

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

LUANA CLÁUDIA PEREIRA

**O USO DA GEOESTATÍSTICA PARA ELABORAÇÃO DE MODELOS
GEOMECÂNICOS MULTIDIMENSIONAIS**

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2020**

LUANA CLÁUDIA PEREIRA

**O USO DA GEOESTATÍSTICA PARA ELABORAÇÃO DE MODELOS
GEOMECÂNICOS MULTIDIMENSIONAIS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de Doctor Scientiae.

Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2020**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade Federal de
Viçosa - Campus Viçosa**

T

P436u Pereira, Luana Cláudia, 1984-
2020 O uso da geoestatística para elaboração de modelos geomecânicos
multidimensionais / Luana Cláudia Pereira. - Viçosa, MG, 2020.
192 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexos.

Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.178-190.

1. Rochas - Classificação. 2. Mecânica de rochas. 3. Geologia -
Métodos estatísticos. 4. Intemperismo. 5. Aprendizado do computador.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22. ed. 624.15132

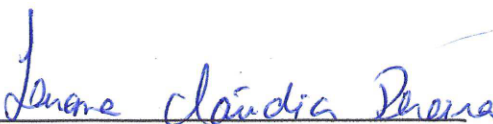
LUANA CLÁUDIA PEREIRA

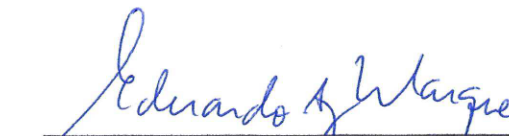
**O USO DA GEOESTATÍSTICA PARA ELABORAÇÃO DE MODELOS
GEOMECÂNICOS MULTIDIMENSIONAIS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 21 de julho de 2020.

Assentimento:


Luana Cláudia Pereira
Autora


Eduardo Antonio Gomes Marques
Orientador

Este trabalho é dedicado ao ser mais
importante do universo: meu filho!!

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela existência e a minha família pela educação que me foi dada. E, agradeço ao Ronaldo pela parceria ao longo dos anos.

Agradeço ao Edu por todo o conhecimento transmitido, por toda ajuda durante a realização deste trabalho e, por todas as portas que me abriu no mundo da geotecnia. Valeu Edu!! Obrigada de verdade!!

Meu muito obrigada ao Gérson por todo conhecimento que me foi passado e, principalmente, pela paciência em trabalhar com alguém fora do mundo estatístico.

Agradeço a todos que de alguma forma colaboraram para a realização deste trabalho, principalmente, aos Luca's, ao Archange, e ao Douglas. Em especial agradeço ao Jandresson por toda ajuda na programação.

Agradeço à Agnes, à Tatiana e à Laís pela parceria ao longo dos anos na UFV.

Agradeço à Silmara e à Lilianne pela ajuda e incentivo para finalização deste trabalho.

Agradeço à UFV, especificamente, ao Departamento de Engenharia Civil pelo acolhimento e pela oportunidade de fazer parte desta instituição.

Agradeço a Votorantim Metais Vazante por ter fornecido o banco de dados com as informações dos furos de sondagem.

Agradeço à Professora Lydia Lobato da UFMG que cedeu uma licença do Leaprog Geo através do programa Student Chapter para uso neste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

*If you don't make mistakes,
you're not working on
hard enough problems,
and that's a big mistake.*

Frank Wilczek

RESUMO

PEREIRA, Luana Cláudia, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2020. **O uso da geoestatística para elaboração de modelos geomecânicos multidimensionais.** Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques.

O presente trabalho teve por objetivo a elaboração de um modelo geomecânico a partir de dados de furos sondagem. Foram utilizados geoestatística e linguagem de programação R. Em relação à região analisada, foram estudados três subsetores, da região do Extremo Norte da Mina de Vazante/MG: Norte_Sul, Norte_Central e Norte_Norte, onde foram utilizados, 70, 254 e 149 furos, respectivamente. Os referidos furos de sondagem continham informações sobre localização espacial, profundidade, litologia, alteração, fraturamento, RQD (Rock Quality Designation) e classificação do maciço rochoso local. A partir dos dados existentes foi elaborado a classificação de maciço RMR (Rock Mass Rating) simplificada para todos os subsetores. Após tratamento dos dados, foi realizada uma análise exploratória e na sequência, empregou-se a técnica de aprendizado de máquina, via o algoritmo do Random Forest. O RQD foi identificado como a variável que mais influencia no comportamento geomecânico dos maciços rochosos analisados. Diante deste resultado foram elaborados modelos geomecânicos para o RQD e para a classificação RMR simplificada, utilizando o interpolador IDW (Inverse Distance Weighted) e as krigagens ordinária e a simples. Como resultado, notou-se que o subsetor Norte_Central possui o maciço rochoso mais resistente, apresentando os maiores valores de RQD e melhores classes geomecânicas. Além disso, para ambas as variáveis analisadas pôde-se observar alinhamentos de pontos com maiores ou menores valores das variáveis analisadas com as direções NE-SW e NW-SE, sendo estas direções condizentes com geologia regional da região de estudo. A metodologia desenvolvida para confecção dos modelos geomecânicos multidimensionais, tanto para o IDW quanto para as krigagens, é muito relevante e promissora. Permitiu a visualização do ajuste do modelo matemático aos dados do variograma experimental e apresentou resultados condizentes com os dados da geologia regional, indicando uma boa qualidade dos mapas, tem-se que a visualização dos modelos é excelente e superior a de outros programas que permitem elaborar modelos e a interatividade dos resultados também é algo a se destacar.

Palavras-chave: krigagem. Classificação de maciços rochosos. Intemperismo. Aprendizagem de máquina. Árvores de decisão.

ABSTRACT

PEREIRA, Luana Cláudia, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July 2020. **The use of geostatistics for the elaboration of multidimensional geomechanical model.** Advisor: Eduardo Antonio Gomes Marques.

This work aimed to create a 3D geomechanical model based on information collected on boreholes, using geostatistics concepts and the programming language R. Data are from the Vazante Mine, located in Vazante, Minas Gerais state, Brazil. We considered for this study three subsectors – North_South, North_Central, and North_North – located in the north edge of the mine. The number of boreholes used in each subsector was 70, 254 and 149, respectively. Data from these boreholes comprised information about spatial location, depth, lithology, weathering, fracturing, RQD (Rock Quality Designation), and a local classification of the rock mass. Based on these features, a simplified RMR (Rock Mass Rating) mass classification was developed for each subsector. After data processing, an exploratory analysis was carried out and a machine learning technique (Random Forest algorithm) was performed. As a result, RQD was the variable that most influenced the geomechanical behavior of rock masses. Based on this result, geomechanical models were developed for both the RQD and the simplified RMR classification, using the IDW (Inverse Distance Weighted) interpolator and the ordinary and simple kriging. The North_Central subsector showed the most resistant rock mass, with the highest RQD values and the best geomechanical classes. For these variables, we observed higher or lower values point alignments in the NE-SW and NW-SE directions, which have been consistent with the regional structural geology. The methodology developed for creating multidimensional geomechanical models is very relevant and promising for IDW or kriging. Besides allowing visualization of the adjustment of the mathematical model to the data of the experimental variogram, it presented consistent results with the data of the regional geology, indicating a good quality of the models. Also, the model's visualization is excellent and superior to that of other modeling softwares, besides the notable interactivity of the results.

Keywords: Kriging. Classification of rock mass. Weathering. Machine learning. Decision trees.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Decomposição do fenômeno geológico em determinístico e estocástico e sua relação com pesquisas de campo e propósitos.	26
Figura 2 - Organograma da metodologia desenvolvida por Kaufmann e Martin (2009) para construção de modelo geológico 3D	28
Figura 3– Parâmetros do semivariograma	40
Figura 4 - Localização do Extremo Norte na Unidade de Vazante, Vazante/MG	49
Figura 5 - Coluna estratigráfica do Grupo Vazante.....	52
Figura 6 - Classificação geomecânica de Vazante	53
Figura 7 - Locação dos furos de sondagem do Setor Norte.....	56
Figura 8 - Exemplo de grid de visualização do modelo geomecânico 3D	62
Figura 9 - Exemplo de grid de visualização do modelo geomecânico com furos de sondagem	62
Figura 10 - Medidas estatísticas de tendência central e de dispersão: A – Subsetor Norte Sul; B – Subsetor Norte_Central e C – Subsetor Norte_Norte	72
Figura 11 - Gráficos de estatística exploratórios da profundidade: A – Subsetor Norte Sul; B – Subsetor Norte_Central e C – Subsetor Norte_Norte.....	74
Figura 12 - Gráficos de estatística exploratórios da litologia: A – Subsetor Norte Sul; B – Subsetor Norte_Central e C – Subsetor Norte_Norte.....	77
Figura 13 - Gráficos de estatística exploratórios do RQD: A – Subsetor Norte Sul; B – Subsetor Norte_Central e C – Subsetor Norte_Norte.....	78
Figura 14 – Ranqueamento da importância das variáveis para o maciço rochoso sendo no eixo das abcissas apresentado informações sobre a precisão do decréscimo média (InsMSE) e sobre o decréscimo médio de Gini (IncNodePurity): A – Subsetor Norte Sul; B – Subsetor Norte_Central e C – Subsetor Norte_Norte.....	82
Figura 15 - Mapa Metalogenético do distrito Zincífero de Vazante com indicação dos subsetores; escala 1:75.000.....	83

Figura 16 - Modelo geomecânico da variável RQD obtida com emprego do interpolador IDW - subsetor Norte_Sul	86
Figura 17 - Modelo geomecânico do RQD a 50 m de profundidade (A), a 250 m de profundidade (B), a 440 m de profundidade (C) e a 500 m de profundidade (D) – subsetor Norte_Sul.....	87
Figura 18 - Visualização do gráfico 4D do modelo geomecânico da variável RQD com o emprego do IDW – subsetor Norte_Sul	91
Figura 19 - Modelo geomecânico da variável CLASS obtido com o emprego do interpolador IDW - subsetor Norte_Sul	92
Figura 20 - Modelo geomecânico do CLASS a 50 m de profundidade (A), a 250 m de profundidade (B), a 440 m de profundidade (C) e a 500 m de profundidade (D) – subsetor Norte_Sul.....	93
Figura 21 - Visualização do gráfico 4D do modelo geomecânico da variável CLASS com o emprego do IDW – subsetor Norte_Sul	94
Figura 22 - Modelo geomecânico da variável RQD obtida com emprego do interpolador IDW - subsetor Norte_Central.....	98
Figura 23 - Modelo geomecânico do RQD na superfície (A), a 80 m de profundidade (B), a 150 m de profundidade (C), a 200 m de profundidade (D), a 340 m de profundidade (E), a 390 m de profundidade (F) e 560 m de profundidade (G) – subsetor Norte_Central	99
Figura 24 - Visualização do gráfico 4D do modelo geomecânico da variável RQD com o emprego do IDW – subsetor Norte_Central	101
Figura 25 - Modelo geomecânico da variável CLASS obtido com o emprego do interpolador IDW - subsetor Norte_Central.....	102
Figura 26 - Modelo geomecânico do CLASS na superfície (A), a 80 m de profundidade (B), a 150 m de profundidade (C), a 200 m de profundidade (D), a 340 m de profundidade (E), a 390 m de profundidade (F) e 560 m de profundidade (G) – subsetor Norte_Central	103
Figura 27 - Visualização do gráfico 4D do modelo geomecânico da variável CLASS com o emprego do IDW – subsetor Norte_Central	105
Figura 28 - Modelo geomecânico da variável RQD obtida com emprego do interpolador IDW - subsetor Norte_Norte	108

Figura 29 - Modelo geomecânico do RQD a 60 m de profundidade (A), a 120 m de profundidade (B), a 270 m de profundidade (C) e a 420 m de profundidade (D) – subsetor Norte_Norte.....	109
Figura 30 - Visualização do gráfico 4D do modelo geomecânico da variável RQD com o emprego do IDW – subsetor Norte_Norte.....	110
Figura 31 - Modelo geomecânico da variável CLASS obtido com o emprego do interpolador IDW - subsetor Norte_Norte	111
Figura 32 - Modelo geomecânico do CLASS a 60 m de profundidade (A), a 120 m de profundidade (B), a 270 m de profundidade (C) e a 420 m de profundidade (D) – subsetor Norte_Norte	112
Figura 33 - Visualização do gráfico 4D do modelo geomecânico da variável CLASS com o emprego do IDW – subsetor Norte_Norte.....	113
Figura 34 - Modelo geomecânico da variável CLASSLOCAL obtido com o emprego do interpolador IDW - subsetor Norte_Sul.....	116
Figura 35 - Modelo geomecânico da variável CLASSLOCAL obtido com o emprego do interpolador IDW - subsetor Norte_Central	117
Figura 36 - Modelo geomecânico da variável CLASSLOCAL obtido com o emprego do interpolador IDW - subsetor Norte_Norte.....	118
Figura 37 - Ajuste do variograma do subsetor Norte_Central.....	122
Figura 38 - Exemplos dos modelos geomecânicos 4D do RQD e da CLASS gerado com o emprego da linguagem de programação R	127
Figura 39 - Modelo geomecânico da variável RQD obtida com emprego da KO - subsetor Norte_Sul.....	131
Figura 40 - Modelo geomecânico do RQD obtido pela KO na superfície (A), a 60 m de profundidade (B), a 260 m de profundidade (C) e a 500 m de profundidade (D) – subsetor Norte_Sul.....	132
Figura 41 - Visualização do gráfico 4D do modelo geomecânico da variável RQD com o emprego da KO – subsetor Norte_Sul.....	133
Figura 42 - Modelo geomecânico da variável CLASS obtida com emprego da KO - subsetor Norte_Sul.....	134

Figura 43 - Modelo geomecânico da CLASS obtido pela KO para superfície (A) , a 60 m de profundidade (B) , a 260m de profundidade (C) e a 500 m de profundidade (D) – subsetor Norte_Sul.....	135
Figura 44 - Visualização do gráfico 4D do modelo geomecânico da variável CLASS com o emprego da KO – subsetor Norte_Sul.....	136
Figura 45 - Modelo geomecânico da variável RQD obtida com emprego da KO - subsetor Norte_Central	139
Figura 46 - Modelo geomecânico do RQD obtido pela KO na superfície (A) , a 60 m de profundidade (B) , a 210 m de profundidade (C) e a 470 m de profundidade (D) – subsetor Norte_Central	140
Figura 47 - Visualização do gráfico 4D do modelo geomecânico da variável CLASS com o emprego da KO – subsetor Norte_Central	141
Figura 48 - Modelo geomecânico da variável CLASS obtida com emprego da KO - subsetor Norte_Central	142
Figura 49 - Modelo geomecânico da CLASS obtido pela KO para superfície (A) , a 60 m de profundidade (B) , a 260 m de profundidade (C) e a 500 m de profundidade (D) – subsetor Norte_Central	143
Figura 50 - Visualização do gráfico 4D do modelo geomecânico da variável CLASS com o emprego da KO – subsetor Norte_Central	144
Figura 51 - Modelo geomecânico da variável RQD obtida com emprego da KO - subsetor Norte_Norte.....	148
Figura 52 - Modelo geomecânico do RQD obtido pela KO na superfície (A) , a 140 m de profundidade (B) , a 220 m de profundidade (C) e a 300 m de profundidade (D) – subsetor Norte_Norte.....	149
Figura 53 - Visualização do gráfico 4D do modelo geomecânico da variável RQD com o emprego da KO – subsetor Norte_Norte	150
Figura 54 - Modelo geomecânico da variável CLASS obtida com emprego da KO - subsetor Norte_Norte	151
Figura 55 - Modelo geomecânico da CLASS obtido pela KO para superfície (A) , a 60 m de profundidade (B) , a 260 m de profundidade (C) e a 500 m de profundidade (D) – subsetor Norte_Norte.....	152

Figura 56 - Visualização do gráfico 4D do modelo geomecânico da variável CLASS com o emprego da KO – subsetor Norte_Norte	153
Figura 57 - Modelo geomecânico da variável CLASSLOCAL obtida com emprego da KO - subsetor Norte_Central	155
Figura 58 - Semivariograma da variável CLASSLOCAL dos subsetores Norte_Sul (A) e Norte_Norte (B).....	156
Figura 59 - Visualização do gráfico interativo entre a CLASS x Litologia com todos os litotipos (A) e somente com as fendas (B)– subsetor Norte_Sul.....	160
Figura 60 - Visualização do gráfico interativo entre a CLASS x RQD para todos os valores (A) e somente para alguns valores excelentes de RQD (B)– subsetor Norte_Sul.....	162
Figura 61 - Visualização do gráfico interativo entre a CLASS x alteração para todos os valores (A) e somente para alguns valores de alteração (B)– subsetor Norte_Norte	164
Figura 62 - Análise entre litologia x fraturamento x class– subsetor Norte_Sul.....	166
Figura 63 - Análise entre litologia x fraturamento x RQD– subsetor Norte_Sul.....	167
Figura 64 - Comparação dos resultados do modelo do RQD obtidos via IDW (imagem superior) com a KO (imagem inferior) – subsetor Norte_Sul	168
Figura 65 - Comparação dos resultados do modelo do CLASS obtidos via IDW (imagem superior) com a KO (imagem inferior) – subsetor Norte_Sul	169
Figura 66 - Comparação dos resultados do modelo do RQD obtidos via IDW (imagem superior) com a KO (imagem inferior) – subsetor Norte_Central.....	170
Figura 67 - Comparação dos resultados do modelo do CLASS obtidos via IDW (imagem superior) com a KO (imagem inferior) – subsetor Norte_Central.....	171
Figura 68 - Comparação dos resultados do modelo do RQD obtidos via IDW (imagem superior) com a KO (imagem inferior) – subsetor Norte_Norte	172
Figura 69 - Comparação dos resultados do modelo do CLASS obtidos via IDW (imagem superior) com a KO (imagem inferior) – subsetor Norte_Norte	173

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Determinação do valor atrelado a cada um dos parâmetros de Bieniawski	30
Quadro 2 - Determinação da condição das descontinuidades	31
Quadro 3 - Comparação entre KO e KS	44
Quadro 4- Exemplo da planilha final do banco de dados.....	58
Quadro 5 -Exemplificação do artifício utilizado com relação a profundidade dos furos.....	65
Quadro 6- Escala numérica adotada para o grau alteração.....	66
Quadro 7- Escala numérica adotada para o grau de fraturamento.....	66
Quadro 8- Escala numérica adotada para a classificação geomecânica local	66
Quadro 9 - Legenda das litologias da Mina de Vazante.....	67
Quadro 10 – Classificação RMR simplificada elaborada na presente pesquisa.....	69
Quadro 11 – Resumo dos coeficientes de determinação e dos erros obtidos com o RF	84
Quadro 12 - Resultados dos ajustes dos variogramas dos subsetores	122
Quadro 13 -Valores das médias e do desvio padrão das variáveis preditas pela KO e pela KS	123
Quadro 14 -Valores das médias e do desvio padrão das variâncias das variáveis preditas pela KO e pela KS.....	124
Quadro 15 -Valores dos erros obtidos pelo processo de validação entre a KO e a KS	125
Quadro 16 -Comparação entre os erros da validação entre a KO e o IDW.....	174

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a	Alcance
ARD	Ardósia
BLUP	Blue linear unbiased estimation
BXD	Brecha Hidrotermal
BXD/Dcz	Brecha dolomítica / Dolomito cinza
BXD/doro	Brecha dolomítica / Dolomito Rosa
BXH	Brecha Hematítica
BXW	Brecha Willemítica
c	Patamar
c ₀	Efeito Pepita
c ₁	Contribuição
CLASS	Classificação RMR simplificada
CLASSLOCAL	Classificação local
C++	Linguagem de programação
DCZ/bx	Dolomito cinza
DCZ/bx	Dolomito cinza
DO	Dolomita
DORO	Dolomito rosa
DORObd	Dolomito rosa
DORObx	Dolomito rosa
DOROfrr	Dolomito rosa

DRA	Dolarenito
DRU	Dolorudito
Exp	Exponencial
E-W	Leste-Oeste
FBR	Função de base radial
FD	Fenda
Fe	Fenda
FIL	Filito
FO	Folhelho
GSLib	Geostatistical program library
GNU	<i>GNU's not</i> unix
HC	Hematita Compacta
IDW	Inverse distance weighted
KO	Krigagem ordinária
KS	Krigagem simples
LITO	Litologia
l/min	litro por minuto
m	metro
mm	milímetro
MAE	Erro médio absolute
MB	Metabásica
MG	Minas Gerais

MGA	Marga
MPa	Mega Pascal
MT	Material terroso
MT/CAL	Material terroso/Calamina
MTARG	Material argiloso
N-S	Norte-Sul
NW	Noroeste
OOB	Out-of-bag
Q	Tunelling quality index
R	Linguagem de programação
RF	Random forest
RMR	Rock Mass Rating
RMSE	Erro quadrado médio
RQD	Rock quality designation
R/S	Destruído
ROC	Receiver operating characteristics
Rsquared	Coeficiente de determinação
sd	Desvio padrão
se	Erro padrão
SE-NW	Sudeste-noroeste
SGeMs	Stanford geostatistical earth modeling software

Sph Esférico

S/R Sem recuperação

SW-NE Sudoeste-nordeste

SOLO Solo

UCS Resistência à compressão uniaxial

UTM Universal transversa de Mercator

LISTA DE SÍMBOLOS

$Z(x)$	Valor do ponto que se deseja interpolar
n	Quantidade de pontos próximos empregados na identificação do ponto x
$Z(x_i)$	Valor do ponto x_i
w_i	Peso do valor de x_i
$h(x, x_i)$	Distância entre o ponto x e o ponto x_i
p	Parâmetro de potência do IDW
x_η	Amostras do RF
θ	Vetor randômico
K	Tamanho da amostra
y'_n	Resposta predita para amostras x_η
$T_{L(\theta)}$	Preditor do RF
h	Vetor entre dois pontos x_1 e x_2 no espaço tridimensional
E	Esperança matemática
m	Média aritmética das realizações das variáveis aleatórias
$\hat{Z}(x_0)$	Estimador de krigagem para um ponto não amostrado
μ	Média estacionária conhecida
N	Número de pontos amostrados
λ_i	Peso da krigagem

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Objetivos.....	22
1.2	Organização do trabalho	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
2.1	Modelos Geomecânicos	24
2.2	Classificação Rock Mass Rating (RMR)	29
2.3	Estatística Clássica.....	32
2.4	Métodos de interpolação espacial	33
2.4.1.	Interpoladores determinísticos	34
2.4.2.	Geoestatística	38
2.5	Programas Comerciais: Modelagem geomecânica	46
3	METODOLOGIA	49
3.1	Caracterização da área de estudo	49
3.2	Materiais e métodos	54
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
4.1	Banco de Dados: Tratamento e Análise.....	64
4.2	Análise Exploratória dos Dados	70
4.3	Random Forest.....	79
4.4	Inverse Distance Weighted - IDW	84
4.5	Krigagens	121
4.6	Análises conjuntas	158

4.7	Comparação entre IDW e KO.....	168
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	175
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	178
	ANEXOS.....	191
	ANEXO I – GEOLOGICAL - GEOTECHNICAL CHARACTERIZATION OF DIFFERENT LITHOTYPES IN AN UNDERGROUND MINE	191
	ANEXO II – CONSTRUÇÃO DE UM MODELO GEOMECÂNICO 3D ATRAVÉS DO PROGRAMA LEAPFROG GEO (Publicado no 16 CNG_Portugal).....	192

1 INTRODUÇÃO

A construção de modelos geológico-geomecânicos é um ramo da mecânica de rochas que precisa de contínuo aperfeiçoamento, pois apesar do seu uso comum em diversas atividades de engenharia civil, engenharia de minas e engenharia geotécnica, ainda existem limitações tanto na construção do modelo propriamente dito, quanto na visualização no espaço.

Os modelos geológico-geomecânicos são de extrema importância para o processo de entendimento dos maciços rochosos frente à atividade humana. Sua relevância vai desde a possibilidade de melhor compressão dos diferentes materiais que existem no maciço rochoso até previsões de como esse maciço se comportará frente às solicitações mecânicas a que o mesmo será submetido.

A grande maioria dos modelos geológico-geomecânicos utilizados são construídos em duas dimensões (2D), o que dificulta a visualização e a compreensão da relação espacial entre o maciço rochoso e as intervenções de engenharia. As principais dificuldades para se elaborar estes modelos relacionam-se com a espacialização de dados unidimensionais e a interpolação de dados pontuais para compor as informações espaciais.

Diante disso, a presente pesquisa surgiu da necessidade de propor um novo método de construção de modelos geológico-geomecânicos, empregando ferramentas geoestatísticas conhecidas e a linguagem de programação R e, como base de dados, as informações de furos de sondagem já existentes. Além disso, os modelos geomecânicos desenvolvidos são modelos multidimensionais, ou seja, todos possuem mais de três dimensões espaciais. Cada um dos modelos confeccionados possui informações sobre a localização geográfica, sobre a profundidade e, no mínimo, sobre uma variável geomecânica, como por exemplo, uma classificação geomecânica de maciço rochoso. Ainda, tem-se que alguns dos modelos possuem mais de uma variável analisada por vez.

Os dados básicos para a elaboração dos modelos foram oriundos de informações já existentes de descrição de furos de sondagem. E o banco de dados empregado na presente pesquisa foi, gentilmente, cedido pela Mina de Vazante, de posse atualmente da empresa Nexa Resources. Foi disponibilizado o banco de dados geológico-geotécnicos de um setor, o Extremo Norte, de uma das minas subterrâneas da empresa localizada município homônimo à mina.

1.1 Objetivos

O objetivo principal que motivou o desenvolvimento da presente pesquisa, foi baseado na ideia de que seria possível confeccionar modelos geológico-geomecânicos multidimensionais empregando conhecimentos geoestatísticos já consolidados e utilizando a linguagem de programação de livre acesso – R. E, ainda, informações já disponíveis oriundas da descrição dos furos de sondagem como fonte de dados para a construção dos modelos.

Além disso, os objetivos específicos foram:

- Tratamento de um banco de dados oriundo da descrição de furos de sondagem;
- Definição de qual variável é mais representativa de um maciço rochoso via aprendizado de máquina;
- Criação de uma classificação geomecânica simplificada para a região de estudo;
- Desenvolvimento de metodologia para análise e interpretação de uma ou mais variáveis em gráficos interativos.

1.2 Organização do trabalho

O presente trabalho foi organizado segundo a seguinte estrutura:

- Introdução: faz a apresentação das motivações de realização da presente pesquisa, bem como apresenta como o trabalho foi estruturado.
- Revisão Bibliográfica: traz uma revisão bibliográfica sobre o estado da arte sobre e os conhecimentos científicos que foram empregados no desenvolvimento da pesquisa.
- Metodologia: descreve toda a metodologia empregada para realização do presente trabalho.
- Resultados e Discussão: apresenta os resultados obtidos com a utilização de aprendizado de máquina (algoritmo Random Forest) como classificador e do IDW com interpolador para construção de modelos geológico-geomecânicos multidimensionais. Tem-se, também, o uso de interpoladores geoestatísticos, krigagem ordinária e krigagem simples, para construção de modelos geológico-geomecânicos multidimensionais. E, ainda, faz-se uma comparação entre estes resultados e os do IDW.

- Considerações Finais. apresenta as ponderações finais sobre a pesquisa desenvolvida e apresenta sugestões para trabalhos futuros.
- Anexos: apresenta duas publicações de assuntos relacionados à presente pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica foi realizada no intuito de apresentar o estado da arte em relação à construção de modelos geomecânicos multidimensionais empregando geoestatística.

2.1 Modelos Geomecânicos

O entendimento do comportamento de um maciço rochoso requer o conhecimento de seus parâmetros geomecânicos. Estes são obtidos *in situ* ou por meio de ensaios laboratoriais, entretanto, a informação adquirida normalmente é pontual, a partir de testemunhos de sondagem, por exemplo. Entender e representar a variabilidade espacial desses parâmetros ainda é um desafio para a área de mecânica das rochas e é de grande interesse, neste processo a confecção de modelos geomecânicos.

A elaboração de um modelo geomecânico não é uma tarefa trivial, haja vista que se exige a integração de conhecimento técnico específico sobre o assunto. São necessárias habilidades específicas que permitam: avaliar se os dados são suficientes em quantidade e qualidade, compreender quais variáveis exercem maior e menor influência sobre o comportamento do maciço rochoso estudado, ter conhecimento matemático/estatístico para confeccionar o modelo propriamente dito e domínio de ferramentas computacionais para integrar e viabilizar a construção do modelo.

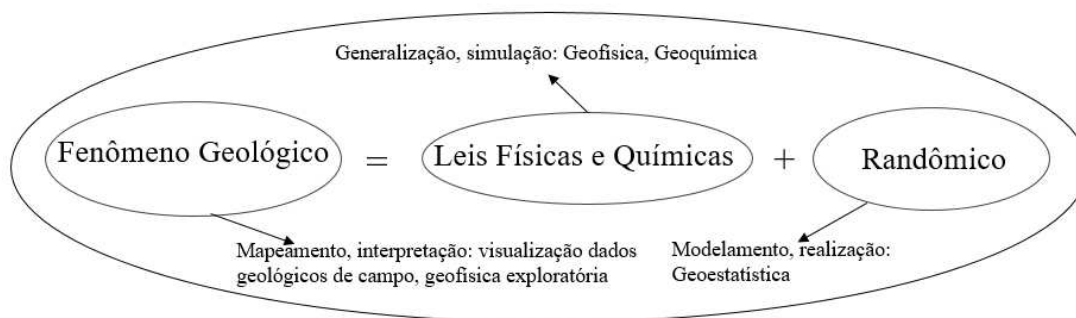
Um modelo consiste numa representação simplificada do meio natural. De acordo com Krumbein e Graybill (1965) apud Landim (1998), o manejo quantitativo de dados geológicos requer a utilização desta simplificação. Pode-se fazer uso de modelos conceituais, modelos escalares e modelos matemáticos. Um modelo conceitual consiste no entendimento dos conceitos teóricos relacionados ao assunto em estudo e na formulação de possíveis soluções. Os modelos escalares são representações em maior ou menor escala de fenômenos originais, como apresentados na natureza. Finalmente, os modelos matemáticos baseiam-se no uso de ferramentas matemáticas para solucionar e representar fenômenos naturais – integram essa tipologia os modelos geoestatísticos.

Os modelos geomecânicos consistem em uma representação simplificada de um maciço rochoso com suas propriedades geológicas-geotécnicas e tem por objetivo permitir análises e previsões de comportamento do maciço sem e com alguma atividade antrópica.

A elaboração de um modelo geomecânico de um determinado maciço rochoso apoia-se no conhecimento e na compartimentação desse maciço em classes de igual comportamento mecânico. Para tal, faz-se necessário o conhecimento aprofundado de suas propriedades geológicas e geomecânicas, assim como o entendimento de como estas propriedades se relacionam e condicionam o comportamento do maciço. Uma vez adquirida esta compreensão, torna-se necessário que esta seja especializada e visualizada e, na sequência, utilizada para diferentes fins como, por exemplo, na previsão de estruturas de contenção ou da forma de escavação em uma mina subterrânea.

Koike (2010) defende que a questão fundamental na engenharia de rochas deve ser o conhecimento profundo e a acurácia do modelo das estruturas geológicas e das propriedades físicas e químicas. Tanto as estruturas quanto as propriedades tendem a apresentar alta heterogeneidade e comportamento não linear devido à presença de descontinuidades geológicas, como falhas e fraturas. Considerações acerca dos fatores de controle de fenômenos geológicos e ambientais podem ajudar na compreensão dos modelos espaciais. Este fenômeno pode ser decomposto em duas partes: (A) uma parte determinística, controlada por leis físicas e químicas e (B) uma parte estocástica, que dá origem à aleatoriedade das propriedades físicas/químicas e às estruturas geológicas, conforme mostra a Figura 1. O autor argumenta que levantamentos de campo e exploração de subsuperfície usando técnicas como reflexão sísmica e resistividade representam o primeiro passo para caracterizar e interpretar o fenômeno natural. Assim, métodos de investigação diretos e geofísicos podem ser usados para identificar os componentes determinísticos (A) e compreender quais leis físicas/químicas representam o fenômeno. Já para os componentes estocásticos (B), métodos geoestatísticos são muito utilizados para investigações dos componentes randômicos do fenômeno, que não podem ser explicados por leis. A distribuição espacial de (A) é muito mais sutil que em (B) porque os componentes determinísticos normalmente não são muito influenciados por pequenas distâncias.

Figura 1– Decomposição do fenômeno geológico em determinístico e estocástico e sua relação com pesquisas de campo e propósitos.



Fonte: modificado Koike, 2010.

Pinheiro et al. (2016) argumentam que, corriqueiramente, em projetos geotécnicos, os parâmetros geomecânicos são definidos com base em campanhas de trabalho de campo (mapeamento geológico), testes de caracterização *in situ* e laboratoriais. De posse dos resultados, estabelece-se uma setorização geotécnica em que um conjunto de parâmetros é atribuído a cada setor. Tem-se que essa é uma tarefa altamente subjetiva, porque não contabiliza adequadamente a variabilidade espacial intrínseca e a alta heterogeneidade que podem ser encontradas no maciço rochoso, o que pode ter um impacto significativo no comportamento da estrutura e, extremamente importante para as demais etapas do projeto. Nesse sentido, necessita-se reduzir a subjetividade da setorização geotécnica. Os modelos geoestatísticos podem ser um meio para promover essa redução, pois os parâmetros geomecânicos são vistos como resultado de campos aleatórios espaciais, cujas propriedades podem ser inferidas a partir das medições *in situ* e testes laboratoriais.

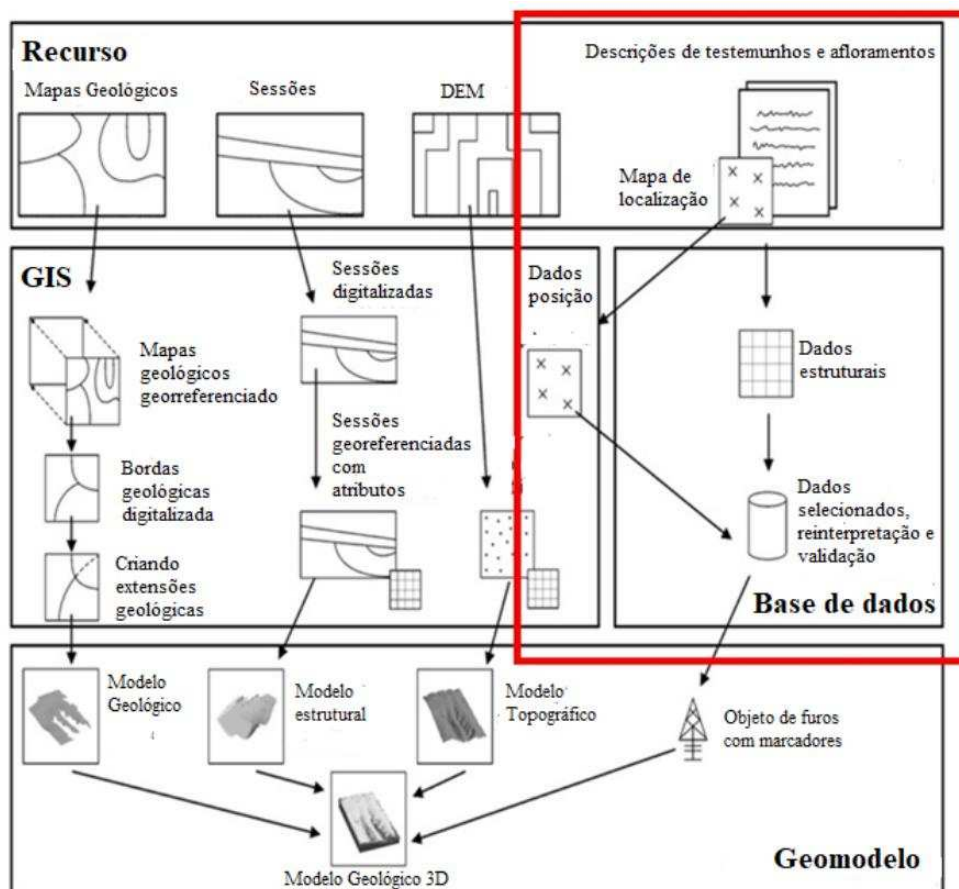
Zhu et al. (2013) afirmam que o processo de modelagem geológica 3D precisa seguir um fluxo prático de trabalho. A partir dos dados coletados de uma propriedade deve-se determinar os limites entre as diferentes unidades geológicas definidas; na sequência busca-se prever a distribuição espacial da propriedade estudada e, por fim, deve-se realizar uma verificação do modelo gerado visando sua aderência à realidade e sua aplicabilidade. Ainda, segundo estes autores, alguns aspectos precisam ser mais bem estudados e desenvolvidos, como a implementação de ferramentas geoestatísticas, a distribuição espacial para temas relacionados

à geologia, o melhoramento da visualização 3D dos modelos e a ampliação das técnicas espaciais quantitativas.

Kaufmann e Martin (2009) defendem que o primeiro passo num processo de construção de modelo geológico 3D é coletar, organizar e selecionar os dados a serem utilizados. De acordo com estes autores o trabalho inicial é fatigante, mas essencial para garantir a construção de um modelo confiável. Na sequência, os dados precisam ser processados e armazenados numa base de dados consistente e, assim que selecionados, precisam ser referenciados segundo um sistema de coordenadas geográficas bem como de uma definição quanto à escala de trabalho. Dada a variabilidade natural e visando garantir a qualidade dos dados, uma validação criteriosa se faz necessária.

Kaufmann e Martin (2009) relatam ainda que, em muitos casos, o principal recurso de informação geológica é o levantamento geológico e que dados pontuais são obtidos em furos de sondagem. Além disso, descreveram uma metodologia composta de vários passos para a construção de um modelo geológico, conforme apresentado na Figura 2. Um deles consiste na automatização, visando dar agilidade ao processamento de dados e permitir atualizações. Outro passo é para reinterpretação ou validação do dado, recurso este disponível ao usuário. No estudo de caso apresentado por esses autores, a coleta de dados englobou recursos de conhecimento prévio da área e referências bibliográficas. Logo, os dados existentes, pontuais e gerais, foram processados separadamente. Algumas informações antigas precisaram ser digitalizadas e referenciadas espacialmente. Por fim, obteve-se a base de dados para elaboração do modelo. A região destacada na Figura 2 consiste na parte da metodologia descrita e empregada no presente trabalho, conforme será relatado posteriormente.

Figura 2 - Organograma da metodologia desenvolvida por Kaufmann e Martin (2009) para construção de modelo geológico 3D



Fonte: Kaufmann e Martin (2009).

Hadjigeorgiou (2012) relata que dados precisam ser analisados, sintetizados e transformados em informação útil para os diversos projetos geotécnicos, caso contrário, sua coleta terá sido realizada sem um propósito. Soufi, Bahi e Quadif (2018) argumentam que a elaboração de um modelo geomecânico passa necessariamente pelo emprego de técnicas de interpolação, haja vista que sempre existirão locais onde não haverá informações levantadas em campo (informações primárias), sendo necessário saber como uma determinada variável se comporta. Assim, as técnicas de interpolação são essenciais para possibilitar o entendimento do comportamento de um determinado parâmetro a partir de informações levantadas sobre ele na área de estudo. Contudo, é necessária cautela do emprego de tais técnicas haja vista que os maciços rochosos são caracterizados pela incerteza e heterogeneidade devido aos complexos processos geológicos que os originaram.

Bhattacharya et al., 2019 argumentam que quando se tem um número diverso de variáveis para construção de um modelo geomecânico torna-se difícil trabalhar com todas as variáveis e, além disso, pode-se ter variáveis que não influenciarão de maneira significativa nos resultados do modelo a ser elaborado e que, assim sendo, em tese não precisariam ser analisadas/consideradas. Posto isso, identificar quais variáveis exercem maior (ou menor) influência numa determinada área é uma atividade de extrema importância para construção de um modelo geomecânico.

A elaboração e o uso de modelos geomecânicos tiveram um aumento significativo na geotecnia nos últimos anos, tendo sido impulsionados grandemente pelos avanços da ciência da computação, tanto de programas quanto de hardwares. Apesar disso, segundo Hack et al. (2006) a implantação de modelos numéricos na área da geomecânica, ainda é morosa devido, principalmente, a dois fatores: o primeiro está relacionado à falta de dados de entrada em quantidade e qualidade suficientes para confecção dos modelos; e o segundo com a necessidade do emprego de mais de um programa para executar todas as atividades necessárias em projeto geotécnico com as inerentes dificuldades de compatibilização entre estes programas.

2.2 Classificação Rock Mass Rating (RMR)

A classificação Rock Mass Rating (RMR) foi originalmente desenvolvida visando estabelecer o tempo máximo de auto sustentação de vãos livres de maciços rochosos em escavações de túneis. Ao longo dos anos, a classificação sofreu modificações que permitiram estimar valores de resistência, como coesão e ângulo de atrito, aumentando assim a sua gama de aplicações na área mecânica das rochas. Com a RMR tem-se uma avaliação geral da qualidade dos maciços rochosos por meio de uma escala de 0 a 100. Esta escala está atrelada a seis parâmetros, quais sejam: resistência à compressão uniaxial, RQD, espaçamento das discontinuidades, condição das discontinuidades (abertura, rugosidade, preenchimento, intemperismo e resistência das paredes) e condição de percolação da água. Para cada parâmetro existe uma avaliação específica e o valor final é dado pela soma dos parâmetros citados, obtendo-se o RMR geral (BIENIAWSKI, 1989; CAMPOS, 2018). Nos Quadros 1 e 2 apresentam os parâmetros propostos por Bieniawski (1989). Além destes, pode-se considerar a orientação das discontinuidades na classificação.

Quadro 1 - Determinação do valor atrelado a cada um dos parâmetros de Bieniawski

Parâmetros			Coeficientes						
1	Resistência da rocha intacta	Point Load (MPa)	> 10	4-10	2-4	1-2	Ver compressão uniaxial		
		Compressão uniaxial (MPa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	< 1
	Pesos		15	12	7	4	2	1	0
2	R.Q.D		90-100%	75-90%	50-75%	25-50%	<25 %		
	Pesos		20	17	13	8	3		
3	Espaçamento das descontinuidades		>2 m	0,6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	<60 mm		
	Pesos		20	15	10	8	5		
4	Condição das descontinuidades (ver Quadro 2)		Superfícies muito rugosas, não contínuas, sem separação, paredes de rocha não alterada	Superfícies ligeiramente rugosas, separação < 1 mm, paredes ligeiramente alterada	Superfícies ligeiramente rugosas, separação < 1 mm, paredes muito alteradas	Superfícies polidas ou enchimento com espessura < 5 mm ou juntas contínuas com separação 1-5 mm	Enchimento mole com espessura > 5 mm ou juntas contínuas com separação > 5 mm		
	Pesos		30	25	20	10	0		
5	Presença de água	Caudal por 10 metros de comprimento do túnel	Nenhum	< 10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	>125 l/min		
		Relação da pressão da água vs tensão principal máxima	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5		
		Condições gerais	Completamente seco	Água intersticial	Úmido	Escorrimentos	Entrada de água		
	Pesos		15	10	7	4	0		

Fonte: Bieniawski, 1989 apud Campo, 2018.

Quadro 2 - Determinação da condição das discontinuidades

Persistência	1 m	1 a 3 m	3 a 10 m	10 a 20 m	> 20 m
Valor associado	6	4	2	1	0
Abertura	Nenhuma	< 0,1 mm	0,1 a 1,0 mm	1 a 5 mm	> 5 mm
Valor associado	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugosa	Rugosa	Levemente Rugosa	Lisa	Estriada
Valor associado	6	5	3	1	0
Preenchimento	Preenchimento duro			Preenchimento Macio	
	Nenhuma	< 5 mm	> 5 mm	< 5 mm	> 5 mm
Valor associado	6	4	2	2	0
Alteração	Não alterada	Ligeiramente	Moderadamente	Muito alterada	Decomposta
Valor associado	6	5	3	1	0

Fonte: Bieniawski, 1989 apud Campo, 2018.

