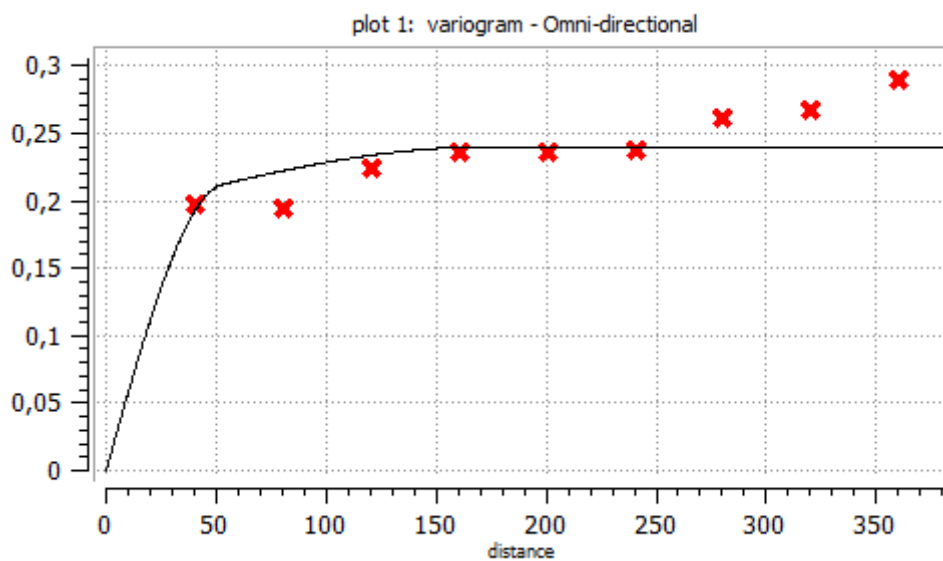
Os variogramas dos indicadores do UCS no conglomerado podem ser observados nas Figura 64 a Figura 66. A Tabela 13 Tabela 15 mostra o sumário com as direções e as estruturas presentes no modelos variográficos para cada indicador.

Figura 67 - Variograma maior direção do Indicador 4 da variável UCS no conglomerado



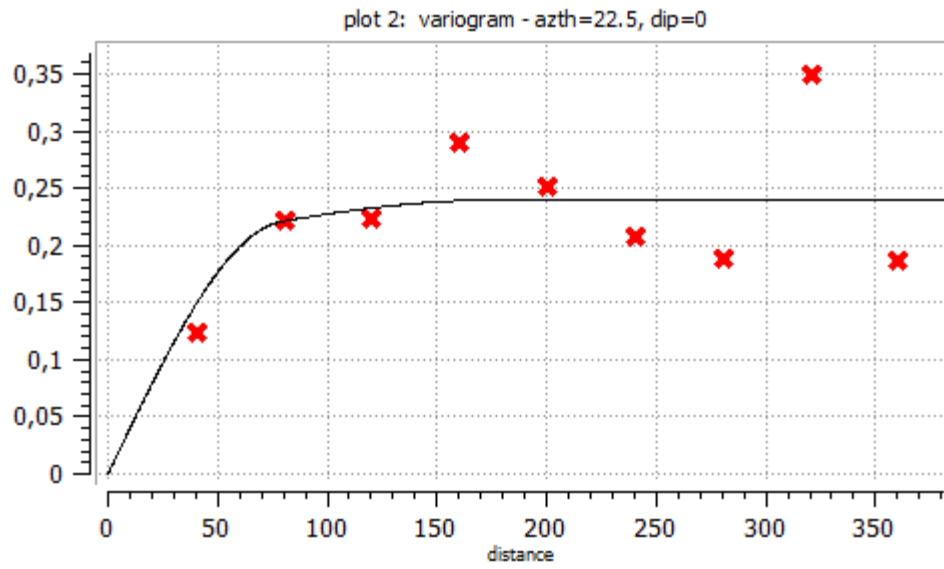
Fonte - Autoria Própria

Figura 68 - Variograma menor e media direção do Indicador 4 da variável UCS no conglomerado



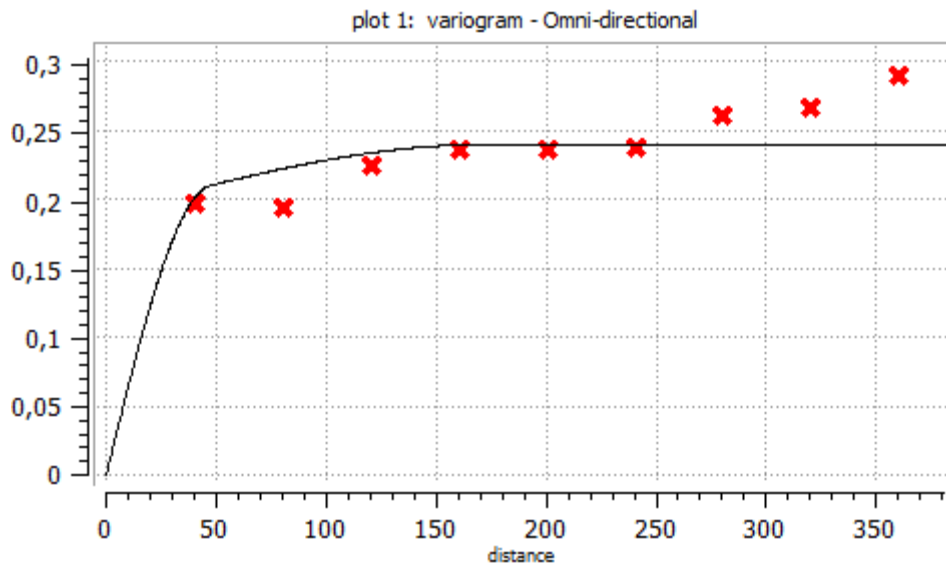
Fonte - Autoria Própria

Figura 69 - Variograma maior direção do Indicador 5 da variável UCS no conglomerado



Fonte - Autoria Própria

Figura 70 - Variograma maior direção do Indicador 5 da variável UCS no conglomerado



Fonte - Autoria Própria

Tabela 16 Modelo variográfico dos indicadores da variável UCS no conglomerado

RUG	Conglomerado						
Indicador	Azimute (°)	Dip (°)	Rake (°)	Sill	Alcance 1 (m)	Alcance 2 (m)	Alcance 3 (m)
4/5	22,5	0	0	0,19	85	25	25
				0,05	180	150	150

Fonte - Autoria Própria

Com todos os modelos variográficos criados foi possível partir para a próxima etapa do trabalho que seria o uso destas informações para a estimativa das variáveis nos modelos de blocos criados anteriormente. Todas as variáveis que apresentaram anisotropia, tiveram suas direções de maior alcance atreladas ao azimute ou ao *strike* das famílias de descontinuidades definidas durante a análise da geologia estrutural da área do estudo.

5.2.2 Estimativa

Todos os capítulos apresentados até esta parte tratam apenas de descrever o comportamento do banco de dados. As técnicas abordadas a partir desta etapa visam utilizar estas informações descritivas para estimar as probabilidades em locais que não tenham sido amostrados. Para a realização da estimativa, existem vários tipos de estimadores disponíveis, porém, o interpolador que leva em conta a medida de continuidade espacial obtida na variografia são as técnicas de krigagem.

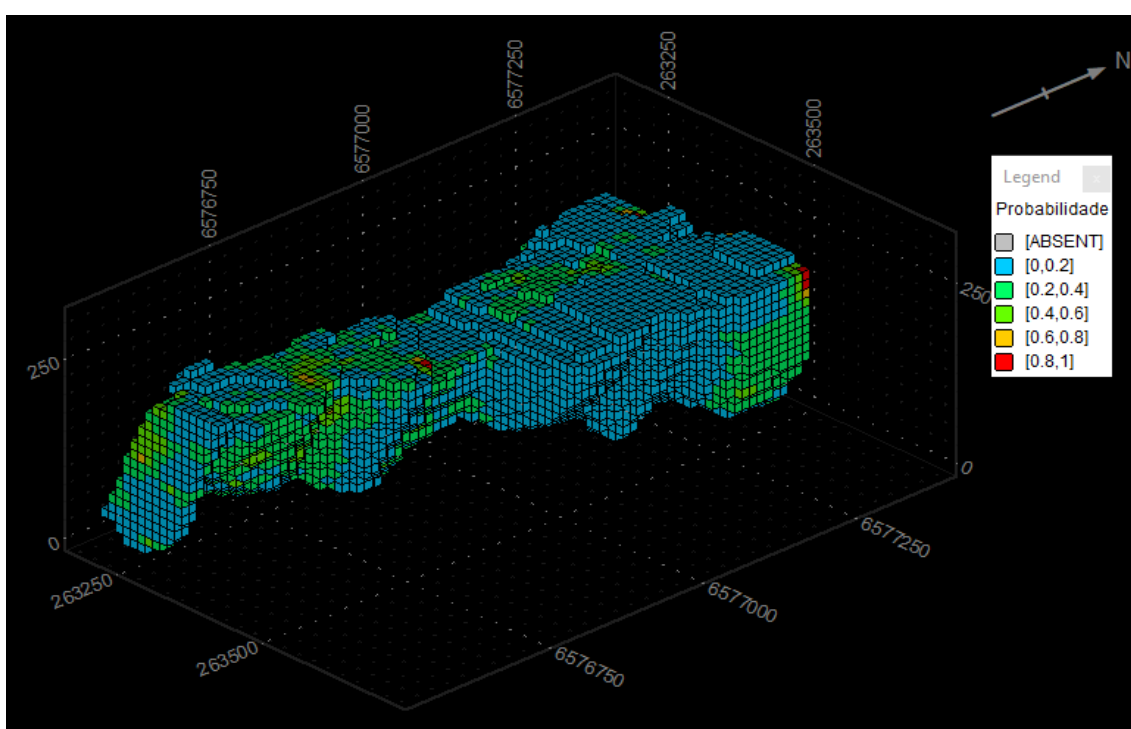
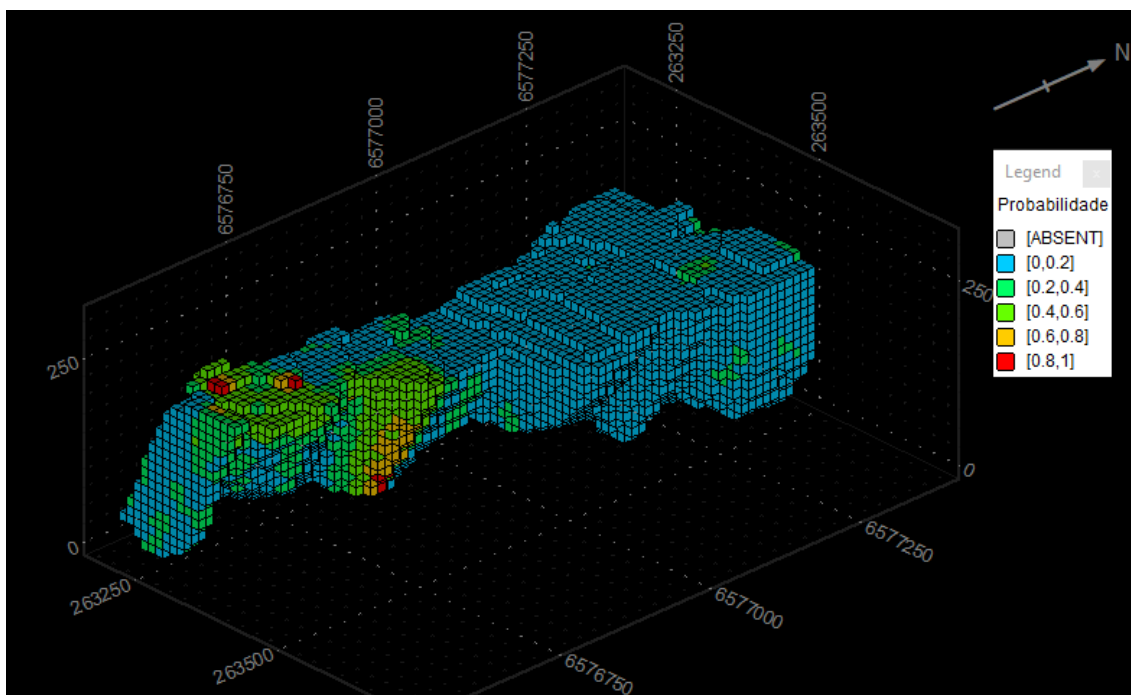
5.2.2.1 Krigagem do Indicadores

As estimativas variam entre si quanto ao alcance do elipsoide de busca, mínimo e máximo de amostras consideradas e quanto a divisão das amostras por octantes (técnica utilizada para não dar preferência a amostras agrupadas).

A discretização por célula pai serve para ao invés de estimar somente um ponto no centro do bloco e dizer que o valor estimado é correspondente ao valor do bloco, discretizar o bloco em diversos pontos e assumir a média do bloco como sendo a média dos pontos dentro do bloco, técnica muito parecida com a krigagem de blocos.

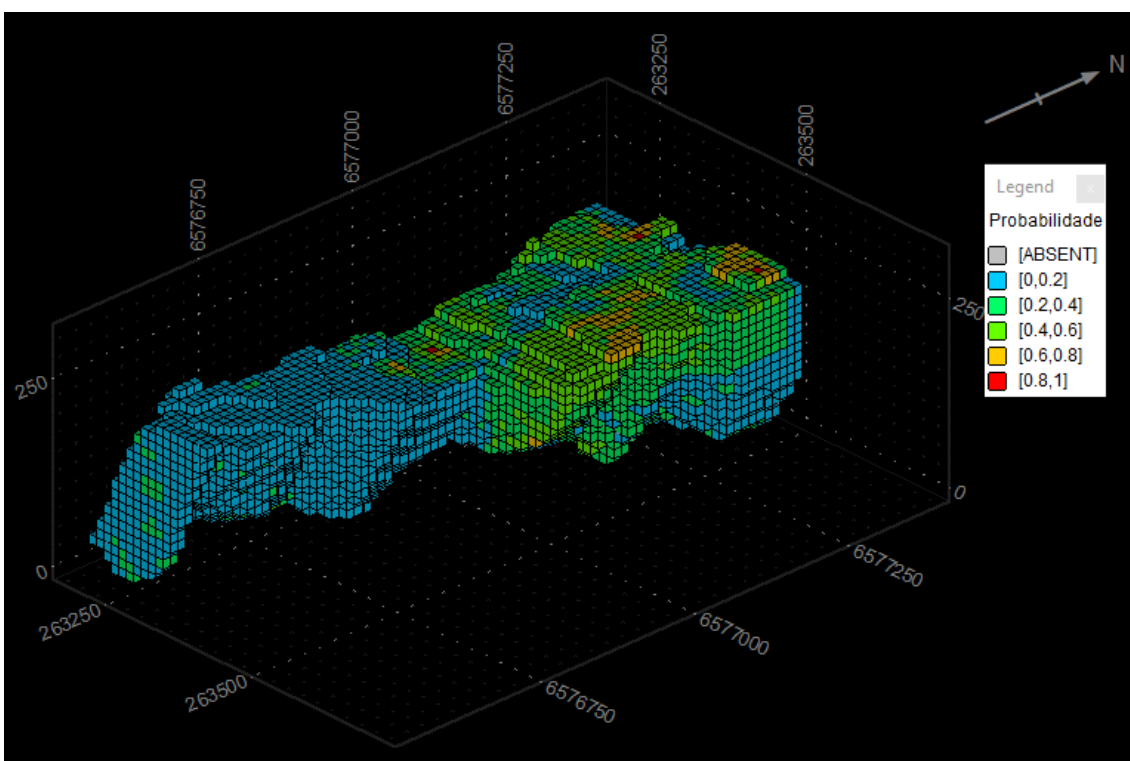
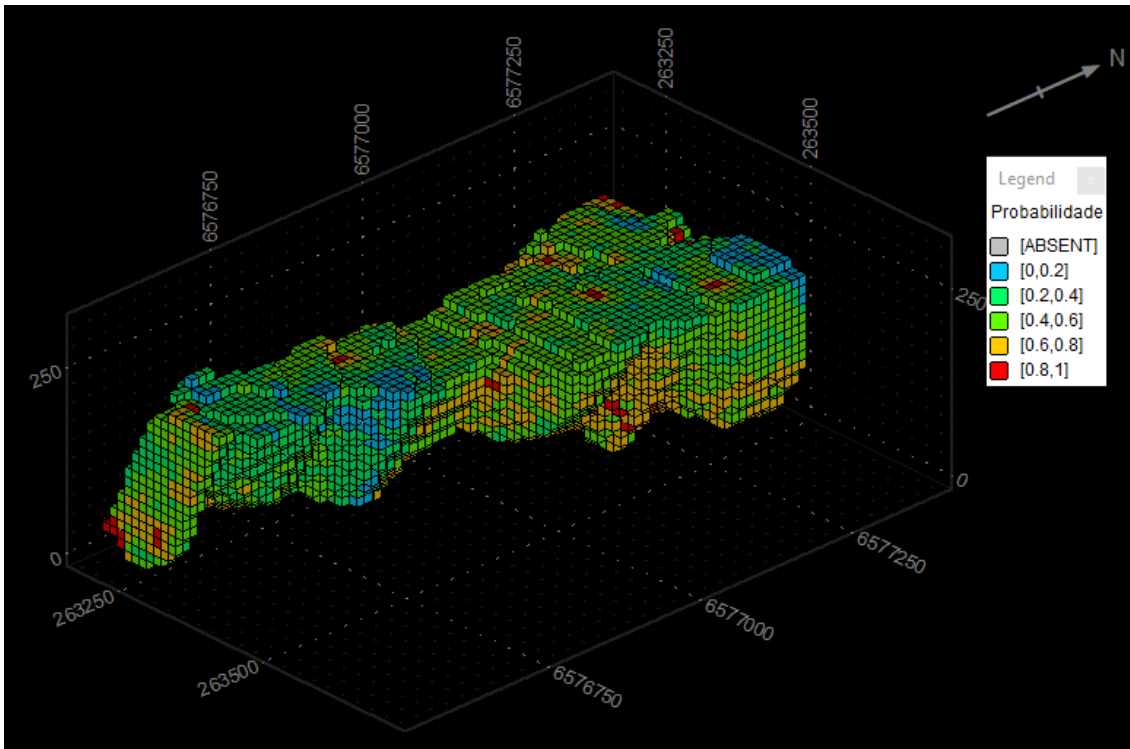
As estratégias de busca utilizadas para a estimativa foram: utilizar os alcances máximos dos modelos variográficos para o elipsoide de busca, utilizar um número mínimo de 4 amostras e no máximo 24 amostras, no mínimo 2 octantes preenchidas por 2 a 4 amostras. As Figura 71 a Figura 73 mostram os modelos de probabilidade para a variável espaçamento para o arenito inferior.

Figura 71 - Modelo de probabilidade para o indicador 1 e 2, respectivamente, da variável ESP no arenito inferior



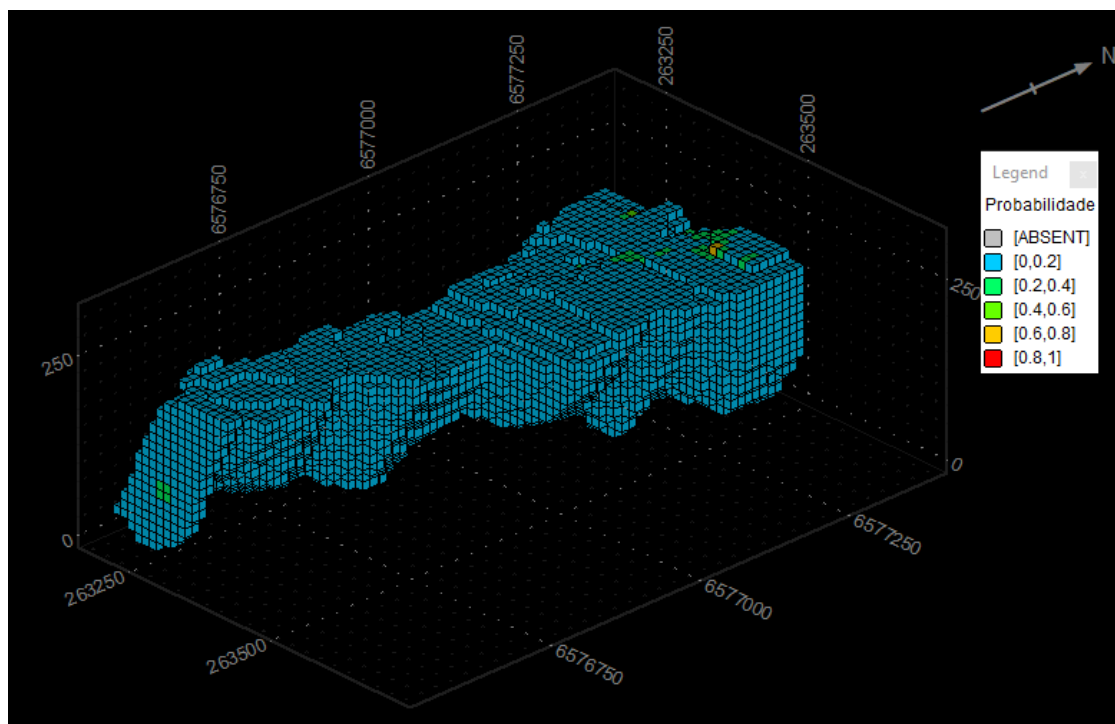
Fonte - Autoria Própria

Figura 72 - Modelo de probabilidade para o indicador 3 e 4, respectivamente, da variável ESP no arenito inferior



Fonte - Autoria Própria

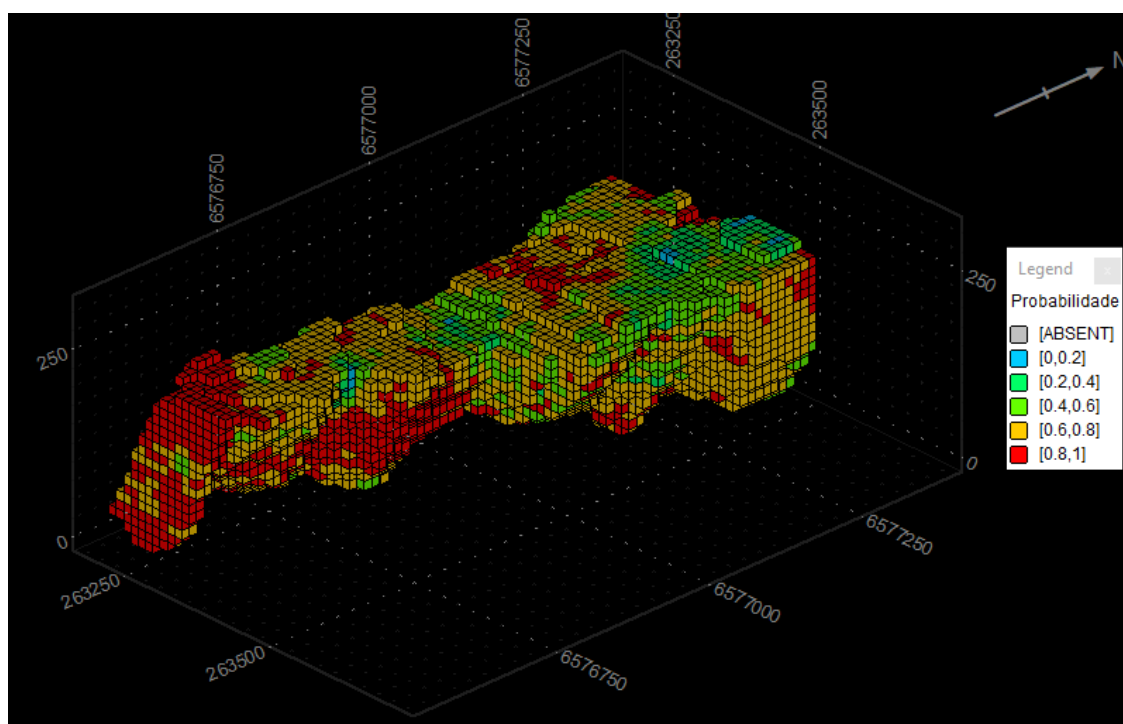
Figura 73 - Modelo de probabilidade para o indicador 5 da variável ESP no arenito inferior