2.3 Estatística Clássica

A estatística clássica, ou simplesmente estatística, é o ramo da matemática aplicada que fornece métodos para coleta, organização, descrição, análise e interpretação de dados e utilização dos mesmos para tomada de decisões. É largamente empregada em vários ramos das ciências. Pode-se dividir a estatística em três grandes áreas: estatística descritiva, probabilidade e inferência estatística. A estatística descritiva é definida como um conjunto de técnicas destinadas a descrever e resumir dados, a fim de permitir conclusões a respeito de características de interesse. A probabilidade trata da teoria matemática utilizada para estudar a incerteza oriunda de fenômenos que envolvem o acaso. E, por fim, a inferência estatística é o estudo de técnicas que possibilitem a extrapolação, a um grande conjunto de dados, das informações e conclusões obtidas a partir de subconjuntos de valores, usualmente de dimensões muito menores (MAGALHÃES; LIMA, 2010).

Os dados estudados pela estatística podem ser do tipo qualitativos ou quantitativos, sendo este subdividido em discretos ou contínuos. Os dados quantitativos discretos são aqueles que podem ser enumerados (número de famílias de descontinuidades, por exemplo) e os dados quantitativos contínuos são os que podem ser medidos, estes estão limitados pela precisão do sistema de medição (peso de uma amostra de rocha). Já os dados qualitativos tratam-se de variáveis não numéricas (MAGALHÃES; LIMA, 2010).

Na estatística, usualmente, tem-se medidas de tendência central e de dispersão. As medidas de tendência central são utilizadas para localizar a distribuição dos dados brutos (ou frequências) sobre o eixo de variação da variável em questão, sendo representada pela média, mediana, moda e os quartis. Por outro lado, as medidas de dispersão indicam quanto os dados se apresentam dispersos em torno da região central, caracterizando, assim, o grau de variação existente em um conjunto de valores. Suas medidas principais são a amplitude, a variância, o desvio padrão e o coeficiente de variação (VIEIRA, 2000). Uma outra maneira de apresentar medidas na estatística clássica é através da distribuição de frequências por meio de histogramas ou boxplot.

Para uso da estatística pressupõe-se que as propriedades dos dados analisados sejam realizações de uma variável casual, que todos os valores tenham a mesma probabilidade de ocorrer e, ainda, que as posições relativas das amostras não interfiram em seus resultados, ou

seja, não há dependência espacial (LANDIM, 1998; VIEIRA, 2000). Caso o valor de uma variável esteja relacionado com sua posição no espaço deve-se utilizar a estatística espacial.

2.4 Métodos de interpolação espacial

A interpolação espacial consiste em metodologias empregadas para estimar valores de propriedade de locais não amostrados, tendo por base valores conhecidos de dados amostrados na mesma região. Como resultado, tem-se a espacialização, através do uso de interpoladores, de um conjunto de valores pontuais em uma superfície contínua na mesma escala dos valores da grandeza em análise, na qual é possível obter valores onde não se possui observações (GIACOMIN et al., 2014; MIRANDA, 2017; SARAIVA; BONOMO; DE SOUZA, 2017).

Os métodos de interpolação podem ser divididos em três classes: determinísticos, geoestatísticos e combinados. A primeira faz uso apenas de formulações matemáticas em que uma superfície é ajustada ao conjunto de dados pontuais, tendo em vista que estes valores pontuais mais próximos devem se assemelhar mais do que os valores distantes. Já a segunda classe faz uso de formulação matemática e estatística investigando a autocorrelação espacial dos valores pontuais, podendo ser uni ou multivariada, o que depende do tipo de variável que utilizam, variáveis primárias ou secundárias. Por fim, a última classe trata da combinação das duas anteriores (LI; HEAP, 2008; MIRANDA, 2017). Alguns exemplos de métodos determinísticos são o método ponderação pelo inverso da distância (Inverse Distance Weighted) e a árvore de regressão (Regression Tree). Já os métodos geoestatísticos são representados, por exemplo, pela krigagem simples (Simple Kriging) e pela ordinária (Ordinary Kriging) (LI; HEAP, 2008).

Toda e qualquer interpolação terá incertezas nos valores estimados. Assim, a eficácia de um método de interpolação se dá em quão menor for a incerteza de um determinado valor predito. Comumente, os modelos geoestatísticos são os que apresentam as menores incertezas (LI; HEAP, 2008; MIRANDA, 2017). Contudo, Gardiman Junior et al. (2012) argumentam que não há um método de interpolação que se sobressaia ao outro, mas deve-se definir o melhor método para cada circunstância e, evidentemente, avaliar os resultados obtidos.

2.4.1. Interpoladores determinísticos

Os interpoladores determinísticos são baseados diretamente nos valores medidos próximos aos valores amostrados e modelos arbitrários ou empíricos são empregados. Nenhuma estimativa de erro do modelo é realizada e, normalmente, não há suposições rigorosas sobre a variabilidade de uma variável (HENGL, 2007).

O Inverse Distance Weighted (IDW) é um método de interpolação determinística em que os valores em pontos não amostrados são determinados por uma combinação linear de valores em pontos amostrados conhecidos. O cálculo da média utilizada pelo IDW é uma média ponderada pela distância euclidiana entre o ponto a ser interpolado e seus vizinhos. Este interpolador emprega uma combinação linear ponderada de valores de amostra que dá mais peso às amostras mais próximas e menos peso às amostras distantes. A técnica não faz suposições sobre relações espaciais, exceto a suposição básica de que pontos próximos devem estar mais intimamente relacionados do que pontos distantes ao valor no local interpolado. O desempenho do método IDW depende da função de potência, vizinhos mais próximos e raio de pesquisa. A função de potência, p , controla a significância dos pontos conhecidos nos valores interpolados, com base na sua distância do ponto de saída. A escolha do valor de p é arbitrária e o coeficiente de variação, assimetria e curtose dos conjuntos de dados pode afetar o valor ótimo de p . A escolha mais popular de p é 2 e o método resultante é frequentemente chamado de distância quadrada inversa ou distância inversa ao quadrado. O parâmetro de potência também pode ser escolhido com base na medição de erros (por exemplo, erro absoluto médio mínimo, resultando no IDW ideal). A suavidade da superfície estimada aumenta à medida que o parâmetro de potência aumenta. Os resultados estimados se tornam menos satisfatórios quando p é 1 e 2 em comparação com quando p é igual a 4. O IDW nunca irá prever valores acima do valor máximo medido ou abaixo do valor mínimo medido (LI; HEAP, 2008; EL-SAYED, 2012; GARDIMAN JUNIOR et al., 2012; SAJID; RUDRA; PARKIN, 2013; KARAMI; AFZAL, 2015; IKECHUKWU et al., 2017).

Os melhores resultados da interpolação são obtidos quando a amostragem é densa em relação à variação local que se está tentando simular, ao passo que se a amostragem for em número insuficiente ou com distribuição espacial inadequada à característica da superfície a ser modelada, os resultados podem não representar suficientemente a superfície desejada (LI; HEAP, 2008; MIRANDA, 2017).

De acordo com Marcuzzo, Andrade e Melo (2011), o interpolador Inverse Distance Weighted – IDW, pode ser descrito através das Equações (1) e (2).

$$Z(x) = \frac{\sum_{i=1}^n w_i Z(x_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

Em que:

$Z(x)$ é o valor do ponto que se deseja interpolar;

n é a quantidade de pontos próximos empregados na identificação do ponto x ;

$Z(x_i)$ é o valor do ponto x_i

w_i é o peso do valor de x_i sobre o ponto x e pode ser calculado pela Equação (2).

$$w_i = \frac{1}{h(x, x_i)^p} \quad (2)$$

Em que:

$h(x, x_i)$ é a distância entre o ponto x e o ponto x_i ;

p é o parâmetro de potência, comumente igual a dois.

O IDW é um método relativamente rápido e muito empregado para confecção de modelos digitais de elevação do terreno. Contudo, apresenta certas deficiências como, por exemplo, o fenômeno conhecido como “*bull’s eyes*”, que aparece com frequência gerando valores elevados na área interpolada. Além disso, tende a suavizar as curvas das linhas de contorno quando o tamanho da amostragem não é suficientemente grande e, ainda, as vezes cria pequenas ilhas isoladas de linhas de contorno. É importante mencionar que o IDW fornece resultados satisfatórios quando o número de pontos de amostragem em uma área é grande e são distribuídos uniformemente. O IDW é uma técnica de interpolação que pressupõe uma certa continuidade espacial, não sendo aconselhável para situações em que as variáveis possuem limites muito bem definidos e com transições bruscas, mas sim para variáveis em que as

transições ocorrem de forma gradual. Este método pode ser adequado para uma visualização ou interpretação preliminar da interpolação de uma superfície, é um método exato, mas que não avalia localmente os erros de previsão (JAKOB; YOUNG, 2006; ACHILLEOS, 2008; ACHILLEOS, 2011).

As florestas aleatórias ou Random Forests (RF) integram o que se denomina por aprendizado de máquina (machine learning do inglês) cujo princípio básico defende que sistemas computacionais podem aprender com os dados analisados, identificar padrões e, a partir de então tomar decisões sem ou com o mínimo de intervenção humana (LI; HEAP, 2008; GIROLAMO NETO, 2014). As florestas aleatórias são um método de árvore de decisão baseado no crescimento múltiplo randomizado de árvores. São rápidas e fáceis de implementar, produzem previsões altamente precisas e podem lidar com um número muito grande de variáveis de entrada sem ajuste excessivo (LIN; JEON, 2006; BIAU, 2012; CHEN et al., 2018).

Random Forest (RF) é um algoritmo classificador composto por uma coleção de árvores de decisão originalmente desenvolvido por Leo Breiman (BREIMAN, 2001). Uma árvore de decisão é um modelo de classificação (ou regressão) cuja estrutura consiste em um determinado número de nós e ramos. Este modelo é composto por uma estrutura no formato de uma árvore, em que cada nó interno da árvore representa um determinado teste de uma variável, e os ramos representam o resultado do teste realizado. Os nós externos da árvore (nós folhas ou nós terminais) são referentes às classes de classificação. Para classificar uma determinada variável, a árvore de decisão é percorrida de cima para baixo, seguindo pelos ramos dos nós em que as características das variáveis satisfazem os testes realizados em cada nó até alcançar um nó-folha, que contém a nova classificação da variável. Uma das principais características de uma árvore de decisão é o seu tipo de representação: uma estrutura hierárquica que traduz uma árvore invertida que se desenvolve da raiz para as folhas (RODRIGUES, 2005; CARVALHO, 2014).

Para a construção de uma árvore de decisão, a abordagem mais comum é a utilização do algoritmo dividir-e-conquistar. Em cada nível de uma árvore, um problema mais complexo de previsão/classificação é decomposto em subproblemas mais simples, ou seja, nos nós descendentes a heterogeneidade da variável a prever e explicar é reduzida, podendo as previsões serem efetuadas com riscos menores para cada um desses nós. Trata-se de uma pesquisa que se desenvolve do geral para o particular, no sentido em que em cada novo nível de nós

descendentes se limita (individualiza) ao valor de mais um atributo explicativo. Diante disso, pode-se definir árvore de decisão/classificação como uma estrutura de dados recursivamente definida como nós folha, que indicam uma classe; ou nós de decisão que contém um teste sobre o valor de um atributo. Para cada um dos possíveis valores do atributo, tem-se um ramo para uma outra árvore de decisão – uma sub-árvore. O critério de divisão dos nós fornece uma medida de qualidade do ajuste para a regressão ou de pureza para a classificação (RODRIGUES, 2005; CUTLER; CUTLER; STEVENS, 2012; CARVALHO, 2014).

O modelo de RF seleciona aleatoriamente um subconjunto de m preditores para o crescimento de uma árvore binária, em que cada árvore é cultivada em uma amostra de bootstrap do conjunto de treinamento. O RF pode analisar dados não lineares e não-Gaussianos; pode examinar diversas variáveis e ser bem treinado, mesmo com um pequeno conjunto de dados. Random Forests não são paramétricos e, portanto, os dados não precisam vir de uma distribuição específica. Três parâmetros na modelagem de RF devem ser especificados: número de árvores a crescer nas florestas ($ntree$), que é o parâmetro mais importante da RF; número de variáveis preditoras selecionadas aleatoriamente em cada nó ($mtry$); e número mínimo de observações nos nós terminais das árvores (tamanho do nó) (LI et al., 2017).

O RF é capaz de estimar tanto o erro de predição quanto a importância das variáveis analisadas. Essas estimativas são geradas avaliando os dados out-of-bag (OOB), que é um subconjunto aleatório dos dados não utilizados pelo algoritmo para construção das árvores, que em média representam 36% das amostras de treinamento. O RF utiliza cada árvore construída para prever os valores dos dados OOB. Essas predições são comparadas com os verdadeiros valores para obter uma estimativa de erro, chamado erro OOB. Os dados OOB também são utilizados para identificar a importância das variáveis. Compara-se o erro OOB aos valores dos erros quando se permuta cada uma das variáveis utilizadas na construção de cada árvore. Além de uma estimativa para o erro, os dados OOB podem ser empregados para calcular a importância de variáveis e proximidade de observações. A importância de uma variável é medida pela diferença entre a acurácia, ou o índice de Gini, quando se troca aleatoriamente os n valores da variável e os dados originais, mantendo fixo os valores das demais variáveis. A medida de importância mede a sensibilidade do modelo para cada variável preditora, quanto mais sensível, mais importante será a variável para o desempenho de um modelo (SANTOS, 2016; CARVALHO JUNIOR et al., 2016; MORAIS, 2017).

O RF podem ser usadas com objetivos diferentes, de acordo com o problema que se pretende resolver, pode-se ter por objetivo classificar os dados referentes a uma população da forma mais eficiente possível ou descobrir qual é a estrutura de um determinado tipo de problema, compreender quais as variáveis que afetam a sua resolução e construir um modelo que o solucione. Com RF é possível escolher as variáveis explicativas que realmente interessam para descrever uma situação, deixando de lado as menos relevantes. Pode-se, ainda, realizar análises de sensibilidade, ou seja, classificar os parâmetros de entrada em termos de sua importância na saída (RODRIGUES, 2005; CARVALHO, 2014; BHATTACHARYA et al., 2019).

Atualmente, os RFs têm sido usados com sucesso nos campos da engenharia geotécnica e da mineração. Como, por exemplo, para a previsão de explosão de rocha dura, estabilidade de pilares, construção de mapas litológicos, previsão de parâmetros como resistência à compressão uniaxial e módulo de elasticidade (HARRIS; GRUNSKY, 2015; MATIN et al., 2018; XIE; PENG, 2019).

2.4.2. Geoestatística

A geoestatística é o ramo da estatística que foi desenvolvido a partir da década de 1960 para atender à mineração, especificamente aos estudos visando a definição de teores de minério num determinado maciço rochoso. Desde então, seu uso se expandiu para outras áreas do conhecimento, e sua aplicação na mineração continua expressiva.

O embasamento teórico da geoestatística consiste no conceito de dependência espacial e no entendimento de que cada ponto no espaço não apresenta um único valor, mas sim uma distribuição de probabilidade de ocorrência de valores. Tendo por base a falta de conclusão do Engenheiro Daniel Krige sobre variações das concentrações de ouro em minerações na África do Sul, o Engenheiro Goerges Matheron desenvolveu, anos mais tarde, a Teoria das Variáveis Regionalizadas que contém os fundamentos desta ciência (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Uma variável regionalizada é qualquer função numérica com uma distribuição e variação espacial, mostrando uma continuidade aparente, mas cujas variações não podem ser previstas por uma função determinística. Apresentam uma aparente continuidade no espaço, sendo representadas por funções numéricas ordinárias que assumem um valor definido a cada

ponto no espaço e matematicamente descrevem um fenômeno natural. A continuidade geográfica atribuída se manifesta pela tendência que a variável tem que apresentar valores muito próximos em dois pontos vizinhos e mais diferentes à medida que os pontos vão ficando mais distantes. Além dessa propriedade, a variável regionalizada pode apresentar os seguintes atributos: localização, anisotropia e transição (LANDIM, 1998; VIEIRA, 2000; YAMAMOTO; LANDIM, 2013). A inferência da continuidade espacial de uma variável regionalizada pode ser realizada com valores amostrais tendo em vista a estatística de dois pontos amostrados (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

A geoestatística, segundo Ramírez (2009) e Chiessib et al., (2010), procura reconstruir comportamentos espaciais de uma variável pela estimação de fenômenos naturais investigados e faz isso utilizando variáveis randômicas e o conceito de semivariograma. Souza e Cabral (2017) argumentam que o semivariograma expressa a correlação entre pares de pontos, oriundos de valores que foram amostrados em diferentes posições, considerando não apenas o valor do ponto em si, mas também, informações sobre a variabilidade espacial, tais como direções e distâncias de continuidade.

O semivariograma é um gráfico que permite individualizar a correlação espacial entre os dados amostrados, traçando a distância entre os pares de pontos de amostragem, no eixo x, em relação à sua semivariância, no eixo y (FERRARI, 2013). Andriotti (2013) argumenta que em termos matemáticos o semivariograma é a média do quadrado das diferenças entre todos os pares de pontos em uma área analisada, separados por um vetor distância h. É possível obtê-lo empregando a Equação (3).

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \dots\dots\dots(3)$$

Em que:

$Z(x_i)$ é o valor do ponto x_i

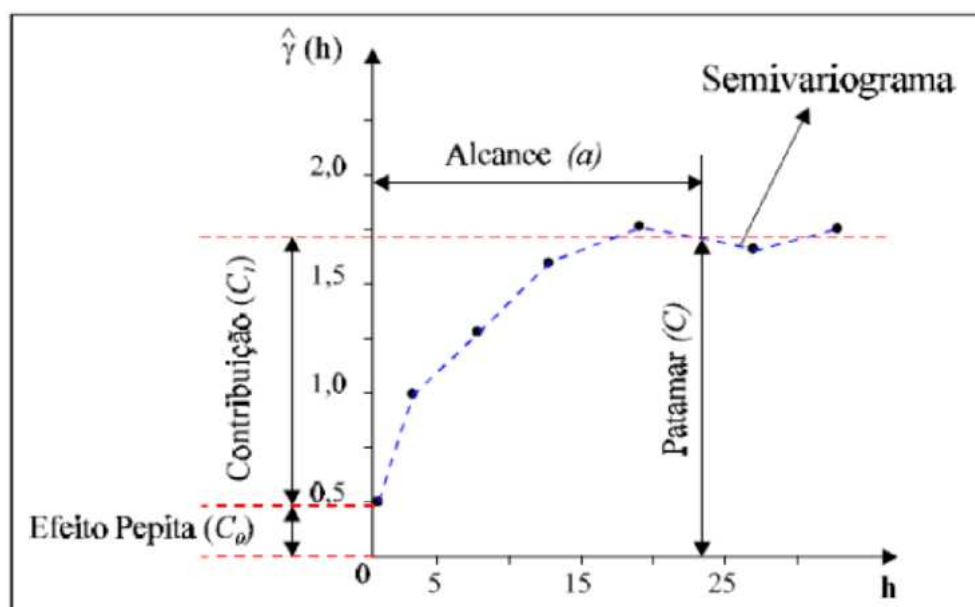
$Z(x_i + h)$ é o valor observado no ponto $(x_i + h)$

$\hat{\gamma}(h)$ é o valor estimado da semivariância na distância h

$N(h)$ é o número de pares de pontos separados entre si por uma distância h

De acordo com Carmo et al. (2015), o comportamento espacial de uma variável estudada pode ser identificado através do cálculo do semivariograma empírico. Neste, conforme observado na Figura 3, tem-se que são identificados alguns parâmetros os quais podem ser ajustados, são eles: o alcance (a) que representa a distância na qual tem-se correlação espacial entre as amostras; o patamar (C) trata-se do valor da variância em que o semivariograma se estabiliza; o efeito pepita (C_0) é o valor da semivariância para a distância igual a zero e; a contribuição (C_1) consiste na diferença entre os valores do patamar e do efeito pepita, cujo resultado permite quantificar a variabilidade dos dados.

Figura 3– Parâmetros do semivariograma



Fonte: Câmara e Medeiros (1998).

Oliver e Webster (2014) ponderam que a confiabilidade de um semivariograma empírico é afetada por alguns fatores, tais como: tamanho da amostra, intervalo entre os pontos amostrados, distribuição dos dados, anisotropia e tendência. O tamanho da amostra é o principal fator que determina a precisão do variograma e é sobre o qual tem-se controle. O intervalo dos pontos amostrados pode ser regular (ou não) e podem estar agrupados. Outro fator que interfere é a distribuição dos dados que pode provocar distorções no variograma. Por fim, tem-se a anisotropia e a tendência, sendo que a primeira é a modificação no variograma com a direção adotada e a tendência é a variação gradual no espaço.

Após a construção do semivariograma empírico é necessário encontrar o semivariograma teórico que melhor lhe convém: o semivariograma empírico precisa ser substituído por um modelo de semivariograma aceitável, ou seja, precisam obedecer a certas propriedades numéricas para que as equações dos interpoladores (krigagem) sejam solucionáveis. O ajuste de um modelo teórico ao semivariograma calculado através dos pontos amostrados é essencial, porque dele dependerá todos os cálculos com os interpoladores geoestatísticos que serão realizados posteriormente. Os modelos mais empregados são os modelos linear, esférico e exponencial. Mesmo com tamanha importância, tem-se incertezas na realização do ajuste. Entende-se que quanto mais simples puder ser o modelo ajustado, melhor (VIEIRA, 2000; FERRARI, 2013).

Ainda em relação ao semivariograma tem-se que o mesmo pode apresentar comportamento isotrópico ou anisotrópico a depender se os dados analisados variam, ou não, com a direção. Caso a anisotropia seja identificada, torna-se necessário efetuar o cálculo dos semivariogramas direcionais (YAMAMOTO E LANDIM, 2013).

Tavchandjian et al. (1997) defendem que os procedimentos em geoestatística geralmente possuem três passos. O primeiro passo consiste em obter o semivariograma experimental, no qual tem-se descrita a estrutura espacial dos dados. No segundo passo, sob o gráfico do semivariograma empírico é ajustado uma função teórica com expressões analíticas. Por fim, no terceiro passo, fundamentalmente a krigagem, estimadores são escolhidos para minimizar a variância do erro da variável analisada.

Segundo Oliver e Webster (2014), a krigagem trata-se de um termo genérico para uma gama de métodos de mínimos quadrados que fornecem as melhores previsões lineares sem viés, ou seja, resultados com variância mínima e com condição de não-tendenciosidade. Do inglês tem-se BLUP que significa Best Linear Unbiased Estimation. Ainda, de acordo com aqueles autores, a krigagem requer apenas conhecimento da função (conjunto de equações lineares) e dos dados do semivariograma para sua implementação.

A krigagem é um método que se propõe a estimar um valor de uma variável distribuída no espaço e/ou no tempo, tendo como referência valores próximos quando considerados dependentes espacialmente pelo semivariograma. O objetivo final é que a estimativa represente, de forma fidedigna, o que seria o valor medido para um determinado ponto. Assim sendo, a krigagem faz o melhor uso do conhecimento existente, levando em conta a maneira como uma

propriedade varia no espaço através do modelo de semivariograma (BLÖSCHL, 2002; YAMAMOTO; LANDIM, 2013; FABRÍCIO et al., 2015).

As equações de krigagem podem ser representadas na forma matricial, forma mais comum de representação em sistemas computacionais. Para a krigagem em uma dimensão, tem-se a Equação (4).

$$A\lambda = b \text{(4)}$$

Em que:

$$A = \begin{bmatrix} \gamma(X_1, X_1) & \gamma(X_1, X_2) & \cdots & \gamma(X_1, X_N) & 1 \\ \gamma(X_2, X_1) & \gamma(X_2, X_2) & \cdots & \gamma(X_2, X_N) & 1 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ \gamma(X_N, X_1) & \gamma(X_N, X_2) & \cdots & \gamma(X_N, X_N) & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_N \\ \psi(X_0) \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} \gamma(X_1, X_0) \\ \gamma(X_2, X_0) \\ \vdots \\ \gamma(X_N, X_0) \\ 1 \end{bmatrix}$$

Existem vários tipos de krigagem, sendo a Krigagem Ordinária (KO) e a Krigagem Simples (KS). A KO é muito usual na área de mineração. Segundo Yamamoto e Landim (2013), a krigagem ordinária produz estimativas suavizadas em que os valores mais altos são subestimados e os valores mais baixos superestimados, dando origem a um fenômeno conhecido como efeito de suavização. Contudo, este efeito não é exclusivo da krigagem

ordinária, mas está relacionado com todos os métodos de estimação baseados na média móvel ponderada.

A KO é um método geoestatístico linear que fornece estimativa local por interpolação. D Krige e G. Matheron introduziram essa técnica de estimativa linear com o objetivo de reduzir o efeito da variação de volume. Eles decidiram por uma técnica linear porque acredita-se que ela forneceria a menor quantidade de diferença entre os valores reais e estimado. A KS pressupõe que variáveis regionalizadas são estacionárias e que a média é desconhecida (ARMSTRONG, 1989). Tem-se ainda que a krigagem ordinária é um dos métodos da geoestatística para se estimar um ponto não amostrado a partir da informação da vizinhança próxima. Essa estimativa é feita a partir da minimização da variância do erro, ou seja, a estimativa resultante minimiza a variância de estimativa (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). A krigagem ordinária pode ser feita tanto em um ponto como em uma área e fornece também uma medida de incerteza, que pode ser medida pela variância de krigagem ou pela variância de interpolação, conforme proposto por Yamamoto (2017).

Já a suposição que governa a Krigagem Simples (KS) é a teoria da estacionariedade, segundo a qual a média e a variância permanecem constantes e são conhecidas em todos os locais. A KS é um método de estimativa em que a condição de $\sum \lambda_i = 1$ não se aplica. A KS deve ser imparcial e deve ter uma variação mínima. O erro de estimativa deve ter um valor esperado de zero para evitar viés. A média do erro de estimativa é zero, portanto, o estimador é imparcial e não há restrição declarada na soma dos pesos. Na KS os pesos são baseados no espaçamento das amostras em relação a outra e ao ponto que está sendo estimado. Os pesos não dependem de maneira alguma do grau das amostras nos pontos usados na estimativa (MPANZA, 2015).

A diferença entre os dois tipos de krigagem são as restrições impostas durante a minimização da variância. A KO pressupõe que a média é desconhecida, enquanto a KS assume que é conhecida e constante ao longo do depósito. A KO explica as flutuações locais da média, limitando a área de estacionariedade da mesma à vizinhança local, o que significa que a média pode variar na área de estudo e não permanece constante. Assim, a média local na KO não é a mesma que a global. Logo, em áreas de grau de informações, a estimativa da KO será menor que a estimativa da KS, pois a média local é menor que a média global. Em regiões com alto grau de informação, a estimativa da KO é maior que a estimativa KS, porque a média local é

maior que a média global, Quadro 3. A KS enfatiza forte estacionariedade, onde o valor médio permanece constante para toda a área de estudo (GOOVAERTS, 1997; MPANZA, 2015).

Quadro 3 - Comparação entre KO e KS

Krigagem Ordinária - KO	Krigagem Simples - KS
A soma dos pesos é igual a um.	A soma dos pesos não precisa ser igual a um.
Não requer conhecimento ou estacionariedade da média em toda a área de estudo.	Supõe que a média seja conhecida e permaneça constante em toda a área de estudo.
A média pode flutuar sobre a área de estudo.	Enfatiza-se a forte estacionariedade.
Estima a média local em cada ponto com dados específicos dos vizinhos.	Assume uma média estacionária.
A KO se adapta bem as tendências, pois a média não permanece constante.	A KS não segue bem as tendências, já que se supõe que a média seja constante.

Fonte: GOOVAERTS, 1997.

Existem outros tipos de krigagem, contudo como não foram empregadas no presente trabalho não foram apresentadas. Nos trabalhos de Olea (1999), Journel e Huijbregts (1978) e Correia (2010) tem-se uma explicação pormenorizada sobre os demais diferentes tipos de krigagem.

Independentemente do tipo de krigagem empregada, tem-se que o uso de métodos geoestatísticos possibilita estimar valores de variáveis desconhecidas, baseada em pontos vizinhos, em posições geográficas desejadas. Porém, a esta estimativa incorpora-se algum erro, haja vista que o valor exato da variável predita é desconhecido. Diante disso, torna-se relevante ter alguma indicação da magnitude deste erro gerado para se conhecer/decidir se a estimativa foi bem calculada, ou o contrário. Para tal, pode-se fazer uso das técnicas de validação (VIEIRA, 2000). Correia (2010) argumenta que vários fatores podem influenciar no erro de estimação de uma variável, dentre eles, o número de amostras, a proximidade das amostras ao ponto de estimativa, a configuração espacial das amostras e a natureza do próprio fenômeno natural analisado.

Dentre as principais técnicas de validação tem-se o método K-fold e o método Leave-one-out. O método K-fold consiste em dividir a amostra d em K partes ($d_1, d_2, \dots, d_k$) de tamanho semelhante m_k , em que $\sum_{k=1}^K m_k = n$. O processo de cálculo terá K interações individuais em que a amostra de validação será dada por d_k , com k variando de 1 a K ($k=1,2,\dots,K$), e a amostra de treino para a obtenção do preditor será o conjunto das outras $K-1$ partes, ou seja, $d_{(-k)} = \{d_1, d_2, \dots, d_{k-1}, d_{k+1}, \dots, d_K\}$. Assim sendo, no final dos K passos, todos os dados seja do treino ou da validação terão sido usados. Quanto maior o valor de K mais preciso será o modelo, contudo maior será o esforço computacional. Assim, os valores mais usuais para K são 2, 5 e 10, sendo que este último valor tem apresentado bom desempenho em diferentes estudos (BURMAN, 1989; KOHAVI, 1995; KIM, 2009; BORRA; CIACCIO, 2010; CUNHA, 2019).

Já o método do Leave-one-out é um caso especial do K-fold em que cada interação a amostra de validação será correspondente a uma observação e a amostra de treino, responsável pelo cálculo do preditor, será feita com as outras $n-1$ observações. Trata-se de um método com excelentes resultados haja vista que a amostra de treino é quase todo o banco de dados, todavia tende a apresentar alta variabilidade pois as parcelas de cada etapa possuem apenas uma observação e, ainda, tem um custo computacional gigantesco (KIM, 2009; BORRA; CIACCIO, 2010).

Em relação a aplicação de geoestatística na área de mineração, especificamente, na área de mecânica das rochas tem-se que alguns autores empregaram a técnica para analisar alguns problemas nesta área do conhecimento. Dentre estes menciona-se Gentier et al. (2000) que empregaram geoestatística para estudar a relação entre a geometria das fraturas e os danos causados pela tensão de cisalhamento. Long e Billaux (1987), Chilès (1988), Billaux et al. (1989), Dowd et al. (2007) e Raffie e Vinches (2008) aplicaram geoestatística em problemas de distribuição de fraturas em maciços rochosos. Já La Pointe (1980), Yu e Mostyn (1993), Tavchandjian et al. (1997), Ozturk e Nasuf (2002), Gumiaux, Gapais e Brun (2003) e, Ellefmo e Eidsvik (2009) estimaram diferentes propriedades do maciço rochoso, tais como orientação de juntas, zonas de cisalhamento, entre outras, empregando geoestatística.

Oh, Chung e Lee (2004), You e Lee (2006), Stavroupolou et al. (2007), Choi e Lee (2007), Exadaktylos e Stavropoulou (2008), Choi, Yoon e Park (2009) e Santos, Da Silva e Brito (2018) estimaram a classificação RMR, principalmente em projetos de túneis. Na grande

maioria dos estudos apresentados nota-se que classificação RMR foi estimada usando como dados de entrada as informações advindas dos furos de sondagem, sendo que em alguns casos a estes dados foram acrescidas informações de levantamentos geofísicos. Já em relação ao tipo de krigagem empregada tem-se que as principais foram as KS, KO e a krigagem de indicadores. Ferrari, Apuani e Giani (2014) argumentam que, analisando trabalhos realizados com a classificação RMR, na maioria dos estudos considerou-se a variável como uma única variável regionalizada, e não como a soma de mais variáveis. Esta abordagem também foi empregada no presente estudo.

Além disso, tem-se alguns trabalhos estimaram a variável RQD através do emprego da geoestatística. Dentre estes tem-se Ayalew, Reik e Busch (2002), que estimaram o RQD empregando a KO para um projeto da casa de força de uma hidroelétrica localizada na Etiópia. Öztürk e Nasuf (2002) e Öztürk e Simdi (2014) a aplicaram em projetos de escavação de túneis em Istambul. Por fim, Seguret e Guajardo (2015) a utilizaram para obtenção do RQD em uma mina de cobre no Chile.

Por fim, Aalianvari, Soltani-Mohammadi e Rahemi (2018) empregaram geoestatística para interpolar parâmetros geomecânicos e por utilizar o programa SGeMS (Stanford Geoestatistical Earth Modeling Softwares). Estes autores empregaram a KO para estimar o RQD, a Resistência à Compressão Uniaxial (UCS) e o RMR de um túnel de uma barragem no Irã. Foram utilizadas informações oriundas de 24 furos de sondagem e o programa usado para confecção do modelo foi o SGeMS que é um programa de código aberto voltado para resolução de problemas envolvendo variáveis relacionadas espacialmente. Neste estudo todos os variogramas foram ajustados ao modelo esférico e o resultado da validação do modelo foi muito satisfatória (r^2 acima de 0.80) para as três variáveis analisadas.

2.5 Programas Comerciais: Modelagem geomecânica

Yamamoto e Landim (2013) mencionam que existem programas específicos, tanto comerciais quanto de livre acesso, para aplicação dos métodos geoestatísticos. O emprego da geoestatística para construção de modelos em geral se beneficiou e se consolidou com o auxílio do avanço computacional obtido nas últimas décadas. Contudo, como mencionado por Ming et

al. (2010) a espacialização de informações pontuais para construção dos modelos geomecânicos 3D não é, ainda, uma tarefa trivial.

Dentre os softwares de livre acesso que realizam modelagem geomecânica empregando geoestatística tem-se o SGeMS (Stanford Geoestatistical Earth Modeling Softwares) que é um pacote de programas criado pela Universidade de Stanford, nos Estados Unidos em linguagem computacional C++ que simula interativamente sob a rede Windows. Este pacote foi desenvolvido para substituir o GSLib (Geostatistical Program Library), criado no ano de 1992 pela mesma instituição, contudo para o ambiente Ms-Dos (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). E, tem-se a linguagem de programação R.

O R não é um programa, mas sim uma linguagem e ambiente para computação estatística e gráficos. Sua origem está vinculada à implementação da linguagem computacional S desenvolvida pela AT&T Bell Laboratories. O ambiente R, ou simplesmente R, trata-se de uma linguagem de programação própria de domínio público cujo objetivo é propiciar a análise e manipulação de dados, além de visualização gráfica. Possui código fonte aberto, podendo ser alterado e/ou implementado por qualquer usuário e possui um elevado número de colaboradores ao redor do mundo, sendo estes das mais diversas áreas do conhecimento. Ressalta-se que o R não é um programa estatístico, mas suas rotinas – seus diversos pacotes – permitem a manipulação, a avaliação e a interpretação de procedimentos estatísticos aplicados a dados diversos. Alguns destes pacotes são considerados pacotes-padrão do R e tantos outros podem ser obtidos através da família CRAN em sites específicos. Na busca por uma plataforma de programação mais “amigável” no R foi criado o RStudio.

Dentre os programas comerciais para construção de modelos geomecânicos, tem-se o Leapfrog Geo e o Geokrige. O Leapfrog Geo, desenvolvido pela ARANZ Geo Limited, é um programa de modelagem geológica que utiliza modelagem implícita em que a geração de superfícies é fácil, rápida e se dá a partir de um conjunto de dados descritos por funções de base radial (FBR), ou seja, seu valor é dependente única e exclusivamente da distância (LEAPFROG, 2017). O Leapfrog Geo permite a construção de modelos geológicos agregando informações de dados de furos de sondagem, de modelos de blocos, de falhas, entre outros. Sendo possível, inclusive, considerar a cronologia tanto dos litotipos quanto das falhas. O uso deste programa para construção de modelos geomecânicos não é usual. Entretanto, a mineradora que cedeu os

dados para utilização no presente trabalho empregou o Leapfrog na confecção do modelo geomecânico da área de estudo.

O Geokrige é um programa brasileiro para modelagem geológica e geoestatística de recursos minerais, escrito inteiramente em linguagem Delphi e conta com recursos gráficos em GLScene, cuja biblioteca de rotinas é suportada pelo OpenGL, disponibilizado pela plataforma Windows. A visualização dos objetivos em 3D foi desenvolvida exclusivamente para o Geokrige, seu sistema foi desenvolvido visando facilitar a sua utilização e minimizar o número de comandos executados (YAMAMOTO, 2017). Este programa foi lançado comercialmente no primeiro semestre de 2017 e, ainda, não se tem na literatura técnica o relato do seu uso para modelos geomecânicos. Todavia, Patias et al. (2017) utilizaram um sistema muito semelhante ao Geokrige, inclusive criado pelo mesmo desenvolvedor, para realizar uma modelagem geológica e geotécnica da fundação integrada com dados piezométricos na Usina de Itaipu.

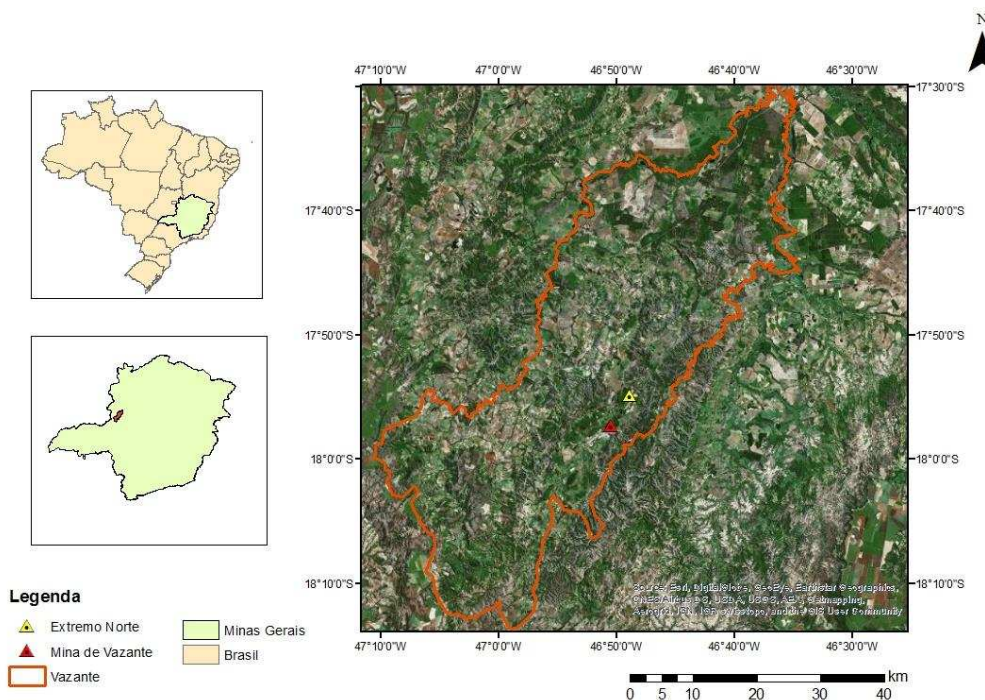
3 METODOLOGIA

A metodologia para realização do presente estudo está dividida em duas partes, sendo a primeira a caracterização da área de estudo e a segunda nos materiais e métodos empregados.

3.1 Caracterização da área de estudo

A área de estudo é a mina subterrânea de Vazante que está localizada no Município de mesmo nome, na região noroeste do Estado de Minas Gerais, Sudeste do Brasil. Trata-se de uma mina subterrânea cujo minério extraído é o zinco. A empresa opera a Mina de Vazante em duas frentes, composta pelas Mina de Vazante – cavas da Lumiadeira, das Bocainas e do Sucuri e a Mina do Extremo Norte (denominada a partir de agora como Extremo Norte), conforme se apresenta na Figura 4. Esta última é o foco do presente estudo.

Figura 4 - Localização do Extremo Norte na Unidade de Vazante, Vazante/MG



Fonte: Própria autora.

A região de Vazante consiste numa faixa central de direção geral NE com aproximadamente 60 (sessenta) km de extensão, relevo relativamente plano, com ocorrência de metadolomitos. Encontra-se margeada por um relevo montanhoso representado por metapelitos e metamargas. Possui uma faixa central que é capeada por uma expressiva cobertura coluvionar e aluvionar, com espessura que varia desde poucos metros até uma centena de metros, o que dificulta a identificação e a análise dos processos de carstificação (BITTENCOURT; REIS NETO, 2012).

A mina de Vazante está localizada em uma zona de cisalhamento, por onde os fluidos mineralizados percolaram dando origem à cristalização do minério de zinco e minerais associados. Insere-se no grupo geológico Vazante, no qual se observa grandes deformações associadas a graus de metamorfismo variável. Com uma litologia metamorfizada e muito deformada, com alta complexidade geotécnica, um sistema hidrogeológico expressivo e associado às características cársticas e estruturais (especialmente às estruturas com direção preferencial NW-SE), tem-se condições ideais para rupturas no maciço rochoso, intensificação dos processos de alteração e de cartificação, que originam rupturas por deslocamento e queda de blocos durante as operações da mina e, ainda, a formação de cavidades que podem conter material alterado ou água sob pressão (BHERING, 2009; BITTENCOURT; REIS NETO, 2012).

O grupo Vazante é dividido em sete formações, conforme apresentado na Figura 5. As rochas encaixantes do minério de zinco são os dolomitos róseos intercalados com rochas metapelíticas, geralmente margas e ardósias; os dolomitos cinzas, que também são encontrados intercalados com metapelitos e margas; além das brechas dolomíticas e da siderita e ankerita. Os dolomitos róseos intercalados com margas e ardósias, são correlatos à Formação Serra do Poço Verde, Membro Pamplona, e são encontrados preferencialmente na região da capa da Falha Vazante, enquanto os dolomitos cinzas (Membro Morro do Pinheiro) se encontram na lapa da falha. Tem-se, também, nesta mesma região, filitos carbonosos intercalado com os dolomitos cinza (DARDENE, 2000; BITTENCOURT; REIS NETO, 2012).

A região ao redor das feições cársticas, preenchidas por material inconsolidado, dá origem a vários graus de intemperismo e de fraturamento no maciço rochoso. Tem-se uma melhora gradual do grau de alteração, com o afastamento das estruturas preferenciais de dissolução, principalmente as estruturas com direção NW- SE e as NE-SW associadas à Falha

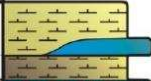
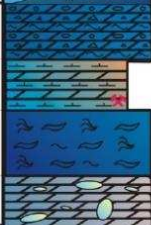
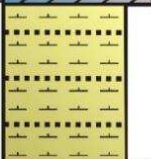
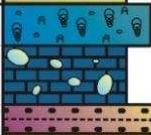
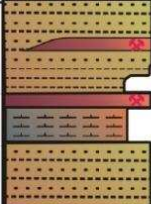
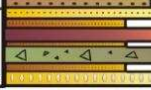
Vazante, identificada em campo, e o sistema de fraturas paralelas. A intensidade da influência de cada sistema é variável em função da profundidade (BITTENCOURT; REIS NETO, 2012).

De acordo com estudos realizados na área e informações verificadas in loco, o maciço da mina de Vazante é fraturado e está associado a uma grande percolação de água que provoca espessas zonas de alteração e de dissolução, responsáveis pela formação de cavidades que, normalmente, apresentam-se preenchidas por material argiloso intemperizado bastante fluido e com blocos de rocha inseridos. Já em relação ao corpo mineralizado, este é constituído de uma espessa zona de cisalhamento em que várias superfícies anastomosadas se entrecruzam, isolando corpos lenticulares com dimensões decimétricas a métricas. Por fim, nota-se que as rupturas no maciço são comumente controladas pelas zonas de cisalhamento que dão origem às discontinuidades. Estas possuem espaçamento irregular, variando de decimétrico a métrico; apresentam baixa resistência, sendo planas a pouco onduladas na escala de lavra e encontram-se normalmente preenchidas por material argiloso de espessura milimétrica (VOTORANTIM, 2013).

Os sistemas de classificação Rock Mass Rating (RMR) e Tunelling Quality Index (Q) não foram suficientes para captar diferenças sutis na qualidade do maciço rochoso da Mina de Vazante. Logo, segundo a Votorantim (2013), houve a necessidade de criação de uma classificação local, mostrada na Figura 6.

Para criação da classificação local (Sistema Vazante), levou-se em consideração conhecimentos empíricos sobre o maciço rochoso local, dados de furos de sondagem e resultados de ensaios laboratoriais. Com base nestas informações, concluiu-se que os parâmetros mais relevantes para a Mina de Vazante, e que deveriam compor a classificação local, seriam grau de fraturamento, grau de alteração, litologia, padrão estrutural, presença de fendas, recuperação de sondagens e RQD (FIGUEIREDO, 2016). De posse das avaliações do padrão estrutural e de retroanálises de rupturas foi definido o padrão de atirantamento para cada classe geotécnica do maciço rochoso de Vazante. O tipo de suporte indicado para cada classe foi definido através de tentativa e erro embasada em fundamentações teóricas e práticas (CHARBEL, 2015; FIGUEIREDO, 2016).

Figura 5 - Coluna estratigráfica do Grupo Vazante

Grupo	Formação	Membro	Descrição e depósitos/ocor- rências minerais associadas	
VAZANTE	Lapa	Serra da Lapa	Ardósias carbonatadas cinzas Lentes de dolomitos	
		Serra do Velosinho	Ardósias carbonatadas pretas	
	Morro do Calcário	Pamplona Superior	Bioherma estromatolítico, fácies de brechas e dolarenitos Depósitos minerais: MORRO AGUDO, Fagundes e Ambrósia	
	Serra do Poço Verde	Pamplona Intermediário	Dolomitos rosados com esteiras estromatolíticas, nódulos de barita e gretas de ressecamento	
		Pamplona Inferior	Ardósias cinza a verde com intercalações de dolomitos rosados Depósito mineral: Vazante	
		Morro do Pinheiro Superior	Dolomitos cinza-escuros com esteiras estromatolíticas e birds eyes	
		Morro do Pinheiro Inferior	Dolomitos cinza-claros a rosados com intercalações de brechas e dolareníticos	
	Serra do Garrote		Ardósias cinzas com lentes de quartzitos esporádicas	
	Lagamar	Sumidouro	Bioherma estromatolítico Calcários cinza-escuros Brechas dolomíticas	
		Arrependido	Conglomerados	
	Rocinha		Ritmitos Depósito mineral: Lagamar - fosforito	
			Ardósias cinza-escuras, piritosas e fosfatadas Depósito mineral: Rocinha - fosforito	
	Santo Antônio do Bonito		Ritmitos Intercalação de quartzitos, fosforitos, diamictitos e ardósias Ocorrência mineral: Coromandel - fosforito	

Fonte: Neves (2011).

Figura 6 - Classificação geomecânica de Vazante

CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DA MINA DE VAZANTE										
LEGENDA	CLASSE	GRAU DE ALTERAÇÃO	GRAU DE FRATURAMENTO	QUALIDADE DA ROCHA	PADRÃO ESTRUTURAL	LITOLOGIA	PRESENÇA DE FENDAS	FRAGMENTAÇÃO DOS BLOCOS	RECUPERAÇÃO (%)	RQD (%)
	II-A	A2	F2-F3	muito boa	laje	Dolomitos	não ocorre	m3	>95%	> 60
	II-B	A2	F2-F3	muito boa	cunha	Brecha	não ocorre	m3	>95%	> 60
	III-A	A2-A3	F3	muito boa	laje	Dolomitos	não ocorre	dm3 a m3	90% a 95%	50 a 75
	III-B	A2-A3	F3	muito boa	cunha	Brecha	não ocorre	dm3 a m3	90% a 95%	50 a 75
	IV-A	A3	F3-F4	boa / média	-	-	esp. cm a dm	cm3 a dm3	>90%	25 a 50
	IV-B	A3-A4	F3-F4	média / ruim	-	-	esp. cm a dm	cm3 a dm3	75% a 95%	25 a 50
	V	A3-A4	F4	muito ruim	-	-	esp. dm a m	cm3 a dm3	50% a 75%	<25
	VI	A2	F4-F5	muito ruim	laje	Filito	não ocorre	cm3 a dm3	>95%	<25
	VII	A4	F4-F5	muito ruim	-	-	espes.métrica	-	<50%	<25
	PILARES	Independente dos parâmetros acima, considerar o efeito das tensões induzidas.								
Grau de Alteração A2- Alteração pouco penetrante, descoloração de alguns minerais. A rocha perde muito pouca resistência ao impacto do martelo e não é friável. A3- Rocha muito descolorida, alteração dos minerais é muito penetrante, assumindo colorações predominante alaranjada e avermelhada. Material não é friável. Resistência moderada ao impacto do martelo. A4- Rocha totalmente alterada com porções de argila bem desenvolvidas. Fragmentos friáveis e preservam estrutura original da rocha. A5- Solo: textura original da rocha foi totalmente destruída, apresentando geralmente cores avermelhadas.					Grau de Fraturamento F1- Pouco fraturado: espaçamento médio das fraturas maior 2m, formando blocos da ordem de m3. F2- Pouco fraturado: espaçamento médio das fraturas de 0,6 a 2m, formando blocos da ordem de m3. F3- Medianamente fraturado: espaçamento médio das fraturas de 0,2 a 0,6m, formando blocos da ordem de dm3 a m3. F4- Muito fraturado: espaçamento médio das fraturas de 0,06 a 0,2m, formando blocos da ordem de cm3 a dm3. F5- Muito fraturado: espaçamento médio das fraturas menor que 0,06m, formando blocos menores ou da ordem de cm3.					

Fonte: Votorantim, 2013.

3.2 Materiais e métodos

Os procedimentos empregados para realização do presente estudo foram divididos em três etapas. A primeira foi o tratamento dos dados, a segundo foi a realização de uma análise exploratória dos dados, sendo na sequência empregado o RF para definição da variável mais importante para o comportamento geomecânico do maciço rochoso da área de estudo. Na terceira, fez-se uso de interpoladores determinísticos e geoestatísticos, (IDW e krigagens, respectivamente) para geração de um modelo geomecânico para a variável definida pelo RF e para a classificação RMR (Rock Mass Rating) simplificada.

As estimativas de existência de recursos minerais usam dados de furos de sondagem, nos quais coletam-se informações como extensão e geometria do corpo mineralizado e a obtenção de valores de parâmetros físicos e químicos (WEBBER et al., 2013). A realização de furos de sondagem em mineradoras é, portanto, uma atividade corriqueira em que uma vez executados os furos, faz-se a descrição litológica e geomecânica dos mesmos.

Essa descrição é realizada por trechos com mesmo comportamento, tendo início na superfície (“boca” do furo) até a sua profundidade final. Usualmente, faz-se a descrição separada dos diferentes tipos litológicos, das estruturas geológicas e das características geomecânicas. Todas essas informações são armazenadas em bancos de dados e são, posteriormente, utilizadas para diferentes objetivos e projetos, tais como elaboração de modelo litológico da área mineralizada, modelos de blocos ou para elaboração de seções geológico-geotécnicas. Jakubec e Esterhuizen (2007) alertam que equívocos podem acontecer no momento da descrição, tais como, dificuldade na diferenciação entre fraturas naturais e quebras induzidas artificialmente, o reconhecimento do material de preenchimento das descontinuidades, entre outras. Assim, é necessário que esta atividade seja realizada de maneira criteriosa e por pessoas com experiência técnica.

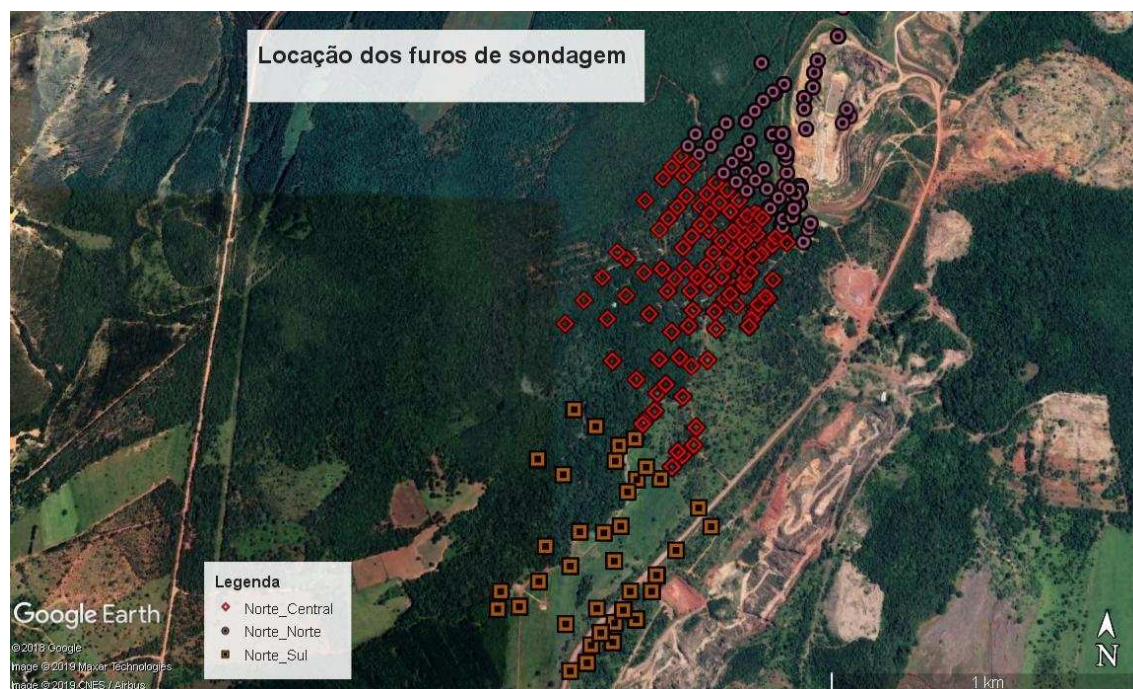
Os dados obtidos através das sondagens são fundamentais para a tomada de decisão em uma mineração. Definições como em qual direção desenvolve-se um corpo mineralizado; quais os teores existentes; a melhor técnica de extração deste recurso e quais as características geomecânicas principais dos maciços rochosos amostrados são possíveis graças aos dados das sondagens. Logo, quanto mais confiável for o dado advindo dos furos de sondagens, melhor será a qualidade de projetos geológicos e geotécnicos elaborados com base nessas informações.

Esta qualidade está relacionada não apenas com a execução do furo em si, mas, principalmente, com a qualidade da descrição das informações obtidas das amostras coletadas no furo.

Bieniawski (1988) defende que os dados geomecânicos precisam ser coletados em quantidade suficiente e com alta qualidade; a interpretação dos mesmos deve ser específica para cada projeto. Assim, diante da necessidade de um banco de dados que contivesse informações de furos de sondagem, firmou-se uma parceria com a Mineração Votorantim SA para obtenção de tais informações. A mineradora que possui operações no município de Vazante, estado de Minas Gerais, gentilmente forneceu seu banco de dados geológico-geotécnicos de uma das minas subterrâneas. Este banco de dados refere-se à mina, também denominada Vazante, em específico a um de seus setores intitulado Extremo Norte.

O banco de dados fornecido era composto por 513 furos de sondagem, sendo dividido em três subsetores, quais sejam: Extremo_Norte_Sul, Extremo_Norte_Central e Extremo_Norte_Norte. Na Figura 7 tem-se os furos de sondagem localizados em cada subsetor. O número de furos de sondagem fornecidos para cada subsetor foi, respectivamente, de 73, 170 e 270 para os setores citados acima. Também foi fornecido um relatório sobre a elaboração e implantação da classificação geomecânica específica para a Mina Subterrânea de Vazante, baseada nos sistemas Q de Barton e no sistema RMR de Bieniawski, específica para a Mina Subterrânea de Vazante. Todavia, não foram disponibilizados pela empresa os mapas/modelos litológicos, geomecânico ou estrutural do setor Extremo Norte.

Figura 7 - Localização dos furos de sondagem do Setor Norte



Fonte: Própria autora.

Para cada um destes subsetores foram fornecidos os seguintes grupos de dados: COLLAR.csv que continha informações sobre as coordenadas dos furos de sondagem, sobre a cota de “boca” e da profundidade; GEOTECH.csv, que trazia informações, por trecho de furo de sondagem, dos parâmetros geomecânicos, tais como classificação local do maciço rochoso, alteração, fraturamento, recuperação e RQD; LITO.csv, que continha informações sobre a litologia de cada trecho dos furos de sondagem; e, SURVEY.csv que trazia informações sobre as inclinações dos furos e as seções geológicas-geomecânicas que o mesmo intercepta.

Foi desenvolvido um script no programa R (R CORE TEAM, 2017) que compilou as informações de localização de cada furo com seus respectivos parâmetros de classificação geomecânicas – alteração, fraturamento, recuperação e RQD – a classificação geomecânica do maciço e sua litologia. O script dava como resposta, uma planilha final com 10 colunas: uma coluna com a identificação do furo e o nome do mesmo; três colunas de coordenadas x, y e z; duas colunas com classificação geomecânica do maciço, sendo uma a classificação local utilizada na mineração (classificação da Mina de Vazante) e a outra classificação RMR simplificada; uma coluna com a litologia; e, por fim, três colunas com parâmetros

geomecânicos, a saber: alteração, fraturamento e RQD. No Quadro 4 tem-se um exemplo da planilha final compilada.

Esclarece-se que a variável recuperação foi suprimida do banco de dados, pois havia informações conflitantes desta variável. Charbel (2015) menciona que a avaliação em conjunto da variável recuperação e da variável RQD seria para possibilitar a verificação de ocorrências de fendas (FD) associadas a regiões do maciço rochoso da mina apresentando elevado RQD. Contudo, no banco de dados fornecido pela mineradora o que foi possível observar foi que para um mesmo intervalo de profundidade tinha-se baixos valores da variável recuperação associados a altos valores de RQD, baixos valores de fraturamento e alteração. Assim, diante das discrepâncias nas informações apresentadas para esta variável, optou-se por excluí-la do banco de dados.

Quadro 4- Exemplo da planilha final do banco de dados

ID	X	Y	Z	CLASS	CLASS LOCAL	LITO	ALTE RACAO	FRATURA MENTO	RQD
ENP29S82WF01	307003.31	8017319.38	0	0	0	S/R	0	0	0
ENP29S82WF01	307003.32	8017319.39	44.95	0	0	S/R	0	0	0
ENP29S82WF01	306996.74	8017324.88	44.95	3	2.5	DORO	2.5	2	84.72
ENP29S82WF01	306996.75	8017324.89	51.1	3	2.5	DORO	2.5	2	84.72
ENP29S82WF01	306997.32	8017324.24	51.1	4	6	DORO	3.5	2	39.02
ENP29S82WF01	306997.33	8017324.25	55.2	4	6	DORO	3.5	2	39.02
ENP29S82WF01	306997.46	8017323.98	55.2	5	9	DORO	3.5	1	13.6
ENP29S82WF01	306997.47	8017323.99	87.7	5	9	DORO	3.5	1	13.6
ENP29S82WF01	307000.95	8017321.56	87.7	4	2.5	DORO	3	2	69.23
ENP29S82WF01	307000.96	8017321.57	94.2	4	2.5	DORO	3	2	69.23
ENP29S82WF01	307001.38	8017321.16	94.2	3	2.5	DORO	2.5	2	86.94
ENP29S82WF01	307001.39	8017321.17	128.2	3	2.5	DORO	2.5	2	86.94
ENP29S82WF01	307003.94	8017318.53	128.2	3	2.5	DORO	2	2	95.85
ENP29S82WF01	307003.95	8017318.54	140.5	3	2.5	DORO	2	2	95.85
ENP29S82WF01	307005.35	8017317.3	140.5	3	2.5	DORO	2.5	2	89.76
ENP29S82WF01	307005.36	8017317.31	150.85	3	2.5	DORO	2.5	2	89.76
ENP29S82WF01	307006.33	8017316.87	150.85	3	2.5	DORO	2	2	97.64
ENP29S82WF01	307006.34	8017316.88	245.4	3	2.5	DORO	2	2	97.64
ENP29S82WF01	307014.35	8017309.65	245.4	3	2.5	DORO	2	2	97.64
ENP29S82WF01	307014.36	8017309.66	249.1	3	2.5	DORO	2	2	97.64
ENP29S82WF01	307014.33	8017309.62	249.1	3	2.5	DORO	2.5	2	95.09
ENP29S82WF01	307014.34	8017309.63	260.5	3	2.5	DORO	2.5	2	95.09
ENP29S82WF01	307014.89	8017309	260.5	3	2.5	DORO	2	2	97.2

Fonte: Própria autora.

A quantidade e qualidade de dados coletados é definida pelos objetivos do projeto geotécnico a ser desenvolvido (HADJIGEORGIOU, 2012). Todavia, no presente trabalho o tipo e a quantidade de dados foram fornecidos pela mineradora e, diante dos dados, fez-se uma análise criteriosa deles para garantir que atendessem à qualidade necessária ao uso pretendido.

Uma vez compilada, iniciou-se a análise e tratamento da planilha. Foram empregados alguns critérios para viabilizar a leitura dos dados no ambiente R (software usado para elaboração dos modelos) e outros para garantir a qualidade dos dados oriundos dos furos de sondagem, visando seu uso para a confecção de modelos geomecânicos multidimensionais para cada um dos três subsetores estudados.

Além do tratamento e análise dos dados, foi proposta uma classificação RMR para o maciço rochoso do Extremo Norte da Mina de Vazante. Esta proposição foi feita visando categorizar o maciço segundo um critério corriqueiro de classificação de maciço rochoso, haja vista que a classificação fornecida no banco de dados era uma classificação de maciço local. Contudo, como no banco de dados não havia todas as informações necessárias para a utilização da citada classificação; faltavam informações sobre as descontinuidades e a resistência à compressão uniaxial entre outras; optou-se por utilizar uma classificação RMR simplificada.

Na classificação RMR simplificada realizada, o peso referente à resistência da rocha intacta foi desconsiderado e no peso associado às condições das descontinuidades, somente o valor relacionado a alteração foi considerado. Além disso, foi admitido o mesmo peso da presença de água para todos os furos de sondagem (igual a 4, escorrimento de água, já que é sabido que a mina apresenta quantidade significativa de água). Diante disso, a classificação RMR simplificada considerou RQD, fraturamento equivalente ao espaçamento, alteração e a presença de água.

De posse do banco de dados tratado, deu-se início a segunda etapa do presente trabalho: a análise exploratória dos dados. Esta análise teve por objetivo buscar um entendimento de como os dados de cada uma das variáveis analisadas – x, y, z, litologia, fraturamento, alteração, RQD, classificação local e classificação RMR simplificada – se comportavam. Assim, foram obtidas medidas estatísticas de tendência central e medidas de dispersão para cada uma destas variáveis.

Na terceira etapa empregou-se o RF para realizar uma regressão e verificar qual variável (ou variáveis) mais afetava o comportamento geomecânico do maciço rochoso de cada

um dos subsetores do Extremo Norte da Mina de Vazante. Para tal, considerou-se a classificação RMR simplificada como a variável resposta (ou de saída) e as demais (x, y, z, litologia, alteração, fraturamento e RQD) como preditoras (ou de entrada).

O método de RF foi empregado no intuito de elencar qual variável (ou variáveis) seria mais importante para explicar o comportamento geomecânico dos dados analisados do Extremo Norte da Mina de Vazante. Marin et al. (2018) argumentam que o objetivo da seleção de variáveis é melhorar a capacidade de interpretação, eliminando entradas irrelevantes para criar um modelo com um pequeno número de variáveis, reduzindo o ruído, evitando o risco de super ajustar, acelerando o tempo de modelagem, melhorando a precisão de um modelo e, finalmente, fornecendo uma melhor definição do processo subjacente que gerou os dados. Ainda, de acordo com aqueles autores, o uso do RF para medir a importância das variáveis tem várias vantagens em comparação com outros métodos similares, tais como: pode determinar o impacto de cada preditor variável individualmente, bem como em interações multivariadas com outros preditores, garante uma medida de importância imparcial e pode ser aplicada a várias áreas do conhecimento.

O RF fornece duas medidas de importância, a Mean Decrease Accuracy (IncMSE) ou precisão do decréscimo médio) e o Mean Decrease Gini (IncNodePurity ou decréscimo médio de Gini). Estas duas medidas podem ser usadas para classificar e selecionar variáveis. O IncMSE quantifica a importância de uma variável medindo a mudança na precisão da previsão, quando os valores da variável são permutados aleatoriamente em comparação com as observações originais; trata-se de uma medida de quanto a precisão diminui se uma variável for excluída do modelo. Já o IncNodePurity é a soma de todas as reduções na impureza de Gini devido a uma determinada variável (quando essa variável é usada para formar uma divisão no RF), normalizada pelo número de árvores. O IncNodePurity é uma medida da contribuição de cada variável preditora para a impureza das árvores resultantes no modelo de RF e reflete quanto cada variável contribui para a homogeneidade dos nós e folhas (CALLE; URREA, 2011; VERIKAS; GELZINIS; BACAUSKIENE, 2011; ZAIMES; GOUNARIDIS; SYMEONAKIS, 2019; MOHAMMADY; POURGHASEMI; AMIRI, 2019).

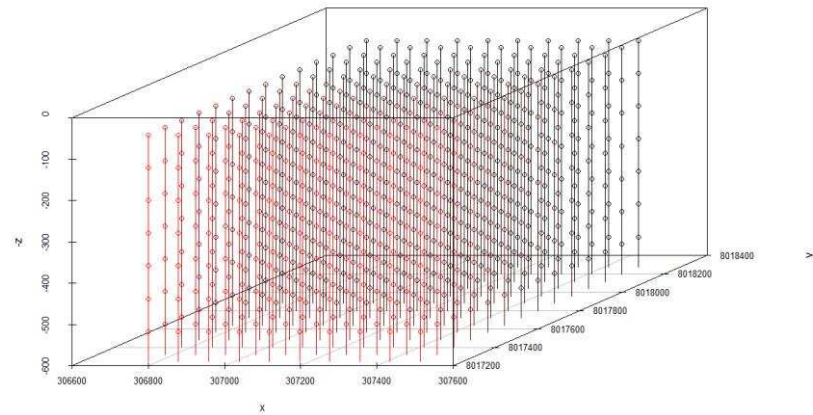
Com os resultados do RF foi possível definir qual variável mais influenciava no comportamento geomecânico do maciço rochoso de cada subsetor do Extremo Norte da Mina de Vazante e, então, selecioná-la para a confecção de um modelo através do uso do interpolador

IDW e das krigagens. Além disso, gerou-se um modelo para a classificação RMR simplificada, finalizado assim, a última etapa da presente pesquisa.

No script desenvolvido para a confecção do modelo geomecânico após a leitura do banco de dados e da análise estatística exploratória, teve início a análise 3D através da criação de um grid regular cúbico de visualização, Figura 8. Neste grid os eixos x e y são as coordenadas geográficas e o eixo z é a profundidade do furo em metros, sendo que todas estas informações tiveram como fonte os furos de sondagem executados na região. Ressalta-se que as dimensões do grid foram definidas a partir da localização geográfica dos furos, ou seja, cada subsetor possui suas próprias dimensões de análise. Uma outra forma de visualização do grid foi desenvolvida, conforme se mostra na Figura 9, sendo que nesta é possível observar os furos de sondagem no espaço.

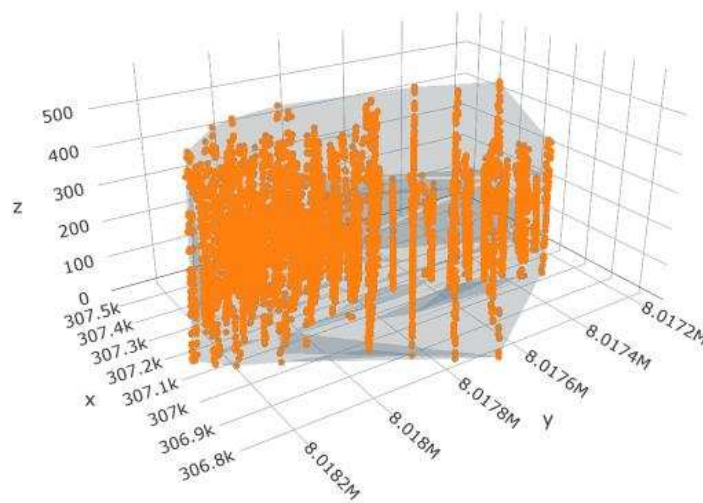
O grid do subsetor Norte_Sul foi: em x de 306570 a 307315 m, em y de 8016535 a 8017415 m e em z de 0 (superfície) até 640 m de profundidade, totalizando assim uma área de análise de 0.7 km². Já para o subsetor Norte_Central tem-se o grid foi de 306740 a 307540 m em x, 8017190 a 8018290 m em y e de zero a 580 m de profundidade, perfazendo uma área de 0.9 km². E, por fim, para o subsetor Norte_Norte tem-se uma área de análise de 0.6 km² e o grid foi de 307135 a 307790 m em x, de 8018010 a 8018890 m em y e da superfície até 515 m de profundidade.

Figura 8 - Exemplo de grid de visualização do modelo geomecânico 3D



Fonte: Própria autora.

Figura 9 - Exemplo de grid de visualização do modelo geomecânico com furos de sondagem



Fonte: Própria autora.

Na sequência, fez-se a interpolação da variável RQD utilizando o IDW para todos os três subsetores do Extremo Norte da Mina de Vazante. Como resultado, obteve-se os modelos multidimensionais com duas visualizações diferentes – uma visualização fatiada,

horizontalmente, em que uma série de mapas foram gerados para diferentes profundidades e uma visualização multidimensional propriamente dita.

Enfatiza-se que para todos os procedimentos realizados, desde o tratamento do banco de dados até a confecção dos modelos geomecânicos em si, foi utilizada a linguagem de programação R. Sendo que os pacotes empregados foram: gstat (PEBESMA, 2004), sp (PEBESMA; BIVAND, 2005), spacetime (PEBESMA, 2012), raster (HIJMANS, 2020), rgeos (BIVAND; RUNDEL, 2020), rgdal (BIVAND; KEITT; ROWLINGSON; 2019), lattice (SARKAR, 2008), moments (KOMSTA; NOVOMESTKY, 2015), plotKML (HENGL et al., 2015), GSIF (HENGL, 2020), ranger (WRIGHT; ZIEGLER; 2017), geoR (RIBEIRO JUNIOR et al., 2020), plotly (SIEVERT, 2020), DescTools (SIGNORELL et al., 2020), readxl (WICKHAM; BRYAN, 2019), psych (REVELLE, 2019), ggplot2 (WICKHAM, 2016), dplyr (WICKHAM, 2020), caret (KUHN, 2020), corrplot (WEI; SIMKO, 2017), spatstat (BADDELEY; RUBAK; TURNER, 2015), maptools (BIVAND; LEWIN-KOH, 2019), scatterplot3d (LIGGES; MÄCHLER, 2003), tcltk2 (GROSJEAN, 2019), doParallel (MICROSOFT, 2019), GGally (SCHLOERKE et al., 2020), e1071 (MEYER et al., 2019), rpart (THERNEAU; ATKINSON, 2019), mlbench (LEISCH; DIMITRIADOU, 2010), randomForest (LIAW; WIENER, 2002), party (HOTHORN; HORKIK; ZEILEIS, 2006), MASS (VENABLES; W.N.; RIPLEY, 2002), nycflights13 (WICKHAM, 2019), gapminder (BRYAN, 2017), Lahman (FRIENDLY, 2019) e htmlwidgets (VAIDYANATHAN et al., 2019).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos na presente pesquisa bem como a discussão dos mesmos foram divididos em: banco de dados, análise exploratória, RF e interpolação.

4.1 Banco de Dados: Tratamento e Análise

De posse da planilha compilada com os dados fornecidos pela mineradora, aplicou-se alguns critérios para garantir a qualidade dos dados e viabilizar a confecção do modelo geomecânico via a linguagem de programação R. O primeiro critério utilizado foi compatibilizar os intervalos de informações litológicas com os intervalos de informações geomecânicas, de modo a obter intervalos iguais que contivessem ambas as informações. E, ainda, fez-se necessário obter as coordenadas geográficas (x e y) dos trechos dos furos através das informações sobre azimuth e rumo de mergulho advindos da sondagem; ou seja, fez-se uma correção da inclinação dos furos. Assim, foram excluídos seis furos de sondagem do total disponibilizado, pois só possuíam informações sobre a litologia e não apresentaram dados sobre os parâmetros geomecânicos. Além disso, foram excluídos mais alguns furos de sondagem, por não possuírem dado de azimuth e rumo de mergulho.

Dando sequência, fez-se uso nas análises do valor inicial e final de cada intervalo nas análises. Assim, o valor final de um intervalo coincidiu com o valor inicial do intervalo subsequente, logo, somou-se 0,01 nas variáveis x e y ao ponto inicial do segundo intervalo em diante, conforme Quadro 5. Tal ação foi necessária porque para uma mesma profundidade tinham-se duas informações distintas de parâmetros geomecânicos e litologia, o que inviabilizaria o tratamento do dado através de ferramentas geoestatísticas.

Quadro 5 -Exemplificação do artifício utilizado com relação a profundidade dos furos

ID	X	Y
ENP29S82WF01	307003.31	8017319.38
ENP29S82WF01	307003.32	8017319.39
ENP29S82WF01	306996.74	8017324.88
ENP29S82WF01	306996.75	8017324.89
ENP29S82WF01	306997.32	8017324.24
ENP29S82WF01	306997.33	8017324.25
ENP29S82WF01	306997.46	8017323.98
ENP29S82WF01	306997.47	8017323.99
ENP29S82WF01	307000.95	8017321.56
ENP29S82WF01	307000.96	8017321.57
ENP29S82WF01	307001.38	8017321.16
ENP29S82WF01	307001.39	8017321.17

Fonte: Própria autora.

Como último critério adotado, tem-se que, para o parâmetro geomecânico RQD utilizou-se o próprio valor proveniente da descrição dos furos e disponível no banco de dados fornecido pela mineradora. Já para os demais parâmetros, alteração e faturamento, e para a classificação geomecânica local, utilizou-se uma escala numérica de correspondência, como apresentado nos Quadro 6, 7 e 8. Esclarece-se que nos intervalos em que foi informado no banco de dados, por exemplo, grau de alteração A2/A3 considerou-se o valor de 2.5 na escala numérica. Igual raciocínio foi empregado para o fraturamento e para a classe geomecânica local.

As litologias presentes no banco de dados encontram-se no Quadro 9. Sua legenda foi fornecida pela mineradora. Ressalta-se que, quanto à litologia, nenhuma modificação foi empregada no banco de dados.

Além disso, vale informar eu nos boletins de sondagem dos furos que compõem o banco de dados não foram disponibilizados pela mineradora. Assim, admitiu-se que o cálculo do RQD foi realizado por trechos de isofraturamento e não por manobra do furo.

Quadro 6- Escala numérica adotada para o grau alteração

Alteração	
Descrição no furo	Escala numérica
A1	1
A2	2
A3	3
A4	4
A5	5

Fonte: Própria autora.

Quadro 7- Escala numérica adotada para o grau de fraturamento

Fraturamento	
Descrição no furo	Escala numérica
F1	1
F2	2
F3	3
F4	4
F5	5

Fonte: Própria autora.

Quadro 8- Escala numérica adotada para a classificação geomecânica local

Classificação Geomecânica Local	
Descrição no furo	Escala numérica
IIA	1
IIB	2
IIIA	3
IIIB	4
IVA	5
IVB	6
V	7
VI	8
VII	9

Fonte: Própria autora.

Quadro 9 - Legenda das litologias da Mina de Vazante

Legenda - Litologias Vazante	
Legenda	Litologia
ARD	Ardósia
BXD	Brecha Hidrotermal
BXD/Dcz	Brecha dolomítica / Dolomito cinza
BXD/doro	Brecha dolomítica / Dolomito Rosa
BXH	Brecha Hematítica
BXW	Brecha Willemítica
DCZ	Dolomito cinza
DCZ/bx	Dolomito cinza
DO	Dolomita
DORO	Dolomito rosa
DORObd	Dolomito rosa
DORObx	Dolomito rosa
DOROfrr	Dolomito rosa
DRA	Dolarenito
DRU	Dolorudito
FD	Fenda
FIL	Filito
FO	Folhelho
HC	Hematita Compacta
MB	Metabásica
MGA	Marga
MT	Material terroso
MT/CAL	Material terroso/Calamina
MTARG	Material argiloso
R/S	Destruído
S/R	Sem recuperação
SOLO	Solo

Fonte: Votorantim Metais Zinco comunicação pessoal.

Tendo finalizado o tratamento dos dados, deu-se início à análise da qualidade. Em alguns intervalos dos furos não havia dados geomecânicos (alteração, fraturamento e RQD) vinculados aos mesmos, nestes casos inseriu-se o valor zero. A falta de informações em alguns intervalos pode estar associada à não recuperação de material rochoso durante o processo de sondagem; sigla S/R ou R/S. Annels e Dominy (2003) defendem que fatores geológicos podem

afetar a recuperação de material, tais como, presença de material inconsolidado, interseção com descontinuidades, porosidade secundária, zonas de falha entre outros. Outra causa provável para a falta de informações é a imperícia no momento da descrição do furo. Hadjigeorgioub (2012) alerta que a coleta de dados geotécnicos precisa ser executada por profissionais devidamente treinados para tal tarefa e que entendam a importância daquela informação.

As siglas Fe e FD, presentes em alguns intervalos dos furos, segundo a mineradora, significavam a presença de fendas no interior do maciço rochoso. Para tais intervalos, também se considerou os parâmetros geomecânicos iguais a zero, uma vez que, sob o ponto físico, tratam-se de espaços vazios no interior do maciço. Figueiredo (2016) relata que estas fendas consistem no resultado da dissolução de minerais carbonáticos nas paredes das descontinuidades devido à presença de água em quantidade significativa. Afirma, ainda, que as fendas podem estar preenchidas por material inconsolidado, argiloso, que pode estar confinado e sob pressão.

Em todos os intervalos cuja litologia era Solo, R/S (Destruído) e S/R (Sem Recuperação), também foram atribuídos aos parâmetros geomecânicos valores iguais a zero, pois não é adequado atribuir a um solo parâmetros de caracterização exclusivo de material rochoso, como havia em alguns pontos do banco de dados original.

Alguns intervalos apresentaram valores de RQD negativos. Estes foram verificados e corrigidos com o auxílio de informações repassadas pela mineradora.

Ainda, na etapa de tratamento do banco de dados foi proposta uma classificação RMR simplificada para o maciço rochoso do Extremo Norte. Como pode ser observado no Quadro 9 os valores dos pesos do RQD, do fraturamento e da presença de água da classificação simplificada desenvolvida na presente pesquisa foram mantidos iguais à classificação original. Em relação ao peso da alteração também se manteve os mesmos valores apresentados no Quadro 10, contudo os demais valores foram ignorados. Assim, uma vez tendo os pesos fez-se o somatório dos mesmos e obteve-se os intervalos para a classificação RMR simplificada.

Quadro 10 – Classificação RMR simplificada elaborada na presente pesquisa.

Parâmetros		Coeficientes				
1	Resistência da rocha intacta	Não considerado				
2	RQD	91-100	76-90	51-75	26-50	< 25
	Pesos	20	17	13	8	3
3	Fraturamento (Intervalo vindo dos furos de sondagem, Quadro 7)	>2m (4.6-5)	0,6-2m (3.6-4.5)	200-600mm (2.6-3.5)	60-200mm (1.6-2.5)	<60mm (0-1.5)
	Pesos	20	15	10	8	5
4	Alteração (Intervalo vindo dos furos de sondagem, Quadro 6)	Não alterada (4.6-5)	Ligeiramente alterada (3.6-4.5)	Moderadamente alterada (2.6-3.5)	Muito alterada (1.6-2.5)	Em decomposição (0-1.5)
	Pesos	6	5	3	1	0
5	Presença de água	Completamente seco	Água intersticial	Úmido	Escorrimentos	Entrada de água
	Pesos	15	10	7	4	0
Peso global		49-61	38-48	30-37	22-29	<21
Classe RMR simplificada		I	II	III	IV	V

Fonte: Própria autora.

Comparando a classificação RMR simplificada com a classificação local, Quadro 10 com a Figura 6, nota-se que as diferenças entre as classificações consistem, principalmente, no fato da classificação local considerar além dos critérios da RMR a qualidade da rocha, o padrão estrutural e a fragmentação dos blocos. Estes dados não constam no banco de dados disponibilizado e não foram disponibilizados separadamente. Ressalta-se que a classificação RMR simplificada elaborada no presente estudo precisa de validação, ou seja, uma checagem em campo para confirmação (ou não) dos resultados obtidos.

Quanto ao banco de dados final tem-se que diversas inconsistências foram corrigidas, melhorando a sua qualidade. Foi acrescido ao banco a variável CLASS – a classificação RMR simplificada. Todo este processo de tratamento dos dados foi realizado automaticamente por meio da linguagem de programação R e, posteriormente, revisado. Diante disso, tem-se que após o tratamento dos dados o subsetor Norte_Sul ficou com 70 furos, o Norte_Central com 255 e o Norte_Norte com 149, ou seja, houve uma redução de furos de 4,1%, 5,6% e 12,4%, respectivamente.

4.2 Análise Exploratória dos Dados

A análise exploratória dos dados teve como propósito possibilitar uma melhor compreensão do comportamento das variáveis do banco de dados. Na Figura 10 apresenta-se as medidas estatísticas de tendência central e de dispersão das variáveis analisadas. De modo geral, nota-se que para os três subsetores (Norte_Sul, Norte_Central e Norte_Norte) as variáveis classificação local (CLASSLOCAL), alteração e fraturamento apresentaram valores de desvio padrão (sd) que permitem inferir que os valores das medidas estão próximos da média. Os valores do erro padrão (se) de todas as variáveis dos três subsetores apresentaram baixos valores o que indica uma boa precisão da estimativa da média. Em relação ao coeficiente de assimetria (skew) tem-se que as variáveis fraturamento e RQD apresentaram resultados negativos para todos os subsetores indicando assimetria negativa em relação à distribuição normal. Já a variável alteração só não apresentou este comportamento para o subsetor Norte_Sul.

Na Figura 10, pelos dados da curtose identificou-se que as variáveis CLASS, CLASSLOCAL, alteração, fraturamento e RQD possuem distribuições ligeiramente mais achatadas que a distribuição normal nos subsetores Norte_Sul e Norte_Norte. Já no subsetor Norte_Central, apenas para as variáveis CLASS e RQD foram verificadas com tal

comportamento sobre a curtose. Além disso, foi constatado que os valores da média e da mediana da variável RQD do subsetore Norte_Central foram mais altas que dos outros dois, indicando que este subsetor seria mais resistente que os demais.

Dando sequência à análise das distribuições dos dados, foram construídos os gráficos tipo boxplot, frequência acumulada e densidade relativa para todas as variáveis analisadas. Na Figura 11, nota-se que a maior parte dos furos apresentou profundidade entre 0 e 400 m para os subsetores Norte_Sul e Norte_Central e, entre 0 e 300 m para o subsetor Norte_Norte. Além disso, é possível observar para todos os boxplot's de todos os subsetores alguns valores discrepantes (possíveis outliers). Estes valores, provavelmente, estão associados à presença de furos de sondagem com grandes profundidades. Já para a latitude e para a longitude, variáveis y e x, respectivamente, só foram observados valores discrepantes para o subsetor Norte_Central e para a longitude do subsetor Norte_Norte.

Em relação à classificação RMR simplificada, observou-se que a maior parte dos dados apresentou-se na Classe 3 para todos os subsetores, ou seja, tem-se um maciço rochoso razoável sob o ponto de vista de resistência mecânica. Os outros dois valores com maior número de observações foram quatro e cinco.

Figura 10 - Medidas estatísticas de tendência central e de dispersão: A – Subsetor Norte Sul; B – Subsetor Norte_Central e C – Subsetor Norte_Norte

	vars	n	mean	sd	median	trimmed	mad	min	max	range	skew	kurtosis	se
ID*	1	5410	NaN	NA	NA	NaN	NA	Inf	-Inf	-Inf	NA	NA	NA
X	2	5410	306869.05	189.14	306894.39	306861.12	227.22	306575.9	307312.7	736.71	0.19	-0.87	2.57
Y	3	5410	8016931.33	209.28	8016856.92	8016917.14	202.83	8016540.9	8017410.4	869.45	0.51	-0.99	2.85
Z	4	5410	161.09	111.66	137.50	150.77	112.83	0.0	636.7	636.70	0.91	0.74	1.52
CLASS	5	5410	3.84	0.86	4.00	3.80	1.48	2.0	5.0	3.00	0.27	-1.49	0.01
CLASSLOCAL	6	5410	3.24	2.86	2.50	2.98	3.71	0.0	9.0	9.00	0.59	-0.85	0.04
LITO*	7	5410	NaN	NA	NA	NaN	NA	Inf	-Inf	-Inf	NA	NA	NA
ALTERACAO	8	5410	2.08	1.69	2.00	2.03	2.97	0.0	5.0	5.00	0.09	-1.27	0.02
FRATURAMENTO	9	5410	1.68	1.18	2.00	1.68	1.48	0.0	4.0	4.00	-0.27	-1.02	0.02
RQD	10	5410	49.00	36.71	56.24	49.33	47.75	0.0	100.0	100.00	-0.24	-1.53	0.50

A -Subsetor Norte_Sul

	vars	n	mean	sd	median	trimmed	mad	min	max	range	skew	kurtosis	se
ID*	1	11562	NaN	NA	NA	NaN	NA	Inf	-Inf	-Inf	NA	NA	NA
X	2	11562	307256.11	138.62	307277.34	307262.56	151.37	306745.6	307535.2	789.57	-0.45	-0.31	1.29
Y	3	11562	8017813.71	245.41	8017855.81	8017833.67	212.93	8017194.1	8018288.6	1094.57	-0.69	-0.23	2.28
Z	4	11562	147.12	115.61	112.70	131.71	93.55	0.0	577.4	577.40	1.16	0.85	1.08
CLASS	5	11562	3.61	0.79	3.00	3.53	0.00	1.0	5.0	4.00	0.68	-0.79	0.01
CLASSLOCAL	6	11562	3.33	2.54	2.50	3.04	0.00	0.0	9.0	9.00	1.05	0.23	0.02
LITO*	7	11562	NaN	NA	NA	NaN	NA	Inf	-Inf	-Inf	NA	NA	NA
ALTERACAO	8	11562	2.30	1.18	2.50	2.31	0.74	0.0	5.0	5.00	-0.16	0.44	0.01
FRATURAMENTO	9	11562	1.88	1.01	2.00	1.91	0.74	0.0	5.0	5.00	-0.34	0.23	0.01
RQD	10	11562	63.48	33.60	78.76	67.22	21.60	0.0	100.0	100.00	-0.91	-0.66	0.31

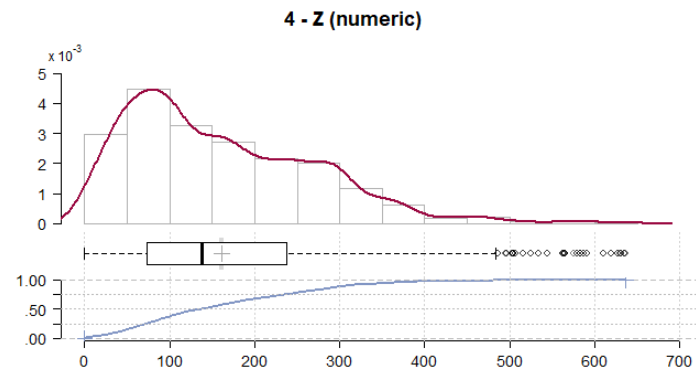
B - Subsetor Norte_Central

	vars	n	mean	sd	median	trimmed	mad	min	max	range	skew	kurtosis	se
:-----	:-----	:-----	:-----	:-----	:-----	:-----	:-----	:-----	:-----	:-----	:-----	:-----	:-----
ID*	1	6452	NaN	NA	NA	NaN	NA	Inf	-Inf	-Inf	NA	NA	NA
X	2	6452	307501.74	113.43	307511.71	307508.30	102.32	307137.6	307787.2	649.59	-0.57	0.35	1.41
Y	3	6452	8018374.80	202.84	8018330.70	8018364.03	198.76	8018014.9	8018888.9	874.04	0.48	-0.56	2.53
Z	4	6452	111.81	85.03	92.80	100.34	66.79	0.0	510.7	510.70	1.36	2.04	1.06
CLASS	5	6452	3.94	0.84	4.00	3.93	1.48	1.0	5.0	4.00	0.02	-1.33	0.01
CLASSLOCAL	6	6452	3.80	3.12	2.50	3.63	3.71	0.0	9.0	9.00	0.47	-1.13	0.04
LITO*	7	6452	NaN	NA	NA	NaN	NA	Inf	-Inf	-Inf	NA	NA	NA
ALTERACAO	8	6452	2.28	1.50	2.50	2.27	1.48	0.0	5.0	5.00	-0.17	-0.86	0.02
FRATURAMENTO	9	6452	1.72	1.13	2.00	1.74	0.74	0.0	5.0	5.00	-0.38	-0.80	0.01
RQD	10	6452	46.72	35.95	52.09	46.68	50.23	0.0	100.0	100.00	-0.13	-1.60	0.45

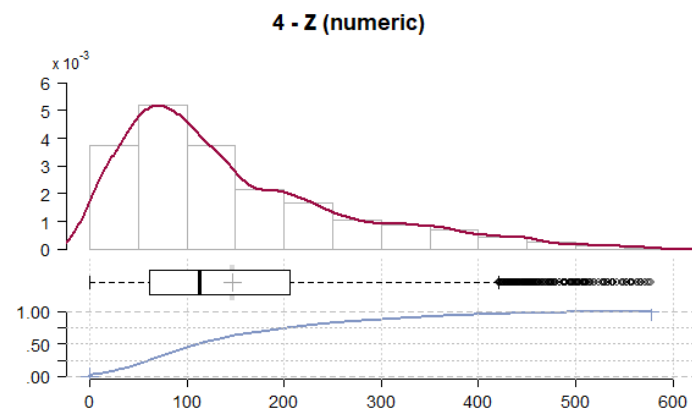
C - Subsetor Norte_Norte

Fonte: Própria autora.