Fonte - Autoria Própria

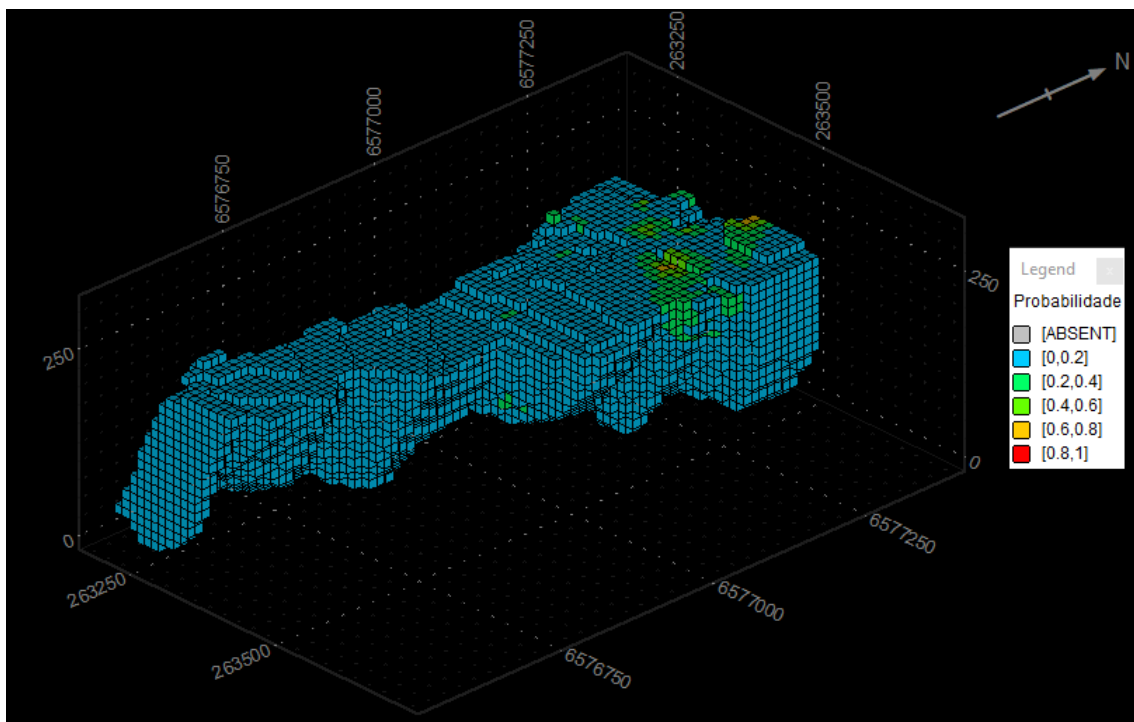
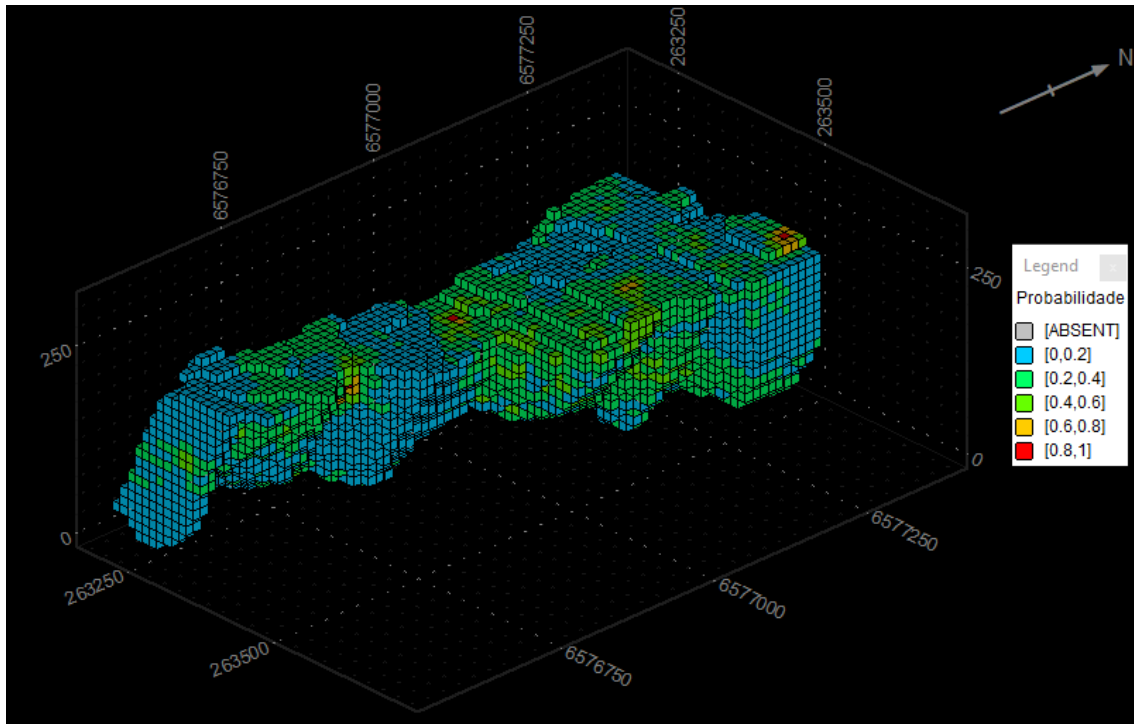
As Figura 74 a Figura 76 mostram os modelos de probabilidade para a variável RQD para o arenito inferior.

Figura 74 - Modelo de probabilidade para o indicador 1 da variável RQD no arenito inferior



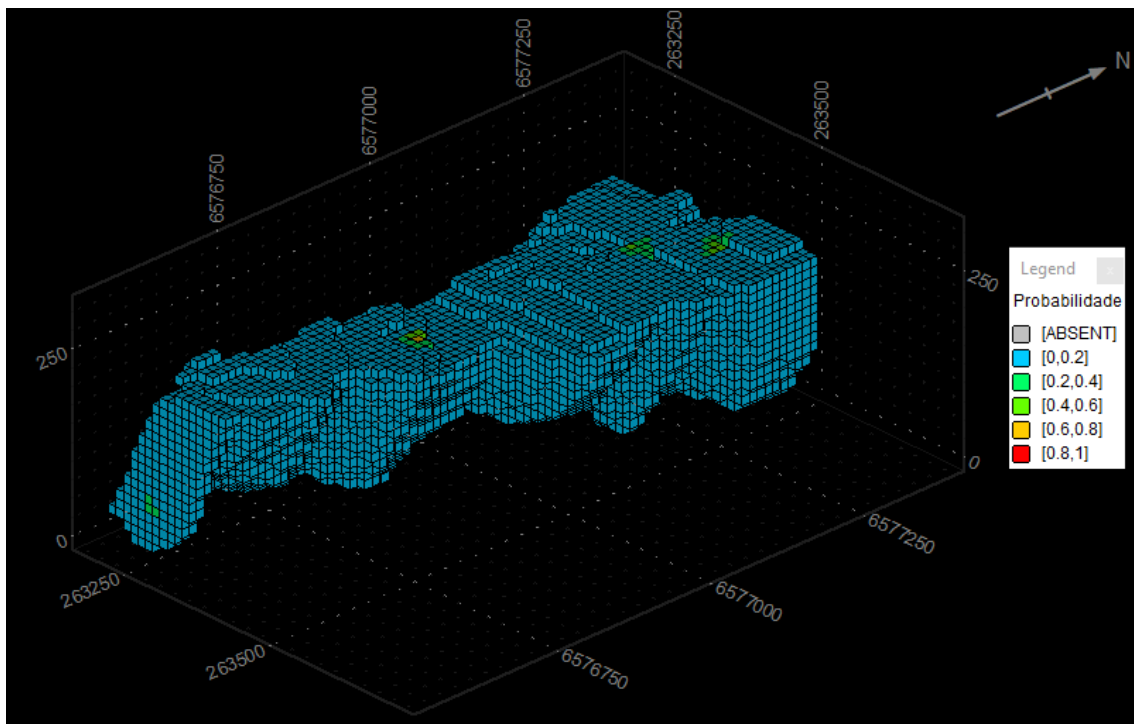
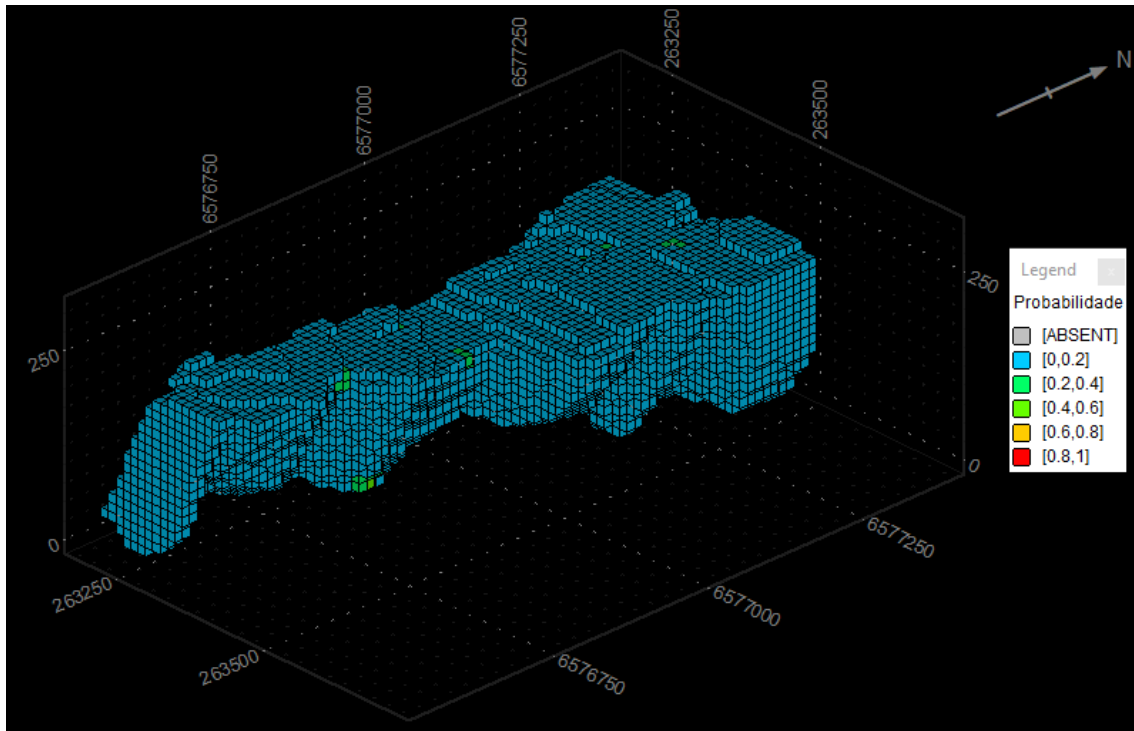
Fonte - Autoria Própria

Figura 75 - Modelo de probabilidade para o indicador 2 e 3, respectivamente, da variável RQD no arenito inferior



Fonte - Autoria Própria

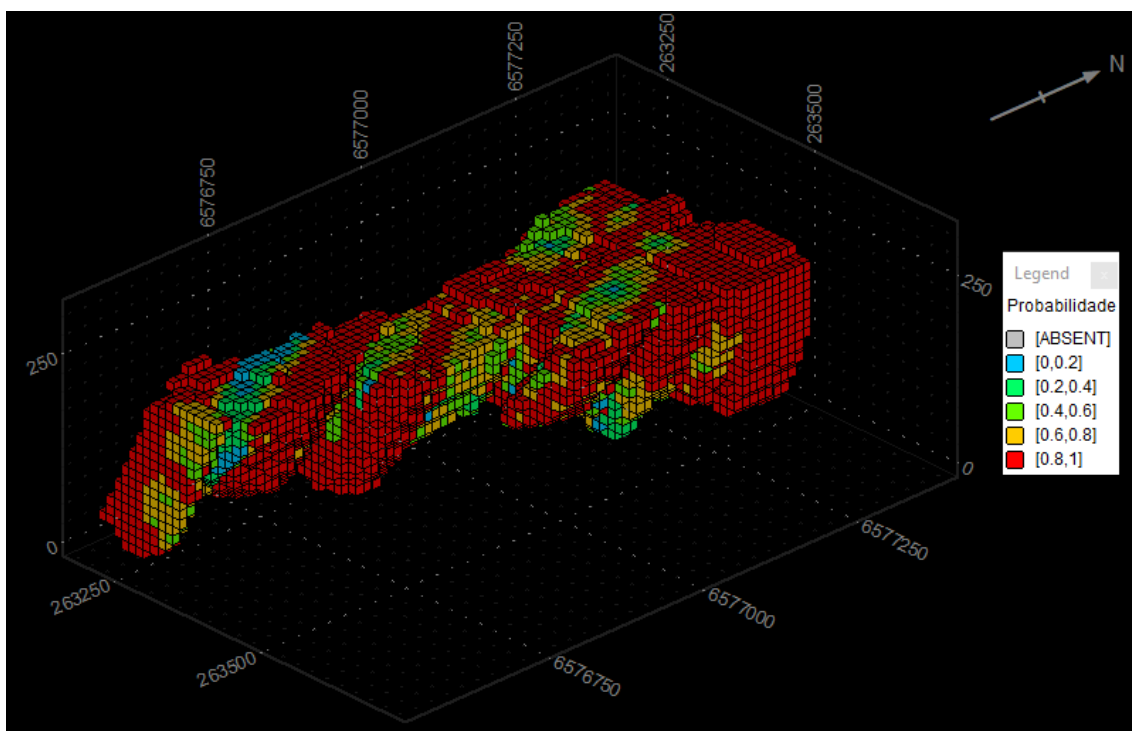
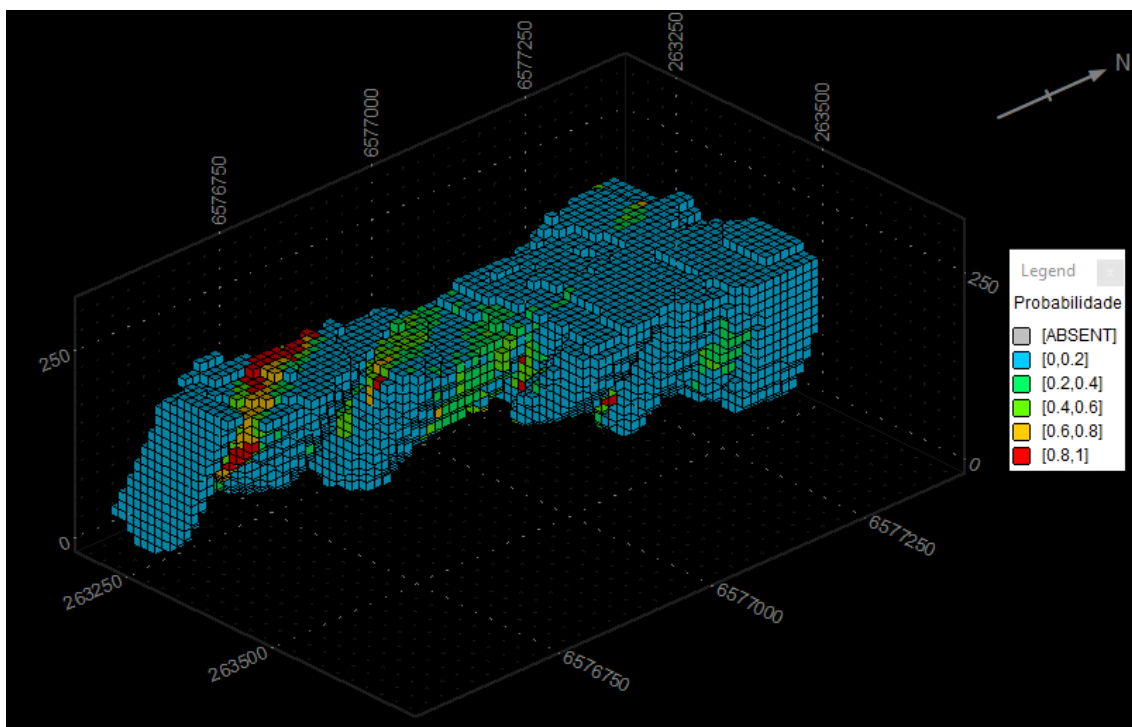
Figura 76 - Modelo de probabilidade para o indicador 4 e 5, respectivamente, da variável RQD no arenito inferior



Fonte - Autoria Própria

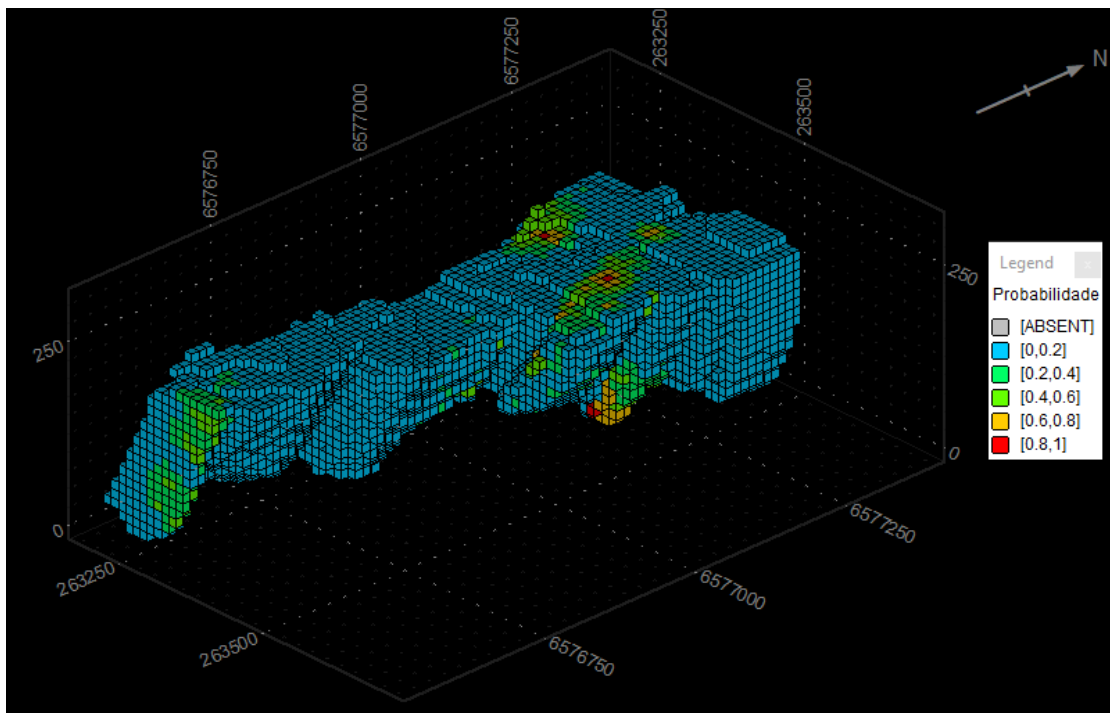
As Figura 77 e Figura 78 mostram os modelos de probabilidade para a variável RUG para o arenito inferior.

Figura 77 - Modelo de probabilidade para o indicador 3 e 4, respectivamente, da variável RUG no arenito inferior



Fonte - Autoria Própria

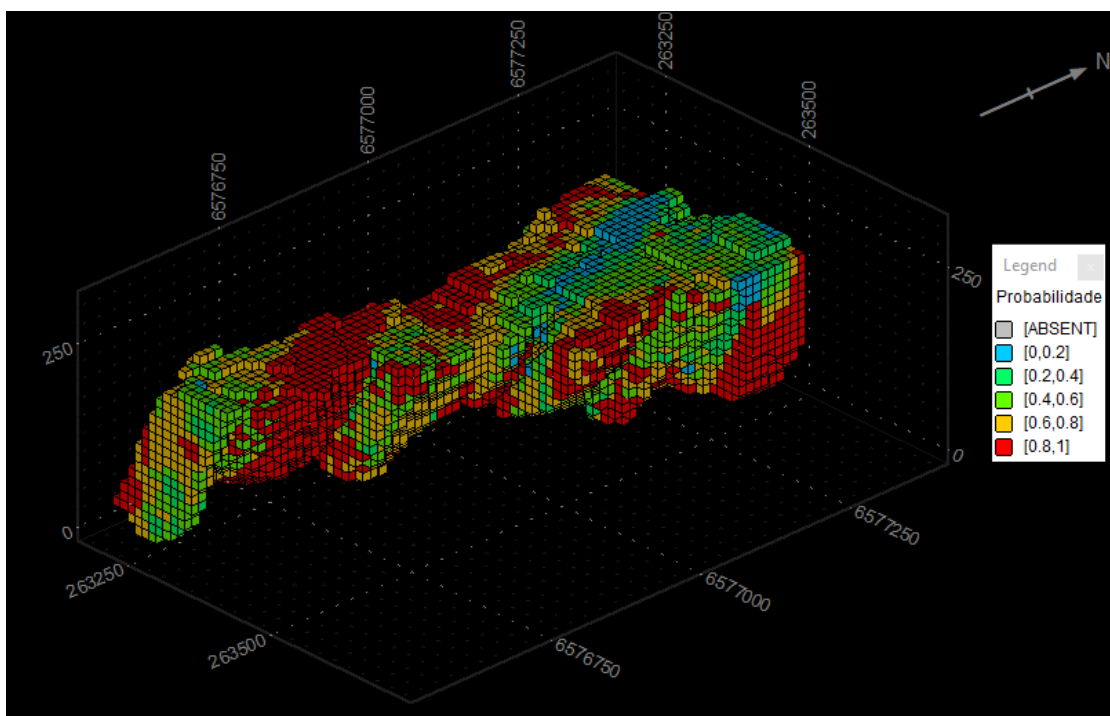
Figura 78 - Modelo de probabilidade para o indicador 5 da variável RUG no arenito inferior



Fonte - Autoria Própria

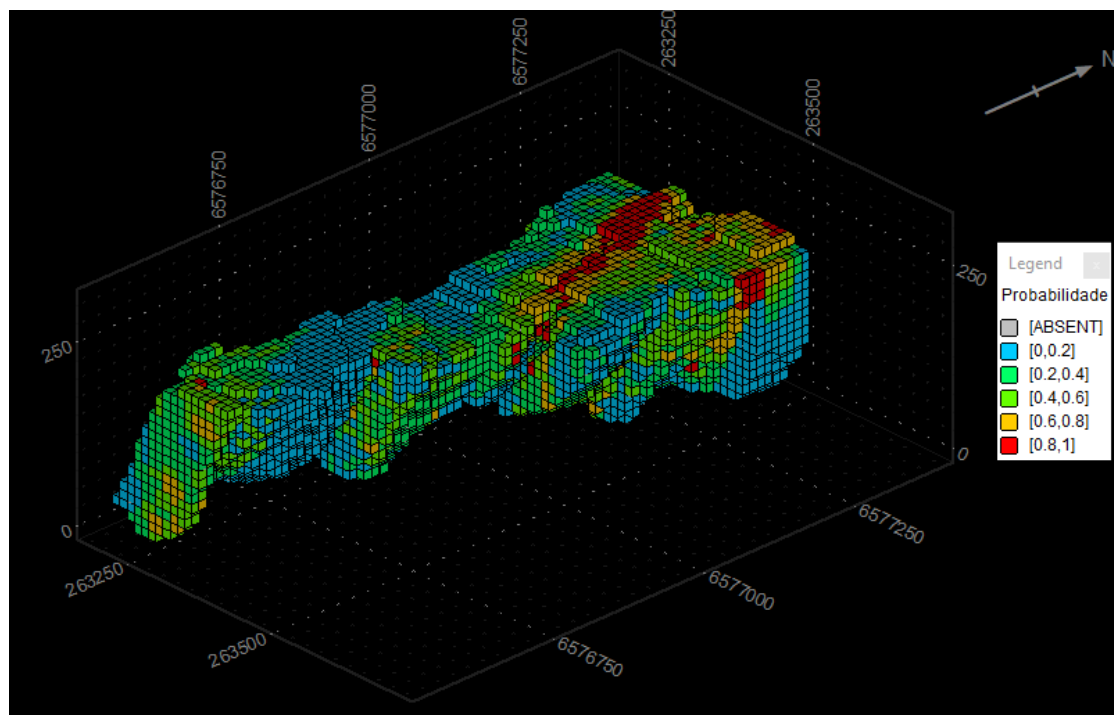
As Figura 79 e Figura 80 mostram os modelos de probabilidade para a variável UCS para o arenito inferior.