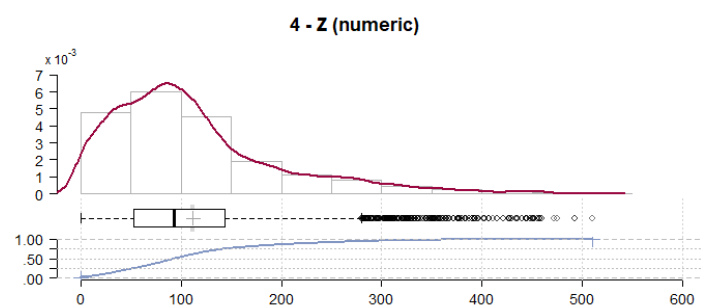
Figura 11 - Gráficos de estatística exploratórios da profundidade: A – Subsetor Norte Sul; B – Subsetor Norte_Central e C – Subsetor Norte_Norte



A -Subsetor Norte_Sul



B -Subsetor Norte_Central



C -Subsetor Norte_Norte

Fonte: Própria autora.

Já quanto à classificação geomecânica local o maior valor foi para a Classe igual a 2.5 para todos os subsetores analisados. Conforme citado anteriormente, a classificação local é uma classificação geomecânica criada com base no sistema RMR e Q e, desenvolvida exclusivamente para a Mina de Vazante pelo seu corpo técnico. Comparando a classificação local com a classificação RMR simplificada constata-se que os resultados estão condizentes já que a classe mais observada em ambas está relacionada com um maciço rochoso de razoável resistência. Ressalta-se que a semelhança entre as duas classificações já era esperada, uma vez que, os dados básicos utilizados para o emprego de ambas são os mesmos.

Na Figura 12 observa-se que as litologias mais comuns no maciço rochoso do Extremo Norte da Mina de Vazante são os dolomitos e as brechas. Além disso, três materiais se destacaram: S/R, FD e SOLO. O S/R significa que o material foi “Não Recuperado” durante o processo de perfuração da sondagem. As fendas (FD) são oriundas do processo de dissolução das rochas carbonáticas formando espaços vazios no interior do maciço rochoso que tendem a provocar uma diminuição da resistência mecânica do maciço. Por fim, o SOLO é o litotipo que se espera encontrar somente na superfície do terreno ou a poucos metros de profundidade.

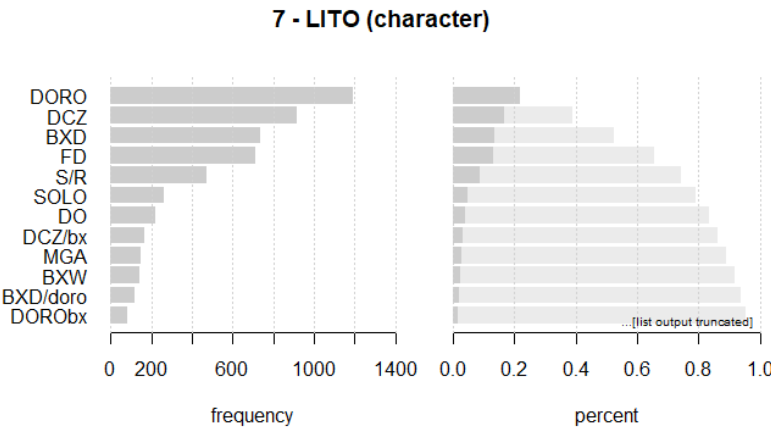
O S/R é o quinto material mais frequente nos subsetores Norte_Sul e Norte_Central e o segundo no Norte_Norte. Já as fendas foram notadas com bastante expressividade em todos os setores analisados, sendo que no Norte_Norte é o terceiro material mais frequente e nos outros dois subsetores é o quarto. Por fim, tem-se que o SOLO é o sexto material mais frequente do subsetor Norte_Sul e o 11º do Norte_Norte e não aparece dentre os doze litotipos mais frequentes do subsetor Norte_Central. Para qualquer um dos três materiais foram associados valores de parâmetros geomecânicos iguais a zero nos respectivos bancos de dados dos subsetores, haja vista que não faz sentido físico atribuir valores a um espaço vazio ou para materiais não recuperados durante o processo de sondagem ou, ainda, atribuir valores geomecânicos para solos.

Para a variável alteração observou-se que os valores de alteração mais frequentes foram iguais a zero para o subsetor Norte_Sul, 2 para o Norte_Central e 2.5 para o Norte_Norte. De modo geral, estes valores indicam um maciço rochoso pouco alterado a medianamente alterado, ou seja, tem-se um maciço rochoso medianamente resistente. Já para o fraturamento o valor mais expressivo foi 2 para todos os subsetores do Extremo Norte da Mina de Vazante. Estes valores indicam, aproximadamente, 60 a 200 cm de espaçamento médio entre as

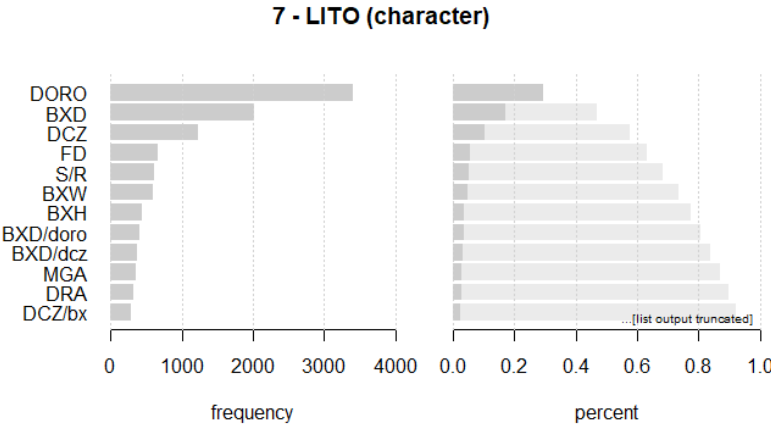
descontinuidades. Em relação à presença de valores discrepantes (possíveis outliers) para a variável fraturamento só no subsetor Norte_Central se observou a presença dos mesmos, enquanto para a variável alteração somente o subsetor Norte_Sul apresentou tais valores. Possíveis justificativas para estes valores discrepantes podem ser erros na descrição dos furos de sondagem que deram origem à quantificação de tais variáveis e/ou à presença das fendas no interior do maciço rochoso.

Por fim, nota-se pela Figura 13, para o RQD, que todos os subsetores têm um comportamento semelhante, ou seja, tem-se valores de RQD em todo o range de valores da variável. Contudo, para o subsetor Norte_Central observou-se uma maior quantidade de altos valores de RQD – tem-se uma concentração maior de dados para os maiores valores de RQD, acima de 70. Diante disso, pode-se inferir que este subsetor é mais resistente que os outros dois. Ressalta-se que a associação entre alteração e fraturamento influencia no comportamento da variável RQD.

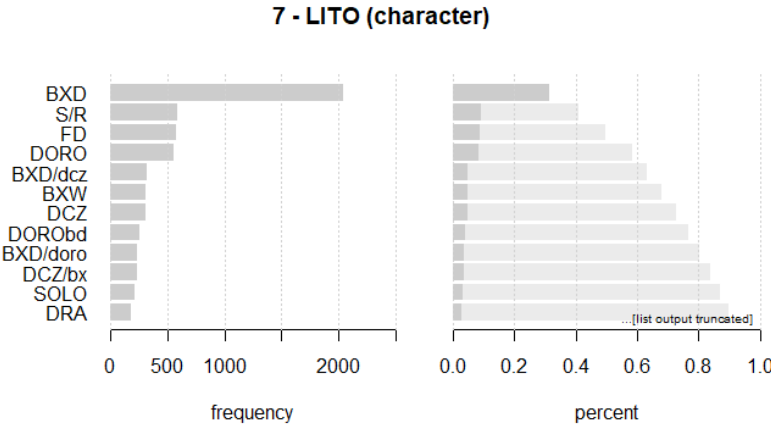
Figura 12 - Gráficos de estatística exploratórios da litologia: A – Subsetor Norte Sul; B – Subsetor Norte_Central e C – Subsetor Norte_Norte



A -Subsetor Norte_Sul



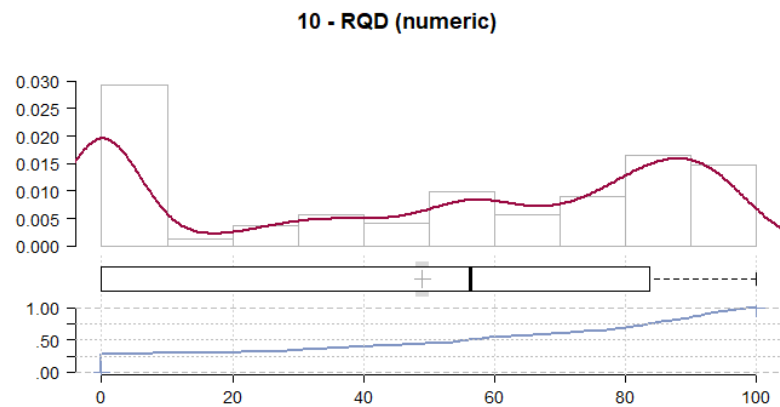
B -Subsetor Norte_Central



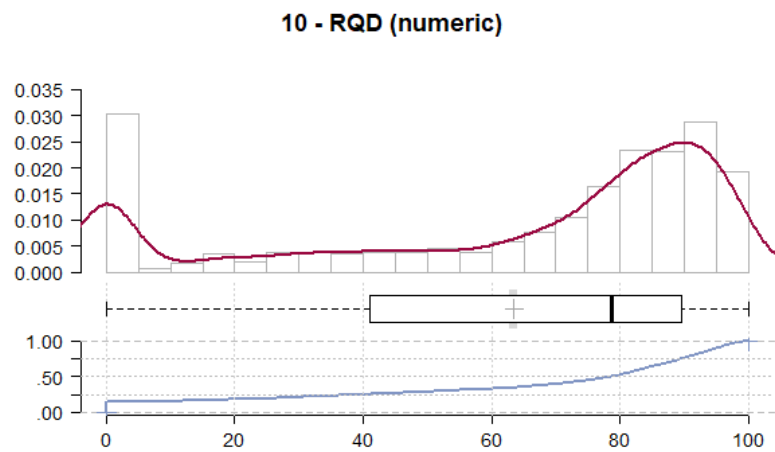
C -Subsetor Norte_Norte

Fonte: Própria autora.

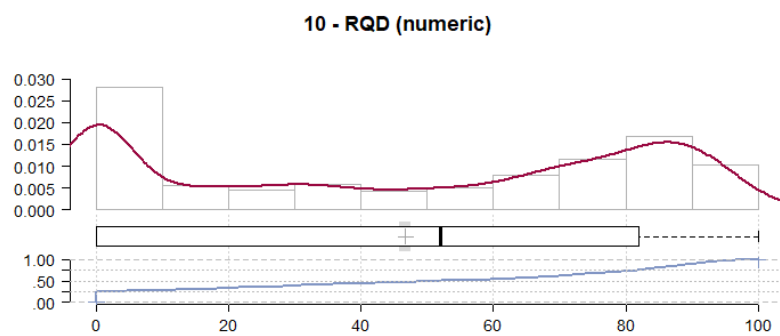
Figura 13 - Gráficos de estatística exploratórios do RQD: A – Subsetor Norte Sul; B – Subsetor Norte_Central e C – Subsetor Norte_Norte



A -Subsetor Norte_Sul



B -Subsetor Norte_Central



C -Subsetor Norte_Norte

Fonte: Própria autora.

4.3 Random Forest

Os resultados obtidos para todos os subsetores são apresentados na Figura 14 e no Quadro 11. Para todos os três subsetores, Norte_Sul, Norte_Central e Norte_Norte, fez-se a regressão das variáveis através do RF. O número de árvores empregado em todos os subsetores foi igual a 1000 ($n_{tree} = 1000$) e o número de nós das árvores analisadas foi igual a 6 ($m_{try} = 6$).

O IncMSE (Mean Decrease Accuracy) do Setor Norte_Sul apresentou as variáveis RQD, alteração e fraturamento como as variáveis que mais influenciam na resistência do maciço desta região. Sendo litologia a variável de menor importância. Para o subsetor Norte_Central, as variáveis que melhor explicam o comportamento do maciço rochoso são RQD, fraturamento e alteração. A variável de menor importância, também é a litologia. Por fim, para o subsetor Norte_Norte as variáveis mais importantes foram o RQD, a alteração e o fraturamento. E a menos relevante foi a longitude. Diante dos resultados, evidenciou-se que a variável RQD é a que melhor explica o comportamento dos maciços rochosos analisados. E, assim sendo, esta deveria ser a variável interpolada para confeccionar os mapas geomecânicos da região. Assim, foram gerados mapas do RQD para cada subsetor e mapas da classificação RMR simplificada.

A relevância do RQD já era esperada haja vista que ele, como já citado anteriormente, compila num único índice o resultado da alteração e do fraturamento, além de ser uma medida de recuperação do material obtido no furo de sondagem. Quanto maior o resultado do RQD melhor o comportamento do maciço rochoso sob o ponto de vista da resistência. O RQD foi criado em 1964 como um índice para classificar a qualidade de um maciço rochoso através da observação em furos de sondagem e, desde então tem sido usado para estimar parâmetros de resistência ao cisalhamento e deformação de maciços; na definição da capacidade de sustentação de fundações e, ainda, se tornou um elemento essencial dentro da estrutura de outros sistemas de classificação geomecânica, tal como a classificação RMR (BIENIAWSKI, 1973; BARTON et al., 1974; PRIEST; HUDSON, 1976; DEERE; DEERE, 1988).

Comparando os resultados do RF com os dados da análise exploratória nota-se que o valor médio do RQD é maior para o subsetor Norte_Central. Tem-se que nesta região há um menor controle estrutural, quando comparado aos dois outros setores, conforme pode ser visto

na Figura 15. Observa-se que este setor encontra-se fora da zona de ocorrência da falha de Vazante. Já para o subsetor Norte_Norte observa-se que o fato do mesmo ter apresentado o menor valor médio da variável RQD pode estar relacionado com a presença na região da falha Vazante associada à presença de lineamentos estruturais por elas gerados.

Pells et al. (2017) argumentam que existem problemas na medição e no uso do RQD ao redor do mundo e que o emprego deste índice deve ser feito com cautela. Os problemas mencionados por aqueles autores vão desde questões relacionadas à identificação de quais descontinuidades são naturais no momento da descrição dos furos de sondagem até o desdém pela definição do índice em si. Soma-se ainda a falta de habilidade do profissional que realiza a quantificação do RQD. Mesmo com estes problemas, o RQD ainda é um índice muito empregado na área de mecânica de rochas.

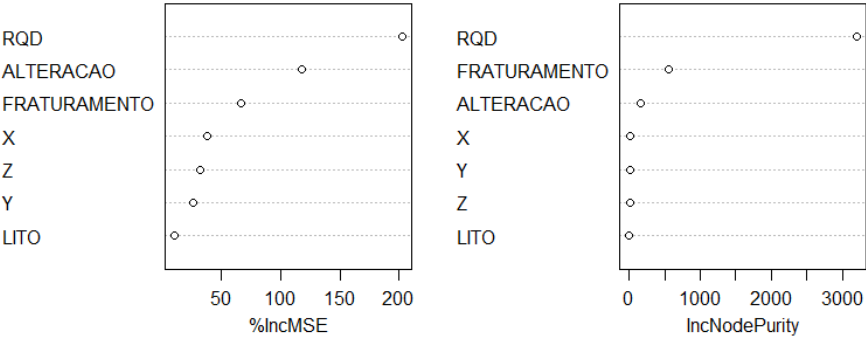
Dentre os resultados do RF esperava-se que com o aumento da profundidade houvesse um aumento da resistência e, conseqüentemente, melhor seria o comportamento do maciço rochoso. Contudo, toda a região da Mina de Vazante possui rochas de origem carbonática e uma expressiva quantidade de água do lençol freático no seu interior, conforme relatado por Araújo et al. (2016) e Bittencourt e Neto (2012). Provavelmente a associação destes dois fatores pode explicar o fato de o aumento da profundidade não apresentar uma relação direta com o aumento da resistência do maciço.

No Quadro 11 tem-se um resumo dos coeficientes de determinação, dos erros obtidos entre os valores preditos e reais e o percentual da variável explicada pelo RF. Conforme observado no referido quadro, constata-se que mais de 99% (% var explained) do comportamento do maciço rochoso do Extremo Norte da Mina de Vazante pode ser explicado pelo resultado obtido com o emprego do RF. Concomitante, os erros (RMSE e MAE) foram muitos baixos e o coeficiente de determinação (Rsquared) obtido foi muito próximo de 1. Logo, pode-se concluir que o ranqueamento da importância das variáveis obtidos empregando o RF é confiável para explicar o comportamento do maciço rochoso estudado.

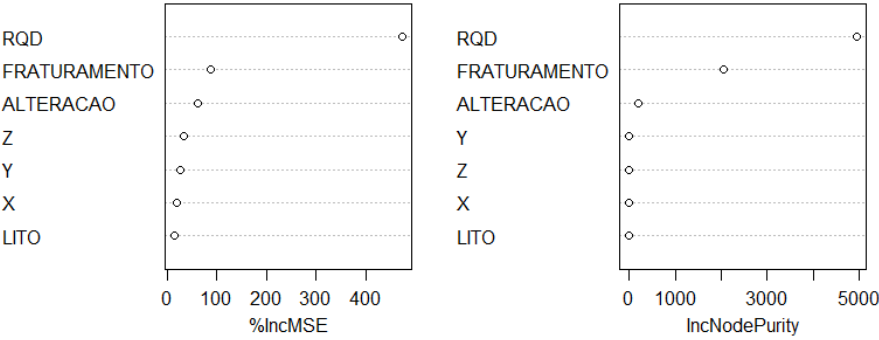
Na literatura técnica relacionada à geomecânica consultada não foram encontrados trabalhos em que o RF tivesse sido usado para prever importância de variáveis para uso posterior na elaboração de modelos geomecânicos. Todavia, tem-se alguns estudos empregando o RF num conjunto de variáveis para prever o comportamento de uma outra variável específica relativa às rochas e aos maciços rochosos. Alguns trabalhos relevantes são o de

Tiryaki (2008) que usou redes neurais, técnicas de árvores de regressão, componentes principais e análises de fatores para prever a resistência à compressão uniaxial e o módulo de elasticidade de três tipos de rocha diferentes em projetos de corte delas. Dong, Li e Peng (2013) que empregaram o RF para classificar se o fenômeno rockburst ocorreria e a intensidade do mesmo em projetos de minas subterrâneas. Para tal, foram analisados alguns fatores que desencadeiam o fenômeno tais como tensões in situ, resistência à compressão uniaxial e à tração, entre outros. Já Marin et al. (2018) fizeram uso do RF para prever o módulo de elasticidade e a resistência à compressão uniaxial com base em algumas variáveis selecionadas – porosidade, índice de Point Load (Is_{50}), velocidade de propagação de onda (v_p) e número de Schmidt. E, por fim, Xie e Peng (2019) utilizaram RF de regressão para prever zonas de danos de escavação numa mina subterrânea de carvão, sendo estas zonas afetadas por distúrbios causados pelo processo de desmonte, pelo descarregamento devido a abertura das escavações e pelo reajuste das tensões in situ.

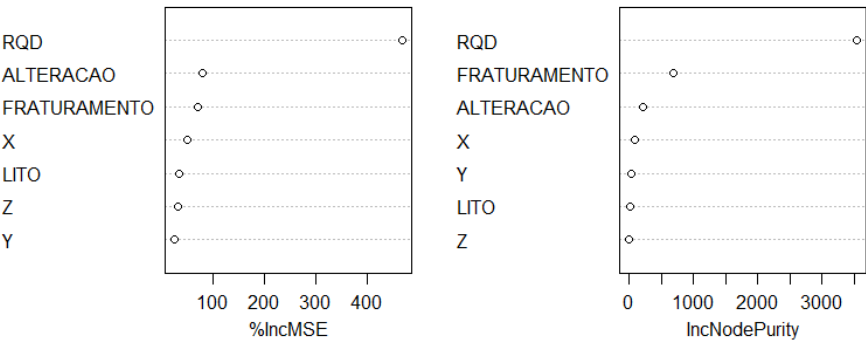
Figura 14 – Ranqueamento da importância das variáveis para o maciço rochoso sendo no eixo das abcissas apresentado informações sobre a precisão do decréscimo média (InsMSE) e sobre o decréscimo médio de Gini (IncNodePurity): A – Subsetor Norte Sul; B – Subsetor Norte_Central e C – Subsetor Norte_Norte



A -Subsetor Norte_Sul



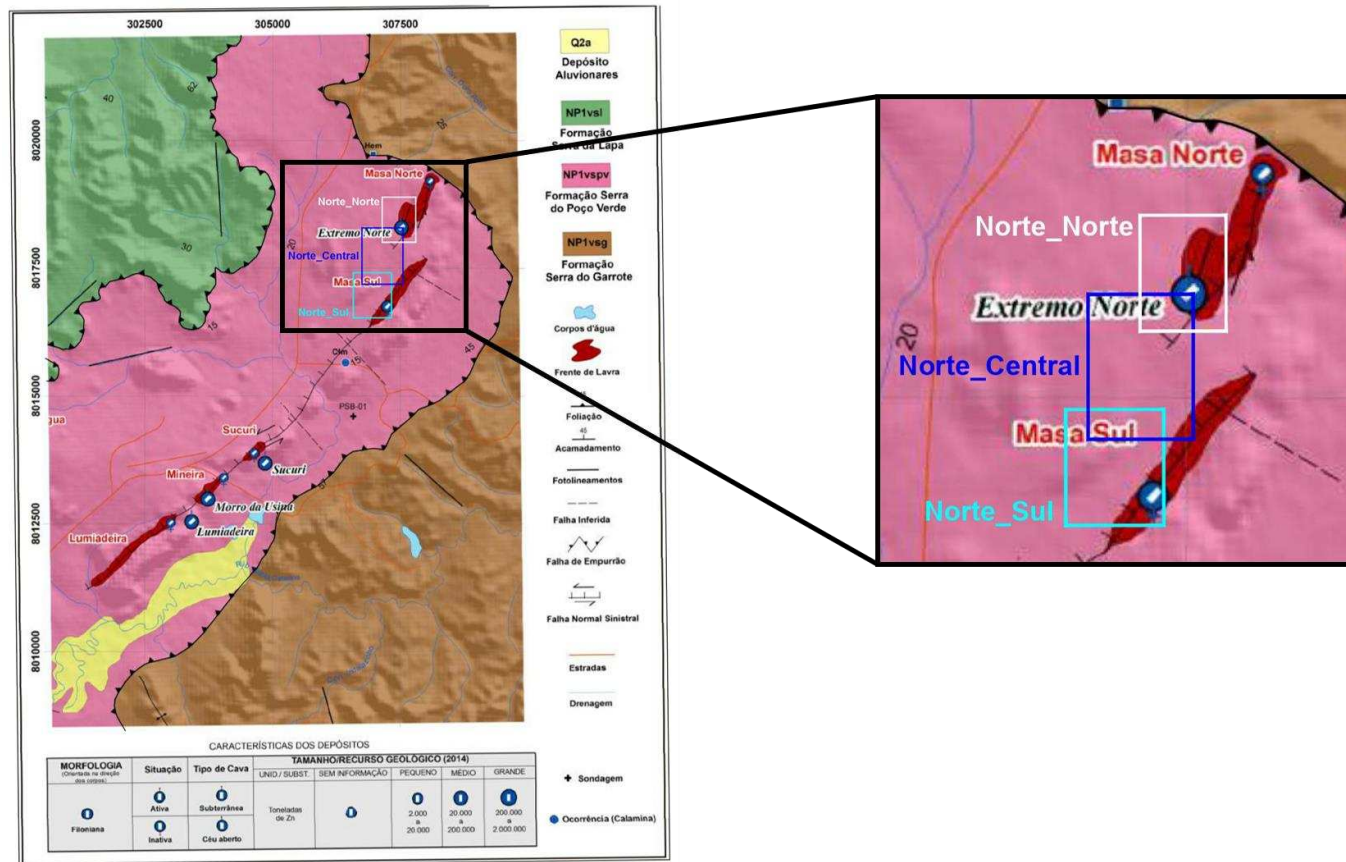
B -Subsetor Norte_Central



C -Subsetor Norte_Norte

Fonte: Própria autora.

Figura 15 - Mapa Metalogenético do distrito Zincífero de Vazante com indicação dos subsetores; escala 1:75.000



Fonte: CPRM (2015).

Quadro 11 – Resumo dos coeficientes de determinação e dos erros obtidos com o RF

Subsetor	RMSE (Erro quadrado médio)	Rsquared (Coeficiente de determinação)	MAE (Erro médio absoluto)	% Variável explicada
Norte_Sul	0.0157	0.9999	0.0018	99.96
Norte_Central	0.0454	0.9987	0.0041	98.86
Norte_Norte	0.0286	0.9997	0.0021	99.81

Fonte: Própria autora.

4.4 Inverse Distance Weighted - IDW

Fez-se a interpolação das variáveis RQD e da classificação RMR simplificada (CLASS) utilizando o IDW para todos os três subsetores do Extremo Norte da Mina de Vazante. Como resultado, obteve-se um modelo 4D com duas visualizações diferentes – uma visualização fatiada, horizontalmente, em que uma série de mapas foram gerados para diferentes profundidades e uma visualização multidimensional, 4D propriamente dita. Ressalta-se que toda a explicação dos resultados dos modelos foi feita usando as imagens geradas para o modelo planificado. Isso foi feito por uma questão de facilidade. Visualizar um modelo multidimensional no plano do papel é difícil, já que o mesmo não pode ser rotacionado, por exemplo. Assim, optou-se por fazer todas as explicações empregando o modelo planificado. Contudo, para o dia a dia de uma mineradora, os gráficos multidimensionais gerados serão mais práticos e usuais do que o modelo planificado.

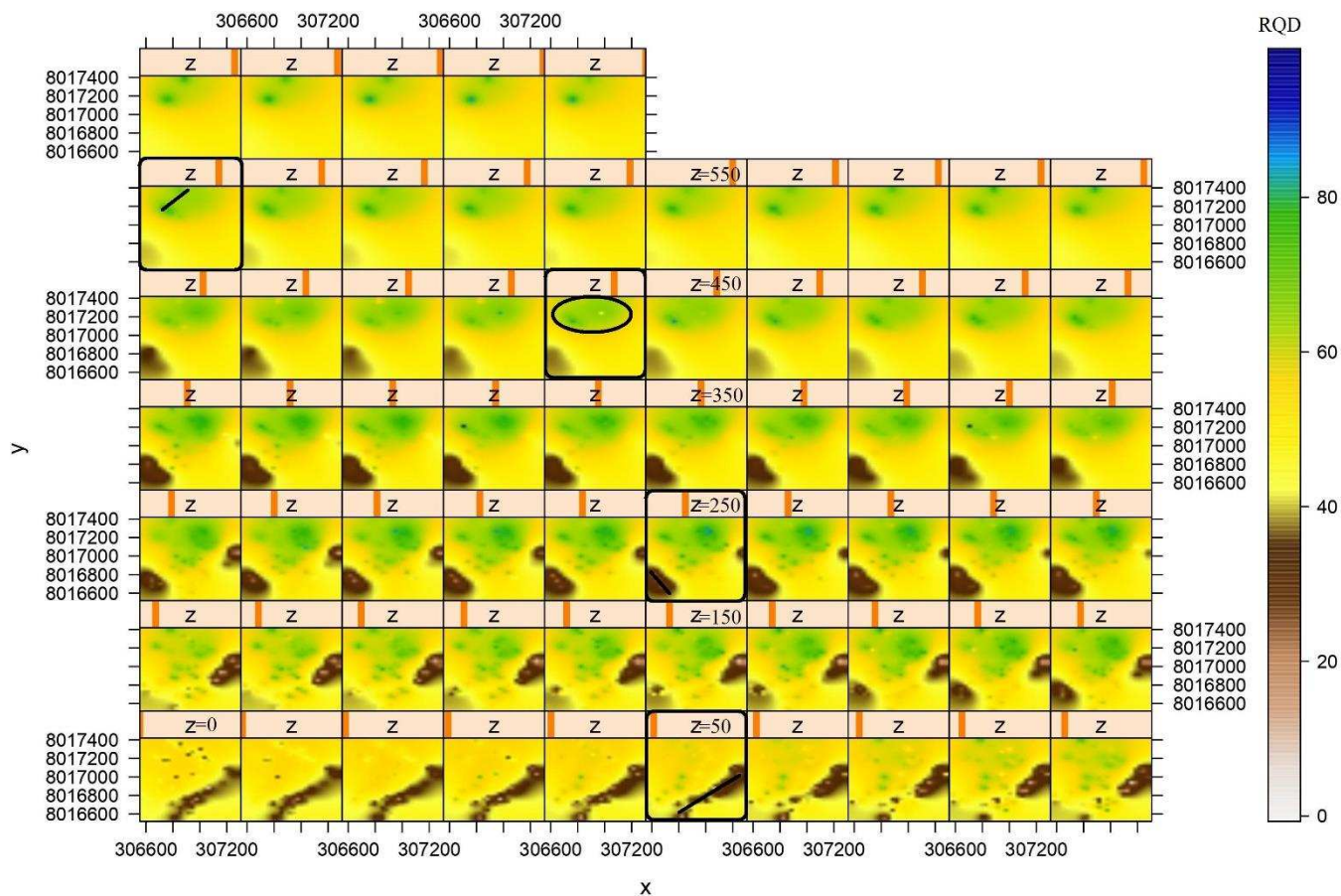
Na Figura 16 tem-se os resultados da interpolação da variável RQD pelo interpolador IDW para o subsetor Norte_Sul. Nota-se que há baixos valores (< 40) de RQD até a profundidade de 530 m, sendo que até 460 m estes podem ser observados de maneira expressiva. Para os primeiros 170 m de profundidade é observado que os baixos valores de RQD possuem uma orientação espacial preferencial – NE-SW – sendo que da superfície até 50 m esta região possui maior área, conforme Figura 17A. Entre 180 e 290 m é possível observar que os baixos valores de RQD permanecem, contudo numa região bem menor dos mapas.

A partir da profundidade 170 até 490 m é possível visualizar uma segunda direção preferencial de baixos valores de RQD – a NW-SE, Figura 17B. Tem-se que sua maior

representatividade está entre 190 e 390 m. Assim, entre 170 e 280 m ocorre a presença das duas direções mencionadas. Ainda, na Figura 17B (250 m de profundidade) nota-se que na região mais ao norte do modelo geomecânico há núcleos que apresentam altos valores de RQD (> 80), sendo que tal comportamento pode ser observado desde a 210 m de profundidade. Contudo, em torno de 440 m metros (Figura 17C) e 450 m verifica-se a presença de baixos valores de RQD dentro destes núcleos. Por fim, a partir de 460 m até o final do modelo, 640 m de profundidade, distingue-se novamente uma orientação preferencial SW, Figura 17D, só que no extremo esquerdo do modelo geomecânico.

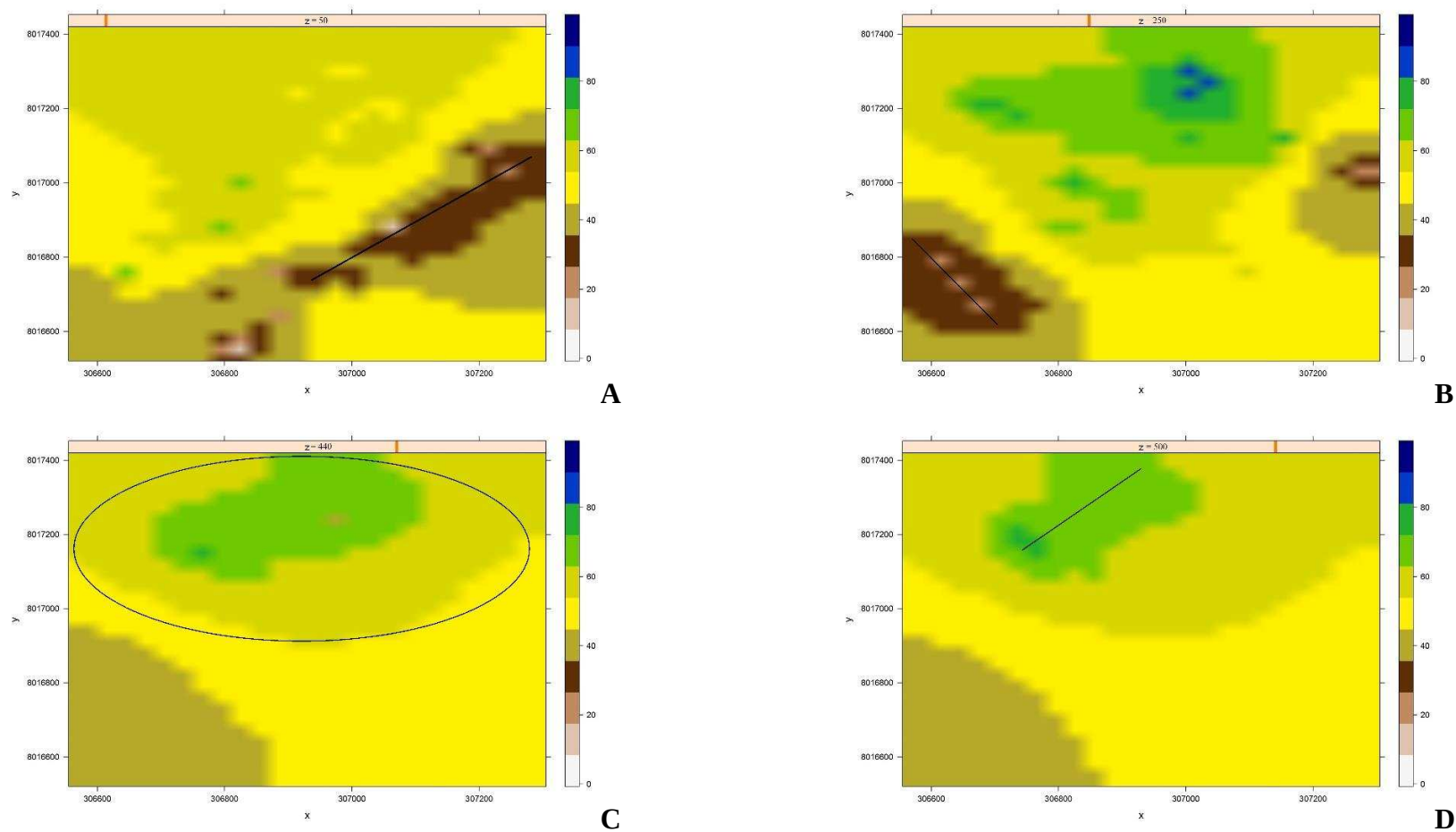
Identifica-se que a partir de 530 m só se tem informações na extremidade centro-norte do modelo, sendo que no restante aparece apenas o valor médio (RQD entre 40 e 60). Isso ocorre porque, conforme observado na análise exploratória, a maioria dos furos de sondagem atinge, em média, até 400 m de profundidade. Logo, abaixo deste valor não há muitas informações que permitam a confecção do modelo. Diante da redução de dados a partir da profundidade citada, o interpolador apresenta um valor médio para estes locais, indicando assim que o modelo confeccionado tem boa qualidade de interpolação.

Figura 16 - Modelo geomecânico da variável RQD obtida com emprego do interpolador IDW - subsetor Norte_Sul



Fonte: Própria autora.

Figura 17 - Modelo geomecânico do RQD a 50 m de profundidade (A), a 250 m de profundidade (B), a 440 m de profundidade (C) e a 500 m de profundidade (D) – subsetor Norte_Sul



Fonte: Própria autora.

Tem-se na Figura 18 uma imagem do modelo geomecânico 4D da variável RQD obtido com o emprego do interpolador IDW, sendo possível visualizar regiões com baixos valores de RQD. Neste modelo é possível visualizar os eixos x e y que são as coordenadas geográficas e profundidade – estas informações aparecem quando se passa o mouse sobre o modelo – o valor do RQD pode ser verificado através das cores do grid. É possível visualizar as informações do RQD em todo o grid para o qual o modelo do subsetor Norte-Sul foi confeccionado, bem como rotacionar o modelo e aumentar e diminuir seu zoom. Evidentemente que os resultados são os mesmos apresentados na Figura 16. Enfatiza-se que a confecção deste modelo com a qualidade de imagem que o mesmo apresenta, com a facilidade de visualização das informações, com a boa interatividade e, principalmente, o fato do mesmo ter sido gerado através do emprego de uma linguagem de programação livre (o R) é algo inédito, especialmente no Brasil que é um país carente em desenvolvimento de programas nacionais neste tipo de análise. Além disso, a metodologia de criação deste modelo permite ao usuário avaliar todo o processo de cálculo da interpolação, ou seja, não é uma “caixa preta” que solta um resultado final sem permitir analisar como o mesmo foi obtido.

Para o modelo geomecânico da variável classificação RMR simplificada (CLASS), Figura 19, nota-se de modo geral um maciço rochoso com uma classificação em torno de 4.0 (CLASS igual a 4), ou seja, um maciço rochoso de resistência mecânica razoável.

Da superfície até 140 m de profundidade tem-se um alinhamento de pontos, com direção NE-SW (Figura 19A), com classificação geomecânica ruim (CLASS igual a 4.5). Após 140 m de profundidade pode-se notar pontos, sem alinhamento, com a mesma classificação citada. E, a partir de 210 m nota-se uma inversão do alinhamento dos pontos com classificação ruim. Os pontos passam a apresentar alinhamento com a direção NW-SE (Figura 19B) até a profundidade de 290 m. Entre 300 e 370 m de profundidade pode-se observar pontos de CLASS igual a 4.5 sem orientação.

A partir de 20 m de profundidade observa-se um alinhamento, com direção NE-SW, de pontos de maior resistência mecânica com CLASS entre 3 e 3.5, Figura 19 A. Este alinhamento continua e dá origem a uma região a partir de 80 m de profundidade, sendo, inclusive possível notar tal região até a profundidade final do modelo. As profundidades nas quais a região é mais expressiva é entre 80 e 350 m. No interior desta região de maior resistência geomecânica pode-se notar um alinhamento de pontos com direção NW-SE de material com

classe geomecânica ainda melhor que o material que a circunda. Este alinhamento pode ser observado entre as profundidades de 130 a 500 m, Figuras 19 C e 19 D. Abaixo desta profundidade tem-se ainda pontos sem alinhamento e também de excelente qualidade geomecânica. Ocorre para a variável CLASS a mesma situação que para o RQD, ou seja, a partir de 530 m de profundidade o modelo apresenta valores médios da variável CLASS devido de quantidade significativa de furos de sondagem a partir desta profundidade. Por fim, todo o modelo do subsetor Norte_Sul apresenta razoável resistência mecânica.

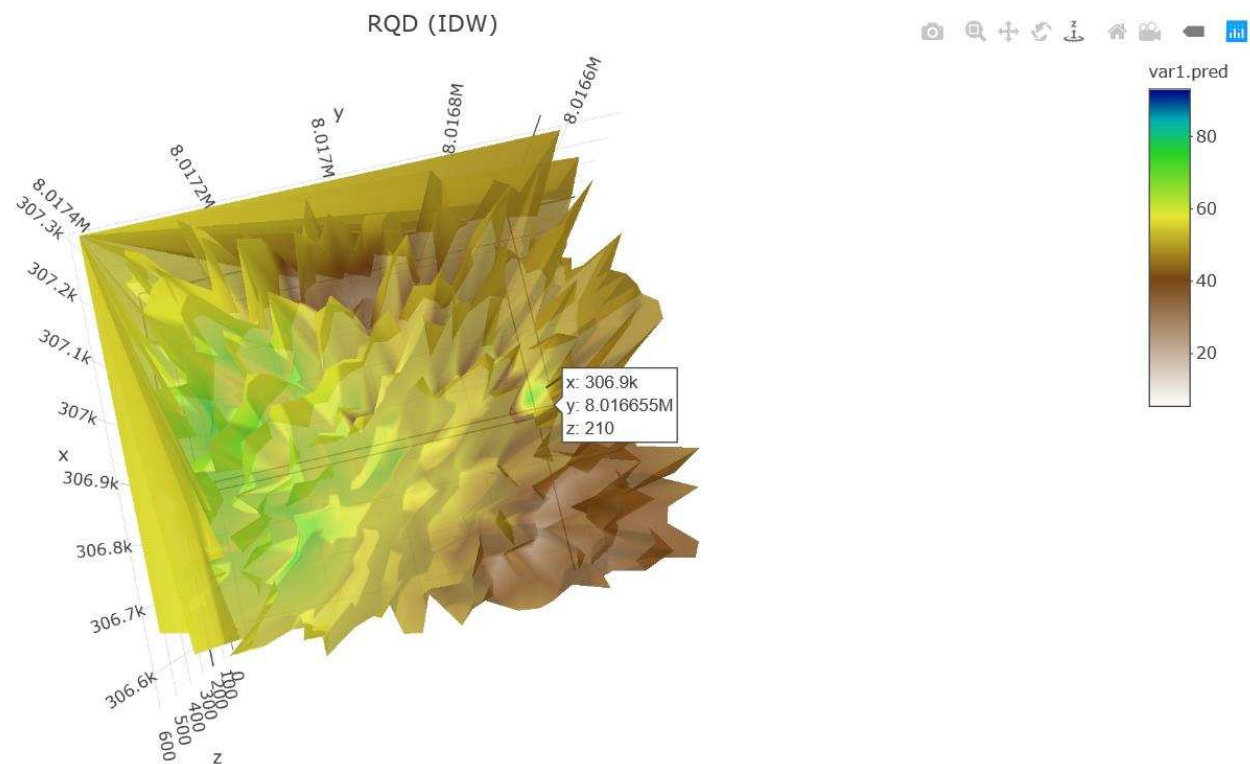
Na Figura 20 tem-se o modelo geomecânico da variável CLASS 4D em que é possível visualizar a extensa região com boa resistência geomecânica, CLASS entre 3 e 3.5. O modelo da variável CLASS possui os mesmos recursos computacionais do modelo do RQD.