Figura 79 - Modelo de probabilidade para o indicador 4 da variável UCS no arenito inferior



Fonte - Autoria Própria

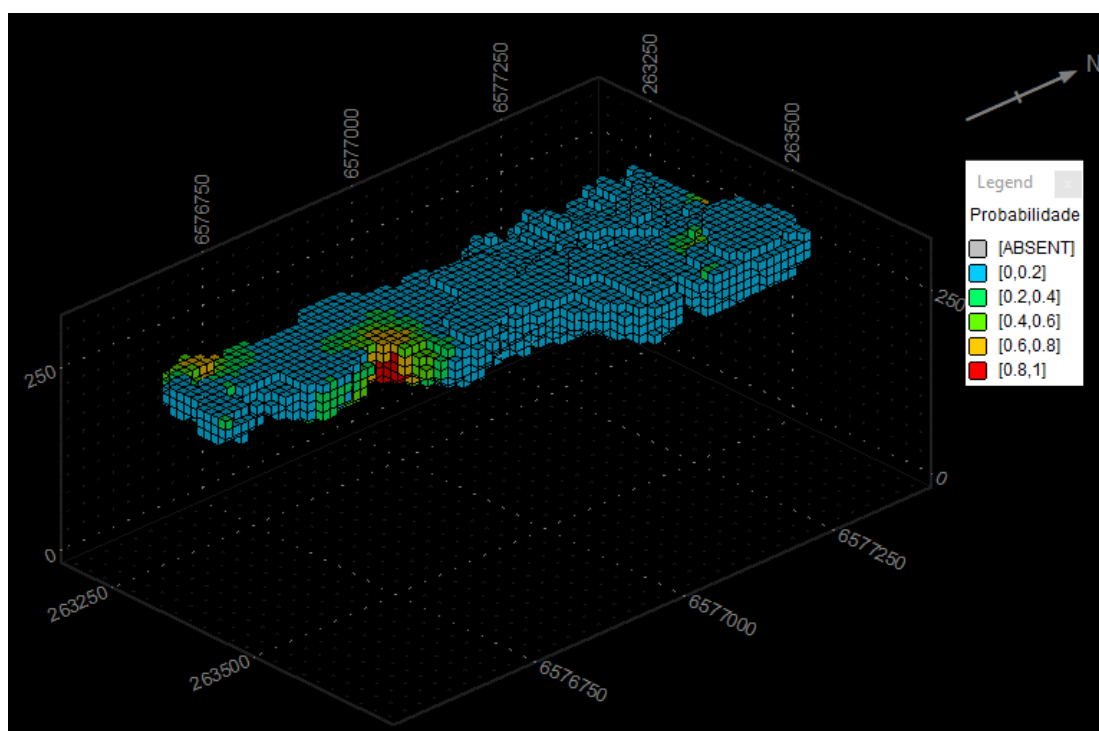
Figura 80 - Modelo de probabilidade para o indicador 5 da variável UCS no arenito inferior



Fonte - Autoria Própria

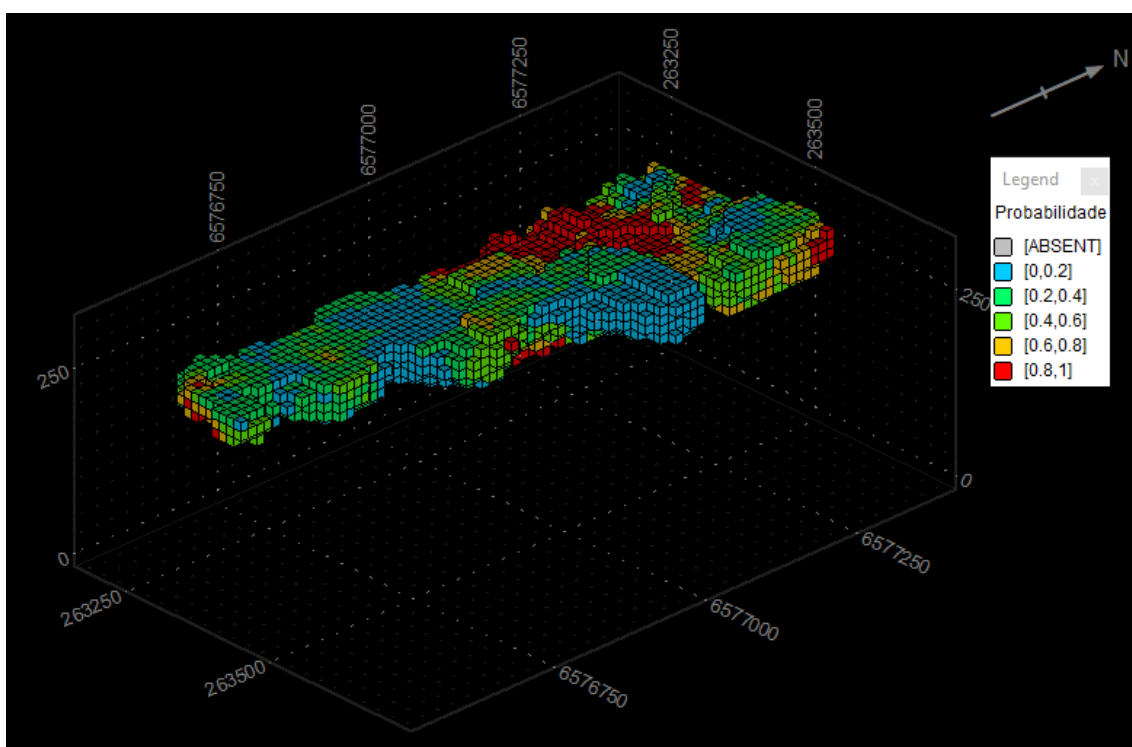
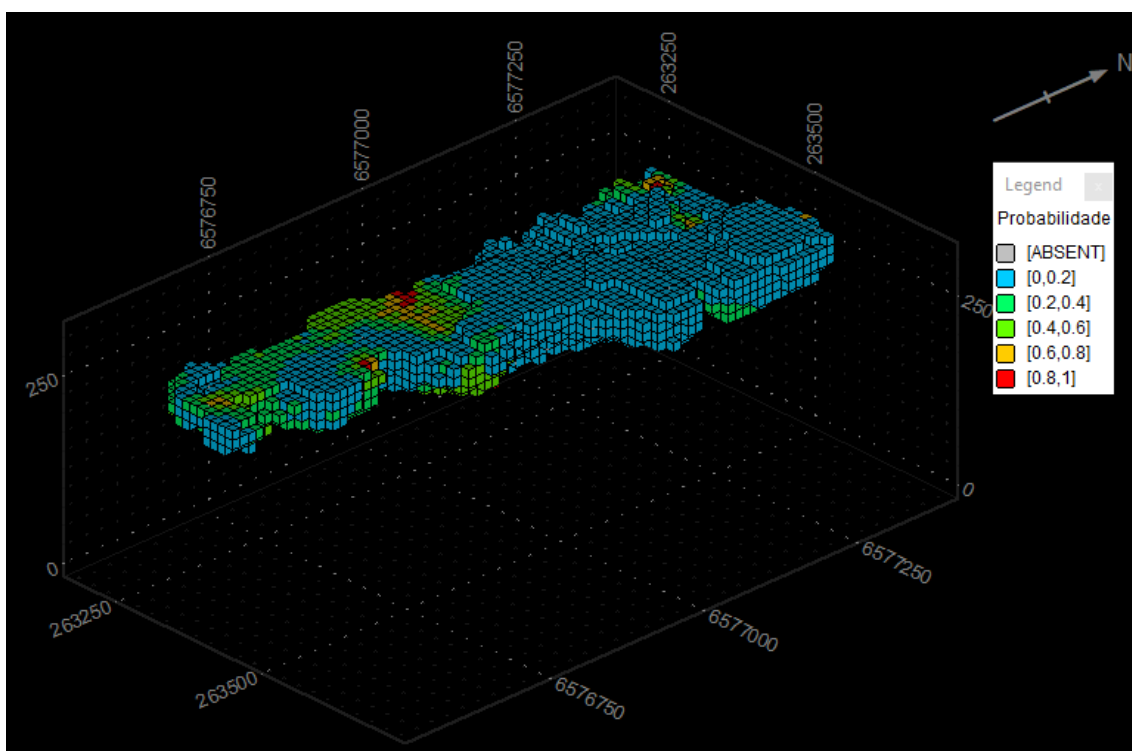
As Figura 81 a Figura 83 mostram os modelos de probabilidade para a variável ESP no conglomerado.

Figura 81 - Modelo de probabilidade para o indicador 1 da variável ESP no conglomerado



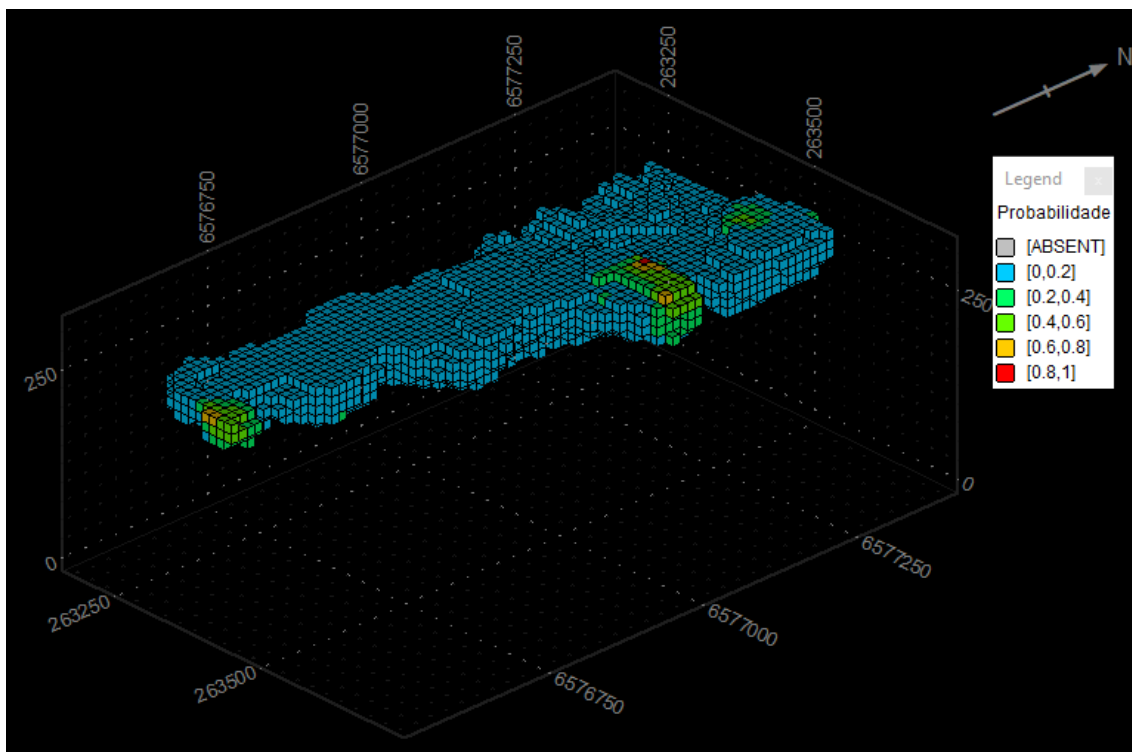
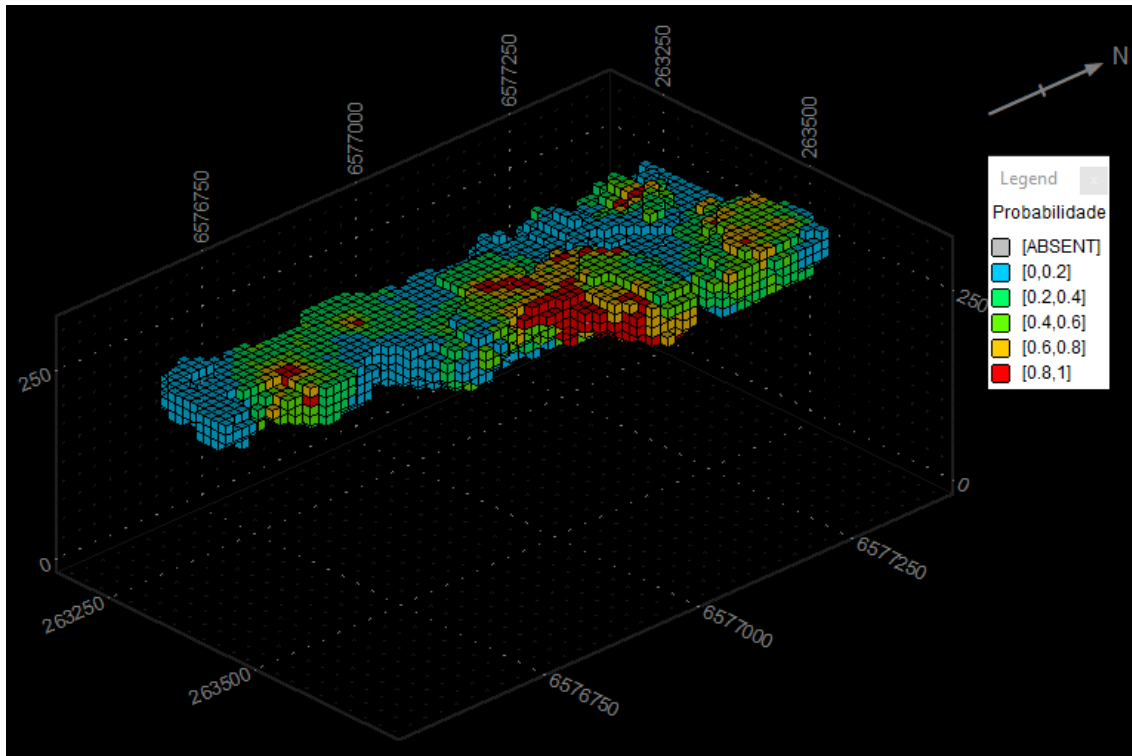
Fonte - Autoria Própria

Figura 82 - Modelo de probabilidade para o indicador 2 e 3, respectivamente, da variável ESP no conglomerado



Fonte - Autoria Própria

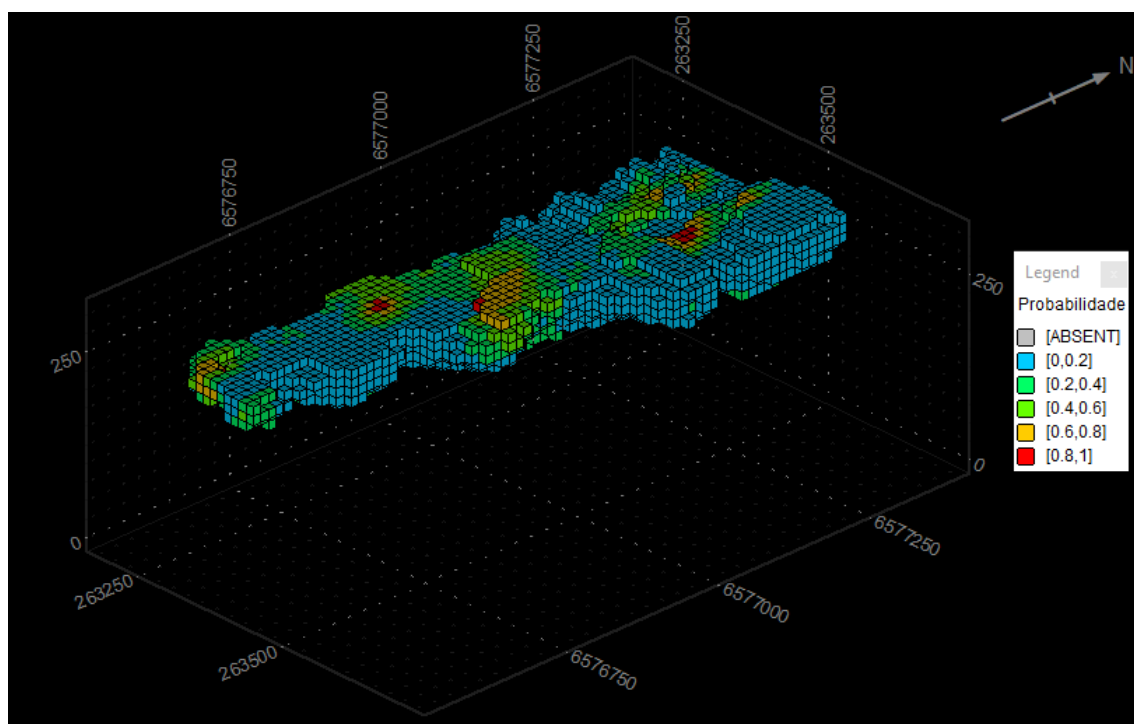
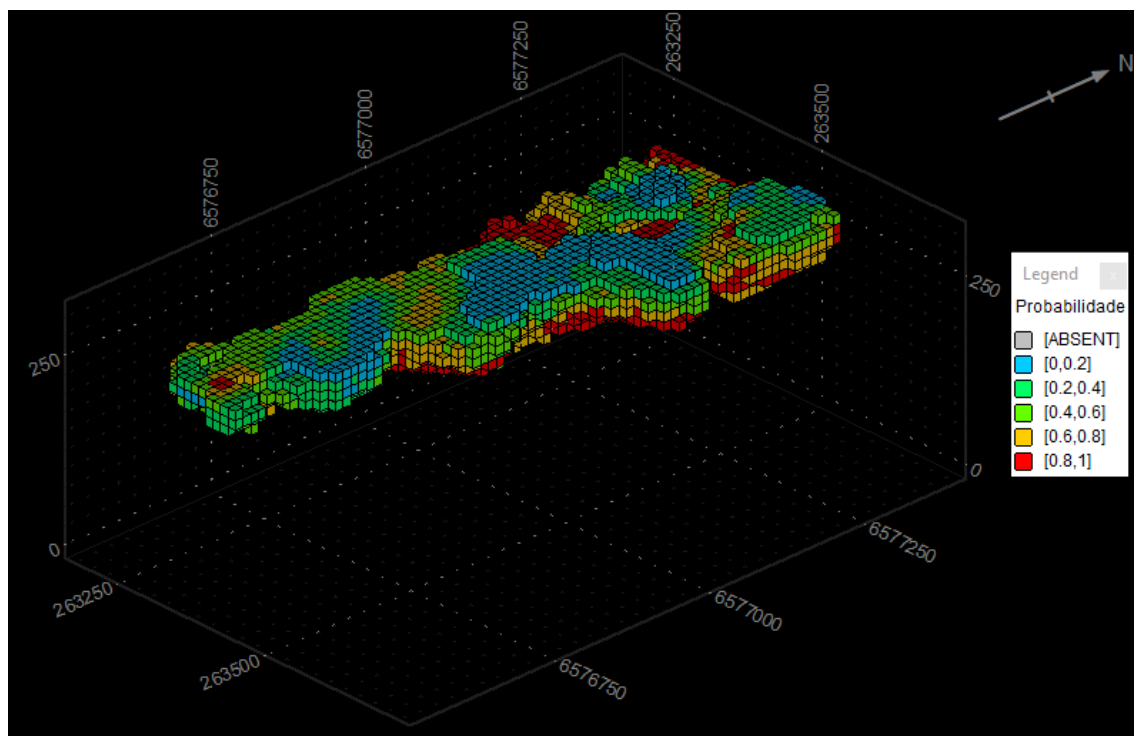
Figura 83 - Modelo de probabilidade para o indicador 4 e 5, respectivamente, da variável ESP no conglomerado



Fonte - Autoria Própria

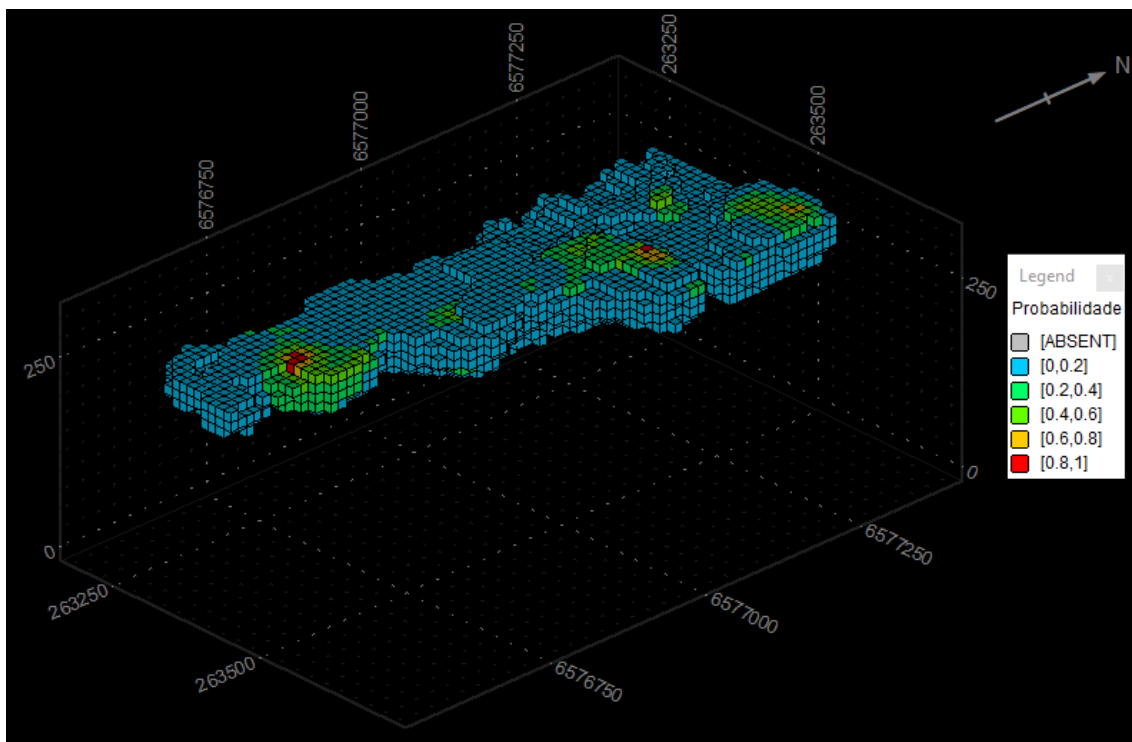
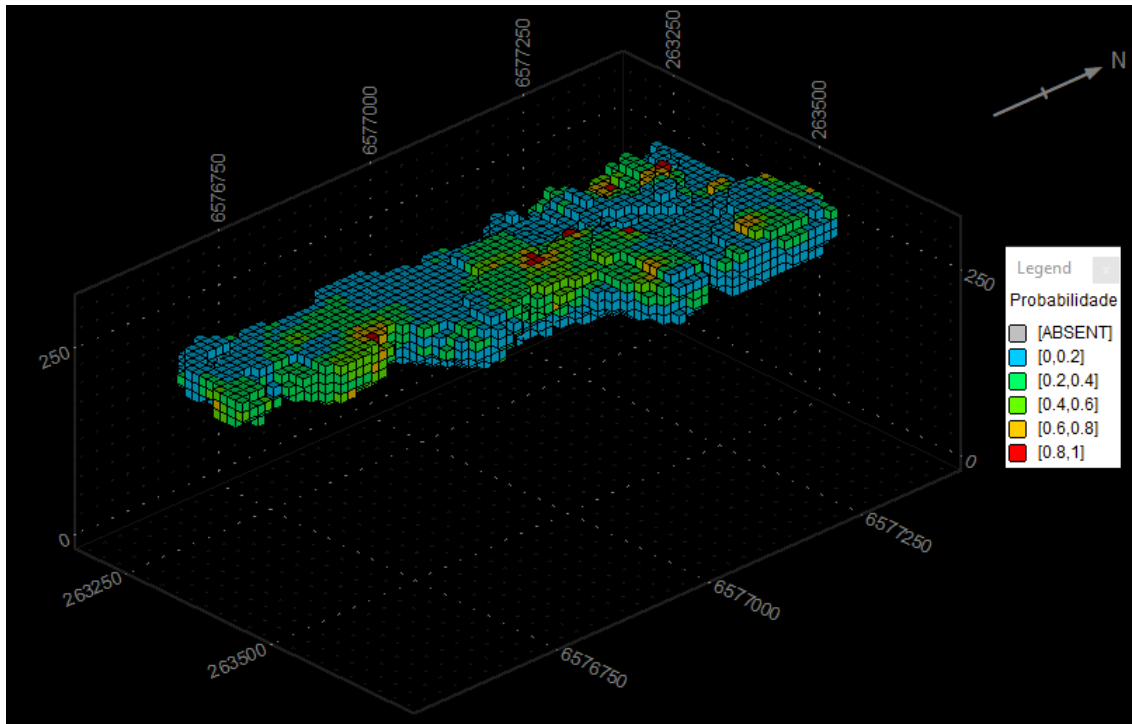
As Figura 84 a Figura 86 mostram os modelos de probabilidade para a variável RQD no conglomerado.

Figura 84 - Modelo de probabilidade para o indicador 1 e 2, respectivamente, da variável RQD no conglomerado



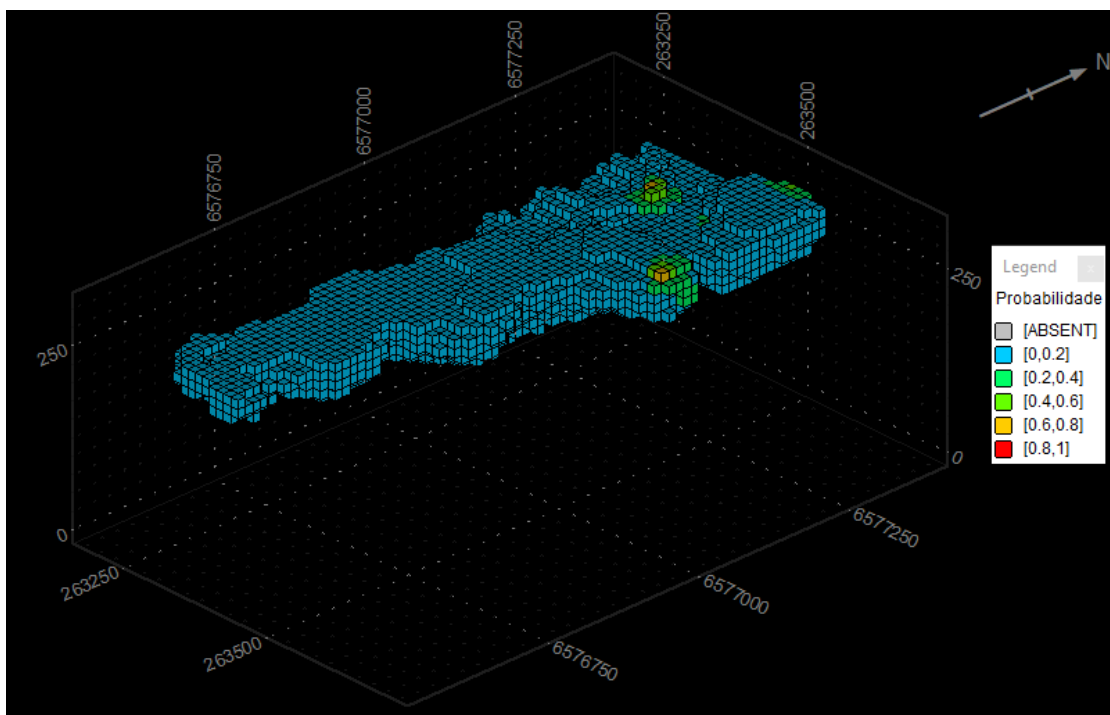
Fonte - Autoria Própria

Figura 85 - Modelo de probabilidade para o indicador 3 e 4, respectivamente, da variável RQD no conglomerado



Fonte - Autoria Própria

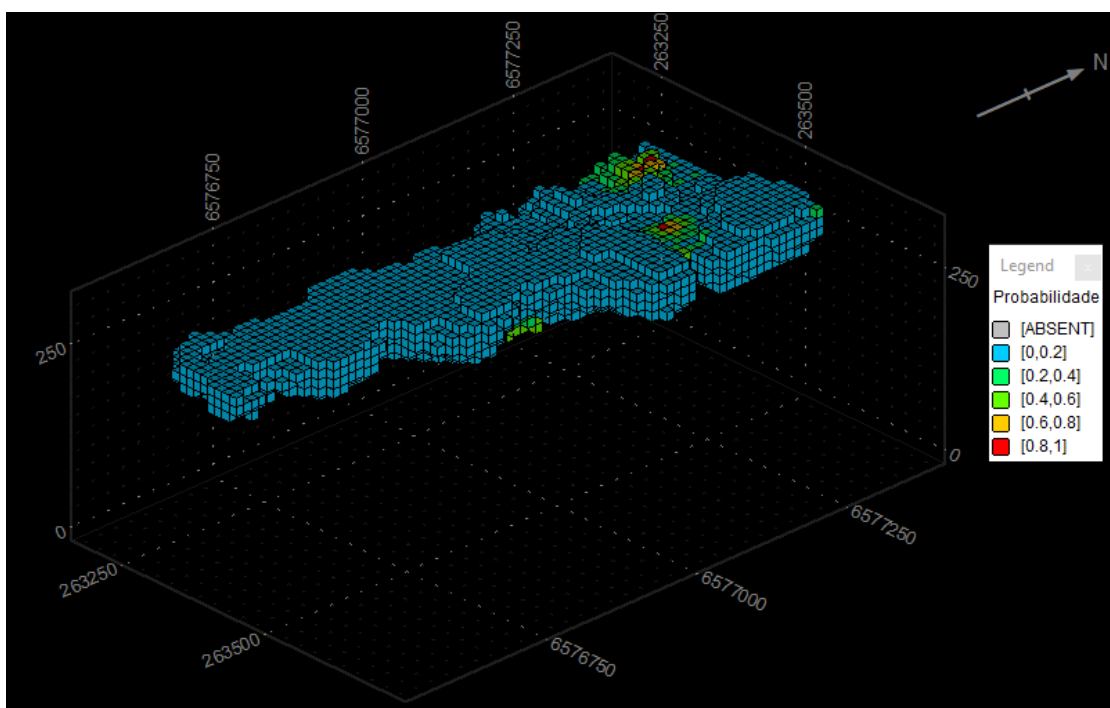
Figura 86 - Modelo de probabilidade para o indicador 5 da variável ESP no conglomerado



Fonte - Autoria Própria

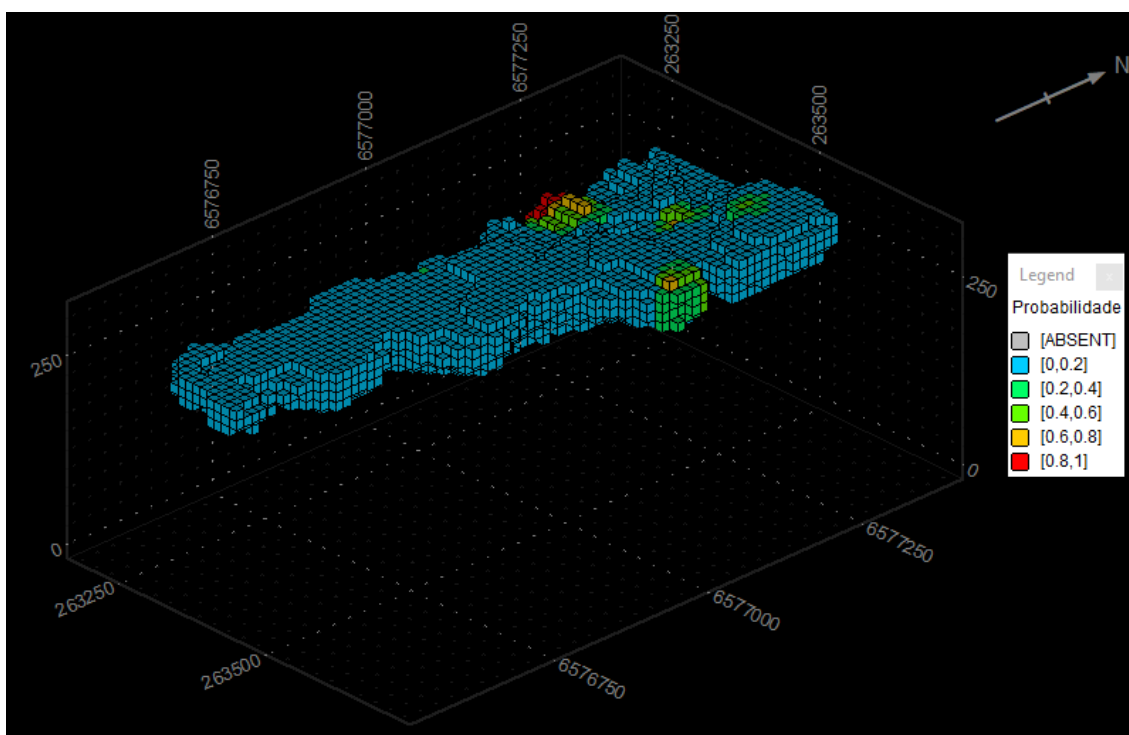
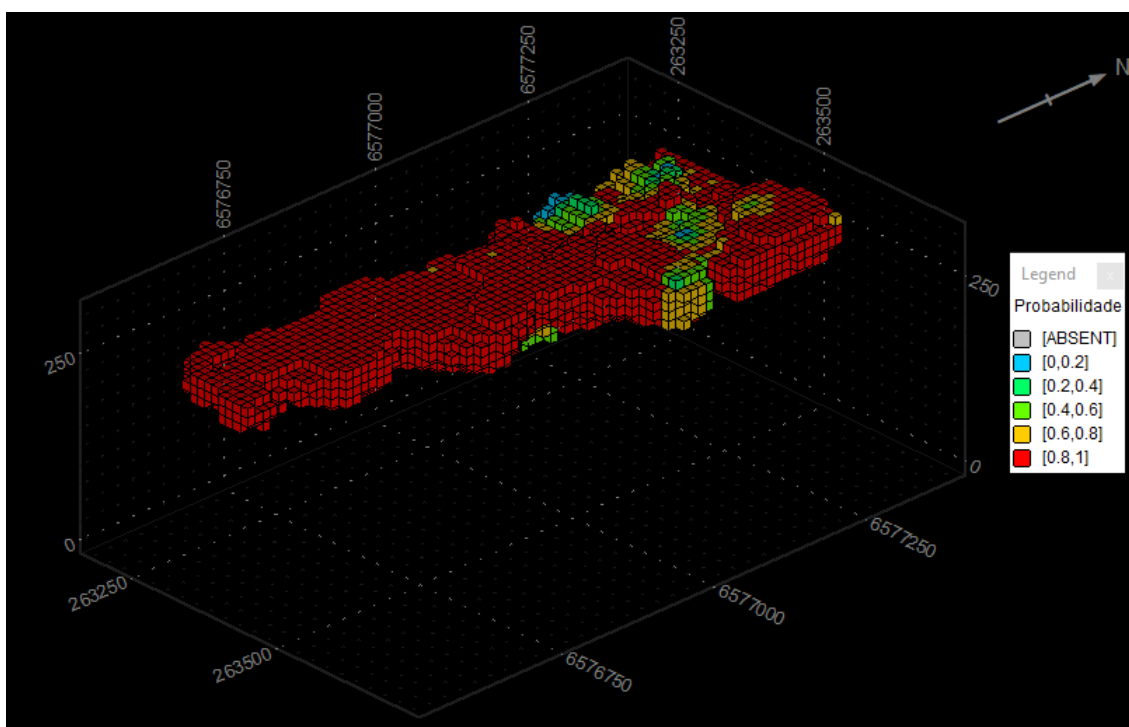
As Figura 87 e Figura 88 mostram os modelos de probabilidade para a variável RUG no conglomerado.

Figura 87 - Modelo de probabilidade para o indicador 3 da variável RUG no conglomerado



Fonte - Autoria Própria

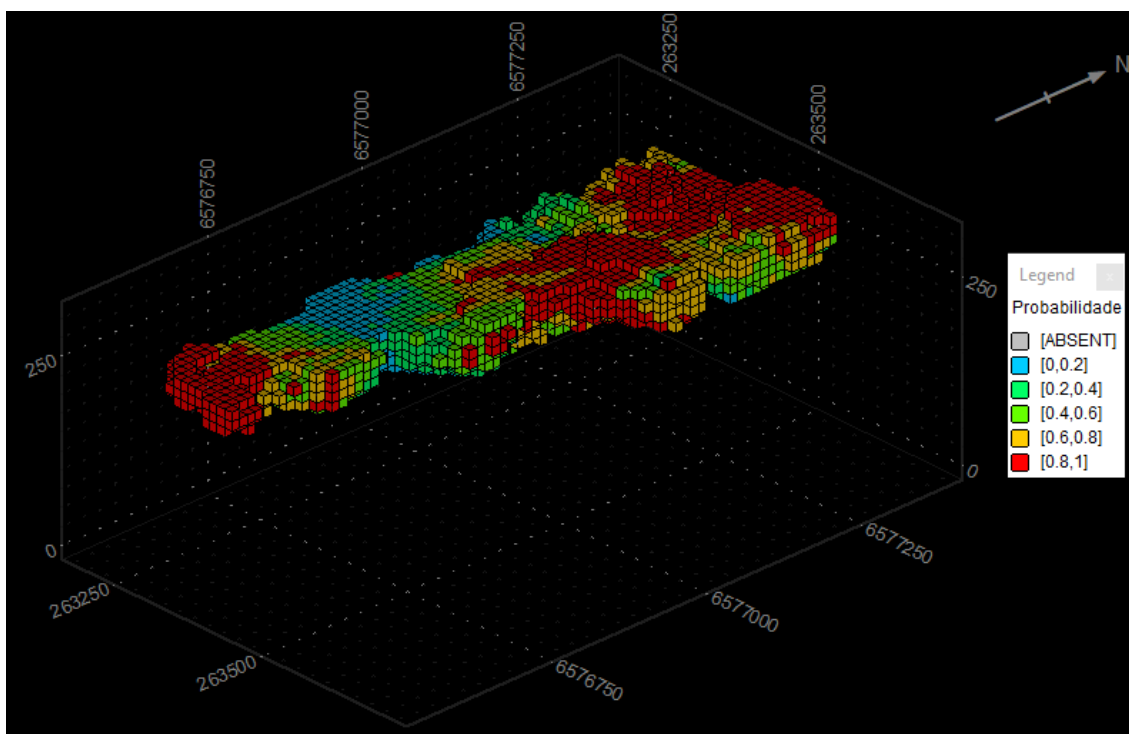
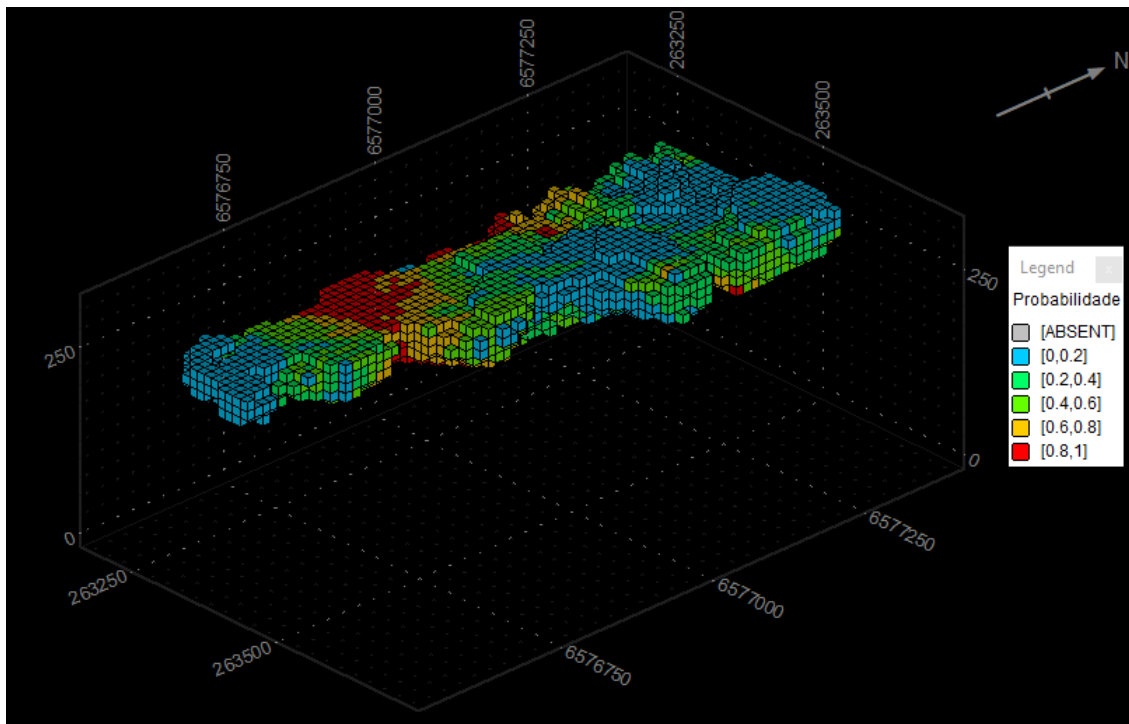
Figura 88 - Modelo de probabilidade para o indicador 4 e 5, respectivamente, da variável RUG no conglomerado



Fonte - Autoria Própria

A Figura 89 mostram os modelos de probabilidade para a variável UCS no conglomerado.

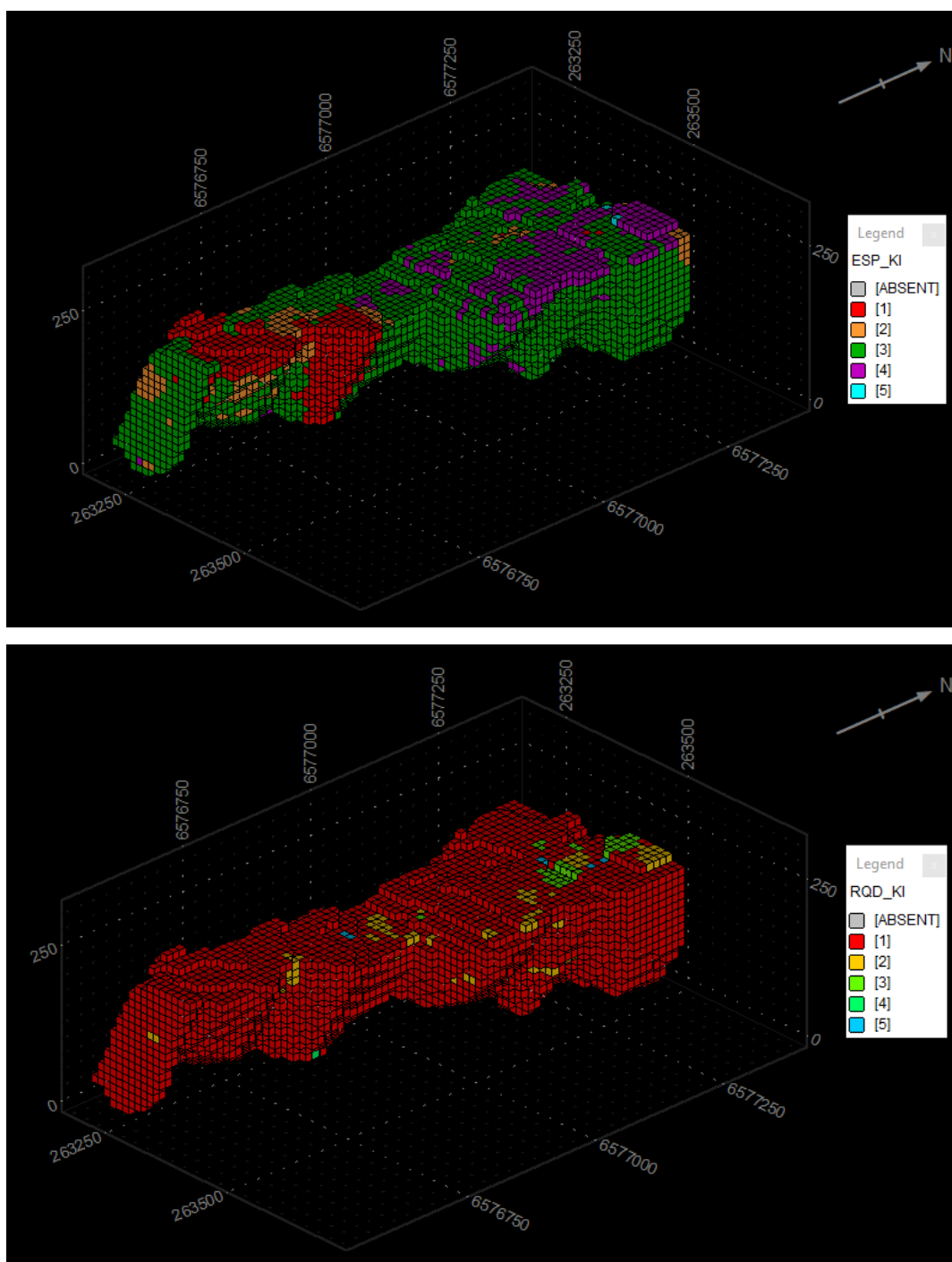
Figura 89 - Modelo de probabilidade para o indicador 4 e 5, respectivamente, da variável UCS no conglomerado



Fonte - Autoria Própria

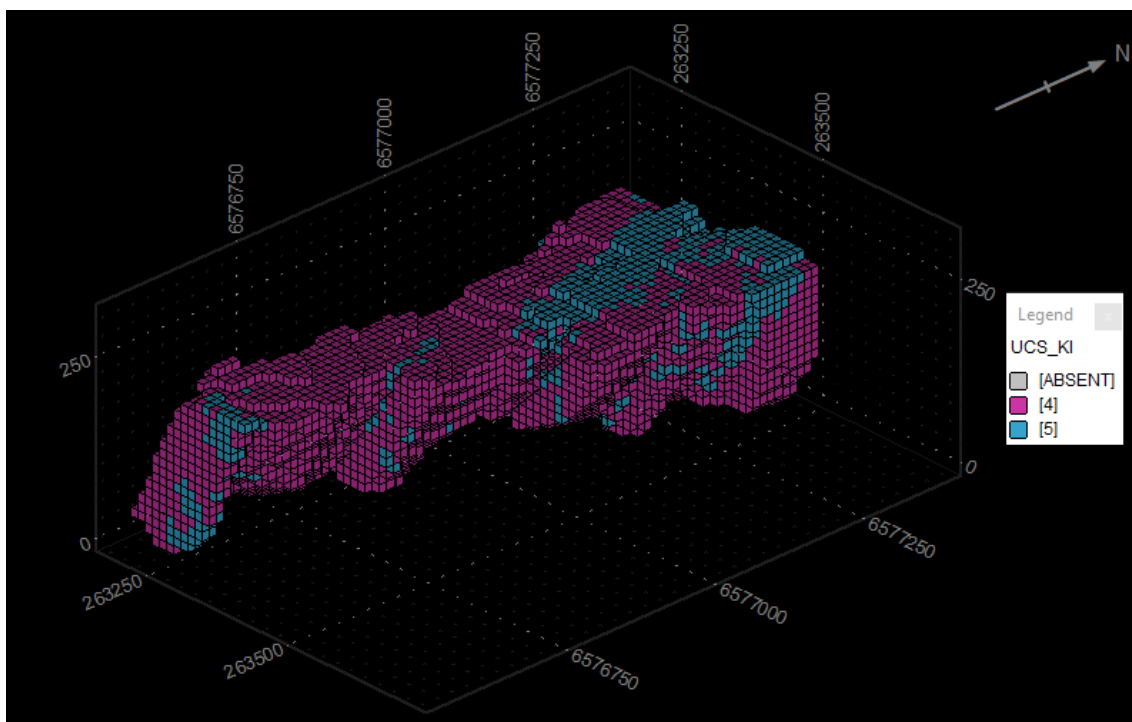
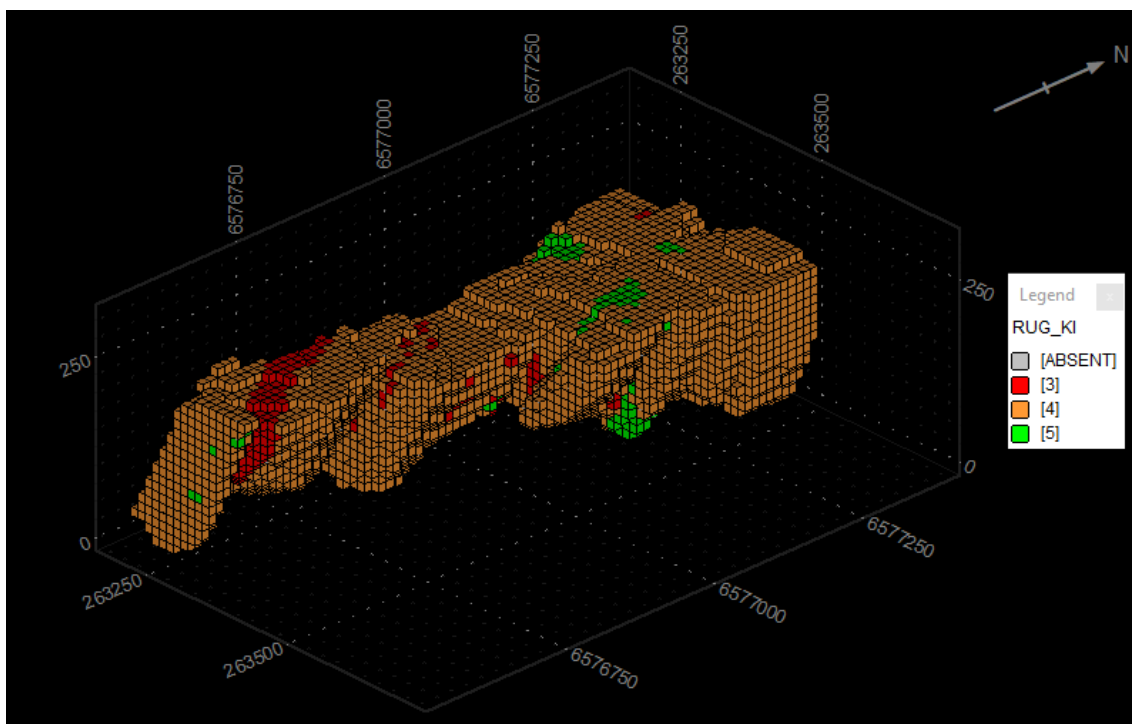
Para a transformação do modelo de probabilidade para um modelo com as classes do espaçamento definidas, foi escolhido que a classe com a maior probabilidade no bloco seria utilizada para definir a classe. Para exemplificar, um bloco do modelo RQD com 70% de ser classe 1, 15% de ser classe 2, 10% de ser classe 3, 3% de ser classe 4 e 2% de ser classe 5, será definido como um bloco de classe 1. As Figura 90 e Figura 91 mostram os modelos finais para o arenito inferior.