Os baixos valores de RQD ($RQD < 40$) e os altos valores da variável CLASS ($CLASS > 3.5$) estão em suma maioria relacionados com a presença das fendas, com o material sem recuperação (S/R) e com solo. Analisando o banco de dados tem-se a presença de fendas (FD) desde a superfície até 450 m de profundidade, sendo que elas aparecem com mais expressividade entre 50 e 100 m. Bittencourt e Reis Neto (2012) citam que na região de Vazante foram encontradas fendas até 600 m de profundidade. Até 50 m de profundidade os resultados obtidos para ambos os modelos (RQD e CLASS), também podem estar relacionados à presença do material sem recuperação (S/R ou R/S) e do solo. Aqueles autores mencionam que existe na região de estudo uma camada de solo coluvionar e aluvionar que varia desde poucos centímetros até centenas de metros. No banco de dados consta que entre 300 e 350 metros de profundidade tem-se a presença de SOLO como litotipo. Acredita-se que tal fato possa estar relacionado à presença de material de preenchimento, conforme relatado por Bittencourt e Reis Neto (2012), ou então, seja um erro na descrição do furo de sondagem. Já em relação aos maiores valores de RQD ($RQD > 80$) e menores valores de classificação ($CLASS < 3.5$) tem-se que estes estão relacionados às brechas e aos dolomitos.

Sob o ponto de vista estrutural não se tem informações locais para se aferir os resultados dos modelos. Contudo, confrontando os resultados com a geologia estrutural regional observa-se o subsetor Norte_Sul, Figura 15, atravessa a falha Vazante, que tem direção NE-SW. Este fato explica a presença desta direção tanto no modelo do RQD quanto da variável CLASS, conforme descrito anteriormente e relatado em trabalhos científicos realizados na região de Vazante, tais como Lemos (2011), Bittencourt e Reis Neto (2012) e Charbel (2015).

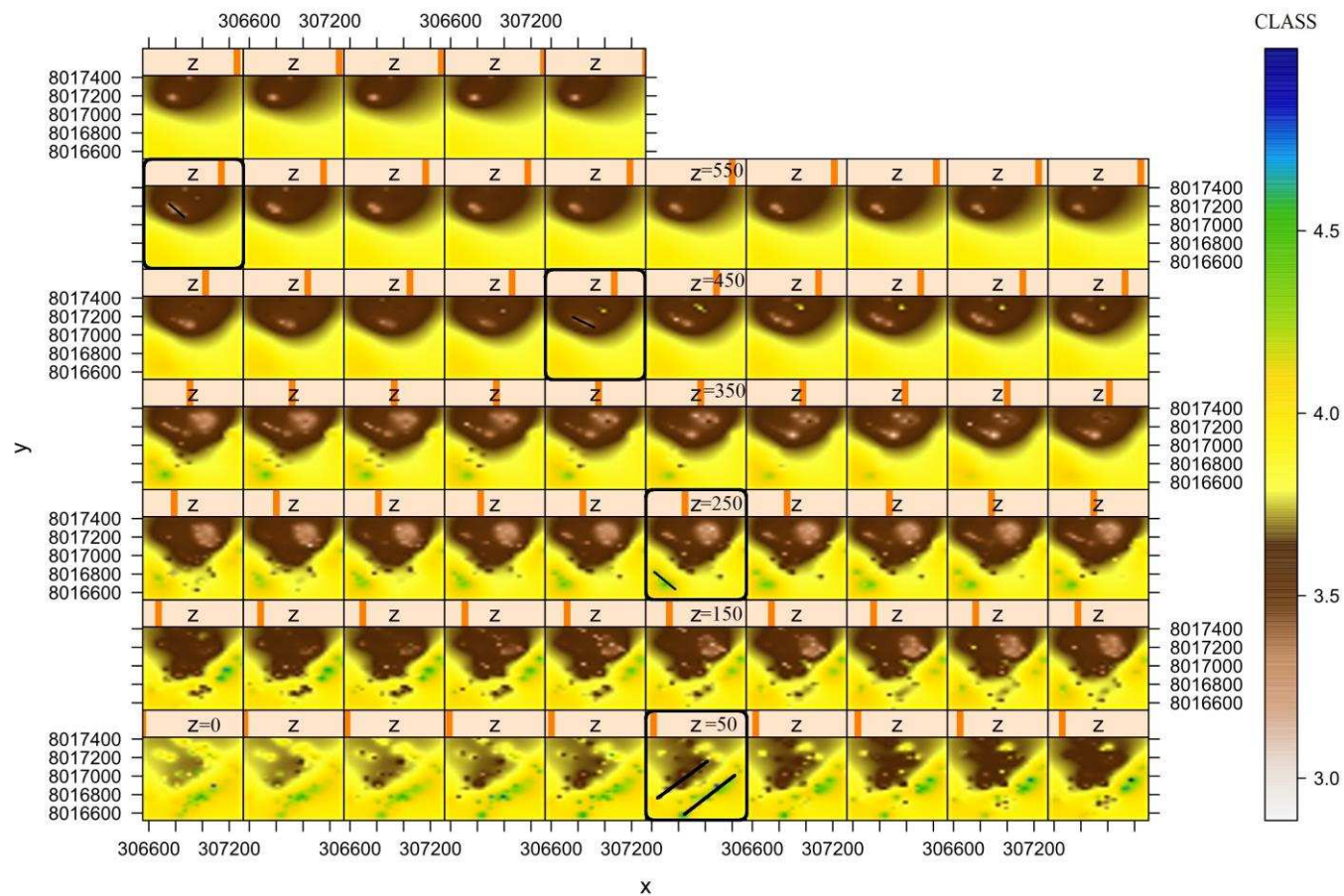
Já a direção NW-SE é a direção da estrutura condutora de água, conforme descrito por Bhering (2009). Faz sentido que próximo desta direção tenha-se uma região de menor resistência mecânica do maciço, uma vez que, a água provoca uma dissolução das rochas carbonáticas presentes no local.

Figura 18 - Visualização do gráfico 4D do modelo geomecânico da variável RQD com o emprego do IDW – subsetor Norte_Sul



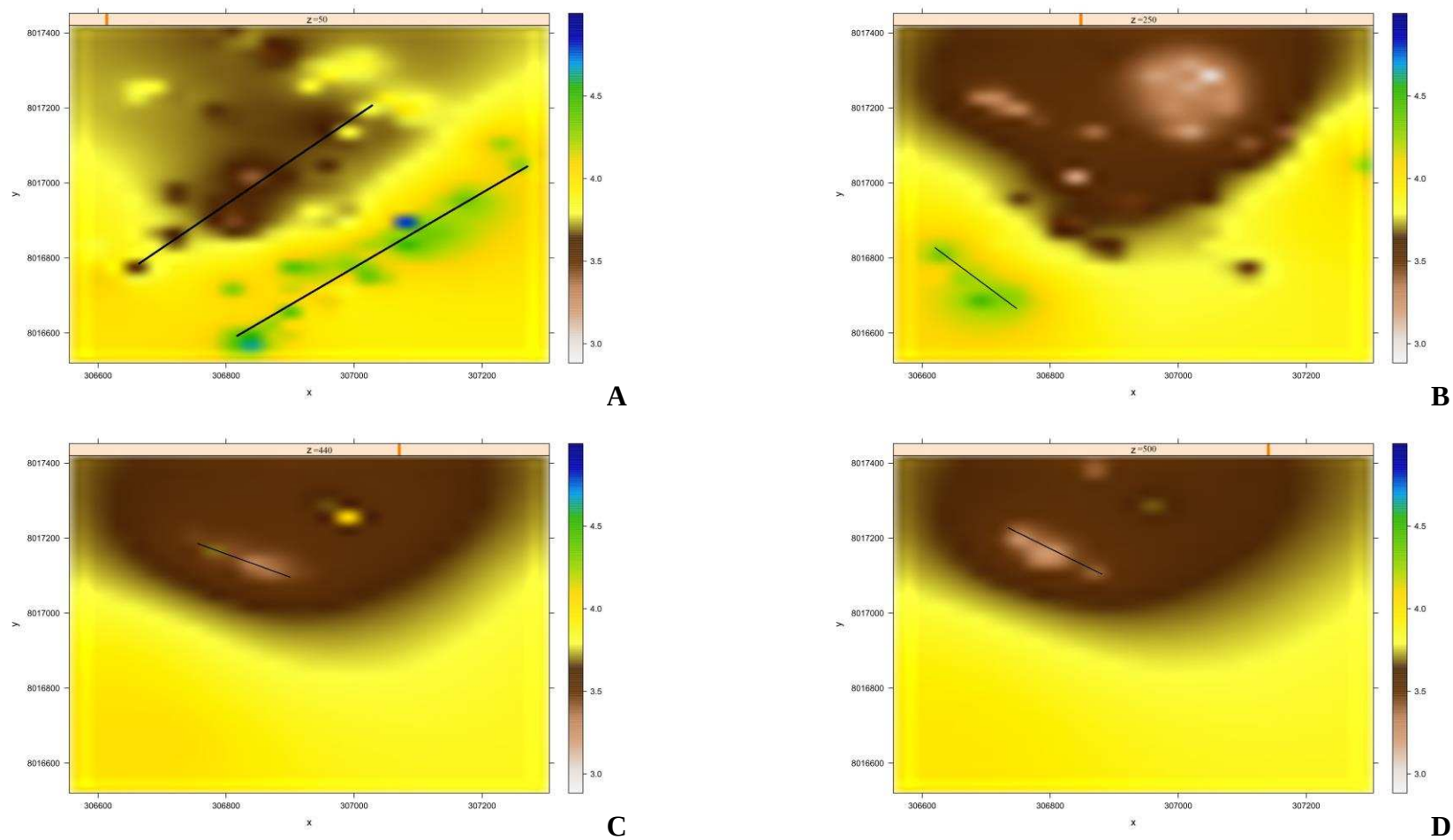
Fonte: Própria autora.

Figura 19 - Modelo geomecânico da variável CLASS obtido com o emprego do interpolador IDW - subsetor Norte_Sul



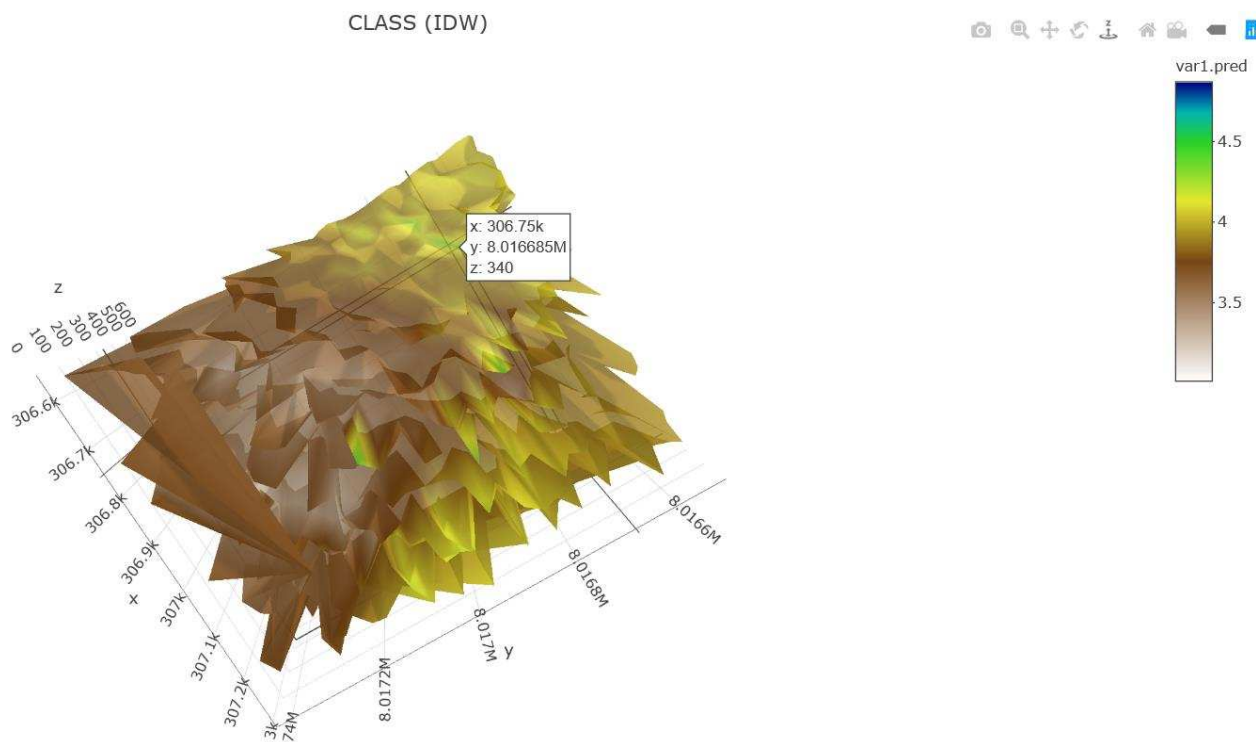
Fonte: Própria autora.

Figura 20 - Modelo geomecânico do CLASS a 50 m de profundidade (**A**), a 250 m de profundidade (**B**), a 440 m de profundidade (**C**) e a 500 m de profundidade (**D**) – subsetor Norte_Sul



Fonte: Própria autora.

Figura 21 - Visualização do gráfico 4D do modelo geomecânico da variável CLASS com o emprego do IDW – subsetor Norte_Sul



Fonte: Própria autora.

Na Figura 22 tem-se os resultados da interpolação da variável RQD pelo interpolador IDW para o subsetor Norte_Central. Nota-se que, desde a superfície, Figura 23A, observa-se uma extensa área com valores medianos de RQD (RQD entre 50 e 60) com poucos pontos com baixos valores de RQD em seu interior. Este comportamento pode ser notado até a profundidade de 60 m. Entre 70 e 130 m de profundidade verifica-se que ocorre uma redução da área com valores medianos de RQD e há um aumento da área com altos valores da variável interpolada (RQD > 70). Além disso, ocorre uma diminuição dos pontos com baixos valores de RQD e um aumento de pontos com altíssimos valores de RQD, inclusive com RQD em torno de 90 (Figura 23B). Entre 140 e 230 m de profundidade vê-se uma diminuição da área com valores médios de RQD (Figura 23D), sendo que no interior destas áreas remanescentes tem-se a presença de baixos valores de RQD (RQD < 40), que desaparecem na profundidade de 240 m. Além disto, entre as profundidades de 140 e 330 m, é possível constatar pontos com altos valores de RQD (RQD > 80) alinhados segundo a direção NE-SW, Figura 23C. A partir de 340 m de profundidade percebe-se que o alinhamento dos pontos com altos valores de RQD tende para a direção N-S, Figuras 23E e 23G, com redução do ângulo do alinhamento com a direção Norte. Lemos (2011) relata que a zona de falha da região do Extremo Norte possui uma direção preferencial N-S, pelo que se acredita que esta rotação esteja relacionada à influência desta zona de falha. Por fim, tem-se que a partir da profundidade de 390 m (Figura 23F) a região com valores medianos de RQD não é mais observada.

Na Figura 24 tem-se o modelo 4D da variável RQD com base no emprego do interpolador IDW. Observa-se que o modelo apresenta uma área considerável com altos valores de RQD. Os resultados desta imagem são os mesmos apresentados nas Figuras 3.15 e 3.16, mas a visualização é imensamente melhor, além de possibilitar de verificação imediata do RQD dentro do grid de análise.

Analisando a Figura 25 nota-se que o modelo da variável CLASS (classificação RMR simplificada), obtida através do interpolador IDW, apresentou um maciço rochoso com média resistência geomecânica com extensas áreas com CLASS igual a 3.6 desde a superfície até a profundidade final analisada. Entre 80 e 190m de profundidade a extensão da citada área é muito expressiva sendo que se tem apenas pequenas áreas nos extremos do modelo com CLASS em torno de 4. Entre 200 e 290 m de profundidade esta área de CLASS em torno de 4 só é observada na parte inferior do modelo.

Especificamente, tem-se que a superfície do modelo (Figura 26A) é composta por uma área com CLASS igual a 4 com pontos com menor resistência inseridas na mesma. Já na profundidade de 80 m (Figura 26B) observa-se um núcleo de média resistência (CLASS = 3) dentro da região de pior classe geomecânica. Entre 120 e 390 m nota-se um alinhamento de pontos com direção NE-SW com boa classe geomecânica, Figura 26 C e Figura 26 D. Já na profundidade de 290 m tem-se um segundo alinhamento de pontos com boa resistência, contudo na direção NW-SE (Figura 26 E). A partir de 450 metros de profundidade observa-se que o alinhamento dos pontos de boa resistência geomecânica apresentam um empinamento, tendendo a direção N-S, Figura 26 F e Figura 26 G. Por fim, em toda a extensão do modelo tem-se pontos da variável CLASS em torno de 4 no interior das áreas com melhor classe geomecânica, sendo que tal padrão de comportamento permanece mesmo com o avanço da profundidade.

Na Figura 27 tem-se o modelo 4D da variável CLASS através do emprego do interpolador IDW. Nota-se que o modelo apresenta um volume expressivo de valores de boa classe geomecânica. Os resultados desta imagem são os mesmos apresentados nas Figuras 3.18 e 3.19, mas a visualização e interatividade são bem melhores e facilitam a compreensão do comportamento.

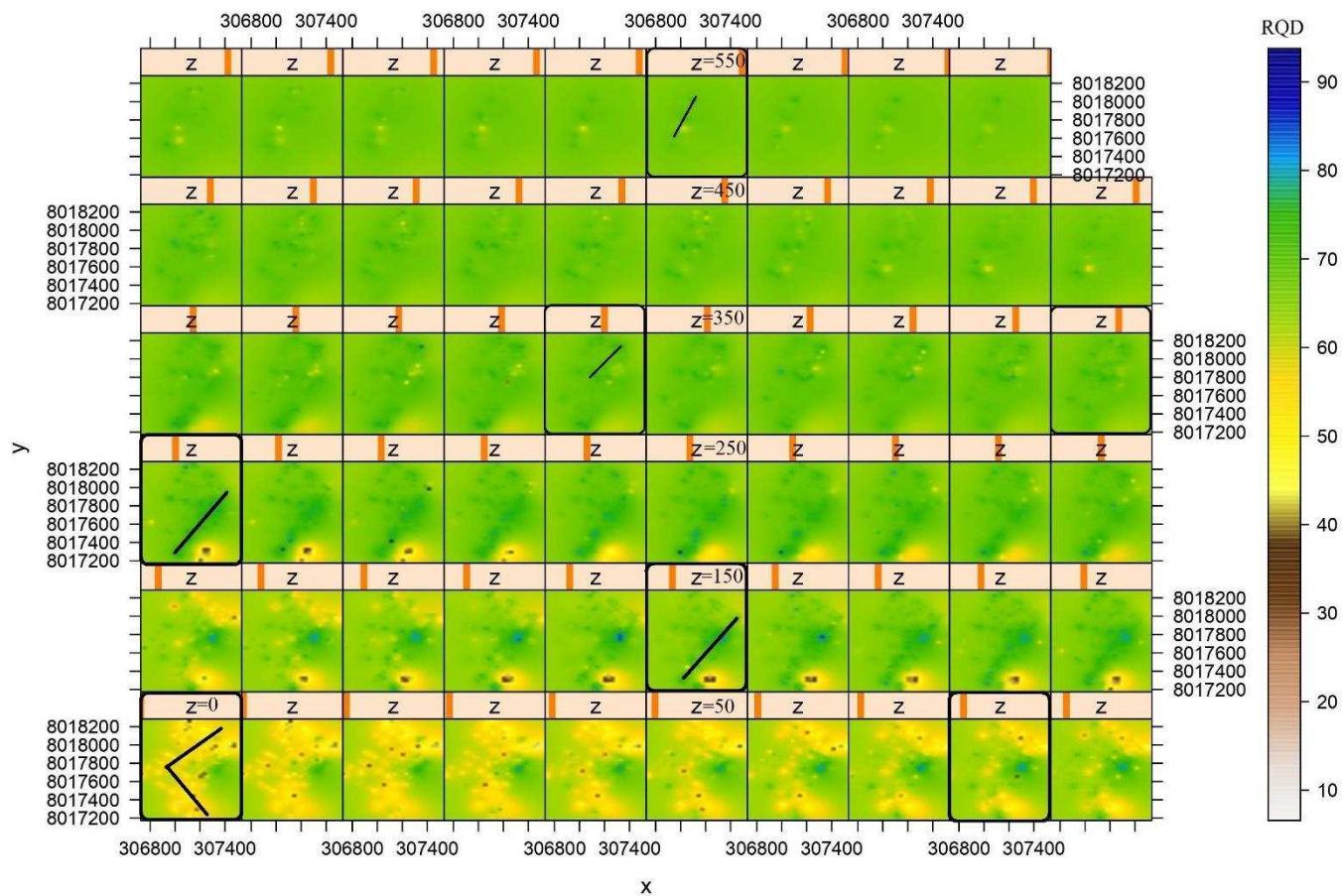
Confrontando os dois modelos confeccionados, tanto no do RQD quanto o da classificação, constata-se que, apesar de condizentes, não houve variação significativa dos resultados a partir de 240-250 m de profundidade, mostrando uma melhora do maciço rochoso em profundidade e sem grandes variações laterais e verticais. Para o modelo da variável RQD foi observado expressiva variação num intervalo considerável até a profundidade de 150 m, indo desde valores muito baixos até em torno do RQD igual a 70. Comportamento semelhante foi notado no modelo da classificação. Da observação das Figuras 22 e 25 nota-se uma boa concordância entre os valores de RQD e os de classificação do maciço (CLASS), já que as zonas de menor RQD estão em concordância com aquelas de maciço de pior categoria. O mesmo vale para as regiões de maior RQD e de melhor classe geomecânica. Foram observadas as mesmas direções para os alinhamentos dos pontos com boa resistência geomecânica.

Os piores valores do RQD e da classificação podem estar relacionados com a presença das fendas. Para o subsetor Norte_Central tem-se que as fendas foram observadas desde a superfície até a profundidade de 400 m, sendo que entre 50 e 100m elas foram mais expressivas.

Porém, para os 50 primeiros metros de profundidade os resultados obtidos, provavelmente, estão relacionados com a presença do material sem recuperação (S/R u R/S) que, por sua vez, pode estar relacionado à cobertura de solo presente na região, conforme relatado por Bittencourt e Reis Neto (2012) e que são comuns em região de ocorrência de rochas carbonáticas.

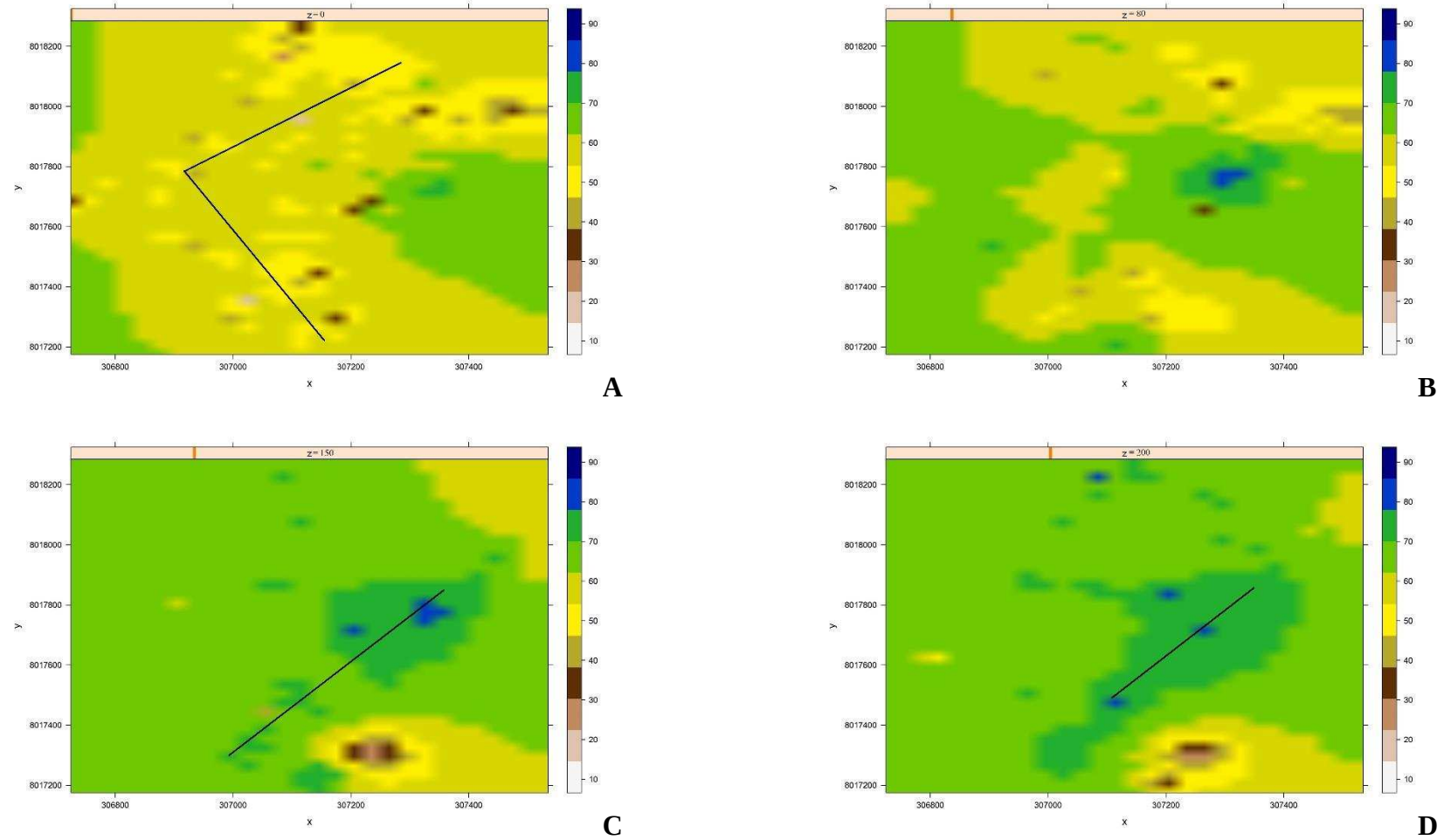
Sob o ponto de vista da geologia estrutural, Figura 15, constata-se que o subsetor Norte_Central não possui controle estrutural em nível regional. Este fato pode explicar a diminuição na presença de fendas no local e, por consequência, o aumento das regiões com altos valores de RQD e melhores valores da classificação RMR.

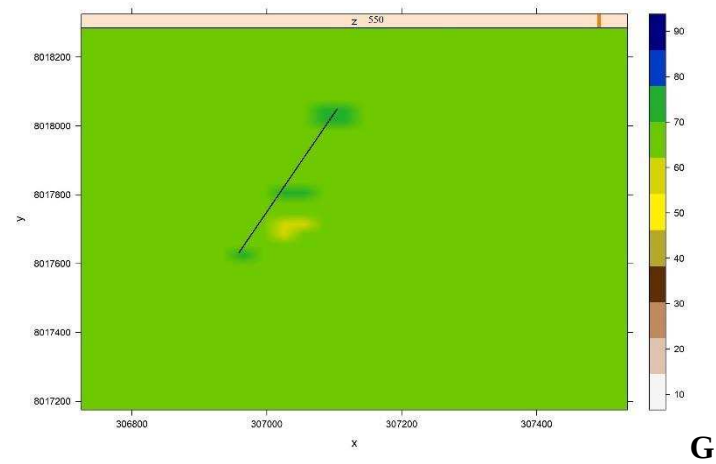
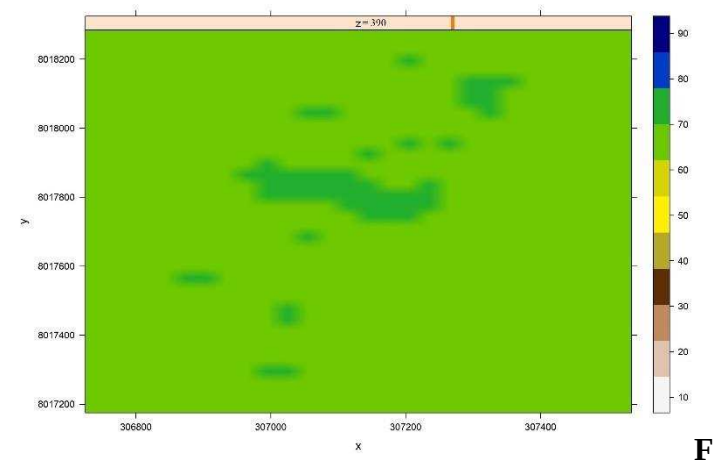
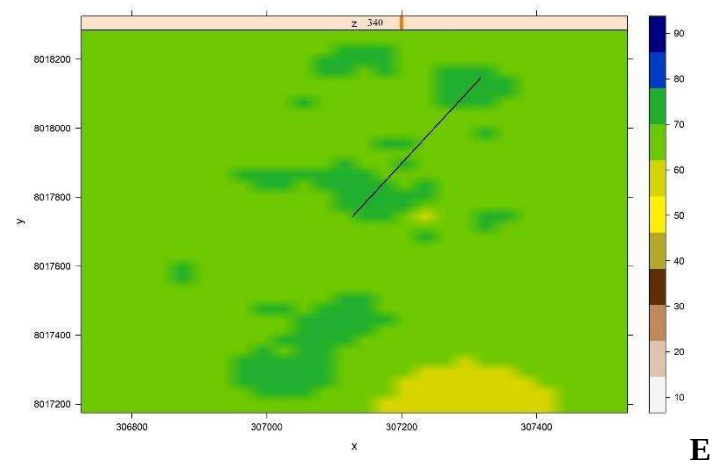
Figura 22 - Modelo geomecânico da variável RQD obtida com emprego do interpolador IDW - subsetor Norte_Central



Fonte: Própria autora.

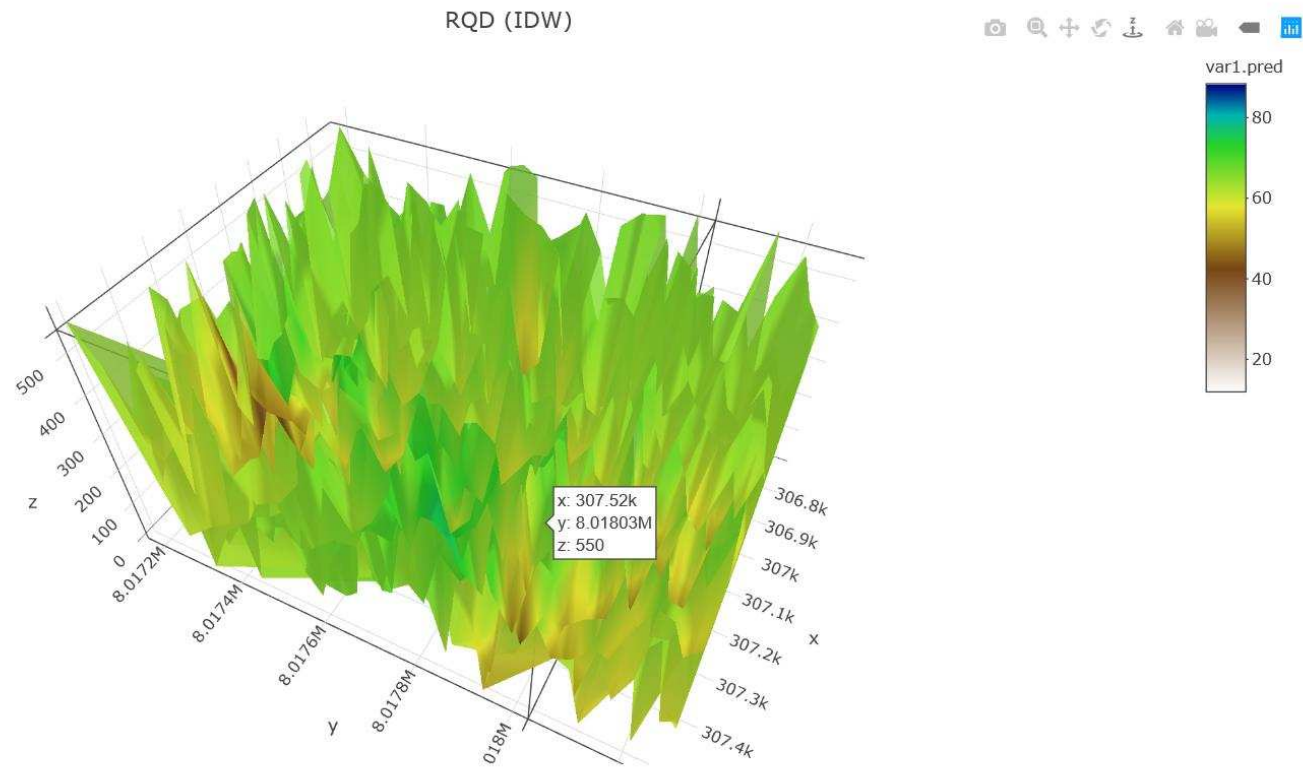
Figura 23 - Modelo geomecânico do RQD na superfície (A), a 80 m de profundidade (B), a 150 m de profundidade (C), a 200 m de profundidade (D), a 340 m de profundidade (E), a 390 m de profundidade (F) e 560 m de profundidade (G) – subsetor Norte_Central





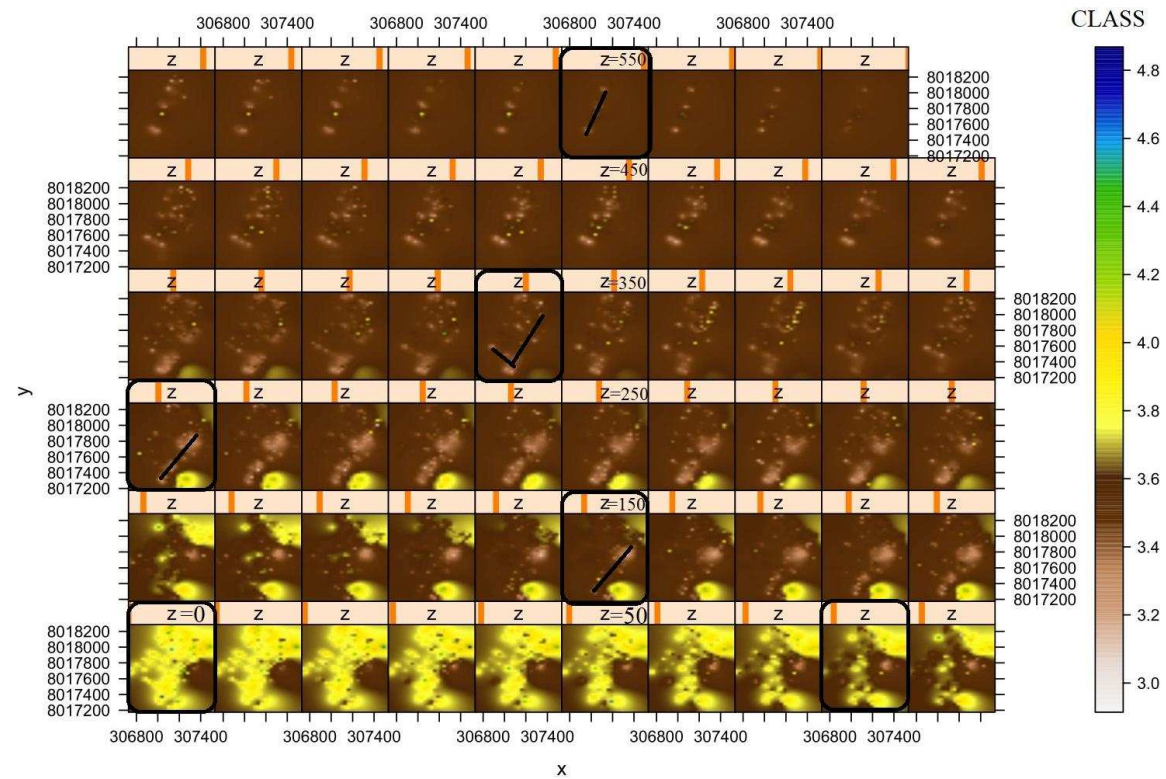
Fonte: Própria autora.

Figura 24 - Visualização do gráfico 4D do modelo geomecânico da variável RQD com o emprego do IDW – subsetor Norte_Central



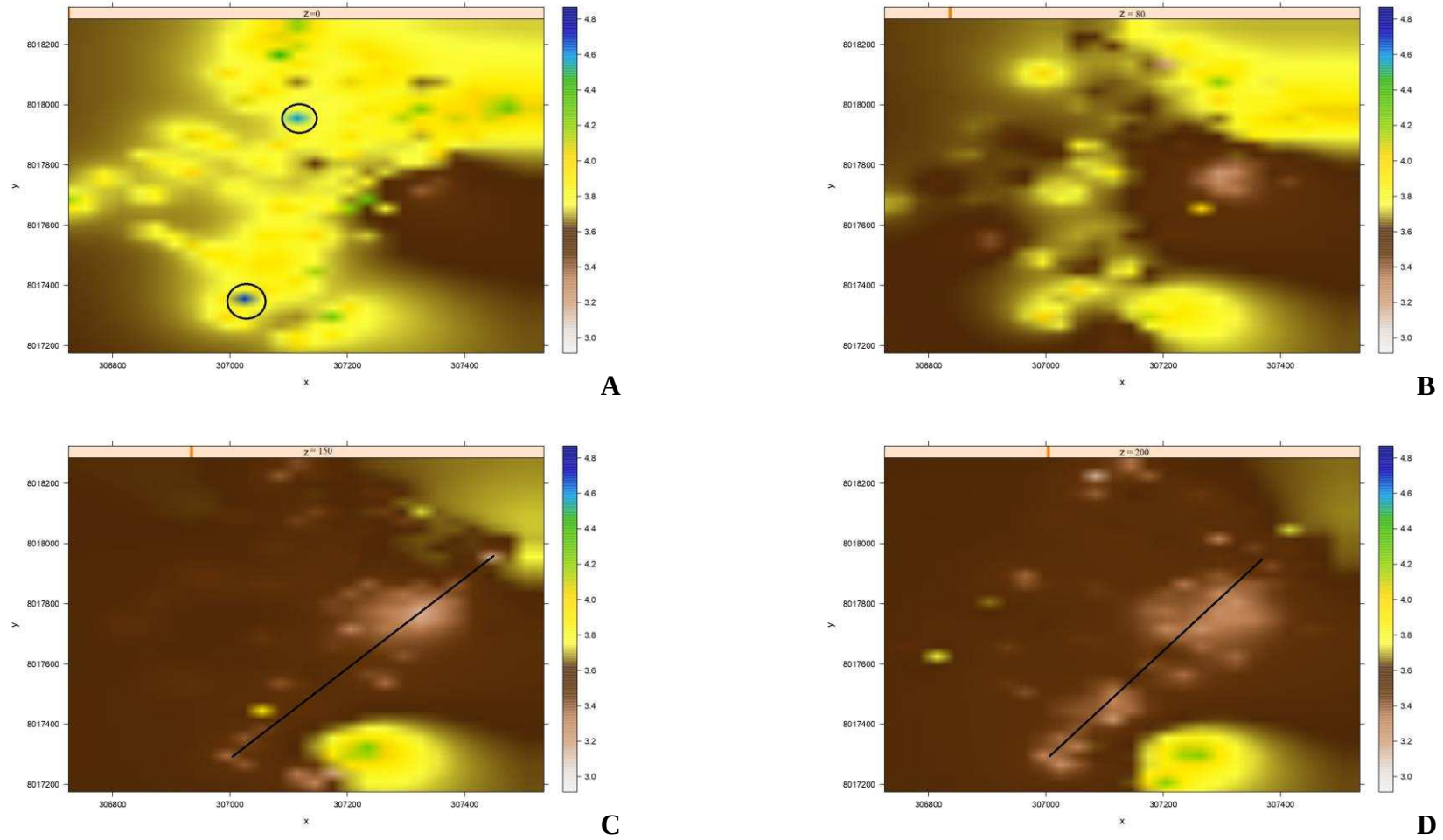
Fonte: Própria autora.

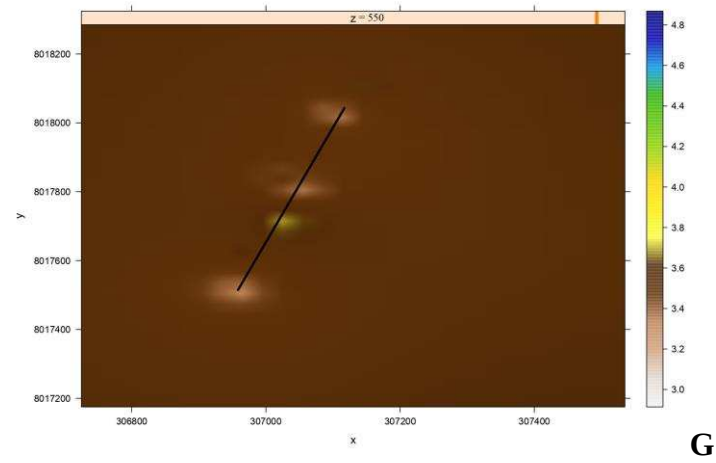
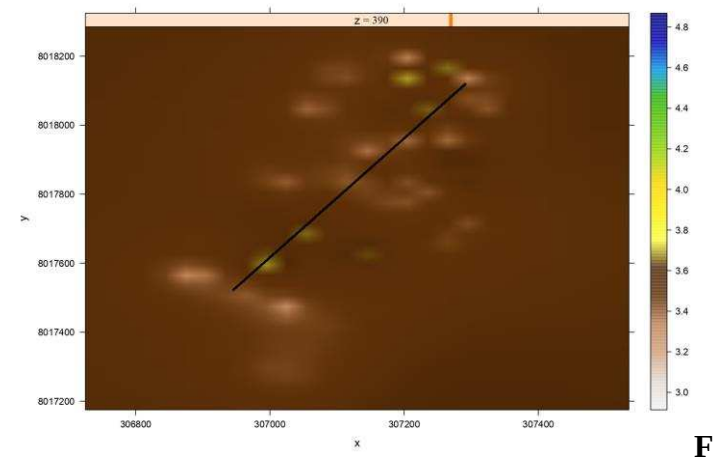
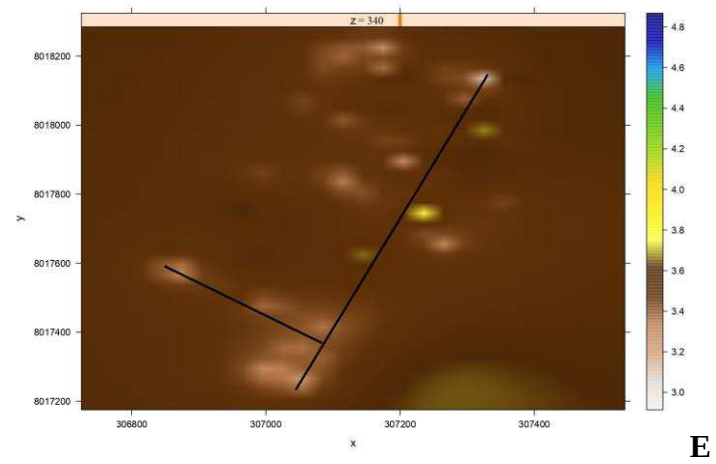
Figura 25 - Modelo geomecânico da variável CLASS obtido com o emprego do interpolador IDW - subsetor Norte_Central



Fonte: Própria autora.

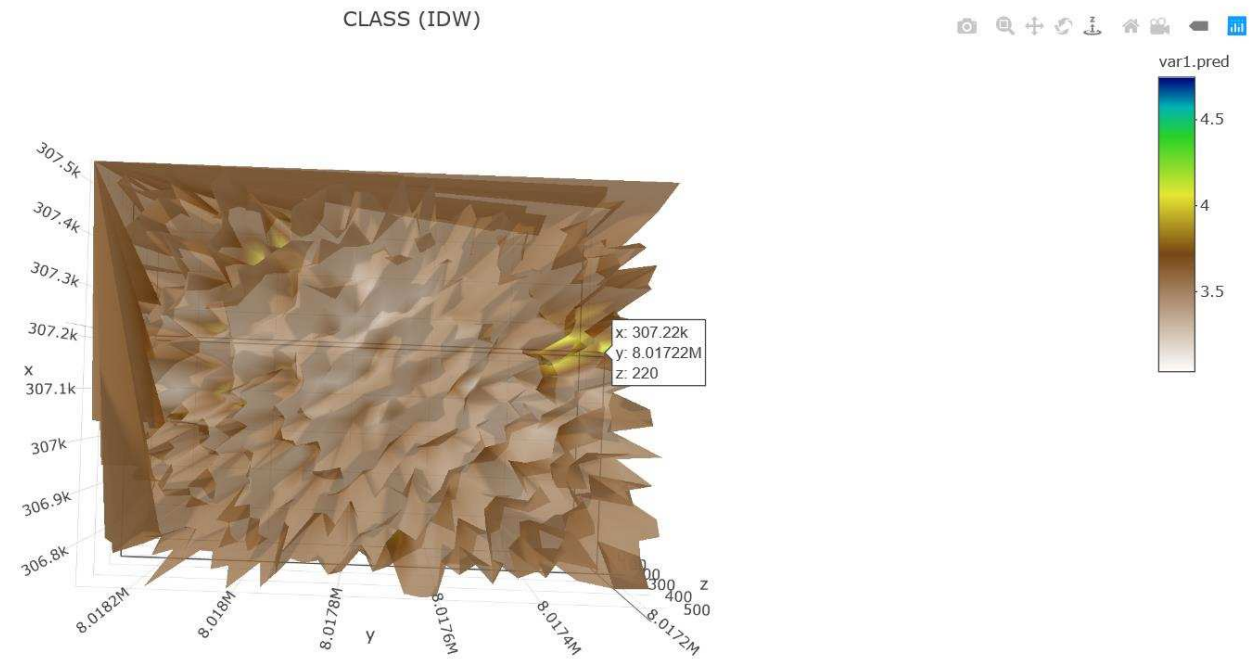
Figura 26 - Modelo geomecânico do CLASS na superfície (A), a 80 m de profundidade (B), a 150 m de profundidade (C), a 200 m de profundidade (D), a 340 m de profundidade (E), a 390 m de profundidade (F) e 560 m de profundidade (G) – subsetor Norte_Central





Fonte: Própria autora.