Figura 90 - Modelo final para as variáveis ESP e RQD, respectivamente, para o arenito inferior



Fonte - Autoria Própria

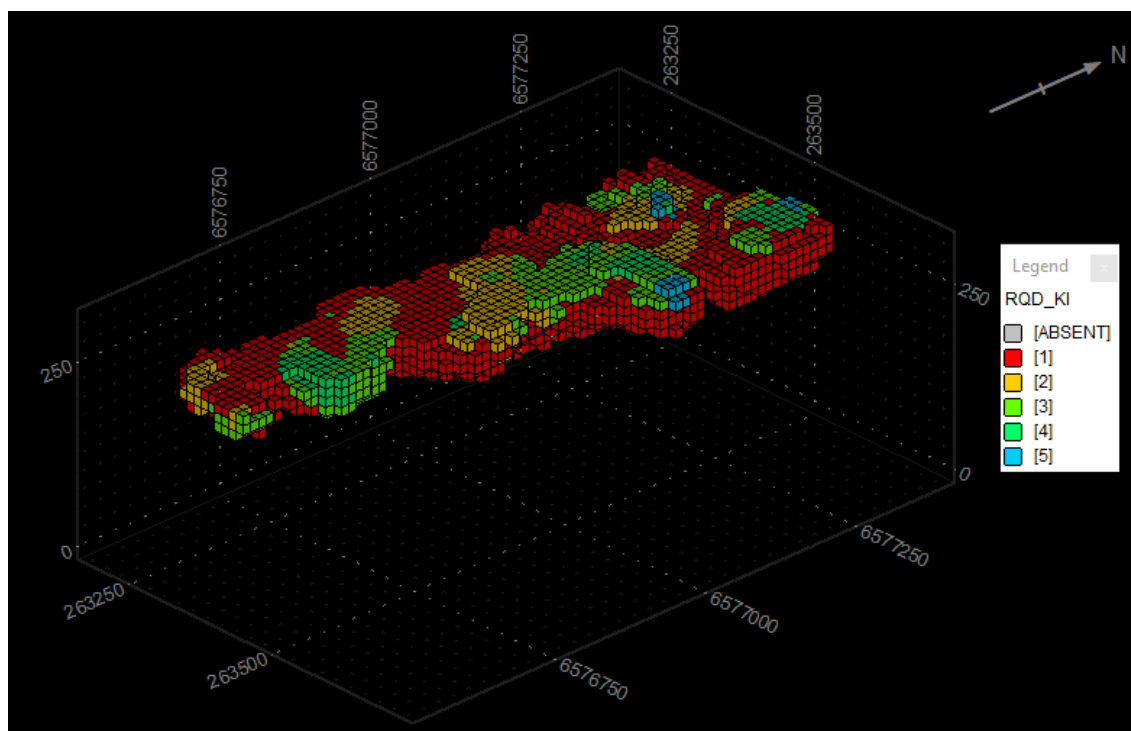
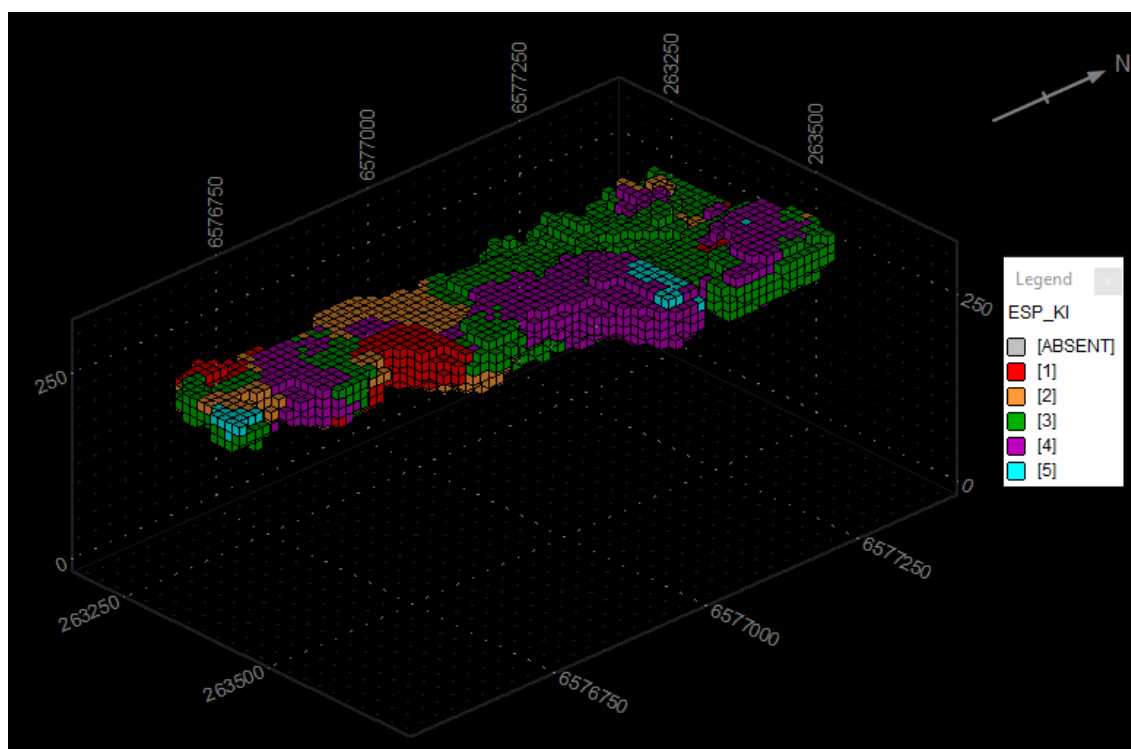
Figura 91 - Modelo final para as variáveis RUG e UCS, respectivamente, para o arenito inferior



Fonte - Autoria Própria

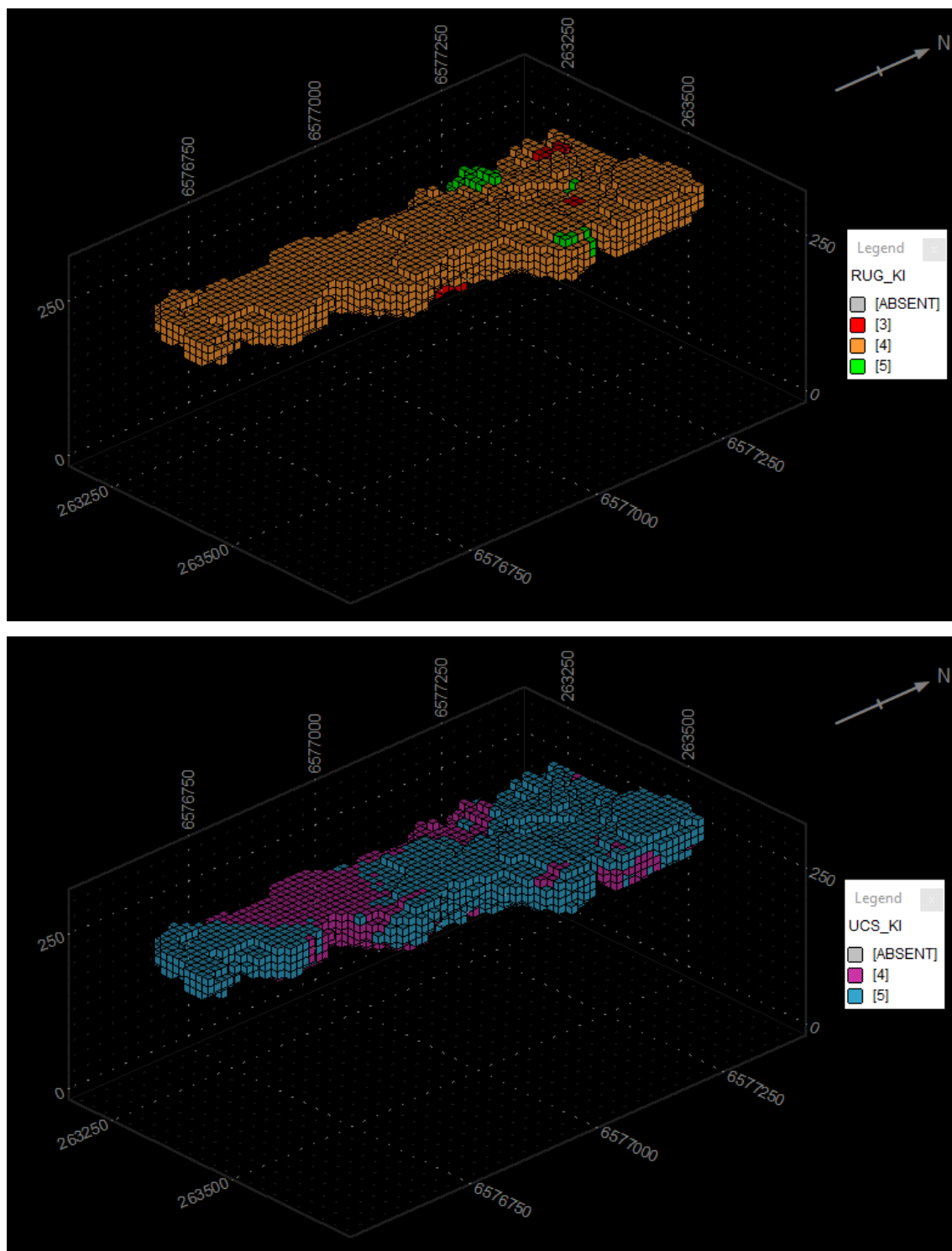
As Figura 92 e Figura 93 mostram os modelos finais para o conglomerado.

Figura 92 - Modelo final para as variáveis ESP e RQD, respectivamente, para o conglomerado



Fonte - Autoria Própria

Figura 93 - Modelo final para as variáveis RUG e UCS, respectivamente, para o conglomerado



Fonte - Autoria Própria

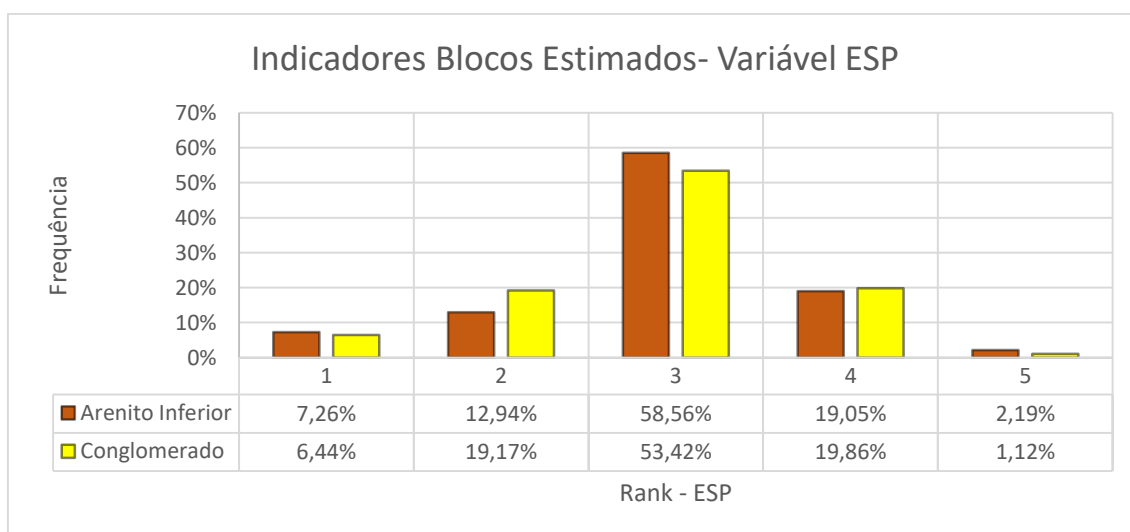
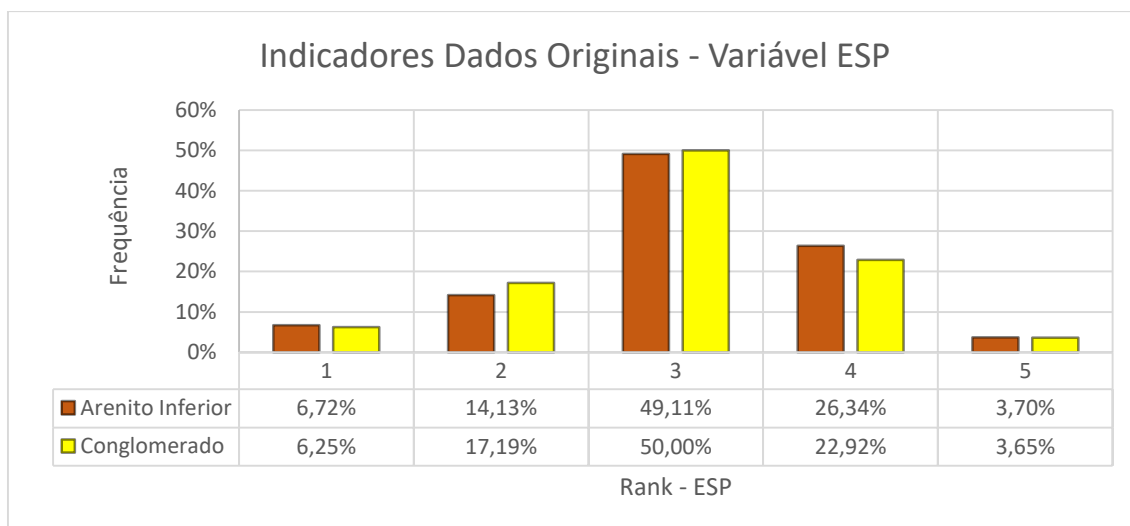
Após a criação dos modelos finais foi possível avançar para a aplicação da classificação RMR nos modelos, obtendo as classes geomecânicas dos blocos. Porém foi necessário validar os modelos para que o resultado final fosse o mais correto possível.

5.2.2.2 Validação da estimativa

Comparar diferentes métodos de estimativas realizados com os dados verdadeiros é muito útil para se entender as diferentes maneiras de se aproximar do resultado verdadeiro. Entretanto, nas situações práticas, não se possui o banco de dados exaustivo para realizar tais comparações (Isaaks e Srivastava, 1989).

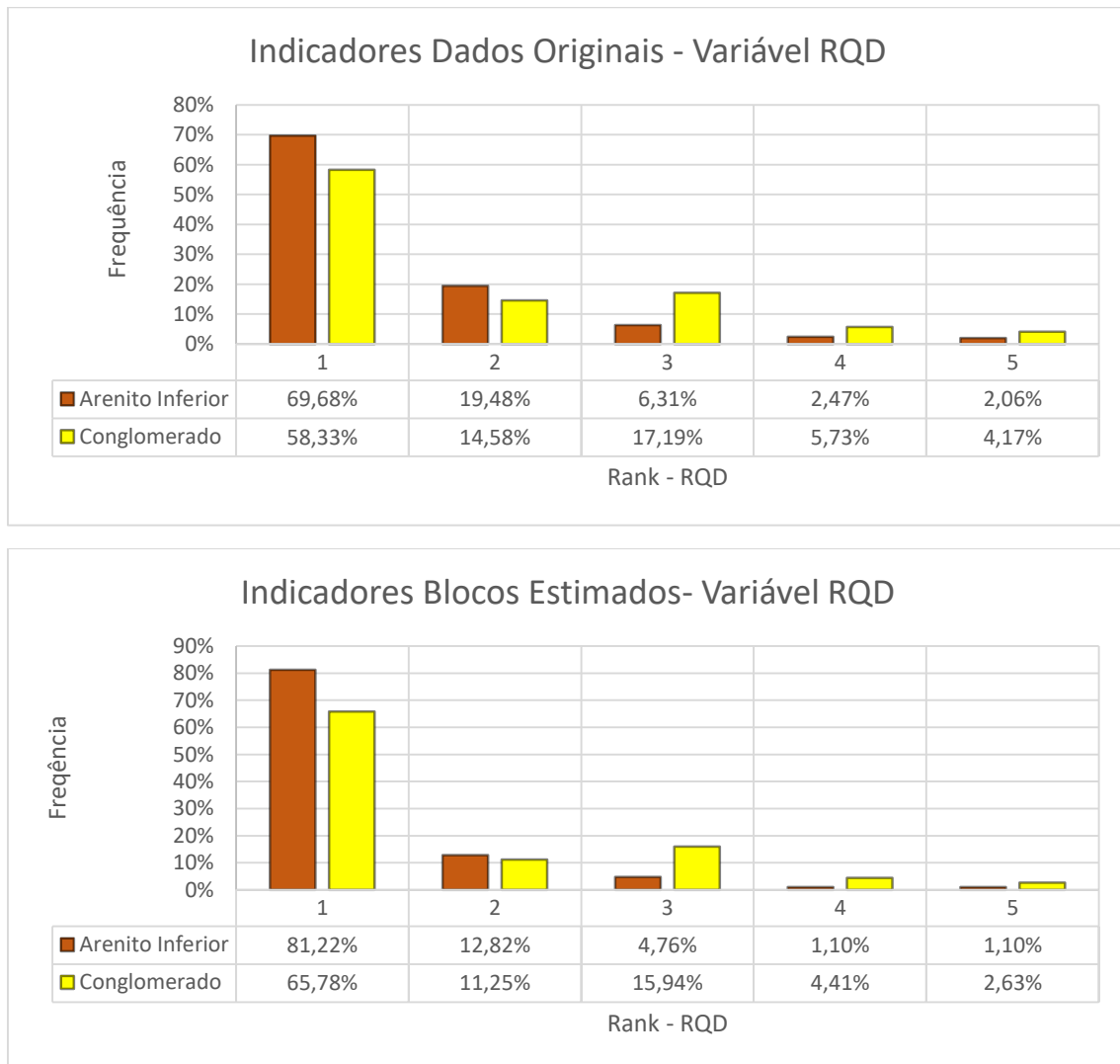
Os métodos de validação da estimativa foram: comparação das proporções dos histogramas dos dados categóricos originais e dos blocos estimado pela krigagem dos indicadores e a validação visual através de seções mostrando os modelos de blocos estimados e os furos de sondagens. As Figura 94 a Figura 97 mostram os histogramas gerados.

Figura 94 - Histograma dos dados originais e blocos estimados da variável ESP



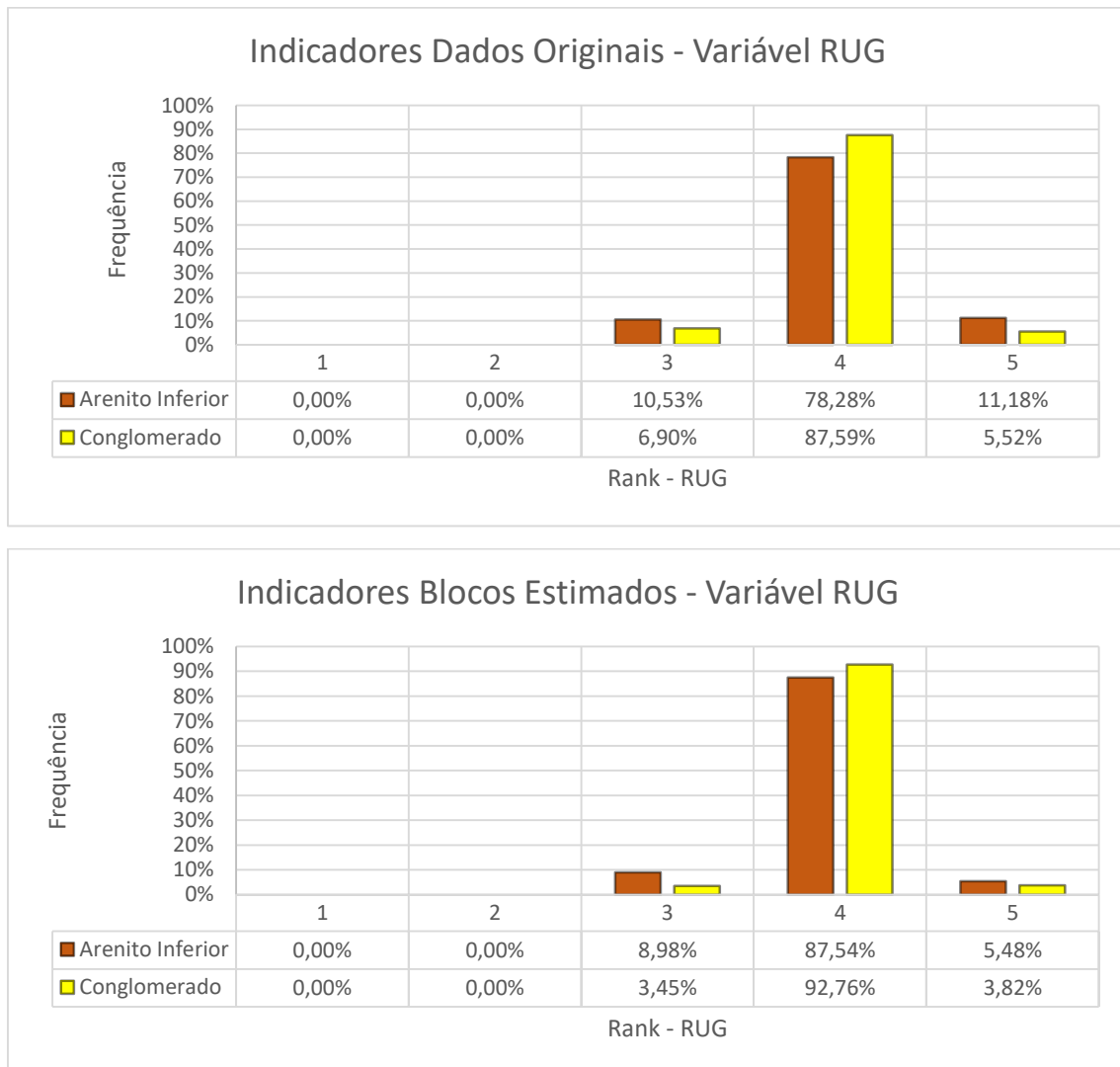
Fonte - Autoria Própria

Figura 95 - Histograma dos dados originais e blocos estimados da variável RQD



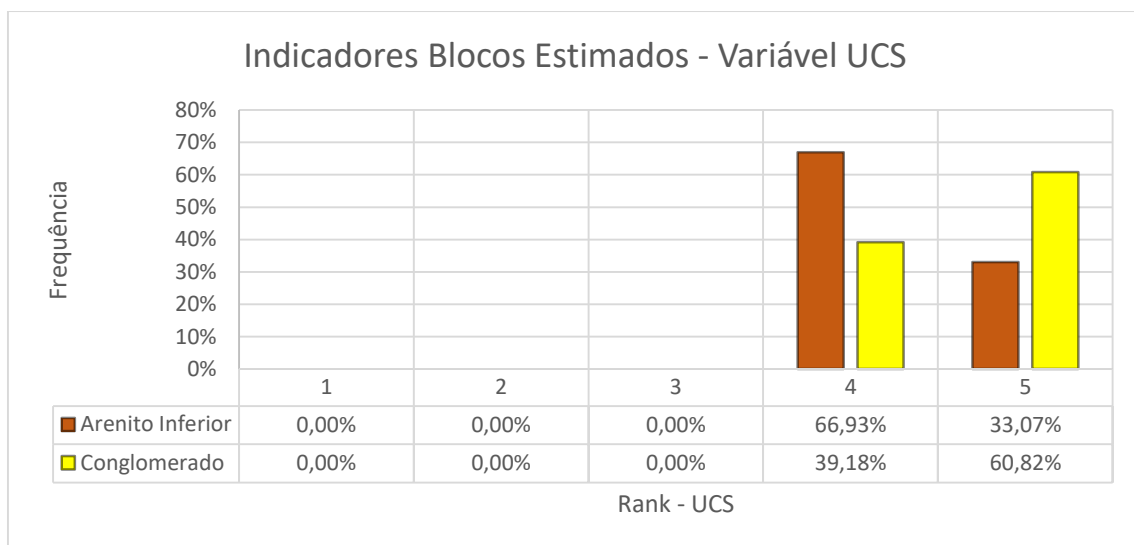
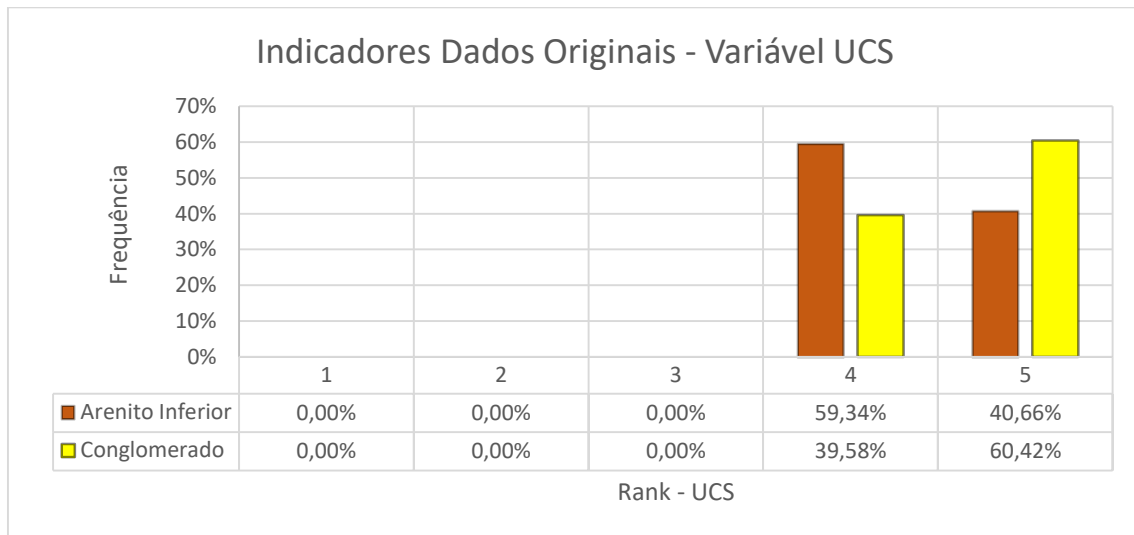
Fonte - Autoria Própria

Figura 96 - Histograma dos dados originais e blocos estimados da variável RUG



Fonte - Autoria Própria

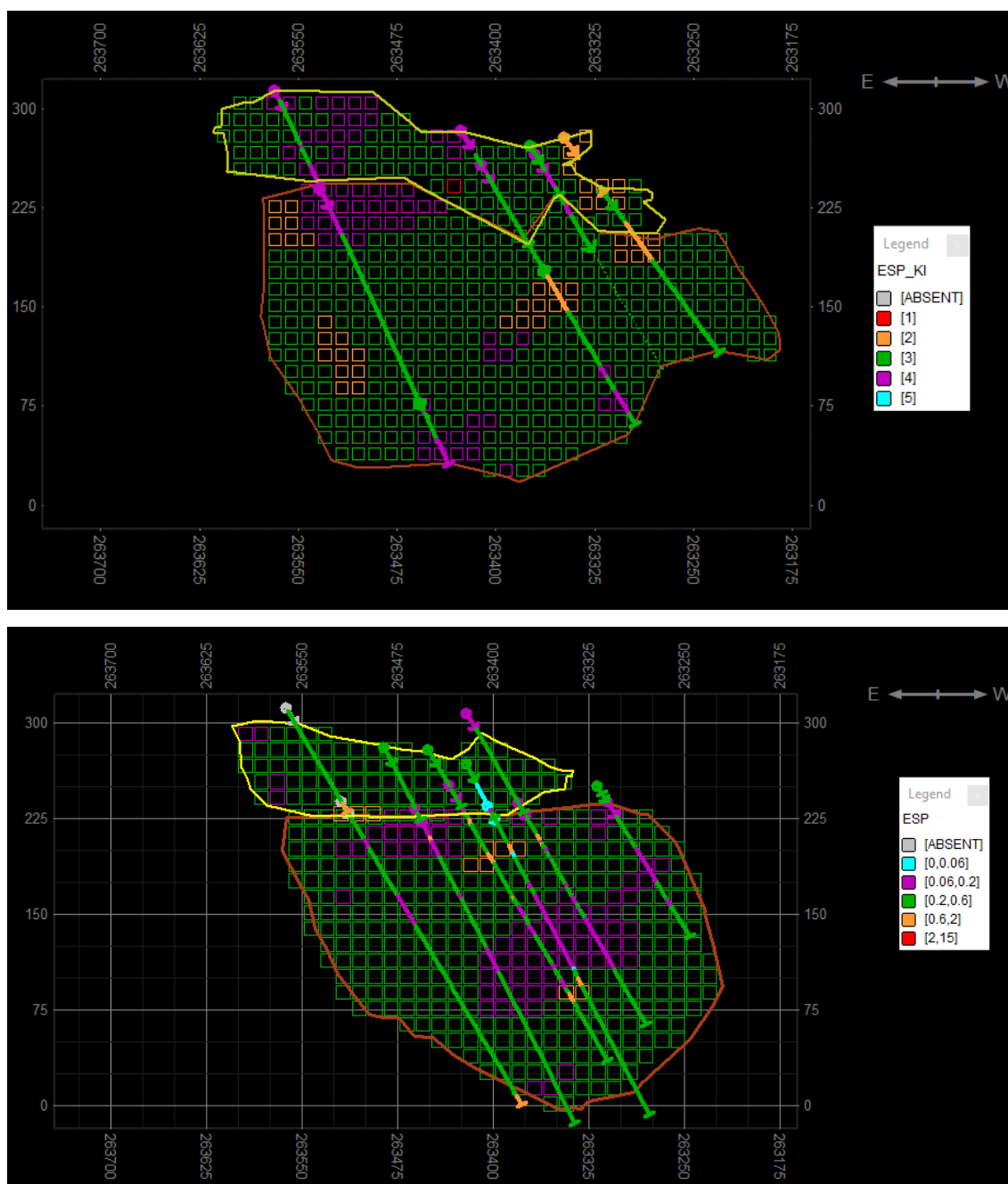
Figura 97 - Histograma dos dados originais e blocos estimados da variável UCS



Fonte - Autoria Própria

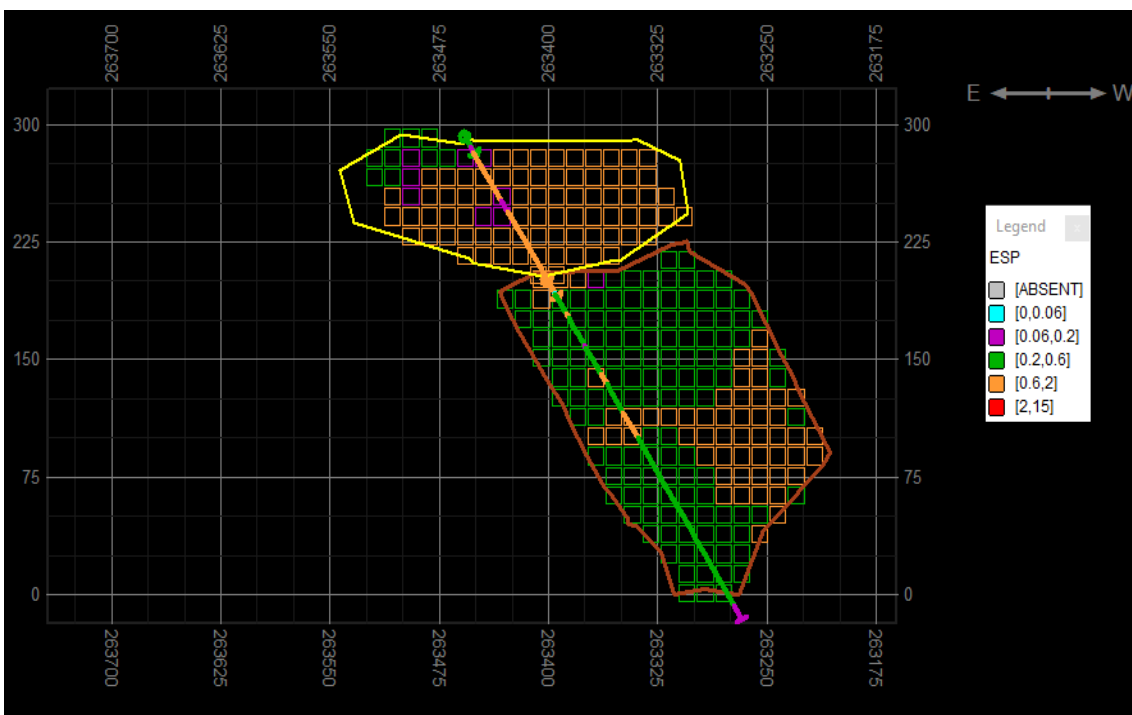
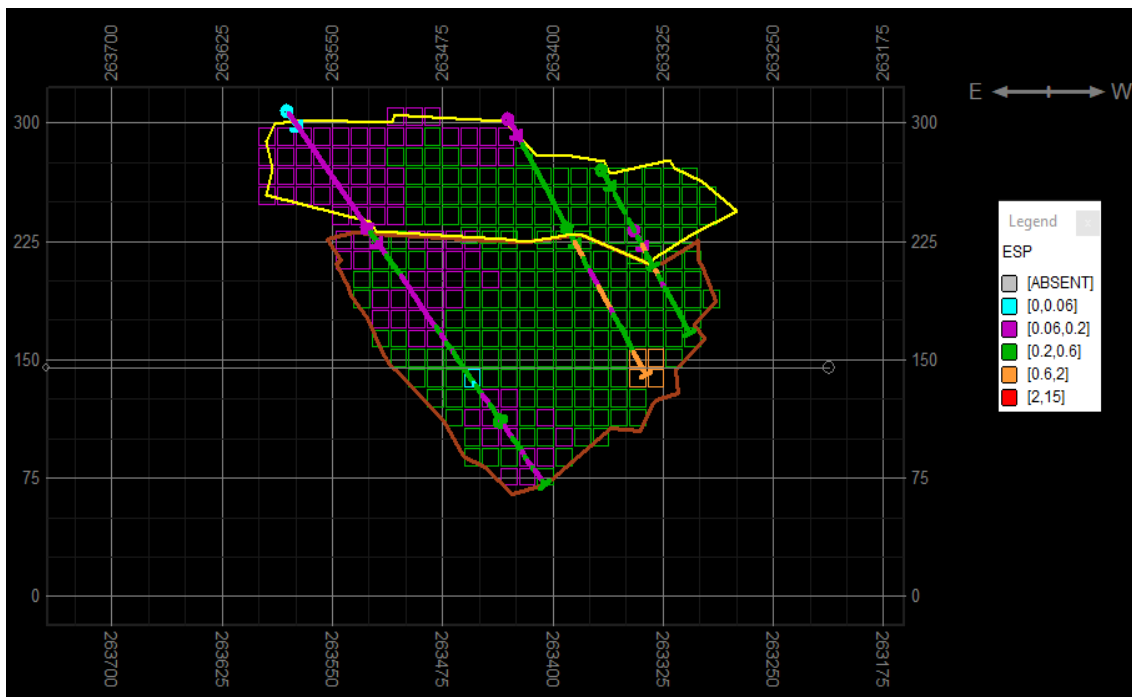
O outro método de validação foi pela criação de seções comparando os modelos de blocos para cada indicador com os furos de sondagem. O conglomerado e o arenito inferior estão indicados, respectivamente, pelas cores amarelo e marrom. No total foram gerados de 5 a 6 seções ao longo do modelo para que a validação fosse a mais completa possível. As Figura 98 a Figura 100 mostram as 6 seções para os modelos da variável ESP.

Figura 98 - Seções 1 e 2, respectivamente, para o modelo do ESP



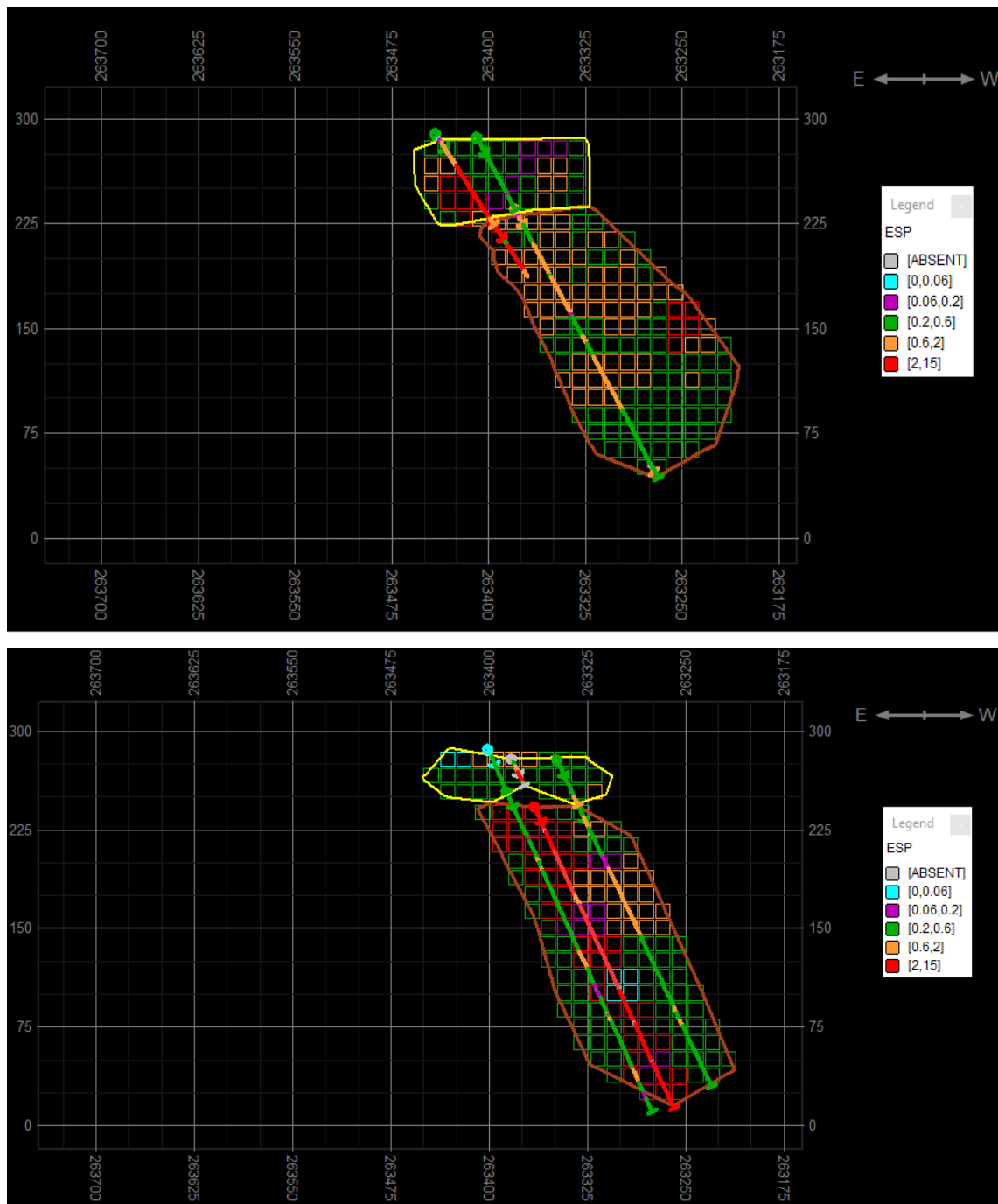
Fonte - Autoria Própria

Figura 99 - Seções 3 e 4, respectivamente, para o modelo do ESP



Fonte - Autoria Própria

Figura 100 - Seções 5 e 6, respectivamente, para o modelo do ESP



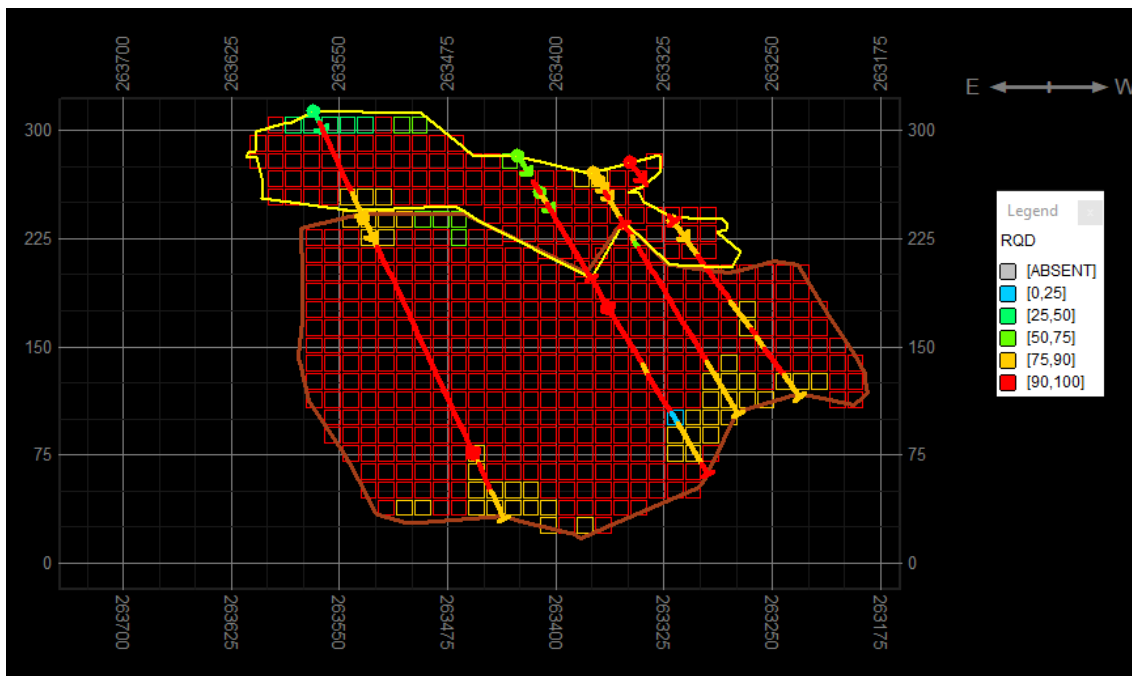
Fonte - Autoria Própria

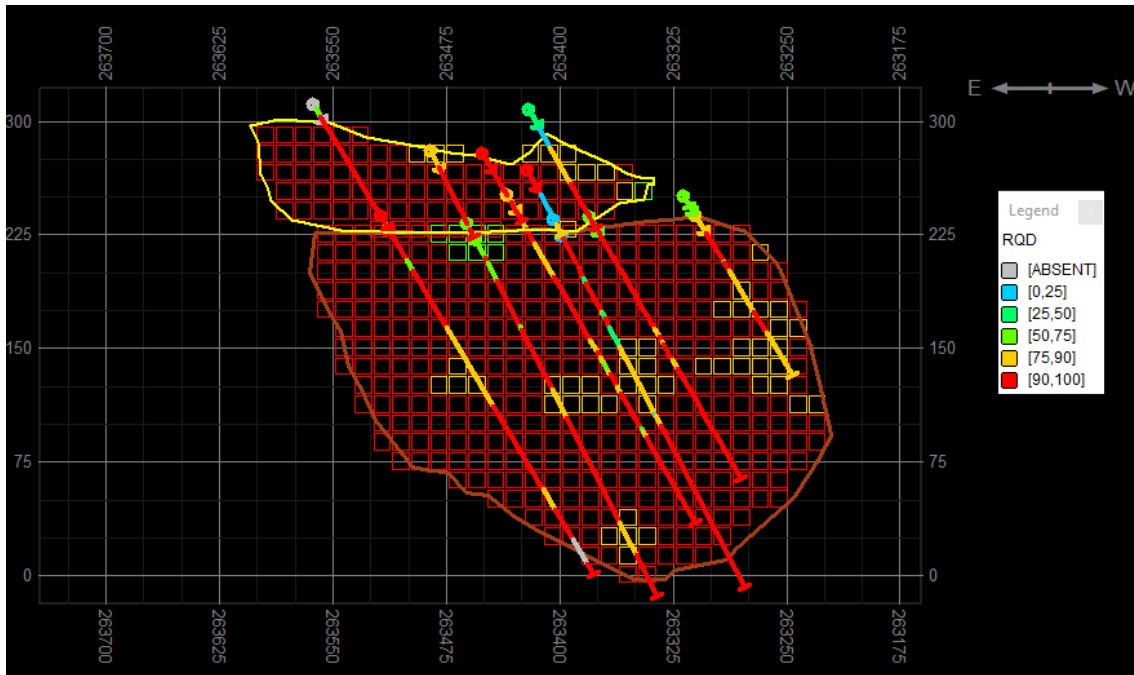
As

Figura 101 σ

Figura 103 mostram as 6 seções para os modelos da variável RQD.

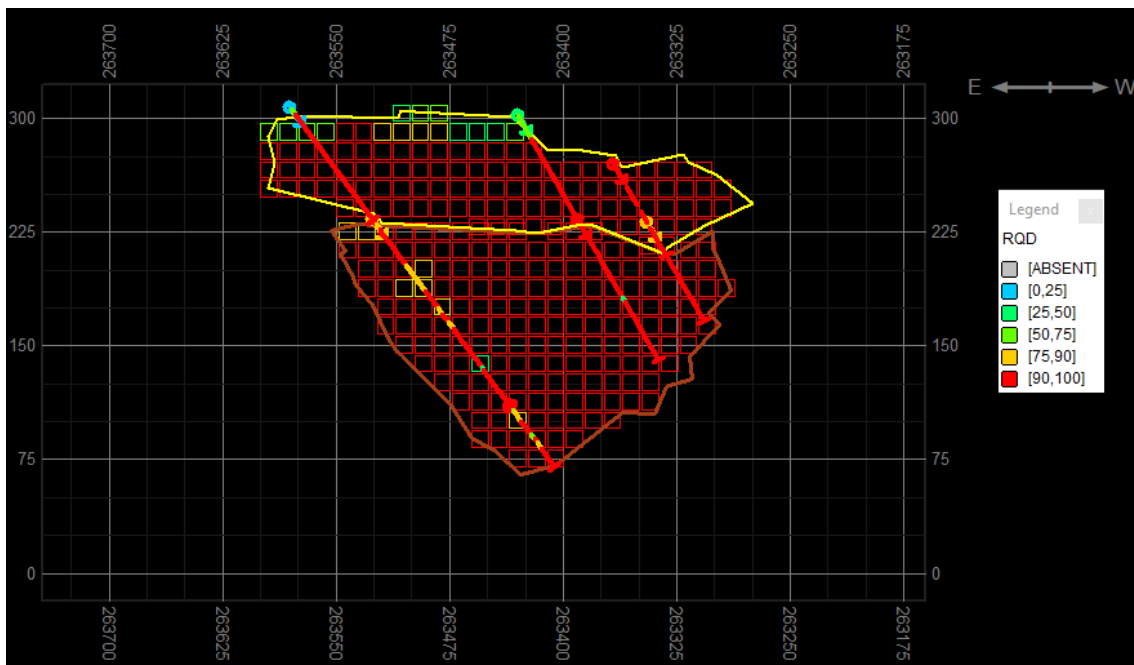
Figura 101 - Seções 1 e 2, respectivamente, para o modelo do RQD

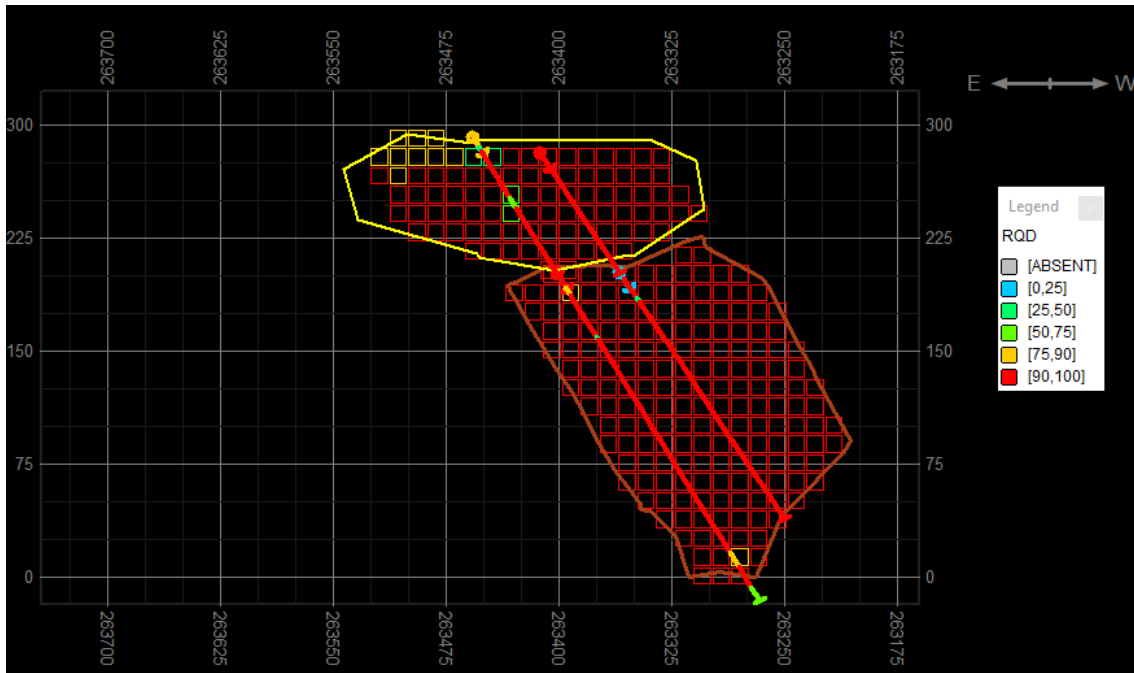




Fonte - Autoria Própria

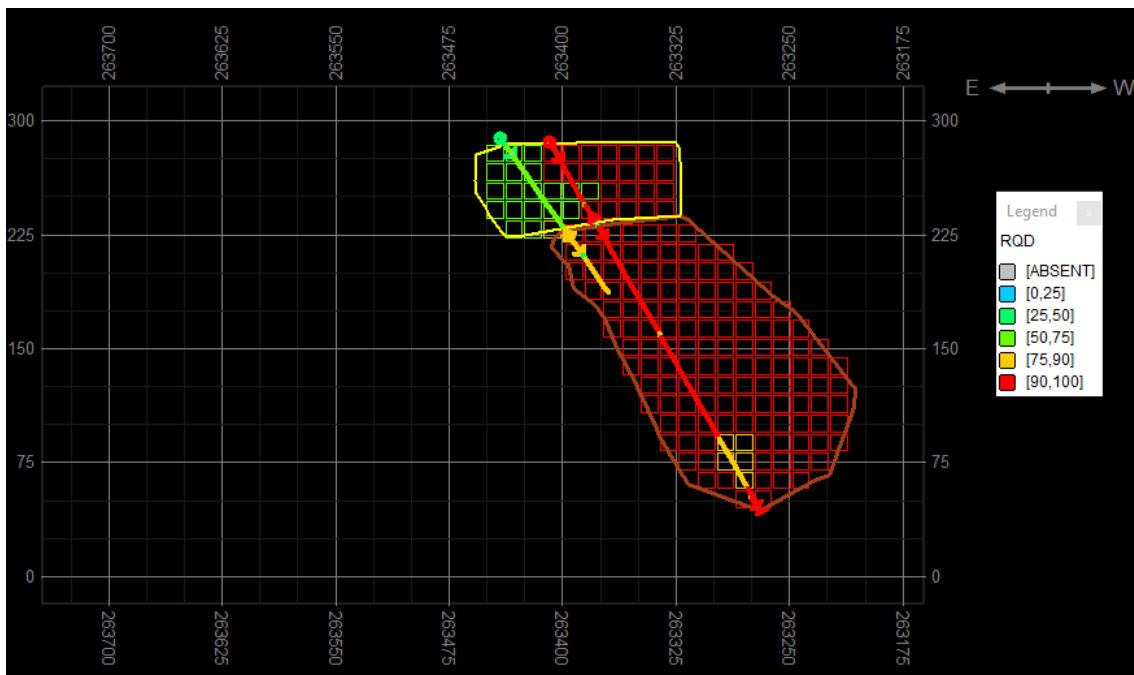
Figura 102 - Seções 3 e 4, respectivamente, para o modelo do RQD