Figura 27 - Visualização do gráfico 4D do modelo geomecânico da variável CLASS com o emprego do IDW – subsetor Norte_Central



Fonte: Própria autora.

Na Figura 28 tem-se os resultados do modelo da variável RQD obtido através do emprego do interpolador IDW para o subsetor Norte_Norte. Da superfície ($z = 0$) até 130m observa-se uma extensa área com valores baixos (em especial na porção Norte da área) e medianos de RQD (RQD em torno de 50), representando quase a totalidade do grid de análise deste subsetor. Além disso, tem-se uma pequena área, também com baixos valores de RQD na parte inferior do modelo e, na região central e alinhamentos de pontos de alto RQD ($RQD > 60$) na direção SE-NW, que vai progressivamente aumentando em área com a profundidade, Figura 29A. Nota-se que com o avanço da profundidade (dentro deste intervalo que é de 0 a 130m) ocorre uma redução da área de baixos valores de RQD da região Norte e um aumento da área a Sul. Além disso, constata-se o aparecimento de pontos com alto RQD alinhados numa segunda direção, a NE-SW, Figura 29B. A partir de 120 m os pontos de alto RQD das duas direções citadas formaram uma área cujas dimensões aumenta progressivamente com o avanço da profundidade. Ademais, esta área está envolvida por uma borda com valores medianos de RQD em toda a profundidade do modelo, havendo inclusive um aumento da borda com o aumento da área, Figura 29C. No intervalo de 140 a 220 m verifica-se uma redução gradual da área com baixos valores de RQD até o seu desaparecimento. Já entre as profundidades de 230 a 270m tem-se a presença de pontos com altíssimos valores de RQD ($RQD > 80$) inseridos na área com RQD em torno de 70 e pontos com baixos valores de RQD ($RQD < 30$) inseridos na área com RQD em torno de 50, conforme pode ser observado na Figura 29D. Finalmente, a partir de 280 m de profundidade nota-se uma inversão deste comportamento, com diminuição da área com altos valores de RQD em contrapartida ao aumento da região com valores medianos da variável analisada.

Na Figura 30 tem-se o modelo 4D da variável RQD através do uso do interpolador IDW permitindo analisar o comportamento 3D da variável e averiguar instantaneamente o valor da variável analisada dentro do grid de análise.

O modelo da classificação RMR simplificada do subsetor Norte-Norte é apresentado na Figura 31. Nos 20 primeiros metros de profundidade nota-se um alinhamento de pontos com direção NE-SW de resistência geomecânica muito baixa, CLASS em torno de 4.8. Este alinhamento persiste até 40 m de profundidade, todavia ocorre uma leve melhora na resistência com o avanço da profundidade traduzida pelo aumento da variável CLASS. Da superfície (z igual a zero) até 80 m tem-se um aglomerado de pontos com boa classe geomecânica (CLASS

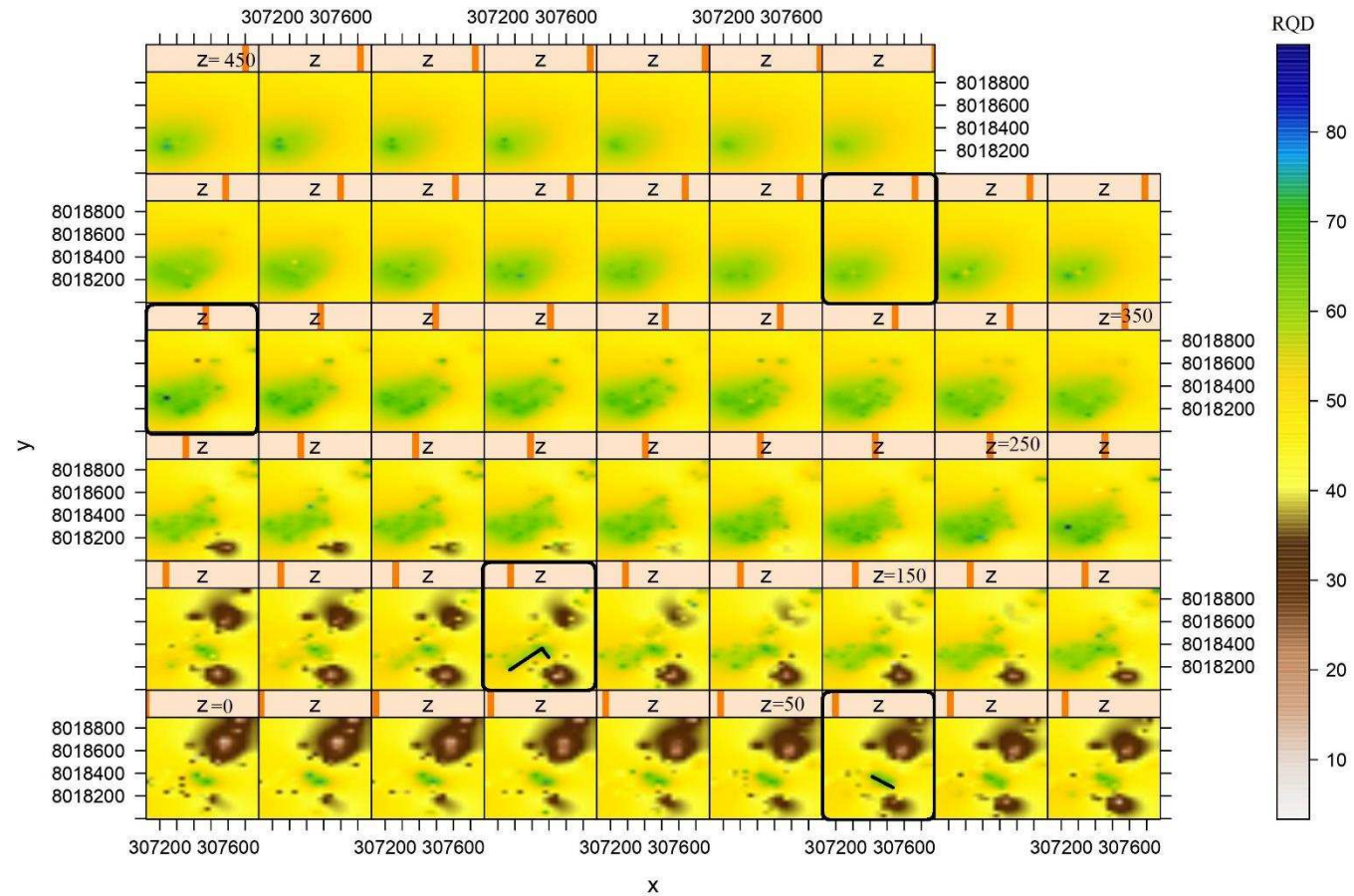
< 3.6) dentro da região de classificação em torno de 4, Figura 32 **A**. Entre 90 e 280 m de profundidade tem-se um alinhamento NE-SW de pontos com boa resistência geomecânica (Figura 32 **B** e Figura 32 **C**), sendo que no intervalo de 100 e 200 m observa-se, também, um alinhamento na direção NW-SE de pontos de boa resistência. Já entre 170 e 350 m nota-se, novamente, que há um núcleo de pontos de boa resistência dentro da Classe em torno de 4. Essa região perde expressividade, Figura 32 **D**, com o avanço da profundidade, contudo pode ser observada em toda a extensão do modelo.

Na Figura 33 tem-se o modelo 4D da variável CLASS através do emprego do interpolador IDW. Observa-se no modelo regiões com bons valores de classificação RMR simplificada (CLASS abaixo de 2) nas profundidades mais rasas do modelo. Os resultados observados na imagem são os mesmos apresentados nas Figuras 31.

Contraponto os dois modelos confeccionados (RQD e CLASS) pelo uso do interpolador IDW para o subsetor Norte_Norte, tem-se que o padrão de resultados obtidos nos dois modelos é semelhante. Observa-se nos modelos áreas significativas de valores medianos para ambas as variáveis analisadas e tem-se a formação de regiões com altos valores de RQD e bons valores de classificação a partir do alinhamento de pontos oriundos de duas direções diferentes, a SW-NE e a NW-SE.

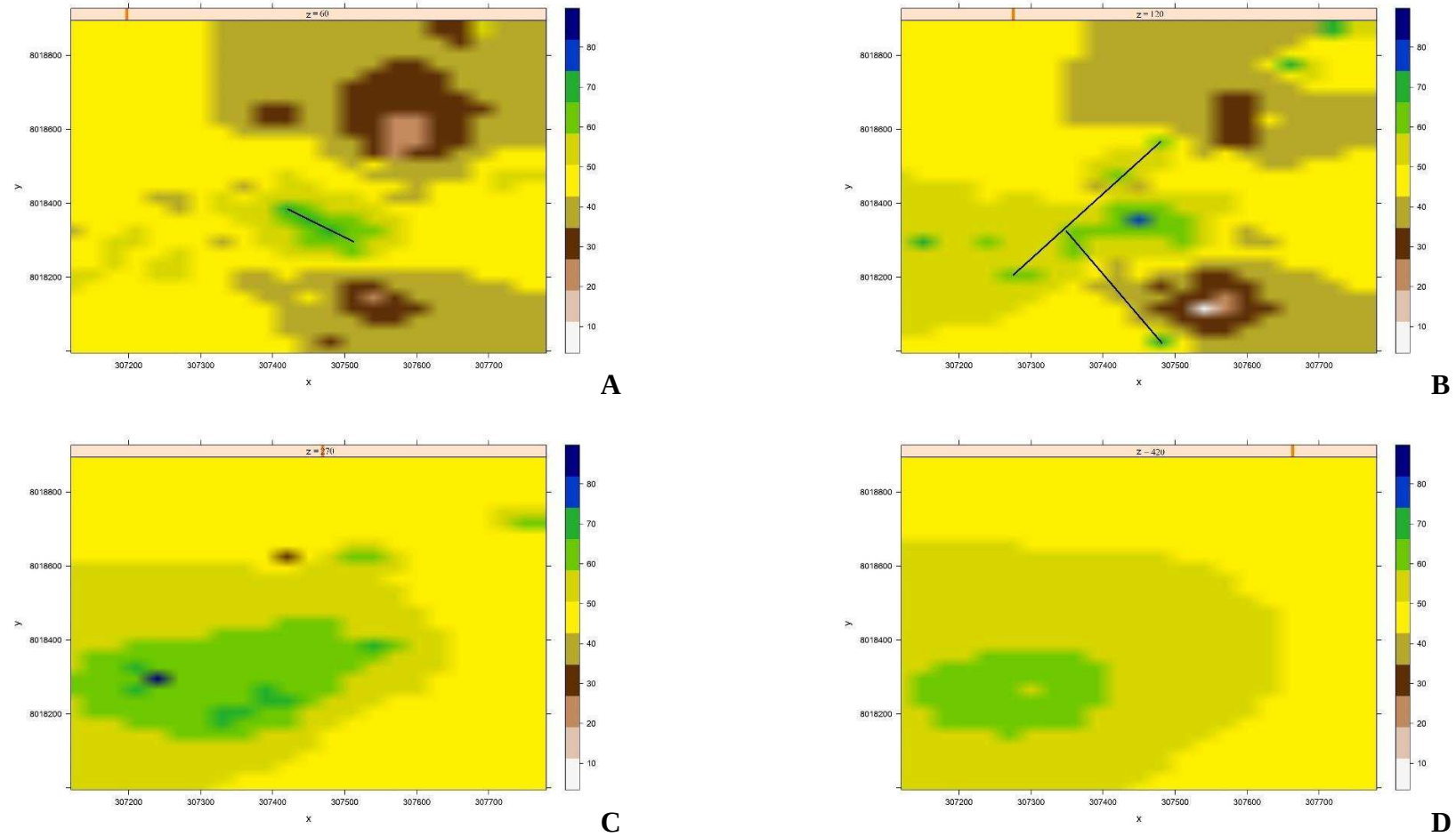
Os resultados encontrados em ambos os modelos, especificamente, os baixos valores de RQD e as áreas com classificação geomecânica ruim (CLASS acima de 4.2), podem estar associados à presença das fendas e com o litotipo S/R no interior do maciço. Para o subsetor Norte_Norte tem-se que as fendas foram observadas desde a superfície até a profundidade de 250 m, sendo que entre 100 e 150 m elas foram mais expressivas. Todavia, para os 50 primeiros metros de profundidade os resultados obtidos, provavelmente, estão relacionados com a presença da cobertura de solos que podem ter dado origem ao material sem recuperação (S/R). Este material pode ter outra fonte além do solo, haja vista que o mesmo foi observado até profundidades entre 250 e 300 metros.

Figura 28 - Modelo geomecânico da variável RQD obtida com emprego do interpolador IDW - subsetor Norte_Norte



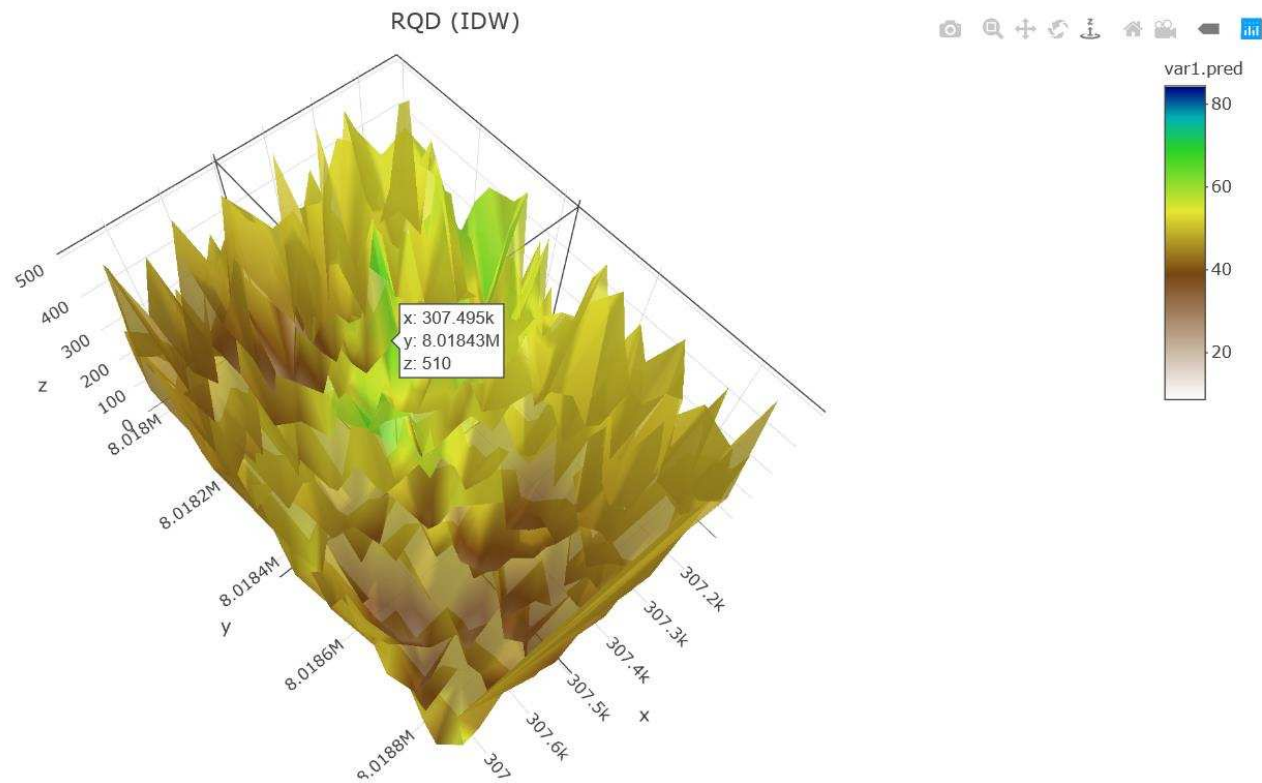
Fonte: Própria autora.

Figura 29 - Modelo geomecânico do RQD a 60 m de profundidade (A), a 120 m de profundidade (B), a 270 m de profundidade (C) e a 420 m de profundidade (D) – subsetor Norte_Norte



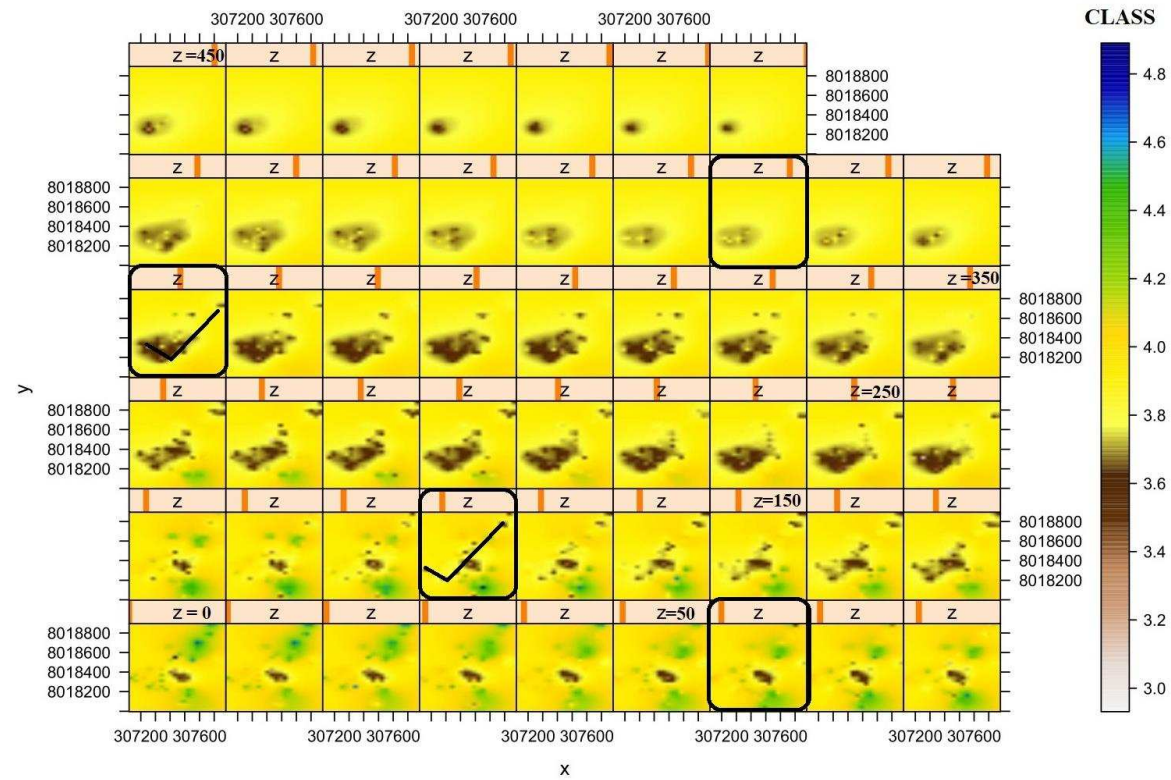
Fonte: Própria autora.

Figura 30 - Visualização do gráfico 4D do modelo geomecânico da variável RQD com o emprego do IDW – subsetor Norte_Norte



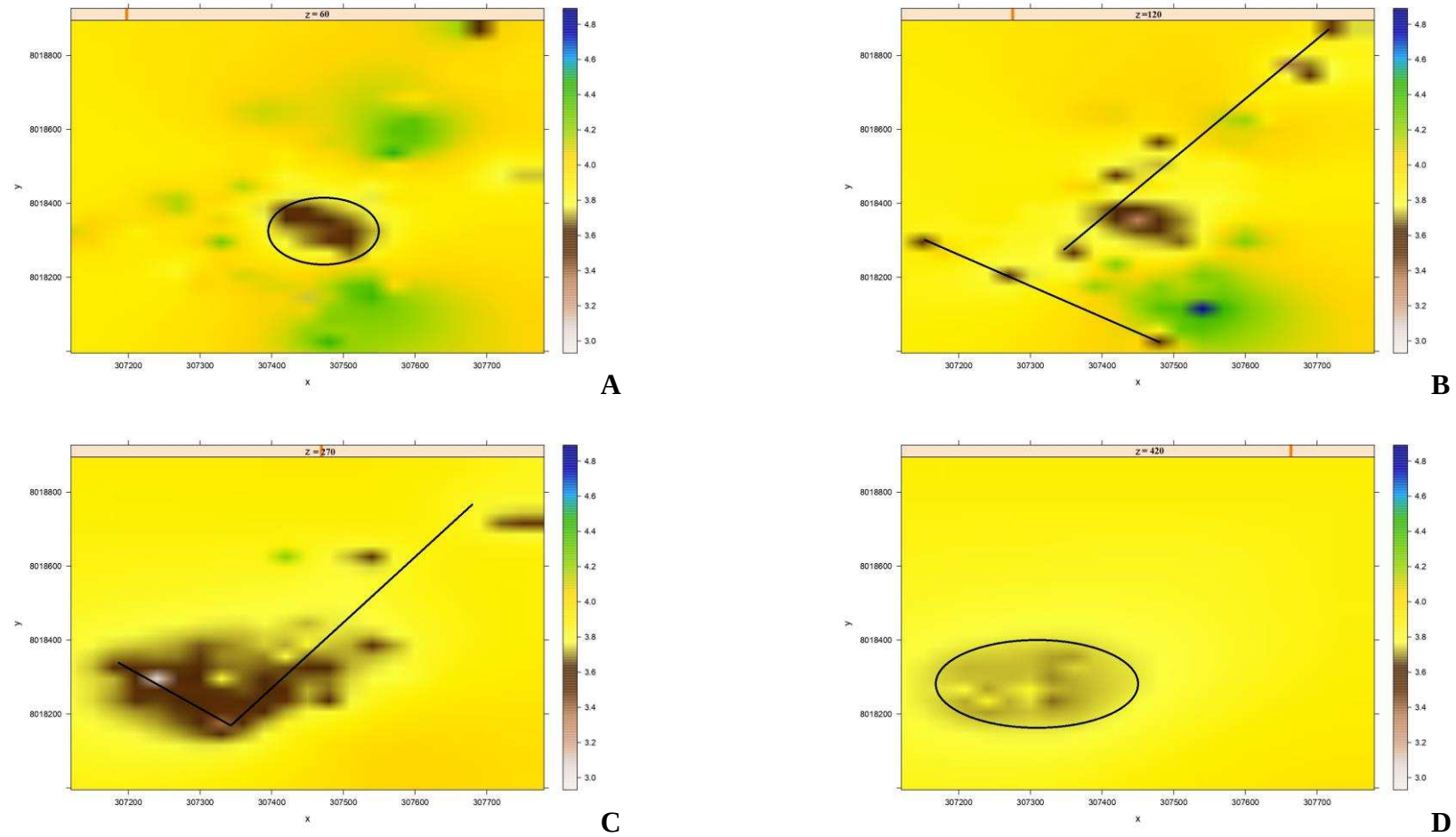
Fonte: Própria autora.

Figura 31 - Modelo geomecânico da variável CLASS obtido com o emprego do interpolador IDW - subsetor Norte_Norte



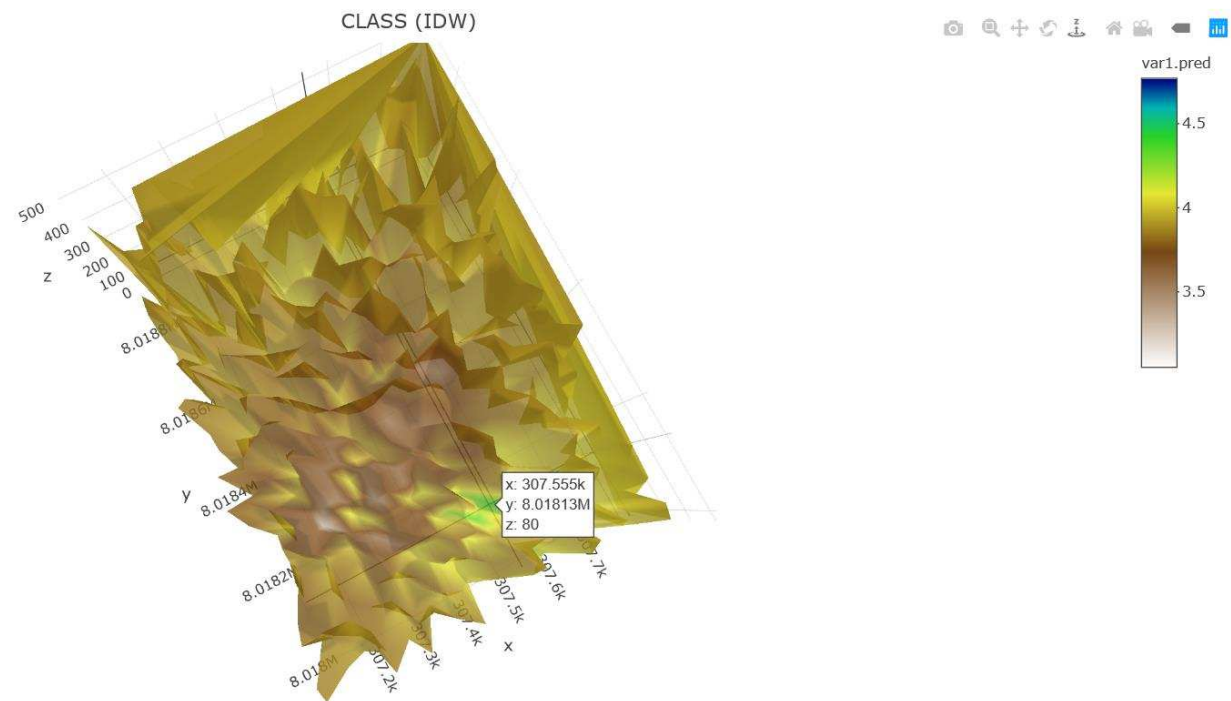
Fonte: Própria autora.

Figura 32 - Modelo geomecânico do CLASS a 60 m de profundidade (A), a 120 m de profundidade (B), a 270 m de profundidade (C) e a 420 m de profundidade (D) – subsetor Norte_Norte



Fonte: Própria autora.

Figura 33 - Visualização do gráfico 4D do modelo geomecânico da variável CLASS com o emprego do IDW – subsetor Norte_Norte



Fonte: Própria autora.

Comparando os resultados dos modelos de RQD dos três subsetores – Figura 16, Figura 22 e Figura 28 – observa-se que o Norte_Sul é o que apresenta áreas com os menores valores de RQD, sendo que estes baixos valores podem ser observados desde a superfície até cerca de 500 metros de profundidade. Além disso, neste subsetor tem-se um notável alinhamento destes pontos com a direção NE-SW. O Norte_Central por sua vez é o que apresenta os maiores valores de RQD (este resultado já havia sido identificado na análise exploratória dos dados), sendo possível também observar alinhamento de pontos de valores medianos do RQD com as direções NE-SW e NW-SE. Já o subsetor Norte-Norte também apresenta extensas áreas com baixos valores de RQD apenas nos primeiros 150 m de profundidade.

Em relação aos modelos da classificação RMR simplificada, quando se faz a comparação entre os três subsetores – Figura 19, Figura 25 e Figura 31 – tem-se que o subsetor Norte_Central é composto quase em sua totalidade pela classe em torno de 3, principalmente após 150 m de profundidade. Os subsetores Norte_Norte e Norte_Sul têm alinhamento de pontos e alguns núcleos classe próximo de 4, sendo que as do Norte_Norte apresentam áreas maiores em extensão e as do Norte_Sul persistem até elevadas profundidades.

Além dos modelos de RQD e CLASS, confeccionou-se os modelos da variável CLASSLOCAL empregando o interpolador IDW. O intuito de gerar estes modelos foi buscar meios para confrontar os resultados dos modelos de ambas as classificações. Comparando os resultados do subsetor Norte_Sul da classificação local (Figura 34) com a classificação RMR simplificada (Figura 16) nota-se que aquela classificação delimitou melhor os pontos de alinhamentos na direção NE-SW das classes de maciço de melhor resistência geomecânica, principalmente com o avanço da profundidade. Além disso, para este subsetor identifica-se que os resultados do modelo da classificação local (Figura 34) não possui boa aderência com o modelo do RQD (Figura 16), pois as mesmas regiões que apresentam baixos valores de RQD tem excelente classe de maciço relacionadas a elas.

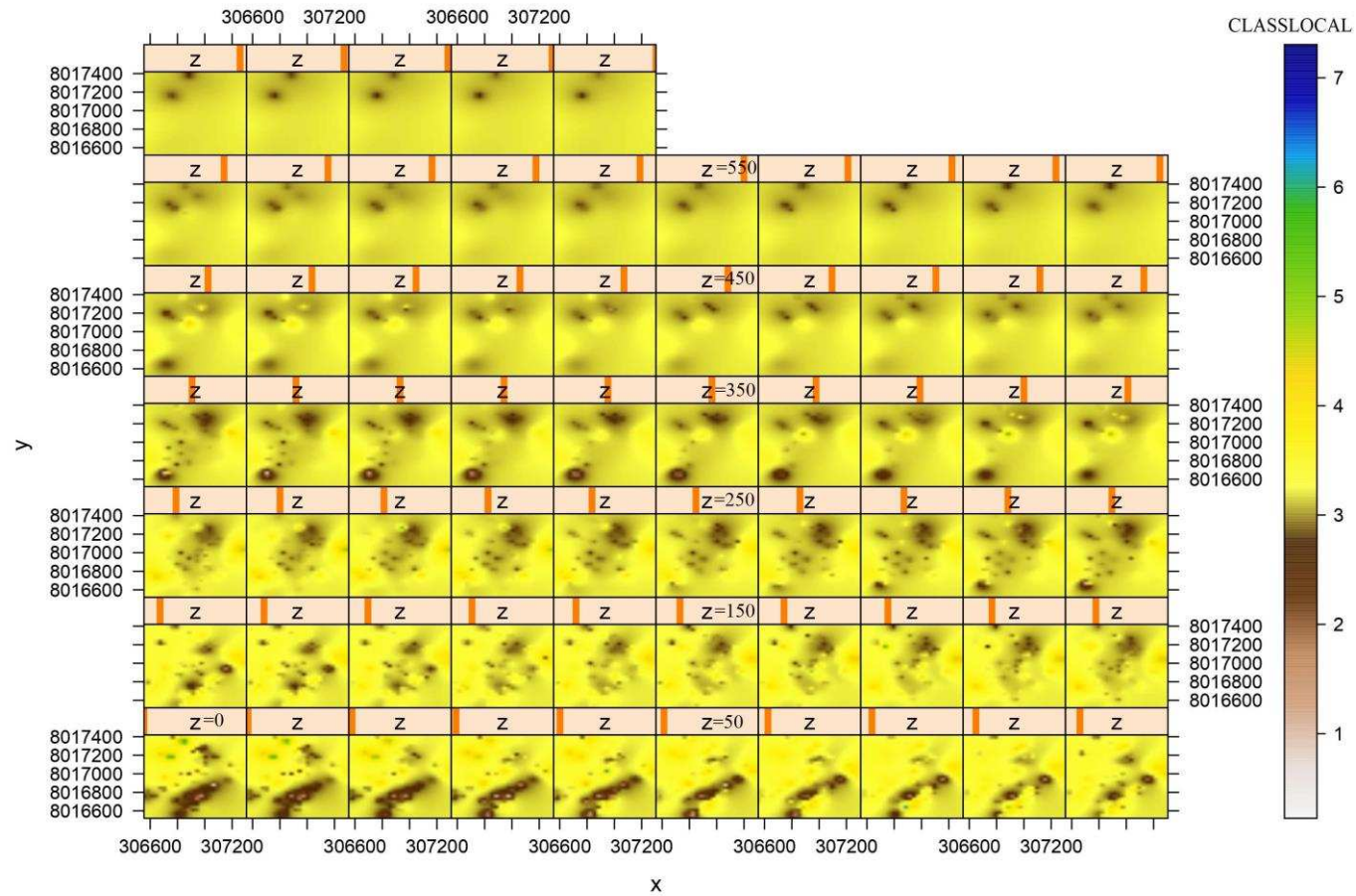
Para o subsetor Norte_Central o modelo da variável CLASSLOCAL (Figura 35) apresenta resultados condizentes com o da variável CLASS (Figura 25). Ambos os modelos apresentam extensas regiões com boas classes do maciço, principalmente, com o aumento da profundidade. Para o modelo da classificação local, nota-se um alinhamento de pontos, bem marcado, de classes 1 e 2 com a direção NE-SW, principalmente entre as profundidades de 100

a 290m. Este alinhamento não pode ser explicado com base no condicionamento estrutural regional, pois conforme já mencionado anteriormente este subsetor não possui elementos estruturais, pelo menos não na escala de análise (1:75.000). Desta forma, provavelmente existe algum condicionamento estrutural local responsável por imprimir este resultado ao modelo. Quando se compara os resultados no modelo do RQD (Figura 22) com o da variável local observa-se que os resultados estão condizentes – regiões de alto RQD com boa classe geomecânica.

Para o subsetor Norte_Norte, comparando os modelos da classificação RMR simplificada (Figura 31) com a classificação local, também foi observada a presença de regiões com boa classe geomecânica para o modelo da variável CLASSLOCAL (Figura 36), principalmente com o aumento da profundidade. Além disso, nota-se a presença de alinhamentos de pontos de classe 1 e 2 com a direção NW-SW, todavia no modelo da classificação local não foi identificado material de baixíssima resistência próximo a superfície como no modelo da variável CLASS. Comparando o modelo da classificação local com o do RQD (Figura 28) nota-se uma excelente aderência entre os modelos, especialmente a partir de 190 m de profundidade.

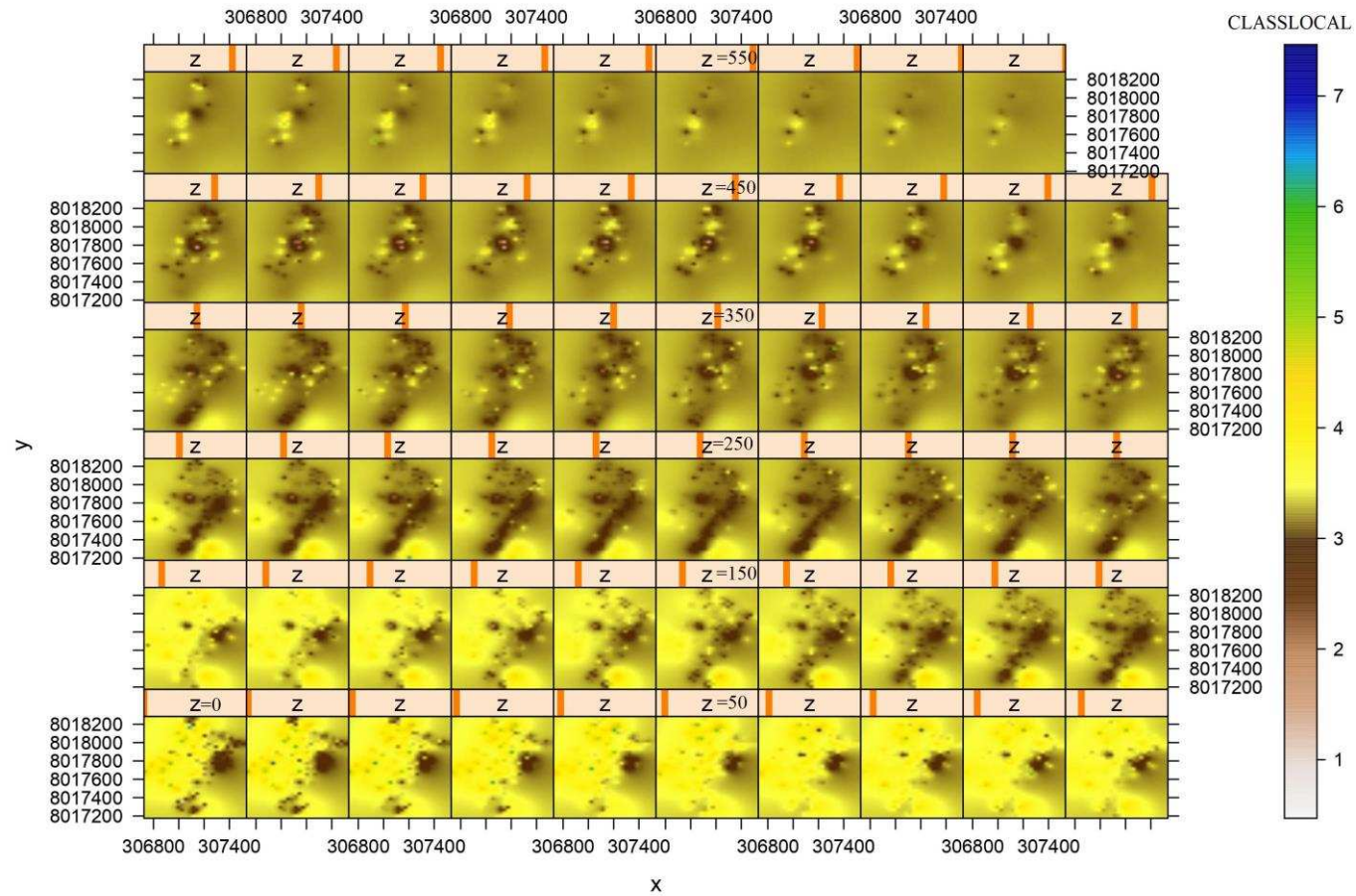
Neste processo de comparação dos modelos de ambas as classificações, infere-se que provavelmente a influência das descontinuidades está menosprezada na classificação RMR simplificada. Isso se deve ao fato de o peso deste parâmetro ter sido reduzido (Quadro 10) quando se empregou apenas a alteração para ponderar este parâmetro, e não foi realizada uma compensação no somatório geral dos pesos para obtenção da classe. Outra consideração a ser feita frente a estas comparações é a aparente falta de compatibilidade entre alguns modelos das classificações com o modelo do RQD. Observa-se que para uma mesma região tem-se boa classificação geomecânica e baixos valores de RQD. Este fato pode estar relacionado à presença de algum parâmetro importante do maciço rochoso que não foi considerado em nenhuma das classificações e possui mais relevância que o RQD.

Figura 34 - Modelo geomecânico da variável CLASSLOCAL obtido com o emprego do interpolador IDW - subsetor Norte_Sul



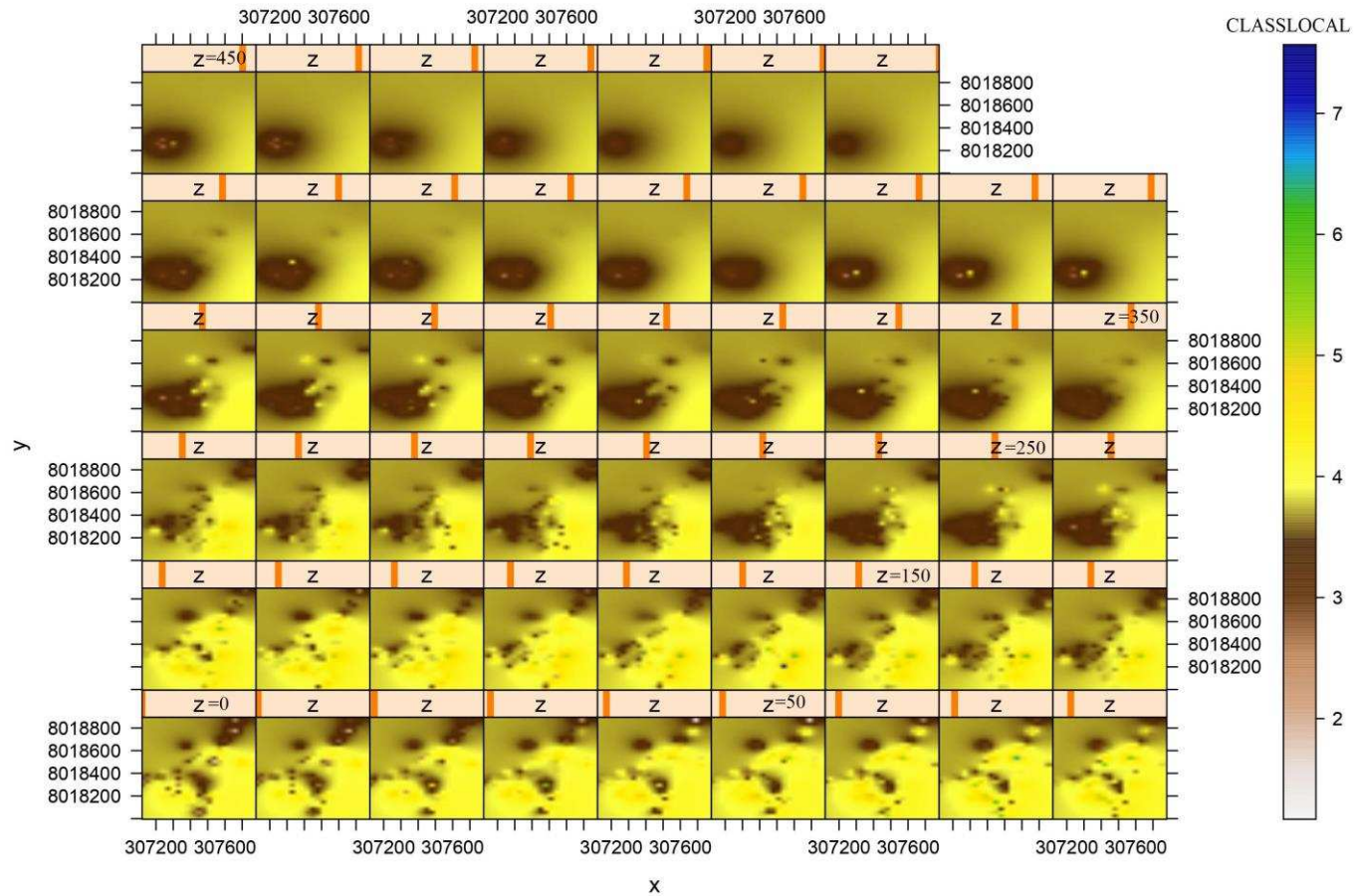
Fonte: Própria autora.

Figura 35 - Modelo geomecânico da variável CLASSLOCAL obtido com o emprego do interpolador IDW - subsector Norte_Central



Fonte: Própria autora.

Figura 36 - Modelo geomecânico da variável CLASSLOCAL obtido com o emprego do interpolador IDW - subsetor Norte_Norte



Fonte: Própria autora.

Com já mencionado anteriormente, a mineradora parceira não forneceu os dados geológicos estruturais locais para a realização deste trabalho. Este fato dificultou a realização de uma interpretação mais detalhada dos resultados obtidos, já que o controle estrutural sobre o comportamento mecânico do maciço é notório. Na literatura técnica, o único trabalho específico sobre a área do Extremo Norte da Mina de Vazante encontrado foi o elaborado por Lemos (2011). Essa autora menciona que a área do depósito de zinco do Extremo Norte é caracterizada por rochas pertencentes às formações Serra de Garrote e Serra do Poço Verde do Grupo Geológico Vazante, conforme já apresentado na Figura 5. Ainda de acordo com a autora, a região do Extremo Norte apresenta rochas bastante fraturadas sendo que as principais estruturas responsáveis por este comportamento são representadas por acamamentos e bandamentos, pelos planos relacionados à Falha Vazante, pelas falhas rúpteis de direção NW, bem como com estruturas de baixo ângulo. Tem-se que as estruturas relacionadas à Falha Vazante apresentam direção N-S devido à proximidade do contato das formações Serra do Poço Verde e Serra de Garrote. Esta direção foi observada em alinhamentos de pontos de alto RQD e boa classe geomecânica no subsetor Norte-Central. Em relação ao grau de fraturamento da região de Vazante como um todo, Bhering (2009) afirma que os principais fatores responsáveis pelo alto grau de fraturamento estão relacionados aos diferentes estados de tensões em que o maciço rochoso esteve submetido ao longo do tempo geológico, à tectônica rúptil como característica estrutural mais marcante e ao excessivo hidrotermalismo.