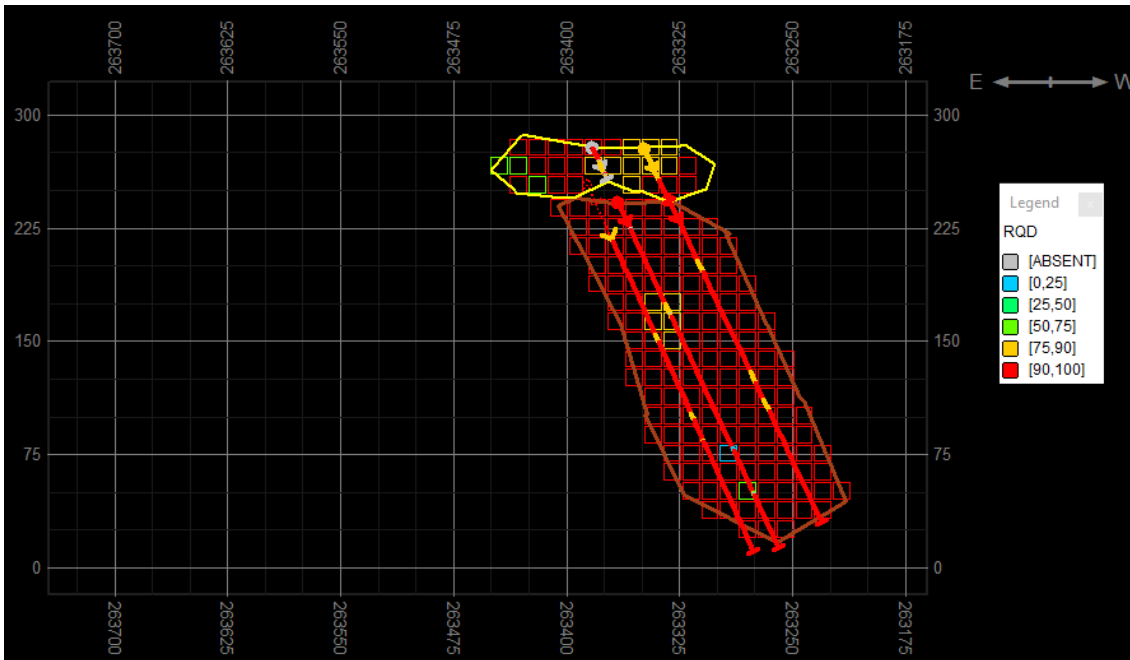




Fonte - Autoria Própria

Figura 103 - Seções 5 e 6, respectivamente, para o modelo do RQD

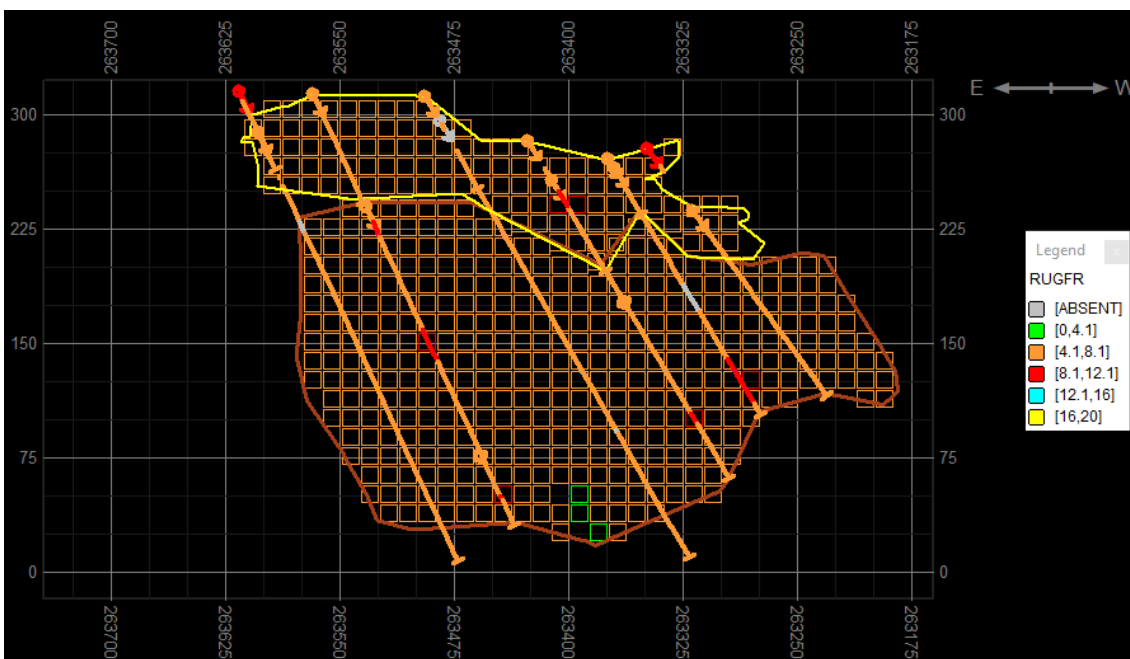


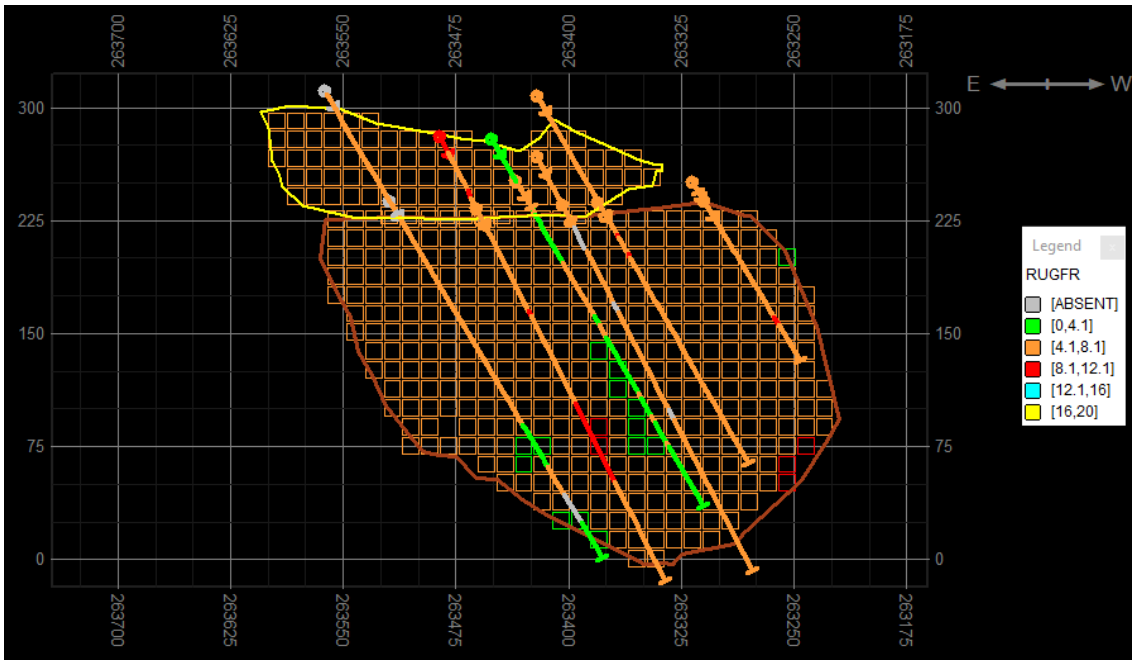


Fonte - Autoria Própria

As Figura 104 a Figura 106 mostram as 6 seções para os modelos da variável RUG.

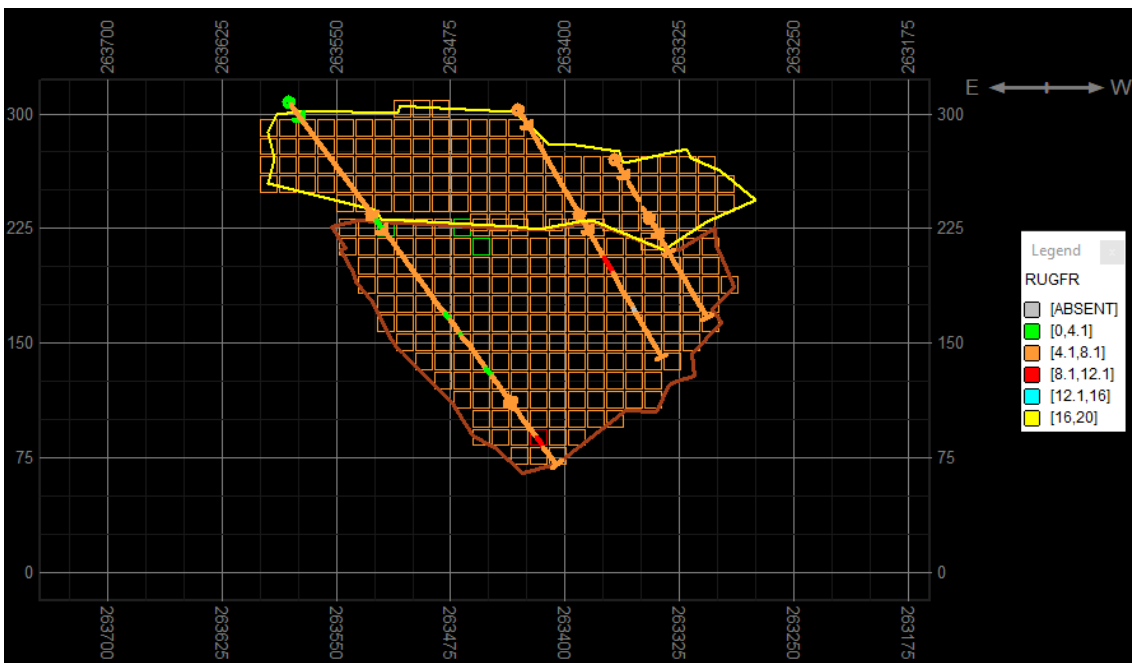
Figura 104 - Seções 1 e 2, respectivamente, para o modelo do RUG

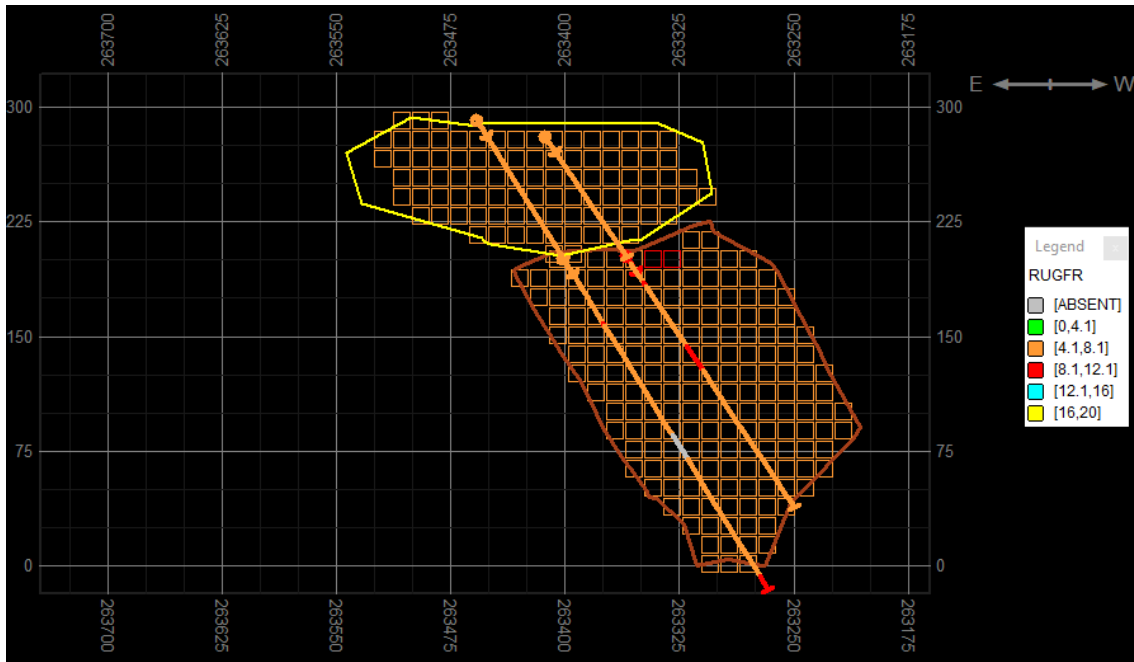




Fonte - Autoria Própria

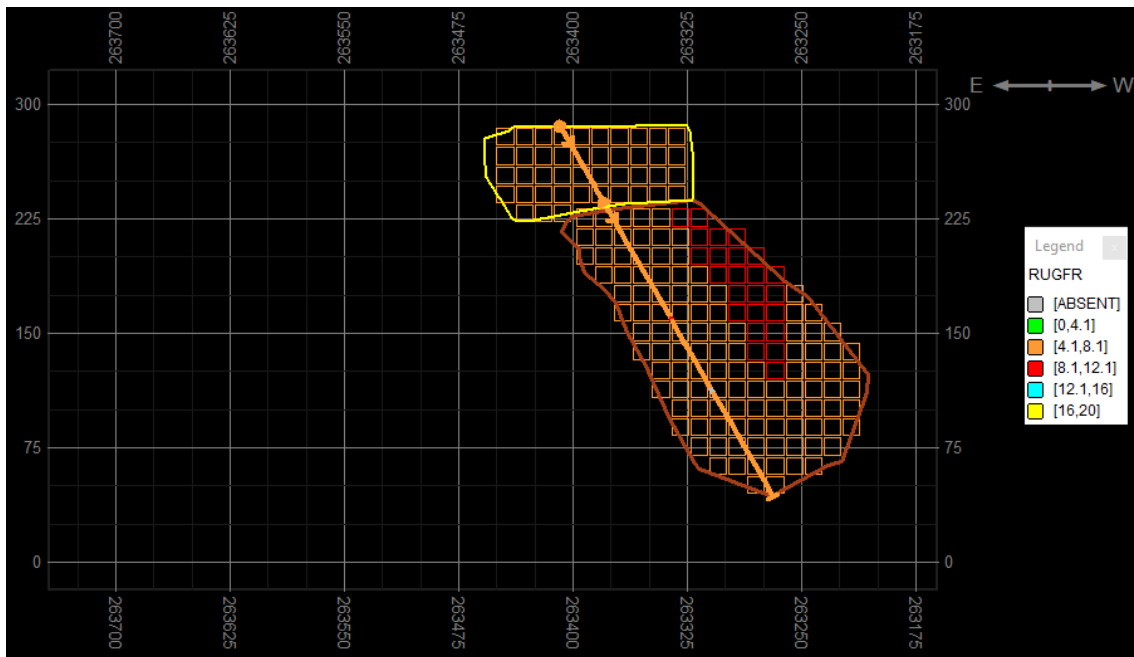
Figura 105 - Seções 3 e 4, respectivamente, para o modelo do RUG





Fonte - Autoria Própria

Figura 106 - Seção 5 para o modelo do RUG

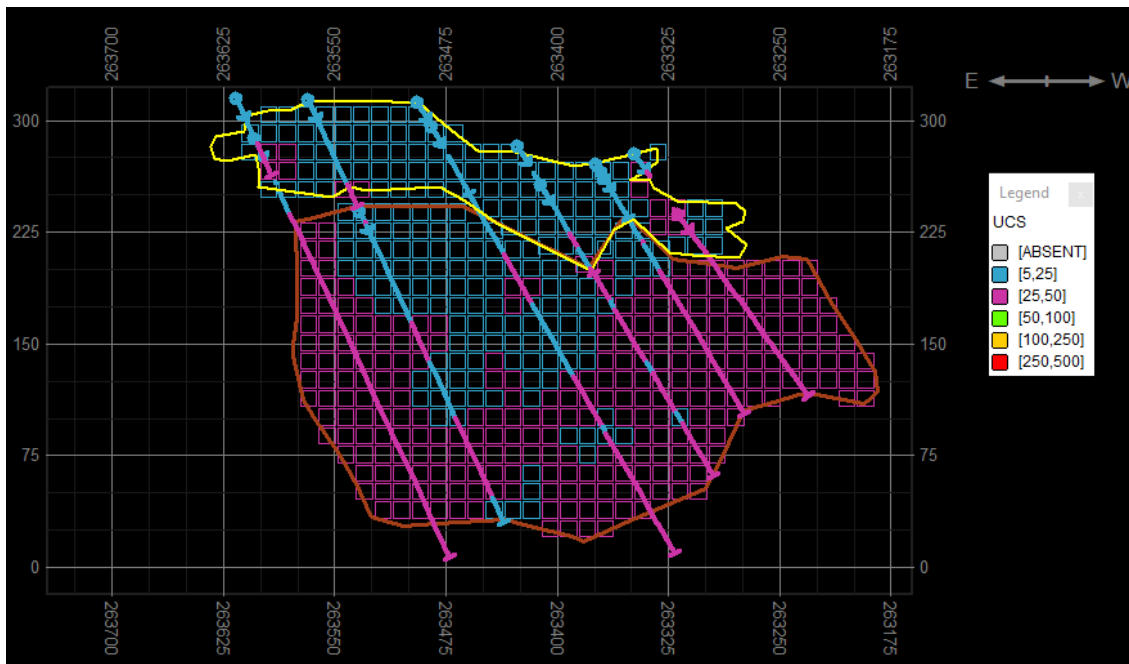


Fonte - Autoria Própria

As Figura 107 a

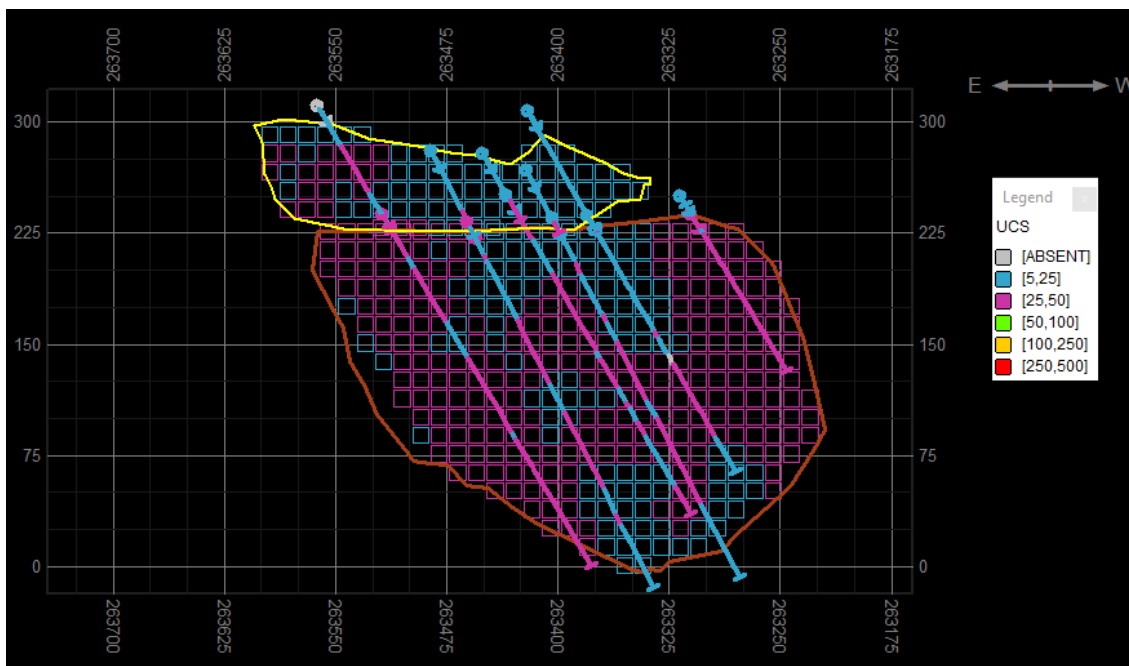
Figura 109 mostram as 6 seções para os modelos da variável UCS.

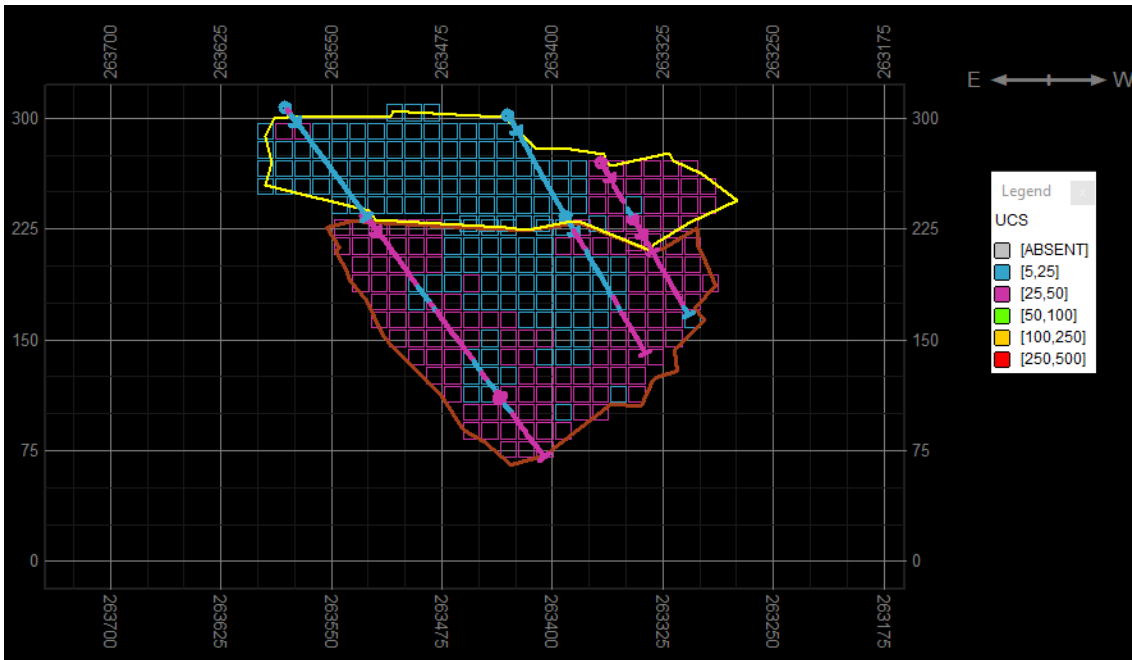
Figura 107 – Seção 1 para o modelo do UCS



Fonte - Autoria Própria

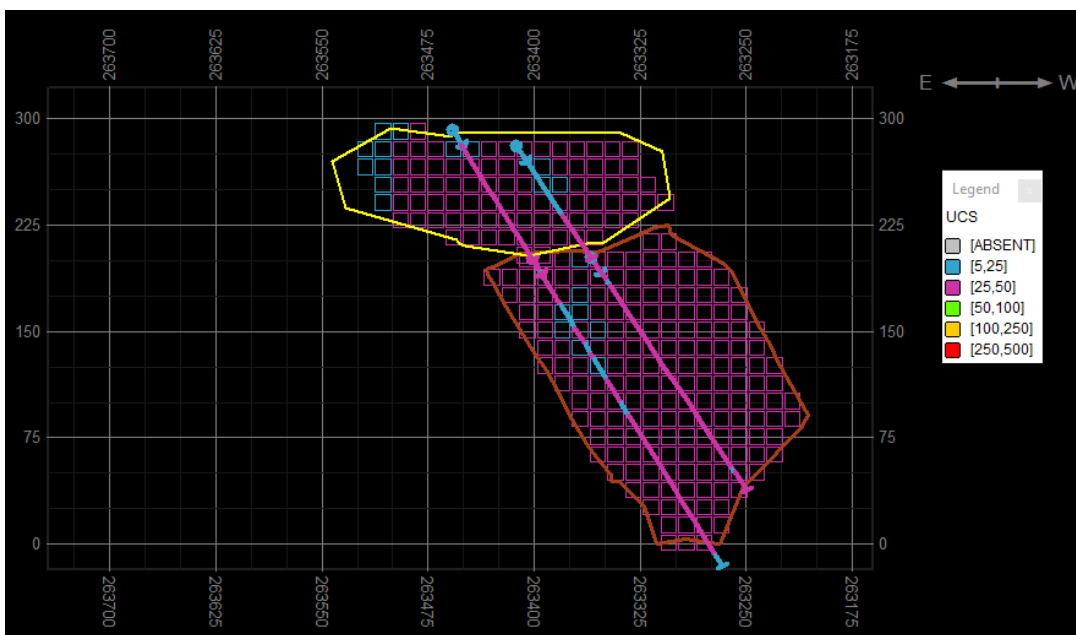
Figura 108 - Seções 2 e 3, respectivamente, para o modelo do UCS

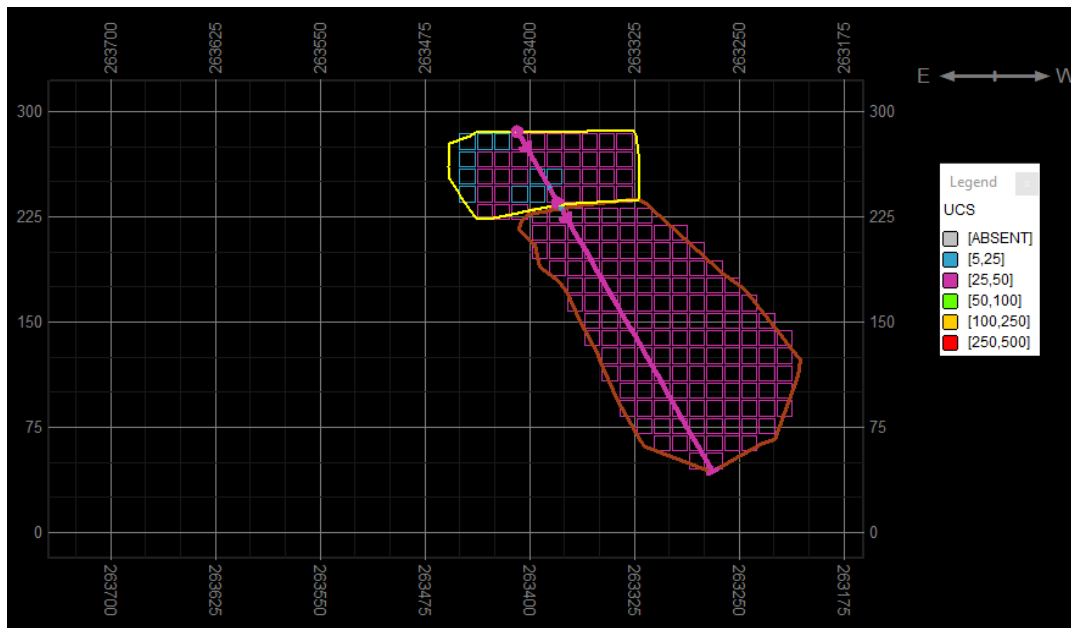




Fonte - Autoria Própria

Figura 109 - Seções 4 e 5, respectivamente, para o modelo do UCS





Fonte - Autoria Própria

A validação pela comparação entre os histogramas dos dados originais e os histogramas dos modelos de blocos estimados pela krigagem dos indicadores, mostraram uma baixa variação entre as porcentagens e mantiveram próximas, as proporções de cada classe de indicadores nas litologias estudadas. A validação pelas seções mostrou que os modelos de blocos apresentaram comportamento adequado em relação aos furos de sondagens originais, concluindo assim que os modelos estavam prontos para aplicar a classificação RMR nos modelos geotécnicos.