Lemos (2011) também relata que as principais descontinuidades condutoras de água, relevantes para a o entendimento da questão hidrogeológica e cárstica de toda a região de Vazante, são pertencentes à família de fraturas NW. Esta direção também foi observada nos resultados dos modelos geomecânicos no presente estudo, associada ao alinhamento de baixos valores de RQD e piores classes geomecânicas para os subsetores Norte_Sul e Norte_Norte.

Do ponto de vista da geologia estrutural regional tem-se que o subsetor Norte_Sul “corta” uma falha normal (Figura 15), provavelmente a Falha Vazante, e o Norte_Norte além da falha também apresenta lineamentos em seu grid de análise. Diante disso, tem-se que a presença destes controles estruturais justifica o fato destes subsetores terem apresentados extensas regiões com baixos valores de RQD. Já a região do grid do subsetor Norte_Central não intercepta a Falha Vazante e não apresenta lineamentos no seu interior. Assim, isto pode explicar o fato deste subsetor ter apresentado os maiores valores de RQD, indicando um maciço

rochoso de boa resistência geomecânica, ou seja, valores da variável CLASS abaixo de 3.5. Constatou-se que o modelo apresentou para a maior parte das profundidades maciços de classe 4, conforme já havia sido observado na análise exploratória dos dados.

Já em relação a geologia local, os litotipos encontrados em todos os três subsetores, de acordo com os dados dos furos de sondagem não variam, todos são compostos basicamente por dolomitos e brechas. O que muda de um subsetor para outro é a maior ou menor presença das fendas (litotipo FD), do material sem recuperação (S/R ou R/S) e a presença de solo. Comparando o percentual de fendas existentes no subsetor Norte_Central com o Norte_Sul para as mesmas profundidades, tem-se uma redução expressiva na presença deste litotipo para o Norte_Central em todas as profundidades. Especificamente, notou-se uma redução expressiva na presença de fendas para profundidades abaixo de 200 m, por exemplo, entre 250 e 300 m de profundidade no subsetor Norte_Sul tem-se que 19.4% dos litotipos apresentados são fendas quando para o subsetor Norte_Central este percentual é de apenas 1.8%. Já em relação aos 50 primeiros metros de profundidade, tem-se que o percentual do material sem recuperação de ambos os subsetores não variou. Para o solo, também foi observada uma diminuição do percentual para o subsetor Norte_Central. Por fim, confrontando o percentual de fendas existentes no subsetor Norte_Norte com os outros dois subsetores, tem-se que os valores observados para este subsetor tem o mesmo padrão das fendas verificadas no subsetor Norte_Central. Logo, o subsetor com maior presença de fendas é o Norte_Sul.

Assim sendo, tem-se que o subsetor Norte_Sul possui, além do controle estrutural representado pela Falha Vazante, uma elevada presença de fendas. Esta associação de fatores pode ajudar a esclarecer o fato deste subsetor ter apresentado menores valores de RQD, principalmente em profundidade, quando comparado com o subsetor Norte_Norte que também apresenta controle estrutural, mas tem menor presença das fendas.

A associação entre a geologia e o controle estrutural em escala regional permite questionar alguns dos resultados obtidos. Como o subsetor Norte_Central é o subsetor que possui menor presença de fendas e não tem controle estrutural esperava-se que a classe geomecânica do mesmo fosse melhor do que dos outros dois subsetores, o que foi constatado pelo modelo.

4.5 Krigagens

A sequência de análises empregada no presente trabalho, no que diz respeito ao emprego da técnica de geoestatística é muito similar a descrita por Egaña & Ortiz (2013). Uma vez conhecidas as dimensões dos *grid's* de cada subsetor, fez-se a construção dos variogramas experimentais e executou-se o ajuste dos mesmos nos modelos matemáticos teóricos. Isto foi feito através de uma função automática disponível no pacote *gstat* da linguagem de programação R. Lichtenstern (2013) faz uma descrição detalhada sobre o uso desta ferramenta.

Para a variável RQD foram testados os modelos teóricos de ajuste exponencial (Exp) e esférico (Sph) e para a variável CLASS foram verificados além destes dois o modelo Matérn. Segundo Isaaks e Srivastava (1989) os modelos esféricos e exponencial são modelos muito empregados em análises do setor mineral. No Quadro 12 tem-se os parâmetros de dependência espacial obtidos com o ajuste dos variogramas.

Tem-se no Quadro 12, para a variável CLASS, que o modelo teórico que melhor se ajustou aos dados do variograma experimental de todos os subsetores foi o modelo esférico. Para a variável RQD o modelo com melhor ajuste foi o exponencial, exceto para o subsetor Norte_Central. Na Figura 37 é possível visualizar uma comparação entre os dois modelos teóricos testados e o melhor ajuste do modelo esférico aos dados. O bom ajuste do modelo teórico aos dados do variograma experimental é essencial para se garantir qualidade da interpolação das variáveis analisadas. Além disso, a possibilidade de visualização deste ajuste é um ganho da metodologia que foi desenvolvida durante a presente pesquisa, tendo em vista que em alguns programas comerciais que permitem a construção de modelos geomecânicos, tal como o Leapfrog Geo, não é possível visualizar o ajuste realizado.

No Quadro 12 também é possível observar, para todos os subsetores e para ambas as variáveis analisadas (RQD e CLASS), a presença do efeito pepita, evidenciando assim que não se tem continuidade no semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras. Parte desta descontinuidade traduzida pela presença do efeito pepita pode estar relacionada com erros de medição ou com alguma variabilidade não detectada pela amostragem, contudo não foi possível mensurá-la.

Guerra (1988) menciona que é possível verificar o grau de aleatoriedade de uma variável regionalizada através de um índice denominado efeito pepita relativo. Este índice

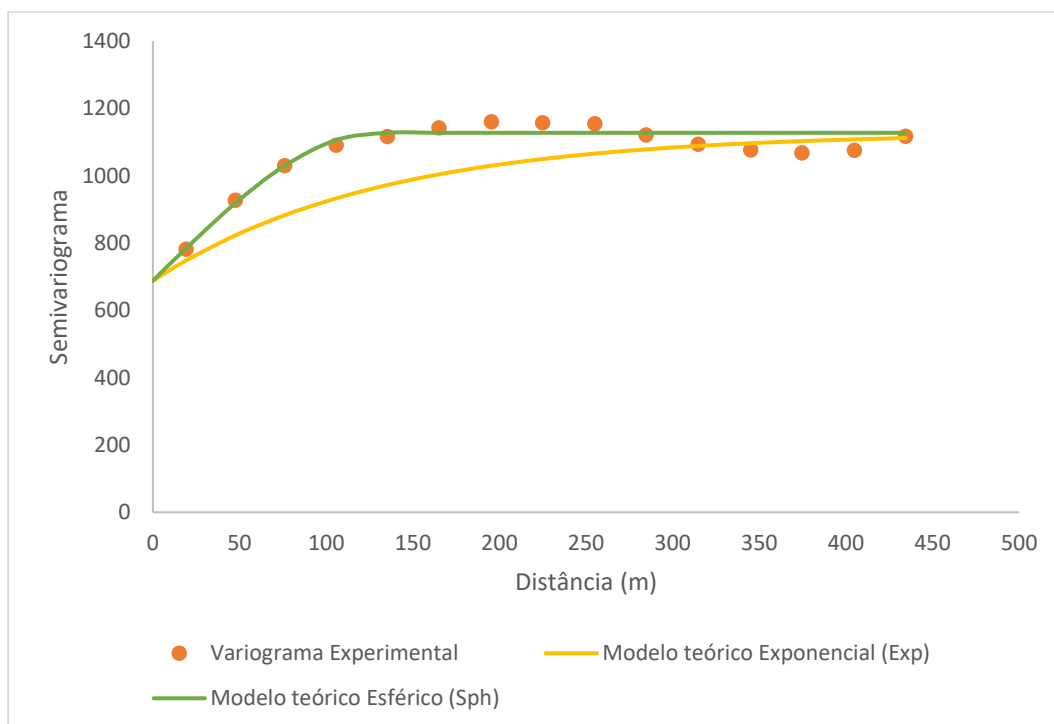
consiste na razão obtida dividindo o efeito pepita pela soma deste com o patamar. O autor defende que para valores do grau de aleatoriedade acima de 0.3 tem-se que a componente aleatória da variável analisada é muito significativa. Tanto o RQD quanto a CLASS apresentaram valores acima de 0.3 para todos os subsetores analisados, atestando a aplicabilidade da técnica aos dados do estudo.

Quadro 12 - Resultados dos ajustes dos variogramas dos subsetores

		Modelo Teórico	Patamar (sill)	Efeito pepita (nugget)	Alcance (range)
Norte_Sul	RQD	Exp	783.54	718.68	186.98
	CLASS	Sph	0.19	0.53	119.17
Norte_Central	RQD	Sph	439.54	687.84	130.01
	CLASS	Sph	0.21	0.41	128.86
Norte_Norte	RQD	Exp	728.15	710.15	129.04
	CLASS	Sph	0.18	0.53	223.70

Fonte: Própria autora.

Figura 37 - Ajuste do variograma do subsetor Norte_Central



Fonte: Própria autora.

Na sequência, fez-se a interpolação das variáveis RQD e CLASS utilizando a Krigagem Ordinária (KO) e a Krigagem Simples (KS). Como resultado, obteve-se mapas 4D de cada uma das variáveis analisadas, bem como modelos geomecânicos com uma visualização planificada em que uma série de mapas foram gerados para diferentes profundidades. Além disso, foi possível analisar, via modelos, a relação entre duas ou mais variáveis do banco de dados para cada subsetor.

Nos Quadros 13 e 14 tem-se, respectivamente, os resultados das médias e do desvio padrão das variáveis preditas tanto para KO quanto para a KS e as médias e o desvio padrão das variâncias das variáveis preditas. Analisando os resultados apresentados no Quadro 13 nota-se que, para a variável CLASS de todos os subsetores, considerando a KS, os valores apresentados foram próximos aos obtidos na análise exploratória. Especificamente, tem-se que aqueles valores foram de 2.15, 2.71 e 2.53, respectivamente, para os subsetores Norte_Sul, Norte_Central e Norte_Norte. Ainda, para a classificação RMR simplificada, tem-se que o valor médio obtido pela KO para o subsetor Norte_Central também foi próximo ao obtido na análise exploratória. Além disso, para a KO e para subsetor Norte_Central o valor predito do RQD também foi próximo ao da análise exploratório que foi de 63.48.

Quadro 13 -Valores das médias e do desvio padrão das variáveis preditas pela KO e pela KS

		RQD		CLASS	
		mean (média)	sd (desvio padrão)	mean (média)	sd (desvio padrão)
Norte_Sul	KO	56.644	17.866	2.337	0.166
	KS	58.147	17.518	2.162	0.170
Norte_Central	KO	63.758	10.989	2.725	0.240
	KS	64.724	10.891	2.742	0.239
Norte_Norte	KO	60.181	17.072	2.678	0.151
	KS	58.730	17.183	2.540	0.154

Fonte: Própria autora.

No Quadro 14 tem-se os valores da média e do desvio padrão das variâncias das variáveis RQD e CLASS. Verifica-se que os valores obtidos, especialmente para o RQD, são altos. Isso ocorre porque a krigagem é o único método de interpolação que quantifica quão acurada é a interpolação realizada através da soma de quadrados. Avaliando-se os resultados

do Quadro 14 observa-se que os valores obtidos para os dois tipos de krigagem analisadas, para todos os três subsetores, são próximos uns dos outros. Assim sendo, não se pode afirmar, com base neste quadro, qual das krigagens apresentou melhores resultados, ou seja, qual das krigagens apresentou melhores valores preditos para o RQD e para a classificação.

Quadro 14 -Valores das médias e do desvio padrão das variâncias das variáveis preditas pela KO e pela KS

		RQD		CLASS	
		mean (média)	sd (desvio padrão)	mean (média)	sd (desvio padrão)
Norte_Sul	KO	1170.359	207.190	2.427	0.043
	KS	1161.160	196.321	2.425	0.043
Norte_Central	KO	1037.456	114.675	1.622	0.036
	KS	1036.052	113.698	1.622	0.036
Norte_Norte	KO	1189.622	192.798	2.384	0.041
	KS	1200.761	203.465	2.385	0.042

Fonte: Própria autora.

Para fazer a mensuração entre as krigagens deve-se fazer a validação dos modelos gerados por cada uma delas individualmente. E, só depois realizar a comparação entre a KO e a KS. A validação consiste em suprimir pontos da amostragem e estimá-lo empregando informações de amostras vizinhas como se ele não existisse e, posteriormente, faz-se a comparação entre os resultados conhecidos (medidos) com os estimados (ANDRIOTTI, 2002; WACKERNAGEL, 2003). No presente trabalho foi empregado a técnica de validação conhecida como K-fold, tendo sido adotado K igual a 10. Informa-se, ainda, que foi realizada a tentativa de validação dos modelos confeccionados via o método do Leave-one-out, contudo sem sucesso devido a limitação computacional.

No Quadro 15 tem-se os valores dos erros, RMSE e MAE, obtidos empregando o método de validação K-fold. Nota-se que os valores obtidos para os erros da variável RQD, para os três subsetores, tanto para a KO quanto para a KS são muito próximos e, para a variável CLASS, os valores dos erros são idênticos para os três subsetores. Assim sendo, apesar de ter sido realizada a validação a mesma não permitiu afirmar quais das duas krigagens apresentou melhores resultados. Talvez para responder a este questionamento seja necessário empregar

outras técnicas de validação mais robustas, tais como a leave-one-out. Esclarece-se que esta validação foi implementada no script dos modelos, todavia não foi possível obter seus resultados devido a falta de capacidade de processamento computacional.

Quadro 15 -Valores dos erros obtidos pelo processo de validação entre a KO e a KS

		RQD		CLASS	
		RMSE (Erro quadrado médio)	MAE (Erro médio absoluto)	RMSE (Erro quadrado médio)	MAE (Erro médio absoluto)
Norte_Sul	KO	25.14	20.06	0.64	0.41
	KS	25.05	19.97	0.64	0.41
Norte_Central	KO	23.96	17.74	0.59	0.35
	KS	23.99	17.75	0.59	0.35
Norte_Norte	KO	23.24	18.10	0.62	0.50
	KS	23.24	18.07	0.62	0.50

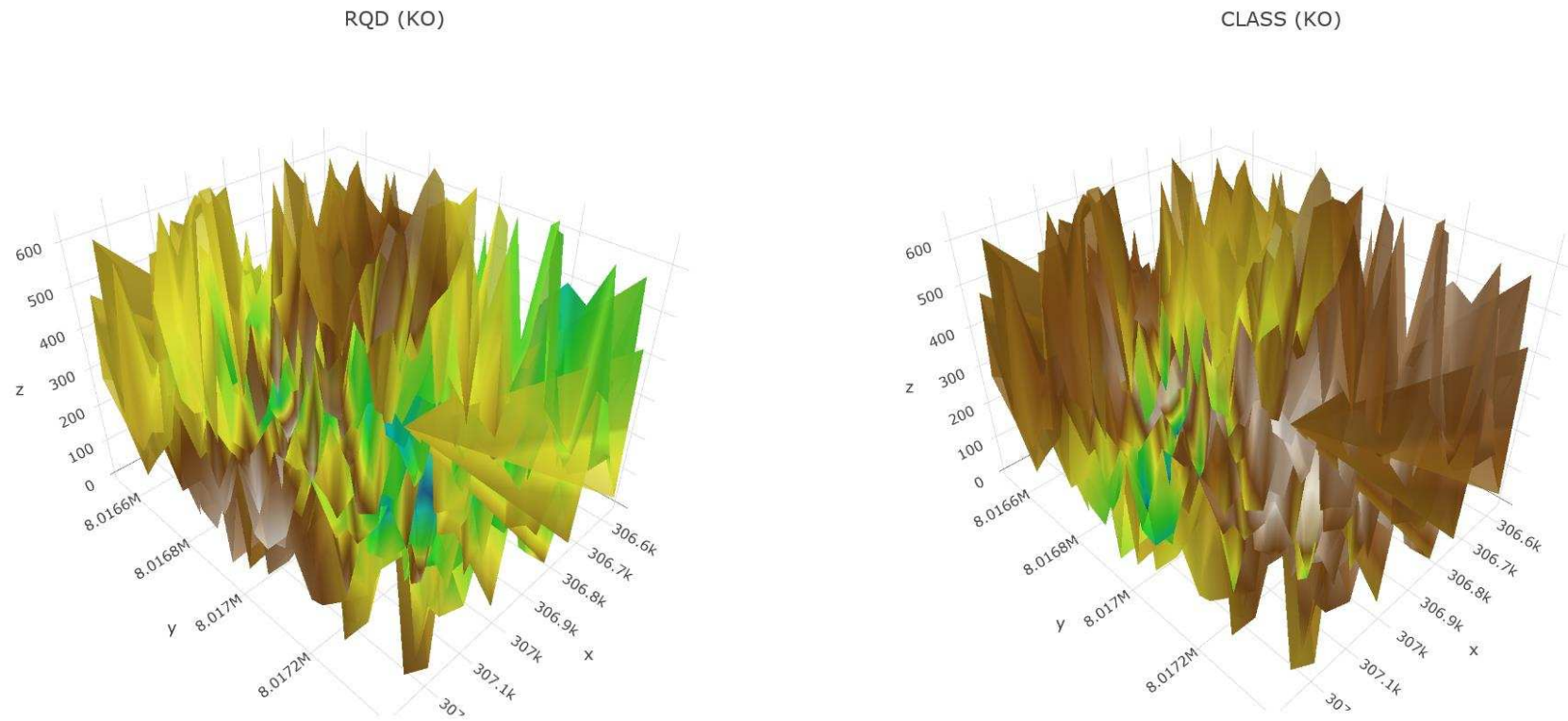
Fonte: Própria autora.

Diante dos resultados da validação e sabendo que a KO é mais empregada em programas que utilizam geoestatística e, ainda, segundo Daya (2015), a KO é um método de krigagem bem aceito na mineração, tanto para estimativa de reservas quanto para controle de teores, optou-se pela apresentação dos resultados dos modelos oriundos deste tipo de krigagem.

Na sequência os resultados dos modelos geomecânicos obtidos através da utilização da KO serão apresentados. Ressalta-se que para todos os três sub setores para ambas as variáveis analisadas foram gerados modelos 4D, conforme Figura 38. Estes modelos geomecânicos são extremamente interativos e permitem a visualização imediata das coordenadas geográficas, da profundidade e do valor da variável analisada em qualquer ponto do grid de análise. Além disso, pode-se rotacionar o modelo na busca por vistas específicas e há a possibilidade de aumentar e diminuir o zoom; pode-se, ainda, capturar imagens das diferentes vistas obtidas. Contudo, visualizar um modelo multidimensional no plano do papel é difícil, pois o mesmo é fixo e não pode ser rotacionado. Assim, optou-se por fazer todas as explicações empregando o modelo planejado que também foi obtido através do R e possui exatamente as mesmas informações dos modelos interativos, somente a visualização dos modelos é diferente. Ressalta-se que para

o dia a dia de uma mineradora, os gráficos multidimensionais serão muito mais práticos e usuais do que o modelo planificado.

Figura 38 - Exemplos dos modelos geomecânicos 4D do RQD e da CLASS gerado com o emprego da linguagem de programação R



Fonte: Própria autora.

A Figura 39 mostra os resultados do modelo gerado para a variável RQD para o subsetor Norte_Sul empregando a KO. De 0 até 90 m de profundidade tem-se um alinhamento de pontos com baixo RQD ($RQD < 20$) com a direção NE-SW. Nota-se que na superfície ($z = 0$) grande parte do modelo, Figura 40A, é representado por estes baixos valores e no restante da área tem-se valores medianos (RQD entre 40 e 50).

A expressividade da área com baixos valores é notada até a profundidade de 30 m, sendo que depois disso ocorre uma diminuição gradual da mesma. No intervalo compreendido entre 30 e 60 m tem-se um alinhamento de pontos com altos valores de RQD (> 60 m) na direção NE-SW, tendo inclusive pontos com altíssimos valores de RQD (RQD igual a 100) no interior destas áreas. Este alinhamento (NW-SE) é notado até a profundidade final do modelo. A partir de 60 m de profundidade ocorre um segundo alinhamento na direção NW-SE, Figura 40B. A junção destes alinhamentos dá origem a uma área significativa do modelo com altos valores de RQD, sendo este comportamento observado de 120 a 350 m de profundidade; tem-se a existência de núcleos de RQD igual a 100 no interior desta junção, Figura 40C.

Entre 350 e 440 m, as zonas de maior RQD ($RQD > 80$) desaparecem, voltando a surgir a partir de 450 m, persistindo até a cota mais profunda do estudo. Estes núcleos são observados desde a profundidade de 90 m até o final do modelo, estando presentes de maneira expressiva no intervalo de 140 a 340 m. Ainda em relação a estes núcleos tem-se, que os mesmos estão alinhados com a direção NE-SW no intervalo de 90 a 370 m, entre 110 e 150 m nota-se um alinhamento N-S e há um alinhamento na direção NW-SE entre as profundidades de 160 e 380m. Entre o intervalo de 220 até 390 m de profundidade tem-se a presença de um alinhamento de baixos valores de RQD na direção NW-SE (Figura 4.5C). É possível observar pontos com baixos valores de RQD até a profundidade de 470 m. Por fim, a partir de 480 m tem-se que os modelos apresentam o mesmo padrão de comportamento, ou seja, tem-se uma área com altos valores de RQD com alinhamento NW-SE com núcleos de altíssimos valores de RQD que vão diminuindo em detrimento do aumento da área com valores de RQD medianos, Figura 40D.

Na Figura 41 tem-se uma imagem do modelo geomecânico 4D da variável RQD obtida com o emprego da KO. Na figura é possível visualizar as duas direções de alinhamento dos baixos valores de RQD, bem como a extensa região oriunda da junção dos alinhamentos dos pontos com alto RQD.

Para o modelo geomecânico da variável classificação RMR simplificada (CLASS), tem-se que a maior parte do modelo é representado pela classe 3.5 e 4, principalmente entre 100 e 390 m de profundidade, Figura 42. Após essa profundidade a área de classificação igual a 3.5 diminui e a de classe 4 aumenta. Em algumas profundidades dentro da área de classe 3.5 tem-se núcleos de maior resistência (CLASS igual a 3.0), sendo este comportamento observado até a profundidade final do modelo, Figura 43D.

No intervalo de 10 a 50 m tem-se um alinhamento de pontos, CLASS igual a 3.5, com direção NE-SW. Após 50 m o alinhamento torna-se uma região observada até a profundidade final do modelo. Além disso, da superfície até 60 m de profundidade é possível observar um alinhamento de pontos com direção NE-SW de material de baixa resistência geomecânica (CLASS igual a 5), Figura 43A e Figura 43B. Este material pode ser observado até 90 m, porém após 60 m não se nota alinhamento de pontos. O material de baixa resistência está envolto numa área de material de resistência um pouco melhor (CLASS igual a 4.5). Sendo que de 0 a 80 m observa-se inclusive o mesmo alinhamento. No intervalo de 100 a 170 m nota-se uma área de classificação igual a 4.5 no modelo sem alinhamento. Já de 210 a 290 m tem-se um alinhamento de pontos de classificação igual a 4.5, pouco expressivo, com direção NW-SE, Figura 43C.

Na Figura 44 tem-se o modelo geomecânico da variável CLASS 4D em que se pode notar que a maioria do modelo é representada pela classificação entre 3.5 e 4. O modelo da variável CLASS possui recursos computacionais similares ao do modelo do RQD.

Comparando os resultados do modelo do RQD com o da variável CLASS tem-se que os resultados obtidos em ambos são condizentes entre si. Os baixos valores de RQD ($RQD < 40$) e os altos valores da variável CLASS ($CLASS > 4.0$) podem estar relacionados com a presença das fendas, com o material sem recuperação (S/R) e com o solo.

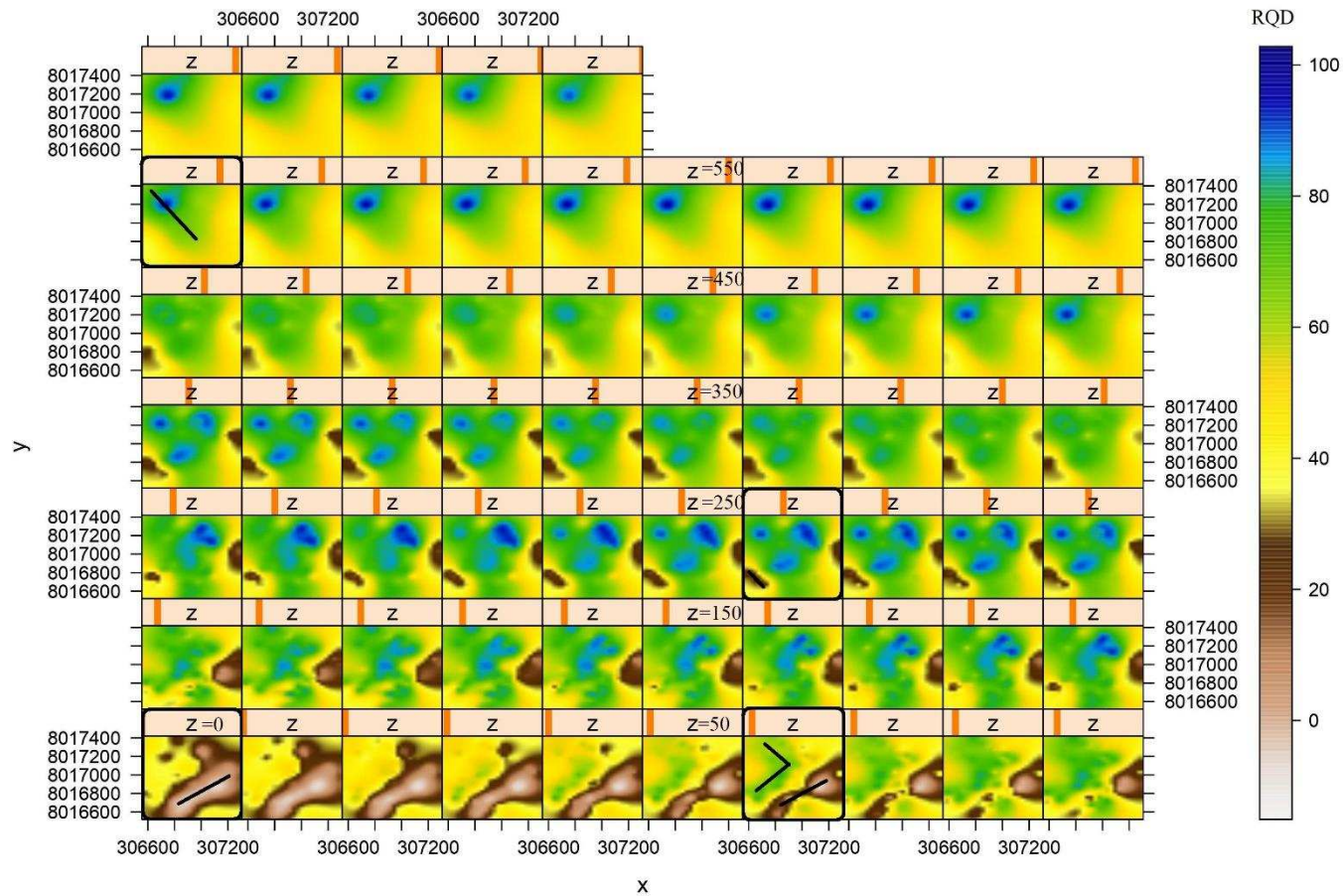
Analisando o banco de dados tem-se a presença de fendas (FD) desde a superfície até 450 m de profundidade, sendo que elas aparecem com mais expressividade entre 50 e 100 m. Bittencourt e Reis Neto (2012) relatam que, na região de Vazante, foram encontradas fendas até 600 m de profundidade. A extensa área de baixos valores de RQD e os pontos com valores altos da variável CLASS até 50 m de profundidade podem, também, estar relacionados à presença do material sem recuperação e do solo. Aqueles autores relatam que existe na região de estudo uma extensa e variável camada de solo coluvionar e aluvionar. No banco de dados consta, que entre 300 e 350 metros de profundidade tem-se a presença de SOLO como litotipo.

Acredita-se que tal fato possa estar relacionado à presença de material de preenchimento, conforme relatado por Bittencourt e Reis Neto (2012), ou então, seja um erro na descrição do furo de sondagem. Já em relação aos maiores valores de RQD ($RQD > 80$) e menores valores de classificação ($CLASS < 3.0$) tem-se que estes estão relacionadas às brechas e aos dolomitos.

Do ponto de vista estrutural não se tem informações locais para aferir os resultados dos modelos. No entanto, confrontando os resultados com a geologia estrutural regional nota-se que o subsetor Norte_Sul, atravessa a falha Vazante, que tem direção NE-SW. Este fato pode explicar a presença dos baixos valores nesta direção no modelo do RQD e dos altos valores (classificação ruim) para a variável CLASS, conforme descrito anteriormente e relatado em trabalhos científicos realizados na região de Vazante, tais como Bittencourt e Reis Neto (2012), Charbel (2015) e Lemos (2011). Situação semelhante ocorre em relação à direção NW-SE que é a direção da estrutura condutora de água, conforme descrito por Bhering (2009).

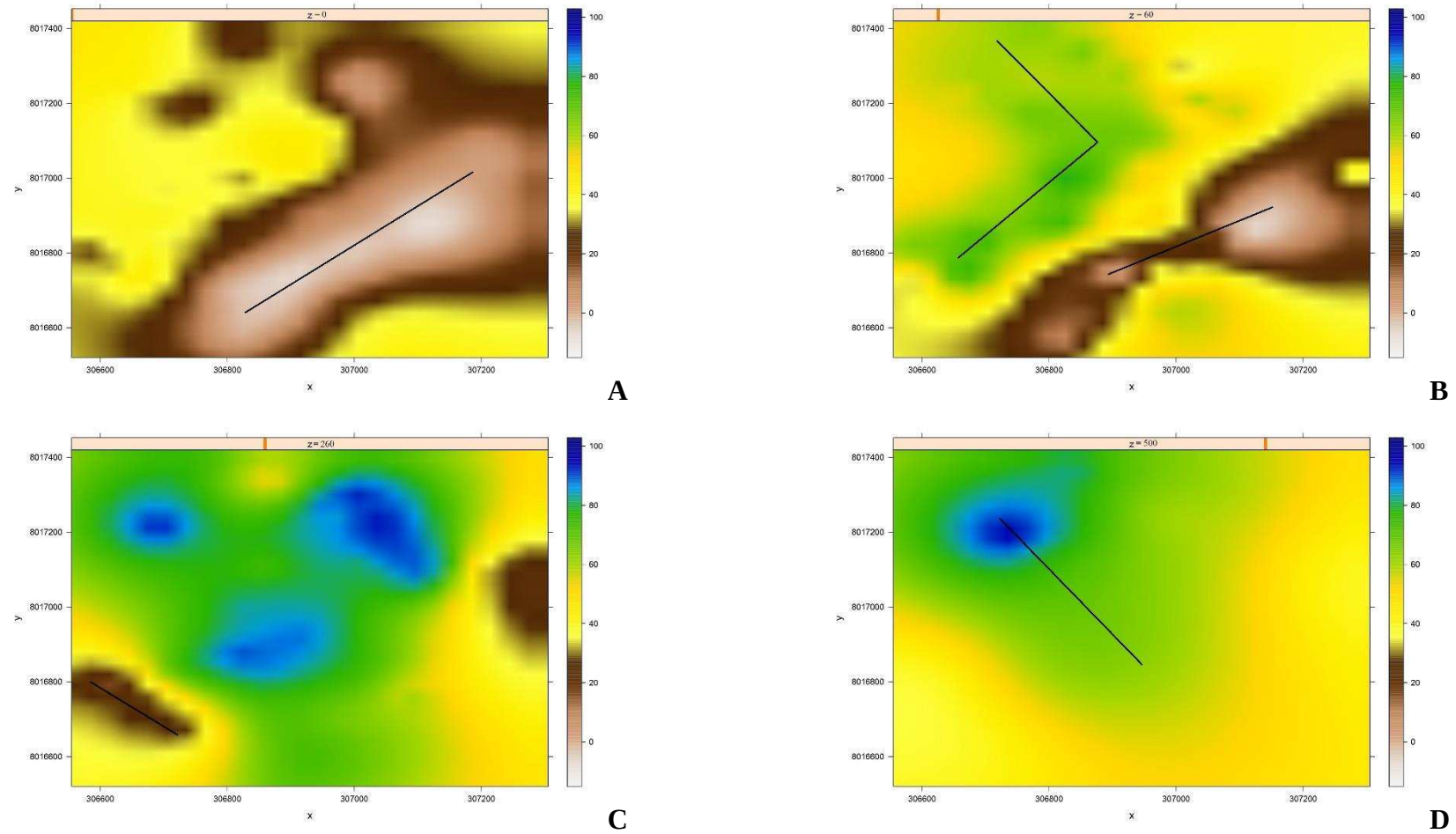
Já os alinhamentos dos altos valores de RQD e baixos valores de CLASS, nas mesmas direções citadas acima, podem estar relacionadas com as feições cársticas. Estas são responsáveis por imprimir ao maciço rochoso de Vazante diferentes condições de alteração que vão desde rochas sãs a presença de espaços vazios (fendas) no interior do maciço (CHARBEL, 2015; FIGUEIREDO, 2016). Para um aprofundamento das causas destes alinhamentos seria necessário o conhecimento da geologia estrutural local.

Figura 39 - Modelo geomecânico da variável RQD obtida com emprego da KO - subsetor Norte_Sul



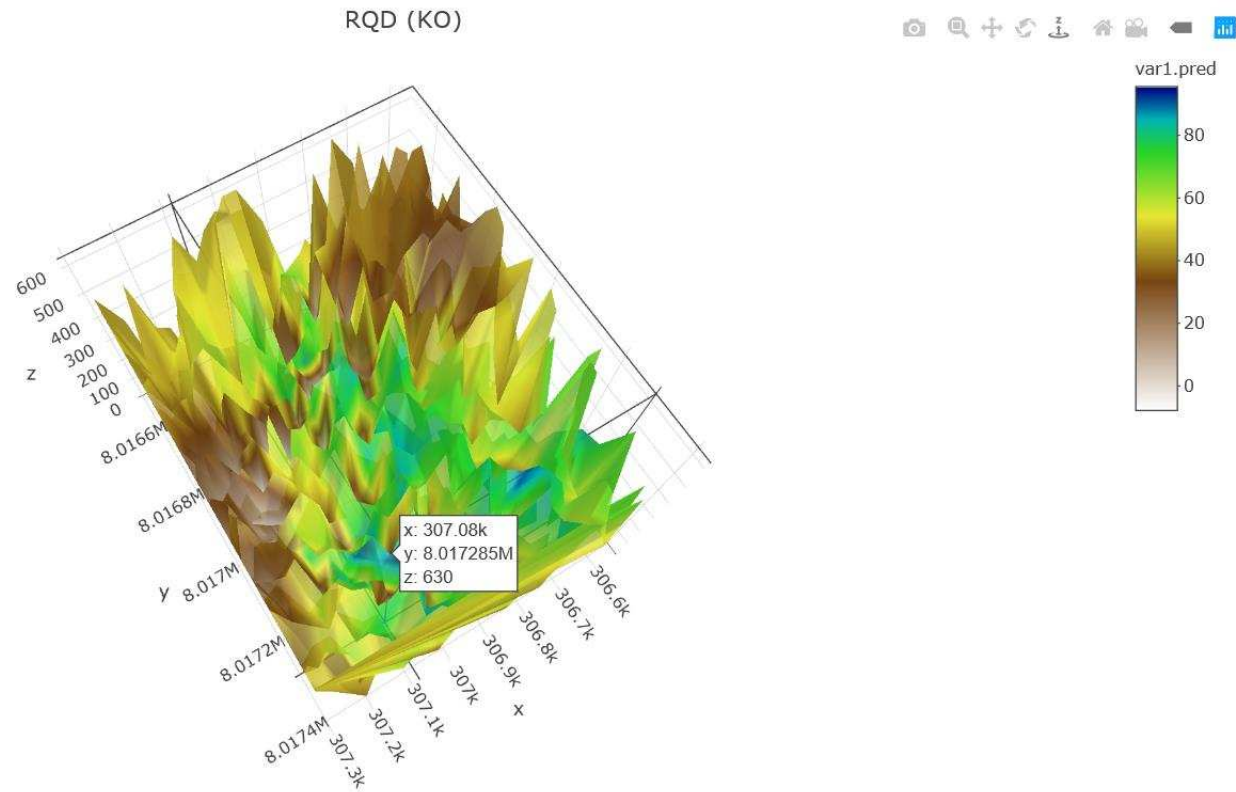
Fonte: Própria autora.

Figura 40 - Modelo geomecânico do RQD obtido pela KO na superfície (A), a 60 m de profundidade (B), a 260 m de profundidade (C) e a 500 m de profundidade (D) – subsetor Norte_Sul



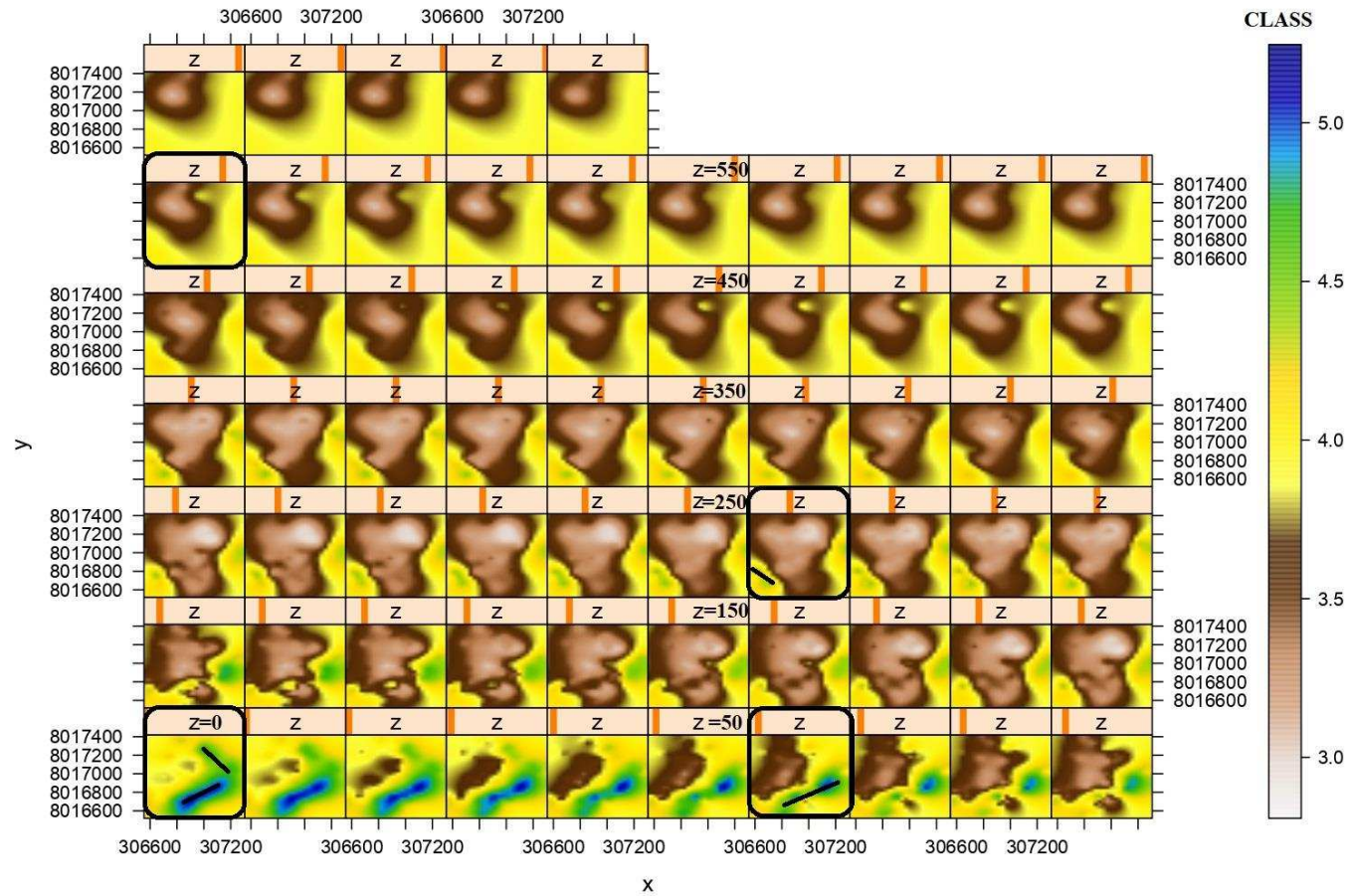
Fonte: Própria autora.

Figura 41 - Visualização do gráfico 4D do modelo geomecânico da variável RQD com o emprego da KO – subsetor Norte_Sul



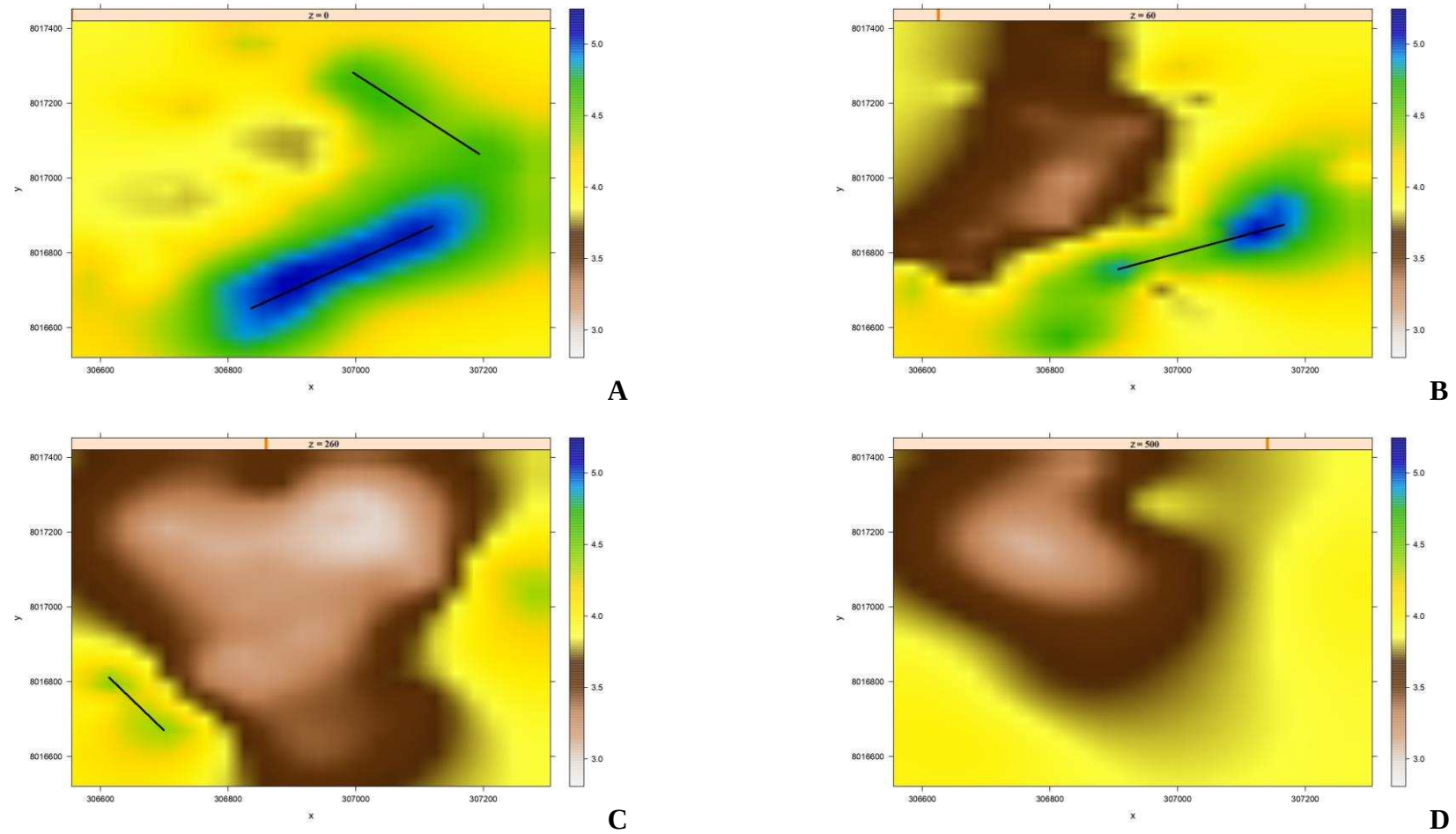
Fonte: Própria autora.