Capítulo 6

6 CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DOS BLOCOS

Este capítulo tem por objetivo implementar a metodologia RMR nos modelos de blocos para se obter informações de qualidade de maciço. Como citado nos capítulos anteriores, o RMR, por não ser uma variável aditiva deve ter seus parâmetros estimados individualmente a fim de se ter um resultado mais preciso. Como apresentado no Capítulo 5, as variáveis foram estimadas e validadas. Este último processo mostrou que as variáveis se comportaram de forma satisfatória e as médias permaneceram dentro de um intervalo de confiança (variação de 15%).

6.1 APLICAÇÃO DO RMR AO MODELO ESTIMADO

A utilização do sistema RMR segue a Figura 6 apresentada no capítulo 2, porém para aplica-la foi necessário criar um sistema de classificação digital no programa *Studio 3 Datamine®* e assim carimbar os blocos de acordo com seus ranques. A digitalização do RMR se deu por uma função condicional, onde primeiro se ranqueou as variáveis aplicando valores diferentes dependendo da classe em que se encontrava e posteriormente o somatório destes ranques para definir a classe do maciço rochoso. A função condicional pode ser visualizada pela Figura 110.

Figura 110 - Função condicional para a classificação geomecânica (RMR)

```

SE (RQD_KI=1)
RQD_RMR=20
SE (RQD_KI=2)
RQD_RMR=17
SE (RQD_KI=3)
RQD_RMR=13
SE (RQD_KI=4)
RQD_RMR=8
SE (RQD_KI=5)
RQD_RMR=3
END

SE (ESP_KI=1)
ESP_RMR=20
SE (ESP_KI=2)
ESP_RMR=15
SE (ESP_KI=3)
ESP_RMR=10
SE (ESP_KI=4)
ESP_RMR=8
SE (ESP_KI=5)
ESP_RMR=5
END

SE (UCS_KI=1)
UCS_RMR=15
SE (UCS_KI=2)
UCS_RMR=12
SE (UCS_KI=3)
UCS_RMR=7
SE (UCS_KI=4)
UCS_RMR=4
SE (UCS_KI=5)
UCS_RMR=2
END

SE (RUG_KI=1)
RUG_RMR=30
SE (RUG_KI=2)
RUG_RMR=25
SE (RUG_KI=3)
RUG_RMR=20
SE (RUG_KI=4)
RUG_RMR=10
SE (RUG_KI=5)
RUG_RMR=0
END

AGUA_RMR=10

RMR= RQD_RMR+ESP_RMR+UCS_RMR+RUG_RMR+AGUA_RMR

SE (RMR<21)
Classe=5
SE (RMR<40 AND RMR>21)
Classe=4
SE (RMR<60 AND RMR>41)
Classe=3
SE (RMR<80 AND RMR>61)
Classe=2
SE (RMR<100 AND RMR>81)
Classe=1
END

```

6.2 RESULTADO DA CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DOS BLOCOS

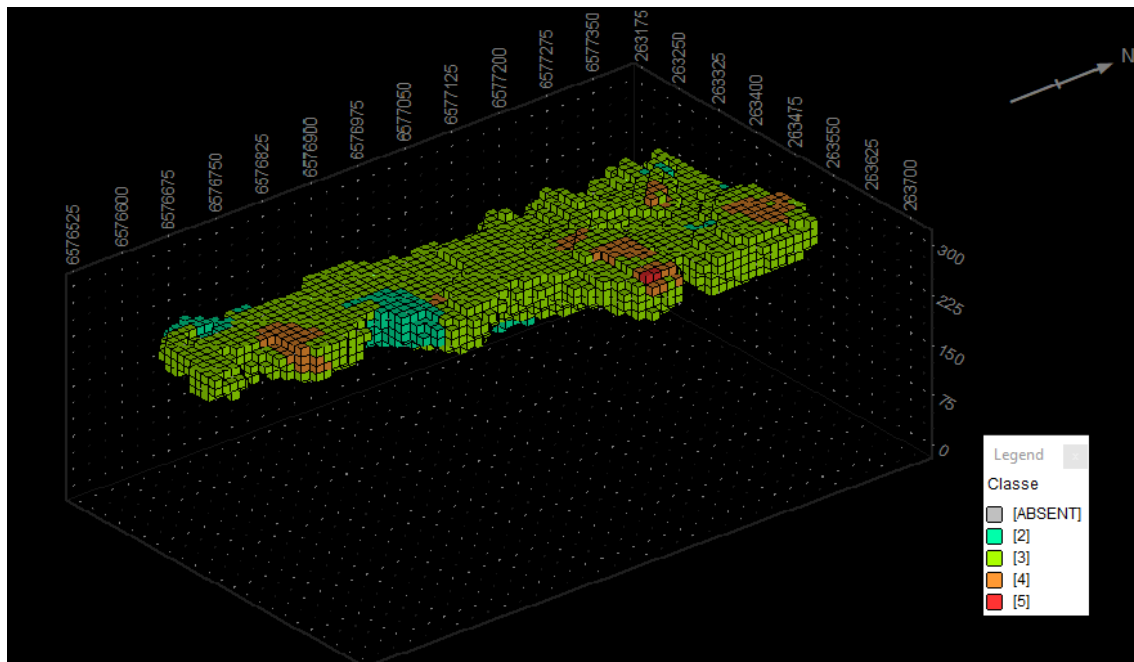
O resultado da classificação RMR é gerar zonas geotécnicas com mesmas características, o autor desta metodologia divide o maciço em 5 classes diferentes, são elas:

1. Classe 1: Maciço de alta qualidade mecânica, com valores teóricos de coesão maior que 400 kPa e ângulo de atrito maior que 45°;
2. Classe 2: Maciço de boa qualidade mecânica, com valores teóricos de coesão entre 300 e 400 kPa e ângulo de atrito entre 35° e 45°;
3. Classe 3: Maciço de média qualidade mecânica, com valores teóricos de coesão entre 200 e 300 kPa e ângulo de atrito entre 25° e 35°;
4. Classe 4: Maciço de baixa qualidade mecânica, com valores teóricos de coesão entre 100 e 200 kPa e ângulo de atrito entre 15° e 25°;
5. Classe 5: Maciço de péssima qualidade mecânica, com valores teóricos de coesão menores que 100 kPa e ângulo de atrito menor que 15°.

O arenito inferior apresentou em sua maioria zonas geotécnicas de classe 3, comportamento parecido com o conglomerado. Os motivos para a penalização da qualidade do maciço podem estar relacionados a profundidade, zonas de maior agrupamento de descontinuidades, zonas de alteração da rocha e zonas de mineralização.

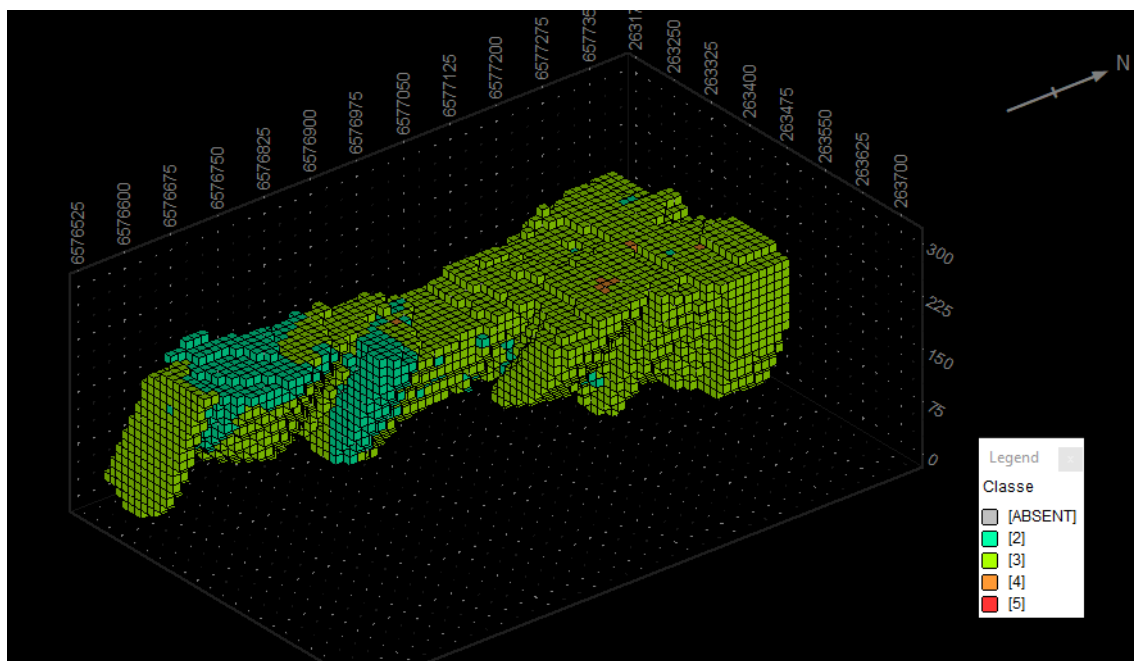
Com os blocos carimbados com suas respectivas classes geotécnicas, foi possível analisar os resultados do modelo geomecânico final. A Figura 111 e Figura 112, mostram respectivamente, o modelo geomecânico final para o conglomerado e para o arenito inferior. A Figura 113 apresenta os histograma com as porcentagens de blocos para cada classe geomecânica nas litologias estudadas.

Figura 111 - Modelo Geomecânico Final para o conglomerado



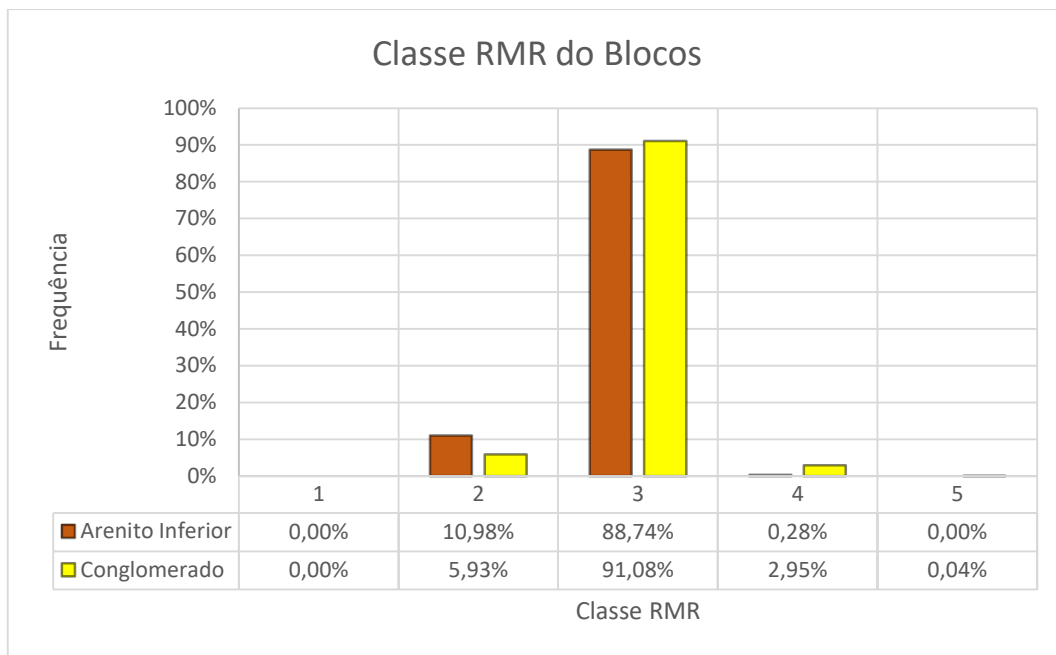
Fonte - Autoria Própria

Figura 112 - Modelo Geomecânico Final para o arenito inferior



Fonte - Autoria Própria

Figura 113 - Histograma das classes geomecânicas após a classificação RMR



Fonte - Autoria Própria

Capítulo 7

7 CONCLUSÕES E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A classificação geomecânica do maciço rochoso é de extrema importância para o sucesso de qualquer empreendimento mineiro. Na fase de pesquisa mineral, a classificação do maciço resultará em informações que auxiliarão as tomadas de decisão na fase de planejamento, principalmente na parte de *design de cava* e estabilidade de taludes nas cavas operacionais. Já na fase operacional, os dados sobre a qualidade da rocha, auxiliam no desmonte e aumentam a segurança operacional para todos que trabalham na mina.

As sondagens são as técnicas diretas de exploração utilizadas para a quantificação de uma jazida mineral, pois a partir dos testemunhos gerados durante as campanhas é possível avaliar a presença de minérios na região. Uma prática comum é utilizar os mesmos testemunhos para obter informações geomecânicas sobre as litologias presentes na área de interesse, porém a maioria dos empreendimentos utilizam apenas o RQD como parâmetro para classificar a qualidade do maciço. Desta forma, este trabalho implementou o RMR nos furos de sondagem, para que além do RQD, as variáveis como o espaçamento, resistência a compressão simples e rugosidade fossem adquiridas durante as descrições geomecânicas.

Estas variáveis quando combinadas resultam em uma classificação que define zonas geotécnicas com mesmas características mecânicas. Para a criação dos modelos tridimensionais, era necessário conhecer se os parâmetros apresentavam um comportamento direcional e se era possível utilizar as técnicas de estimativa para gerar os modelos geotécnicos. A análise da continuidade espacial dos dados mostrou uma relação com as direções das descontinuidades presentes no maciço.

A estimativa dos parâmetros gerou os modelos geomecânicos tridimensionais, e a partir da metodologia do RMR pode-se classificar os blocos de acordo com suas classes. A validação do modelo final se deu pela comparação com os dados originais categóricos, o resultado da estimativa se mostrou coerente com as amostras dos furos de sondagem, indicando que a metodologia proposta neste trabalho obteve sucesso na criação destes modelos geomecânicos tridimensionais.

O arenito inferior e o conglomerado apresentarem em sua maioria blocos definidos como classe 3. A baixa presença de blocos de classe 4 e 5 se deu em regiões próximas a superfície, o motivo destes resultados está relacionado a maior exposição ao intemperismo químico e físico, ou seja, camadas mais próximas a superfície apresentaram um grau de alteração e fraturamento maior do que as camadas mais profundas.

Conforme o projeto for avançando e aumentando a quantidade de informações sobre a jazida mineral, será possível atualizar o modelo geomecânico com dados com um maior grau de precisão, provenientes de ensaios em laboratório. Desta forma será possível criar um modelo geomecânico mais amplo e mais detalhado.

Capítulo 8

8 RECOMENDAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

8.1 RECOMENDAÇÕES

- Durante novas campanhas de furos de sondagem, realizar perfurações em regiões mais afastadas das zonas de mineralização, com o objetivo de ampliar o modelo geomecânico;
- Maior controle de qualidade durante a realização das descrições geomecânicas, visto que todas as variáveis geomecânicas são muito sensíveis a qualquer erro durante as análises;

8.2 TRABALHOS FUTUROS

- Importação destes modelos geomecânicos para programas de análise de estabilidade de taludes tridimensionais, como o Plaxis® e RS3®, com o objetivo de obter informações mais precisas sobre o maciço.
- Implementar o modelo geomecânico ao modelo de teores da mina, a fim de criar um sistema de penalização na função benefício dos blocos. Fazendo com que zonas de classificação geomecânica baixas impliquem em mais gastos quando comparados a zonas de melhor qualidade mecânica.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, D.P.M.; CHEMALE, F. JR. & MACHADO, A. 2012. Late to Post-Orogenic Brasiliano-Pan-African Volcano-Sedimentary Basin in the Dom Feliciano Belt, Southernmost Brazil. In: Ali Ismail Al-Juboury. (Org). **Petrology – New Perspectives and Applications**. Rijeka, In Tech – Open Accer Publisher, p. 73-130.

ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B. B. 1976. The upper Precambrian of South America. **Boletim do Instituto de Geociências**, Universidade de São Paulo, p. 45-80.

ALMEIDA, D.P.M. et al. 2002. The Acampamento Velho Formation, a Lower Cambrian Bimodal Volcanic Package: Geochemical and Stratigraphic Studies from the Cerro do Bugio, Perau and Serra de Santa Bárbara (Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul, RS – Brazil). **Gondwana Research**, p. 721-733.

ALMEIDA, R.P. 2005. Tectônica e Sedimentação do Ediacardiano Ordoviciano: **Exemplos do Supergrupo Camaquã (RS) e do Grupo Cacupé (Paraguai Oriental)**. Tese de Doutorado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. p. 203.

BICCA, M.M. **Tectônica e Proveniência do Grupo Santa Bárbara, Região de Minas do Camaquã – RS**. Dissertação de Mestrado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BIENIAWSKI, Z.T. Engineering classification of jointed rock masses. **Transactions Of The South African Institution Of Civil Engineers**. Johannesburg, p. 335-344. 1973.

BIENIAWSKI, Z.T. Rock Mass Classification in Rock Engineering. In: Symposium on exploration for rock engineering, Johannesburg. **Proceedings...** Cape Town, 1976. P 97-106.

BIENIAWSKI, Z.T. **Engineering rock mass classification**. New York: Jonh Wiley And Sons, 1989. 251p.

BRADY, B.H.G.; BROWN, E.T. **Rock Mechanics for Underground Mining**. 3. Ed. New York: Springer Science +Business Media Inc, 2005. p. 647.

CHEMALE, F. JR. 200. Evolução Geológica do Escudo Sul-Riograndense. In: Holz, M & De Ros, L.F. (eds.). **Geologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, CIGO/UFRGS. P. 13-52.

GUERREIRO, H.J.P. **Exploração Subterrânea de Mármore – Aspectos Geotécnicos**. Trabalho de Conclusão de Curso – Área de Geotecnia. Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, 2000.

HARTMANN, L.A.; CHEMALE, JR.F. & PHILIPP, R.P. 2007. Evolução Geotectônica do Rio Grande do Sul no Pré-Cambriano. In: Iannuzzi, R & Frantz, J.C (eds.). **Geologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, CIGO/UFRGS. p. 13-52.

HARTMANN, L.A; PORCHER, C.C. & REMUS, M.V.D. 2000. Evolução das rochas metamórficas do Rio Grande do Sul. In: Holz, M & DeRos, L.F. (eds). **Geologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, CIGO/UFRGS. p. 13-52.

HARTMANN, L.; SANTOS, J. & MCNAUGHTON, N. 2008. Detrital zircon U-Pb age data, and Precambrian provenance of the Paleozoic Guaritas Formation, Southern Brazilian Shield. **International Geology Review**. ISSN 0020-6814. p. 364-374.

HARTMANN, L.; SILVA, L.; REMUS, M.; LEITE, A. & PHILIPP R. 1998. Evolução Geotectônica do Sul do Brasil e Uruguai entre 3,3 Ga e 470 Ma. In: Congresso Uruguayo de Geologia, 2., 1998, Punta Del Este, Ury. **Anais...** Punta Del Este, SUG. p. 277-284.

HUTCHINSON, D.J; DIEDERICHS, M.S. **Cablebolting in Underground Mines**. Bitech Publisher Ltd., Canada, 1996.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. **Applied Geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989.

ISRM, B.E. **Suggested Methods: Rock Characterization, testing and monitoring**. ISRM Commission on Testing Methods. Pergamon, Oxford, 1981.

KAEWKONGKAEW, K., PHIEN, N., HARNPATTANAPANICH, T., SUTIWANICH, C. **Geological Model of Mae Tang-Mae Ngad Diversion Tunnel Projet, Northern Thailand**. Open Journal of Geology, 2013. p. 340-351.

LIMA, C., MENEZES, J.E. **Propriedades, Índice e Classificação das Rochas: Texto de apoio da matéria Geologia de Engenharia**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, FEUP, Portugal, 2008.

MATHERON, G. **Principles of Geostatistics. Economic Geology**, v. 58, 1963. p. 1246-1266.

OH, S., CHUNG, H., LEE, D.K. **Geostatistical Integration of MT and Borehole data for RMR Evaluation**. Environmental Geology, 2004. p. 1070-1078.

OLIVEIRA, C.H.E. 2010. **Contribuição à evolução estrutural da Bacia do Camaquã, RS**. Porto Alegre. Trabalho de Conclusão de Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. p. 86.

PAIM, P.S.G.; CHEMALE, F. JR & LOPES, R.C. 2000. A Bacia do Camaquã. In: Holz, M. & De Ros, F.F. (eds.). **Geologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, CIGO/UFRGS. p. 231-274.

PAIM, P.S.G.; LOPES, R.C. 2000. **Geologia da Região das Minas do Camaquã**. In: Ronchi, L.H, & Lobato, A.O.C. (eds.), Minas do Camaquã, um estudo multidisciplinar. São Leopoldo, Unisinos. p. 111-132.

REDONDO, F. **Classificação probabilística do padrão geomecânico de uma maciço rochoso mineralizado com base no índice RQD**. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Geociências, área de Concentração em Geociências e Meio Ambiente, 2003.

ROSSI, M.E.; DEUTSCH, C.V. **Mineral Resource Estimation**. Dordrecht: Springer, 2014.

SERRA JR., E., OJIMA, L.M., **Caracterização e Classificação de Maciços Rochosos**. In: Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE, 2004. p. 211-226.

SINCLAIR, A.J.; BLACKWELL, G.H. **Applied Mineral Inventory Estimation**. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

SOARES, A. **Geoestatística para as Ciências da Terra e do Ambiente**, 2. Ed. Lisboa: IST Press, 2006.

SOMMER C.A.; LIMA E.F.; NARDI L.V.S.; FIGUEIREDO A.M.G & PIEROSAN R. 2005. Potassic and low-Ti and high-Ti mildly alkaline volcanism in the Neoproterozoic Ramada Plateau, southernmost Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**. p. 237-254.

STAVROPOULOU, M., EXADAKTYLOS, G., SARATSIS, G. **A Combined Three-Dimensional Geological-Geostatistical-Numerical Model of Underground Excavation in Rock**. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 40 (3), 2007. p. 213-243.

VAN DE WALL, I.A.R.G.; AJALU, J.S. Characterization of the Geotechnical Properties of Rock Material for Construction Purposes. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v.34, 1997. p. 3-7.

WYLLIE, C., MAH, W. **Rock Slope Engineering Civil and Mining**. In: Hoek, E. & Bray, J.W. (eds.), *Rock Slope Engineering*, Taylor & Francis Group, London and New York. p. 431.

YAMAMOTO, J.K. **Avaliação e Classificação de Reservas Minerais**. São Paulo: Edusp, 2001.

YAMAMOTO, J.K.; LANDIM, P.M.B. **Geoestatística: Conceitos e Aplicações**. 1. Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.