Figura 42 - Modelo geomecânico da variável CLASS obtida com emprego da KO - subsetor Norte_Sul



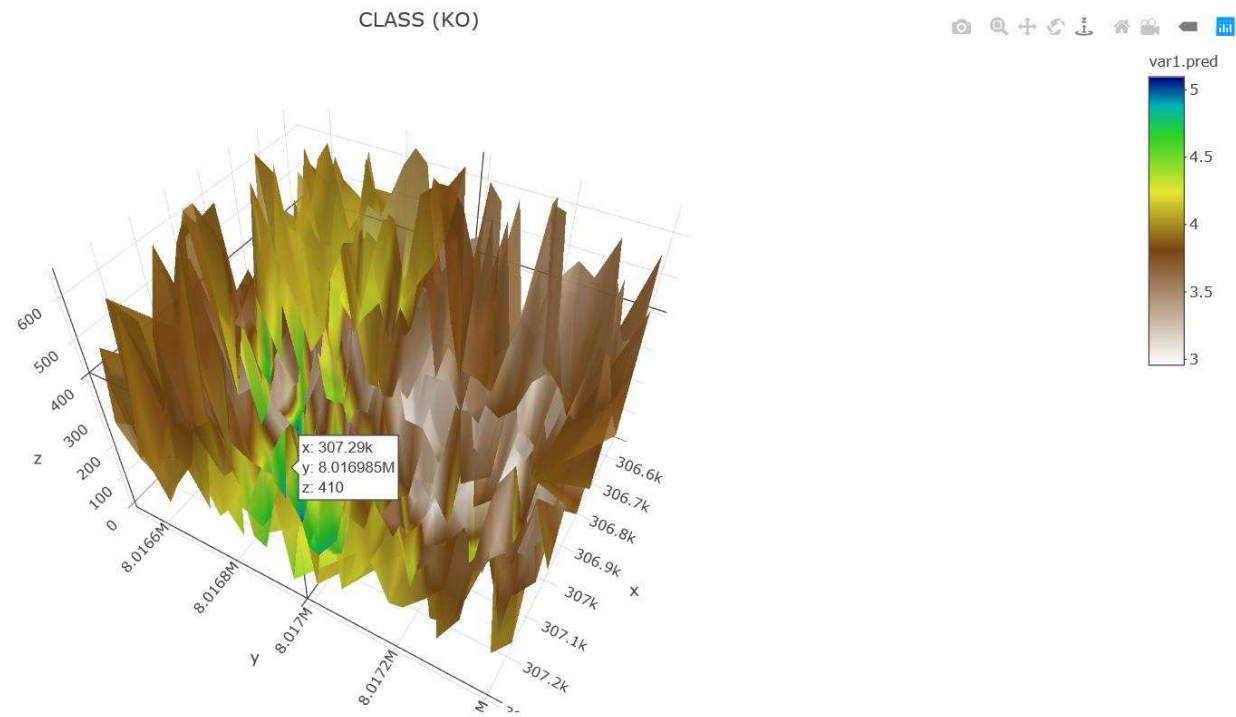
Fonte: Própria autora.

Figura 43 - Modelo geomecânico da CLASS obtido pela KO para superfície (A), a 60 m de profundidade (B), a 260m de profundidade (C) e a 500 m de profundidade (D) – subsetor Norte_Sul



Fonte: Própria autora.

Figura 44 - Visualização do gráfico 4D do modelo geomecânico da variável CLASS com o emprego da KO – subsetor Norte_Sul



Fonte: Própria autora.

A Figura 45 mostra os resultados do modelo gerado para a variável RQD para o subsetor Norte_Central empregando a KO. Da superfície (z igual a zero) até 40 m de profundidade tem-se uma extensa área com baixos valores de RQD ($RQD < 20$), Figura 46A. Esta área vai diminuindo com o aumento da profundidade, sendo possível visualizar pontos dispersos de baixo RQD até a profundidade de 120 m. Apenas na porção Sul da área a mancha de baixos valores de RQD se estende, em profundidade, até 270 m. Além disso, nota-se que a partir de 20 m de profundidade é possível identificar que esta área é a aglomeração de pontos com alinhamento para as direções NE-SW e NW-SE.

Entre 300 e 370 m de profundidade outra área com baixo RQD ocorre na porção centro Leste do modelo. Em relação aos altos valores de RQD (RQD em torno de 80) tem-se que a 40 m de profundidade começa um alinhamento de pontos com a direção NE-SW e a 50 metros tem-se, também, um alinhamento na direção NW-SE, Figura 46B. A partir de 70m tem-se um aumento da área com RQD em torno de 80 e esta aumenta progressivamente até 300 m e possui um alinhamento praticamente N-S. No interior das áreas com altos valores de RQD tem-se pontos com RQD igual a 100, estes pontos já aparecem a 20 m e com o avançar da profundidade começam a apresentar alinhamento NE-SW, indo até a 380 m.

No intervalo compreendido entre 80 e 280 m nota-se um segundo alinhamento de pontos com a direção NW-SE, Figura 46C. De 460 m até o final do modelo tem-se o mesmo padrão de resultados – a maior parte do modelo é composta por valores de RQD em torno de 70 com uma área de altos valores na região central do modelo e com alinhamento com direção de NE-SW tendendo para N-S, Figura 46D. Entretanto, a partir dos 330-340 m deixam de ser observados valores de RQD acima de 80, situação que persiste até a cota mais profunda do modelo.,

Na Figura 47 tem-se uma imagem do modelo geomecânico 4D da variável RQD obtido com o emprego da KO. Na figura é possível visualizar um alinhamento de altos valores da variável.

O modelo da variável CLASS confeccionado através da KO, Figura 48, em toda a sua profundidade possui basicamente valores de classificação RMR simplificada entre 3 e 4 (CLASS entre 3 e 4). Sendo predominante a classe em torno de 3.5 em todo o modelo. Nos primeiros 40 m de profundidade nota-se pontos de classificação igual a 5 no interior de regiões

de CLASS igual a 4.5 e 4, Figura 49A. Já de 50 a 90 m de profundidade tem-se uma redução das áreas de classificação entre 4 e 4.5.

Da superfície até 50 m de profundidade tem-se um alinhamento de pontos com direção NW-SW da classificação em torno de 3.5. A partir desta profundidade nota-se um aumento desta região (Figura 49B), sendo que entre 140 e 300 m nota-se uma maior expressividade desta classe, Figura 49C. Após 300 m de profundidade nota-se uma redução da região de classe 3.5 e inferior. Contudo é possível notar tal classe até a profundidade final do modelo. As regiões de classe 3.5 e 4 apresentam uma tendência de alinhamento NE-SW em praticamente toda a profundidade do modelo. E, a partir de 300 m de profundidade este alinhamento fica ainda mais nítido. Além disso, tem-se que com o aumento da profundidade, o alinhamento citado anteriormente apresenta um empinamento tendendo à direção N-S.

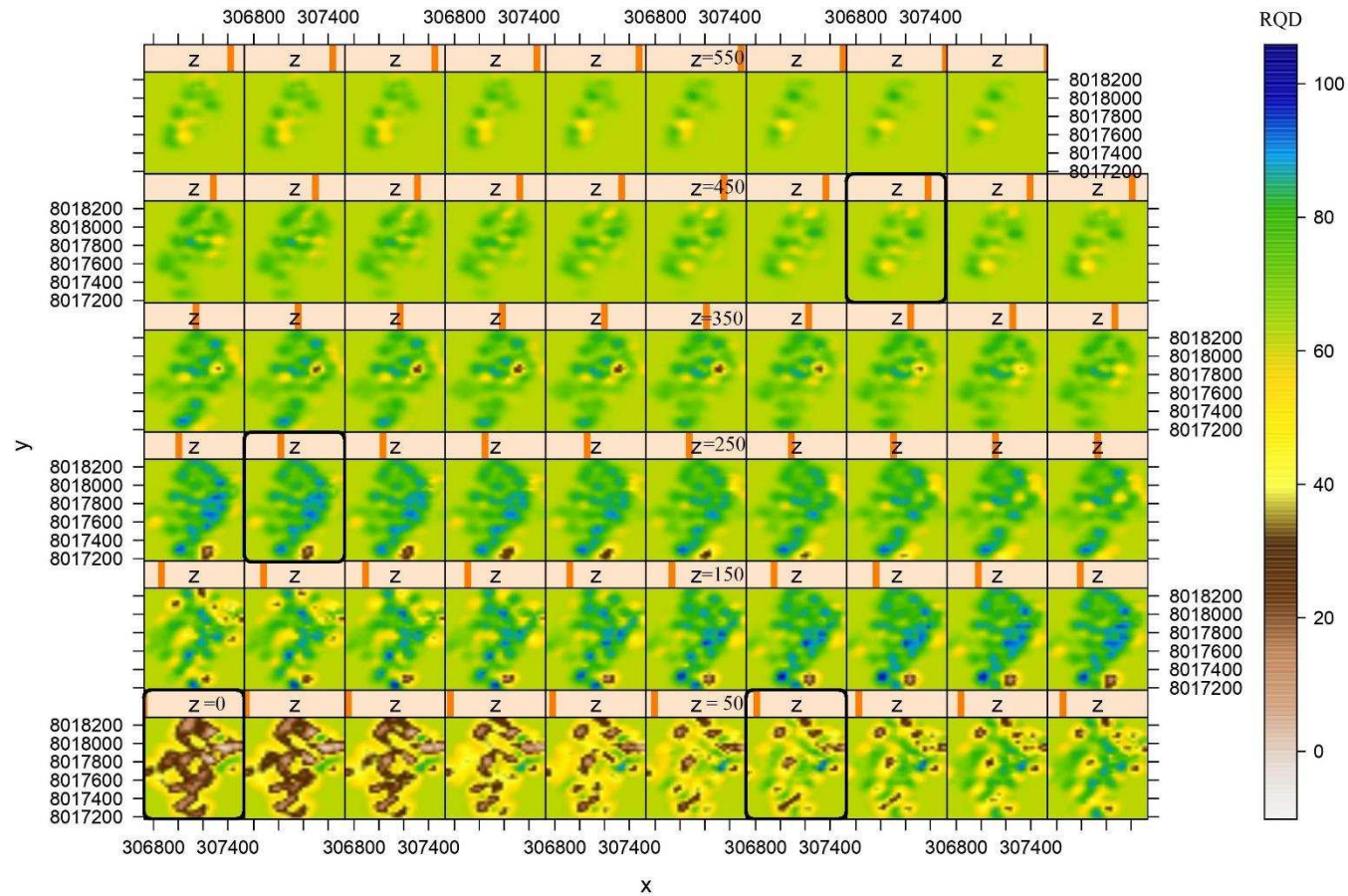
Na Figura 50 tem-se uma imagem do modelo geomecânico 4D da variável CLASS obtido com o emprego da KO.

Contrapondo os dois modelos confeccionados, o do RQD com o da classificação, constata-se que estes são condizentes tanto como os valores das variáveis quanto às direções de alinhamentos dos pontos de melhor ou pior comportamento geomecânico. Tem-se que os pontos de alinhamento com melhores valores de RQD com direção NW-SE, notados principalmente no intervalo de 100 a 500 m de profundidade, também foram identificados no modelo da variável CLASS com melhores valores de classificação (valores baixos da variável CLASS).

As extensas áreas com valores médios para o RQD e de classificação em torno de 3.5 podem estar relacionados com a presença das fendas. Para o subsetor Norte_Central, tem-se que as fendas foram observadas desde a superfície até a profundidade de 400 m, sendo que entre 50 e 100m elas foram mais expressivas. Porém, para os 50 primeiros metros de profundidade os resultados obtidos, provavelmente, estão relacionados com a presença do material sem recuperação (S/R u R/S) que, por sua vez, pode estar relacionado à cobertura de solo presente na região, conforme relatado por BITTENCOURT; REIS NETO (2012).

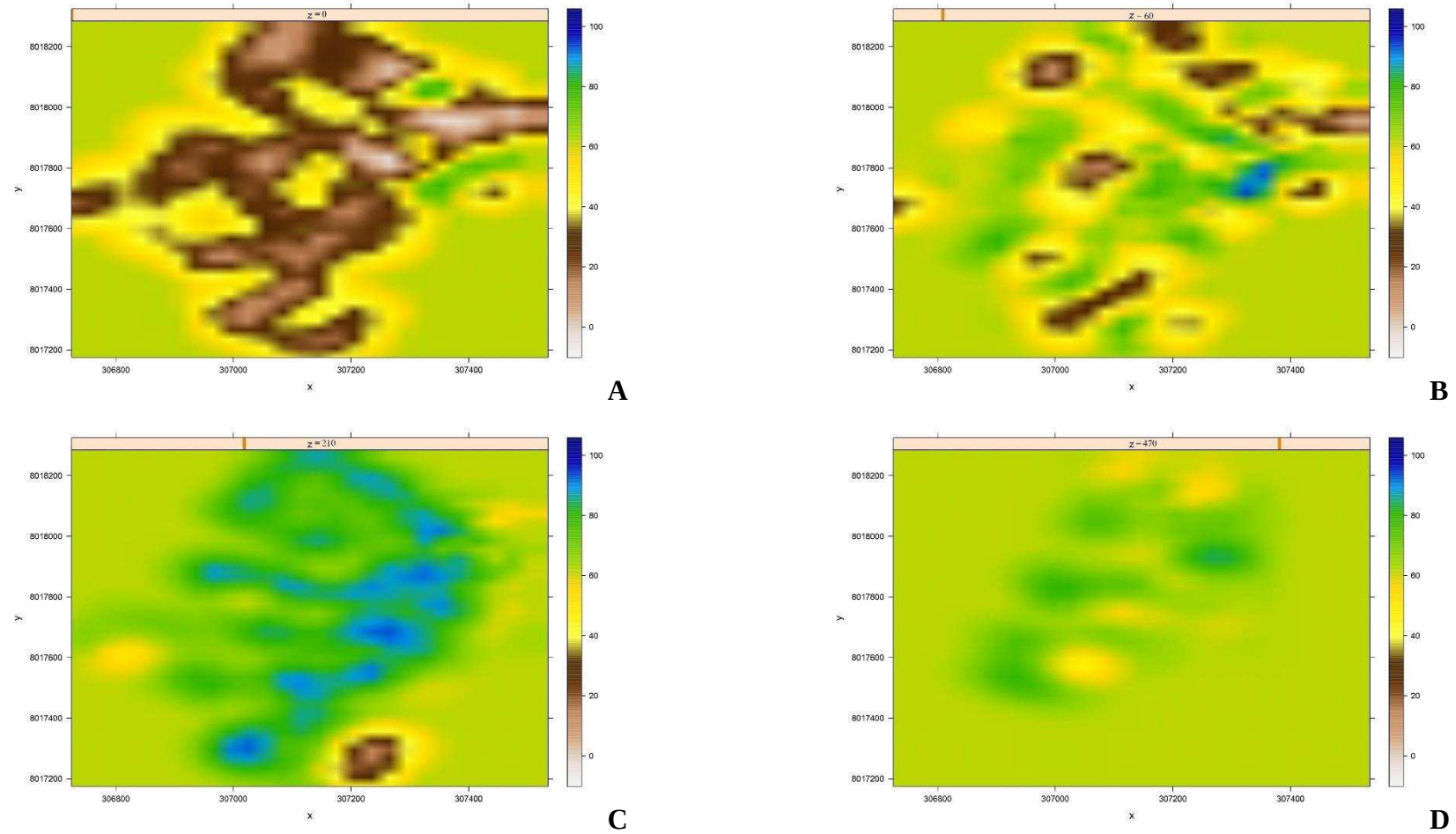
Sob o ponto de vista da geologia estrutural constata-se que o subsetor Norte_Central não possui controle estrutural em nível regional. Este fato pode explicar a diminuição na presença de fendas com o aumento da profundidade e, por consequência, o aumento das regiões com altos valores de RQD e melhor classificação geomecânica.

Figura 45 - Modelo geomecânico da variável RQD obtida com emprego da KO - subsetor Norte_Central



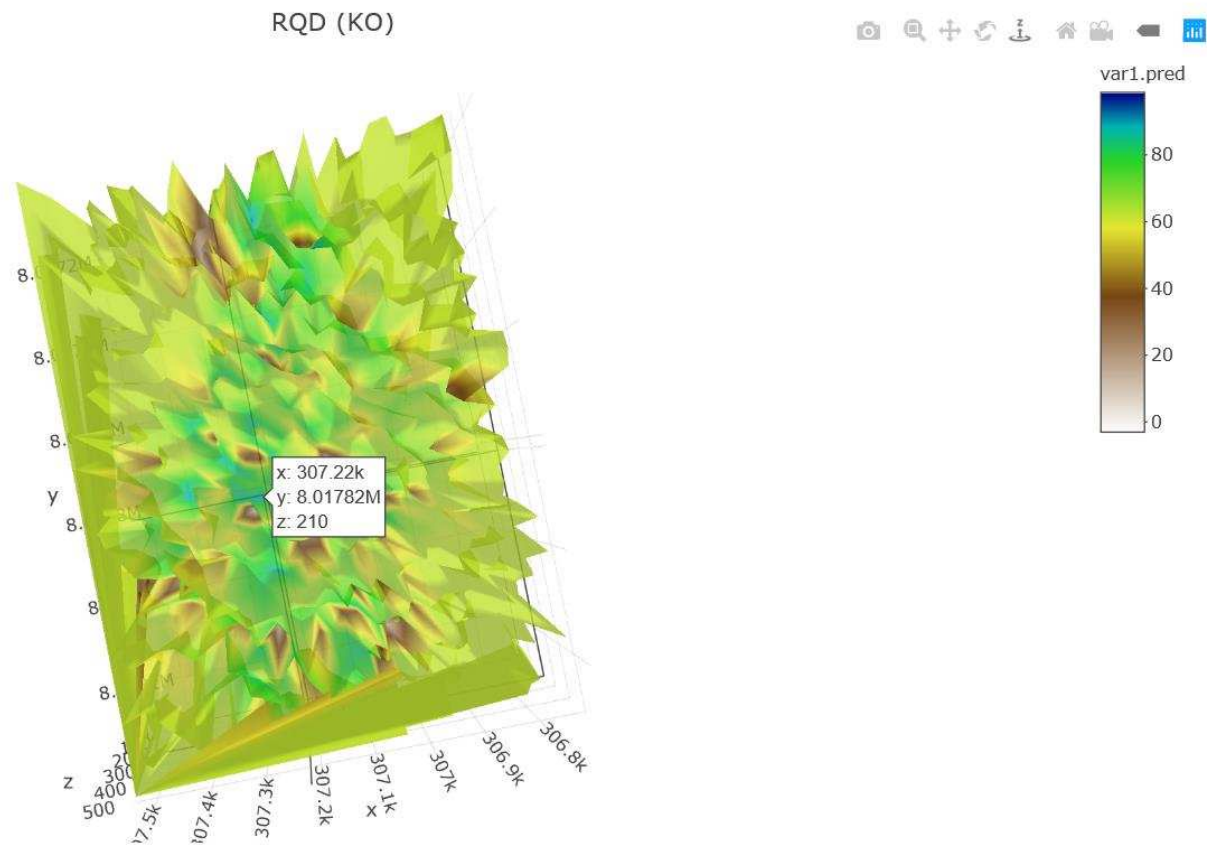
Fonte: Própria autora.

Figura 46 - Modelo geomecânico do RQD obtido pela KO na superfície (A), a 60 m de profundidade (B), a 210 m de profundidade (C) e a 470 m de profundidade (D) – subsetor Norte_Central



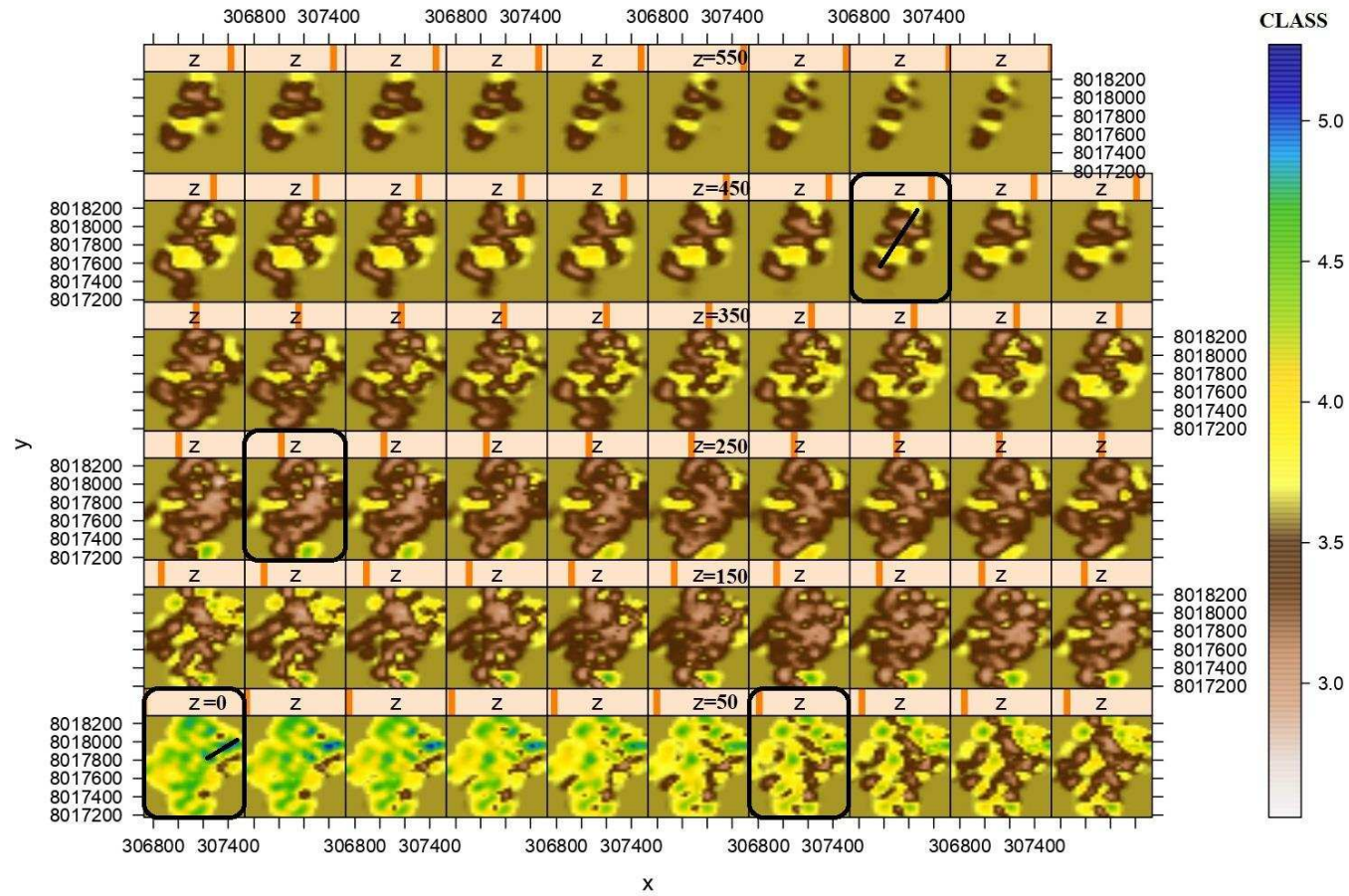
Fonte: Própria autora.

Figura 47 - Visualização do gráfico 4D do modelo geomecânico da variável CLASS com o emprego da KO – subsetor Norte_Central



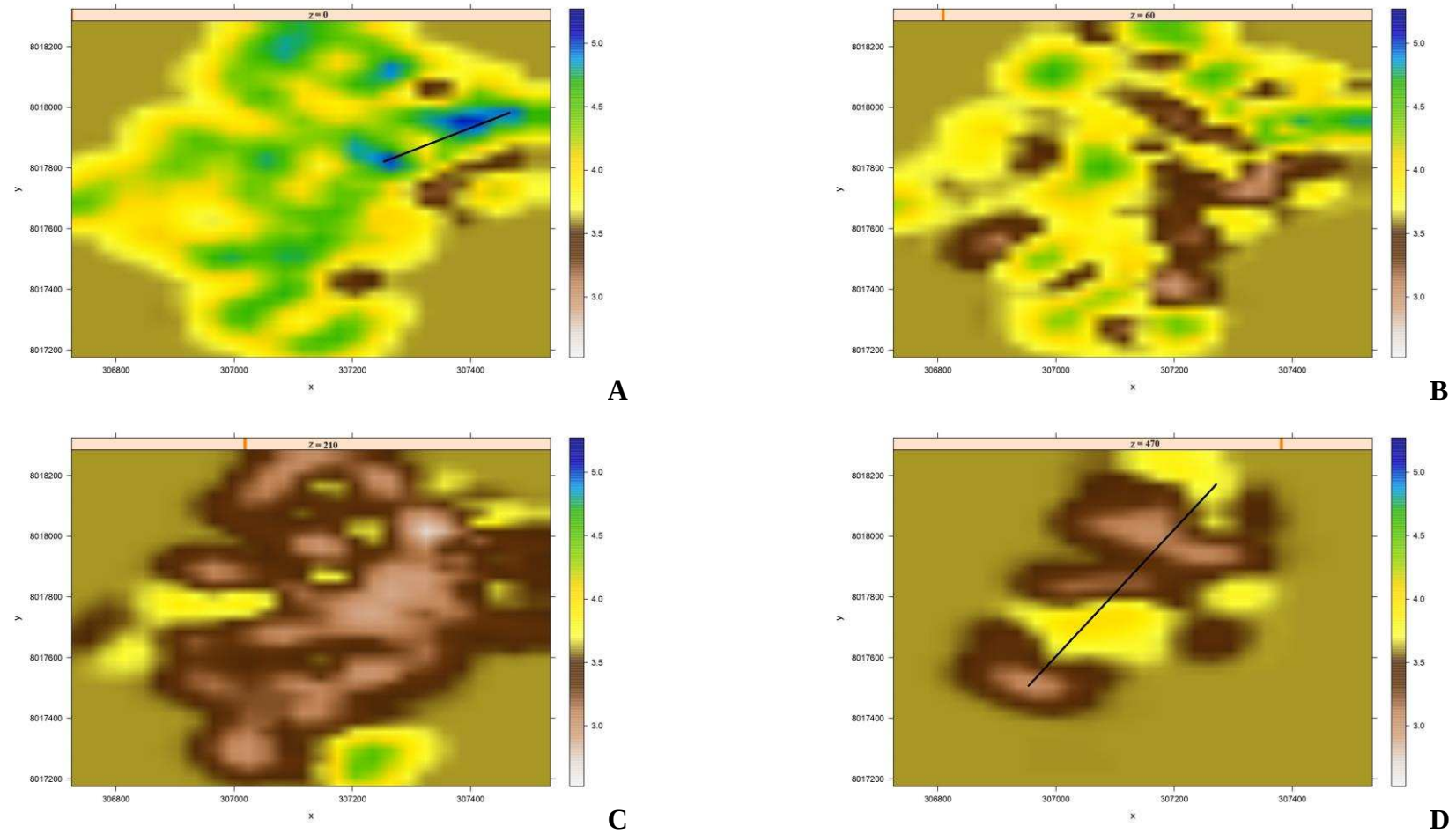
Fonte: Própria autora.

Figura 48 - Modelo geomecânico da variável CLASS obtida com emprego da KO - subsetor Norte_Central



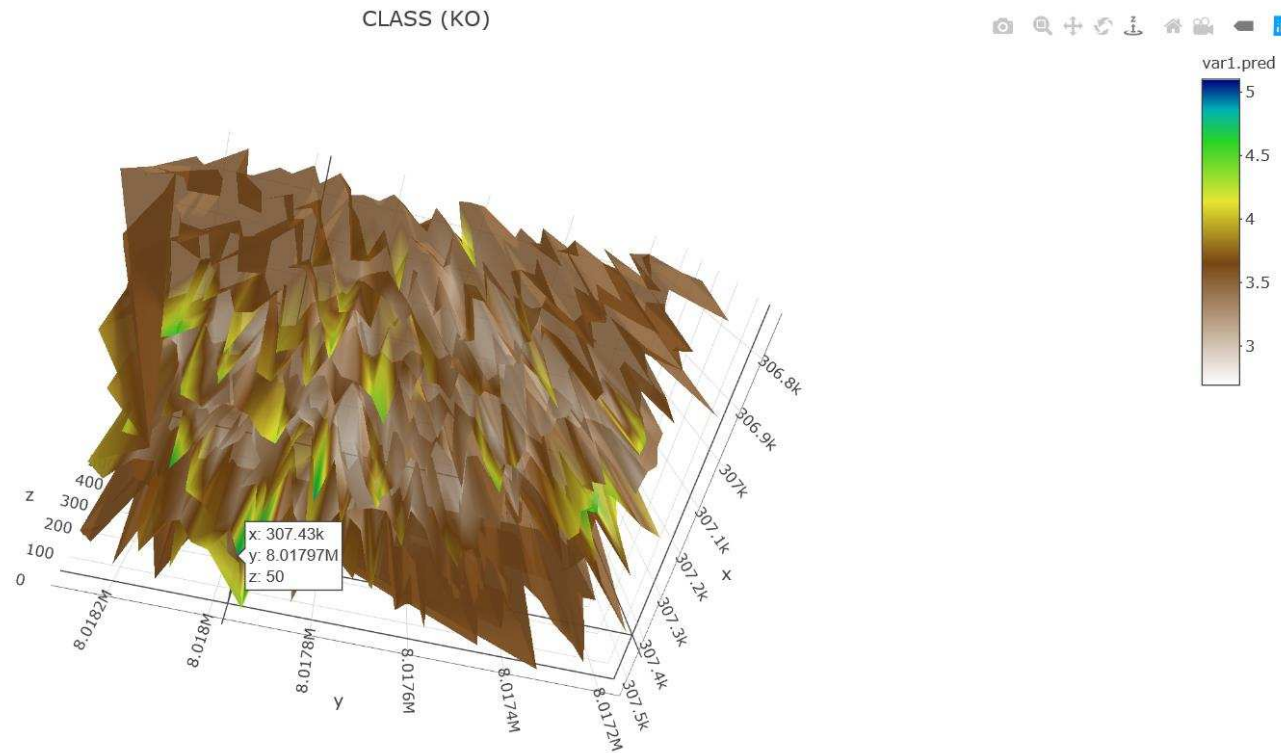
Fonte: Própria autora.

Figura 49 - Modelo geomecânico da CLASS obtido pela KO para superfície (A), a 60 m de profundidade (B), a 260 m de profundidade (C) e a 500 m de profundidade (D) – subsetor Norte_Central



Fonte: Própria autora.

Figura 50 - Visualização do gráfico 4D do modelo geomecânico da variável CLASS com o emprego da KO – subsetor Norte_Central



Fonte: Própria autora.

A Figura 51 mostra os resultados do modelo gerado para a variável RQD para o subsetor Norte_Norte empregando a KO. Da superfície até 80 m de profundidade tem-se uma extensa área com baixos valores de RQD ($RQD < 20$), Figura 52A. Esta região vai progressivamente reduzindo de tamanho até desaparecer completamente a 220 m de profundidade. Até a cota 100 m observa-se um alinhamento de direção SW-NE na porção noroeste da área. A partir de 110m área de menores valores de RQD localizada a Sul vai progressivamente reduzindo em área até desaparecer, a 210 m de profundidade, sendo que nos últimos 30 ocorre uma diminuição expressiva da mesma. No intervalo entre 40 a 140 m de profundidade a maior parte do modelo é composta por valores médios de RQD (RQD em torno de 60), Figura 52B. De 120 a 380 m tem-se a presença de pontos com altíssimo valor de RQD (em torno de 100) alinhados segundo a direção NE-SW. Nota-se que de 170 a 350 m de profundidade tem-se, também, alinhamento de pontos com alto RQD em outra direção, a NW-SE, Figura 52C. Em relação aos altos valores de RQD (em torno de 80) tem-se, desde a superfície, pontos com alinhamento na direção NW-SE. A partir de 30 m nota-se o alinhamento de pontos com altos valores de RQD com a direção NE-SW. Estes alinhamentos formam uma área que cresce progressivamente no modelo e podem ser observadas até a profundidade final do mesmo, Figura 52D. Por fim, de 400 m em diante o modelo apresenta o mesmo padrão de resultado em que se tem a maior parte do modelo composto por valores altos de RQD (até 80) e o restante por valores médios (entre 40-60).

Na Figura 53 tem-se uma imagem do modelo geomecânico 4D da variável RQD obtido com o emprego da KO. Na figura é possível visualizar os alinhamentos de baixos valores da variável nas direções NE-SW e NW-SE.

A Figura 54 mostra os resultados do modelo gerado para a variável CLASS para o subsetor Norte_Norte empregando a KO. Tem-se que todo o modelo é composto basicamente por valores de classificação entre 3.5 e 4. Da superfície até 90 m de profundidade observa-se dois alinhamentos de regiões com direção NE-SW e NW-SE de classe igual 4.5, Figura 55A. Dentro desta região tem-se pontos de classe 5, ou seja, material de muita baixa resistência geomecânica. De 0 até 20 m de profundidade, este material apresenta os mesmos alinhamentos do material de classe igual a 4.5. Já de 30 m até 130 m de profundidade tem-se apenas o alinhamento NE-SW.

Da superfície até 70 m de profundidade nota-se uma região com alinhamento tendendo a direção E-W de classe 3.5. A partir de 80 m observa-se que essa região aumenta de tamanho e passa a apresentar um alinhamento NE-SW, Figura 55B. Esse alinhamento pode ser notado até a profundidade final do modelo.

Entre 130 m e 350 m de profundidade tem-se núcleos de classe próximo de 3 no interior das regiões de classe 3.5, Figura 55C, sendo que de 150 a 280 m de profundidade estes núcleos apresentam direção NE-SW. Por fim, nota-se que de 160 a 350 m, estes núcleos também apresentam alinhamento com a direção NW-SE, Figura 55D.

Na Figura 56 tem-se uma imagem do modelo geomecânico 4D da variável RQD obtido com o emprego da KO.

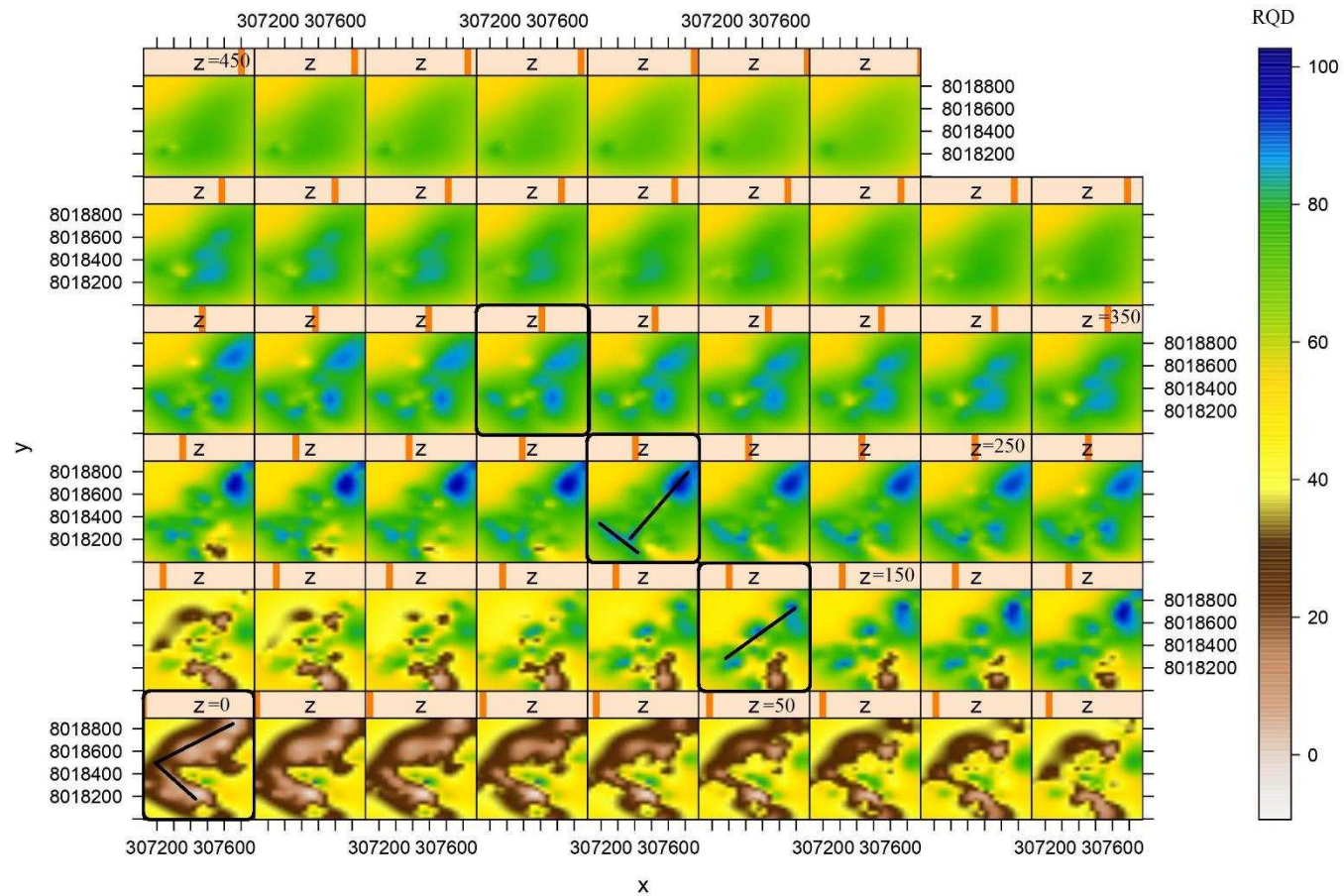
Contraponto os dois modelos confeccionados (RQD e CLASS) pelo uso da KO para o subsetor Norte_Norte tem-se que o padrão de resultados entre os modelos foi concordante. Os valores de RQD acima de 80 observados, principalmente entre as profundidades de 140 e 350 m, foram verificados no modelo da variável CLASS. Para o intervalo da profundidade citada constatou-se valores com classificação RMR simplificada em torno de 3.5, ou seja, uma classe mediana do ponto de vista de resistência mecânica. Em relação às direções de alinhamento dos pontos com classificação boas e ruins, seja do RQD ou da CLASS, constatou-se as mesmas direções para ambos os modelos. Ressalta-se que em ambos os modelos a partir de 400 m de profundidade não se observam mudanças significativas no modelo devido aos poucos dados de amostragem nesta região.

Os resultados encontrados em ambos os modelos, notadamente, os baixos valores de RQD e as áreas com classificação geomecânica ruim (CLASS acima de 4.5) podem estar associados à presença das fendas e com o litotipo S/R no interior do maciço. Para o subsetor Norte_Norte tem-se que as fendas foram observadas desde a superfície até a profundidade de 250 m, sendo que entre 100 e 150 m elas foram mais expressivas. Entretanto, para os 50 primeiros metros de profundidade os resultados obtidos, provavelmente, estão relacionados com a presença da cobertura de solos que podem ter dado origem ao material sem recuperação (S/R). Este material pode ter, possivelmente, outra fonte além do solo, haja vista que o mesmo foi observado até profundidades entre 250 e 300 metros.

Sob o ponto de vista da geologia estrutural verifica-se que o subsetor Norte_Norte possui lineamentos em seu interior, bem como corta a Falha Vazante. Este fato pode elucidar a

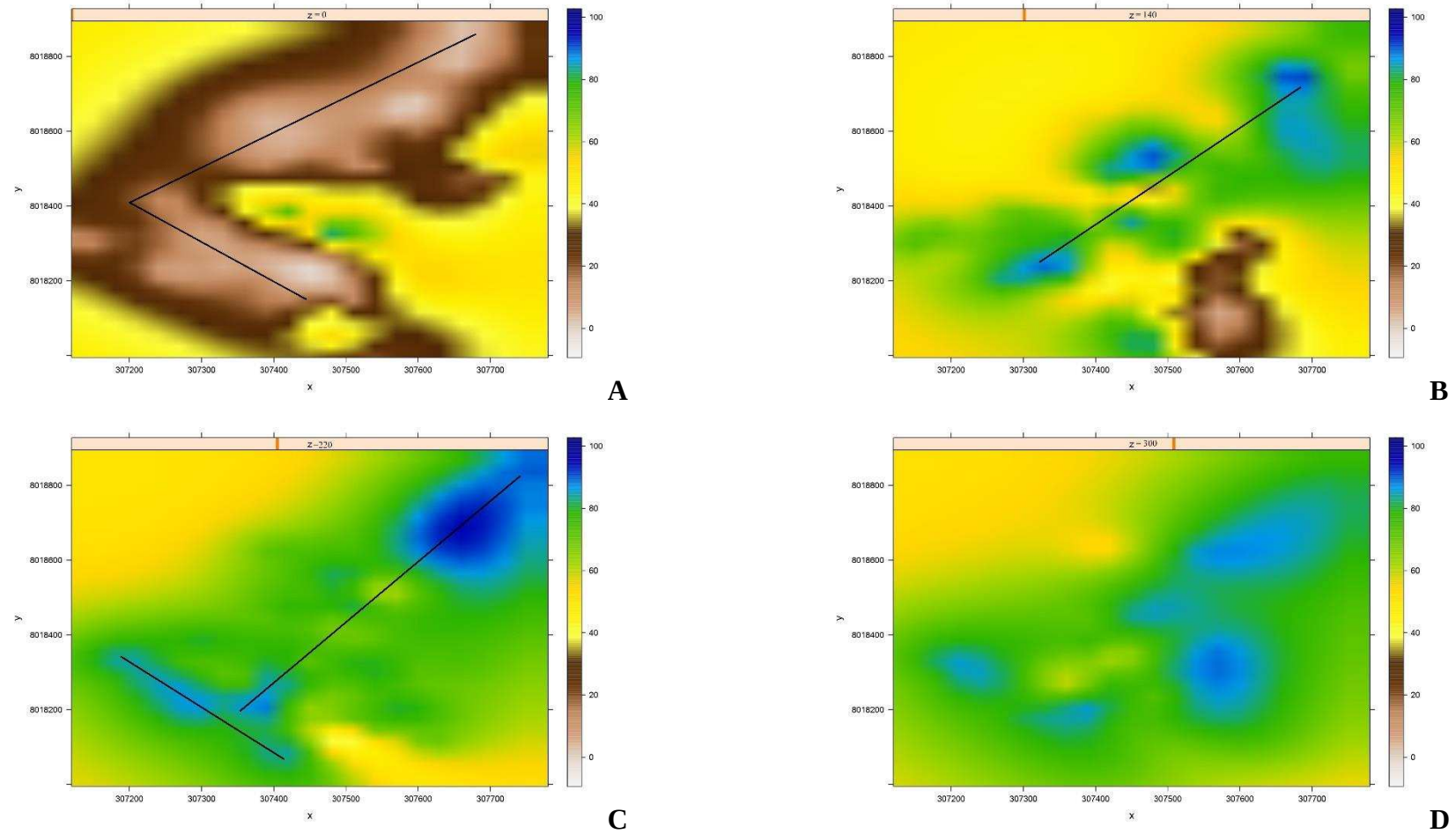
presença de alinhamentos de pontos com alto e baixo RQD e classe geomecânica nas diferentes direções observadas.

Figura 51 - Modelo geomecânico da variável RQD obtida com emprego da KO - subsetor Norte_Norte



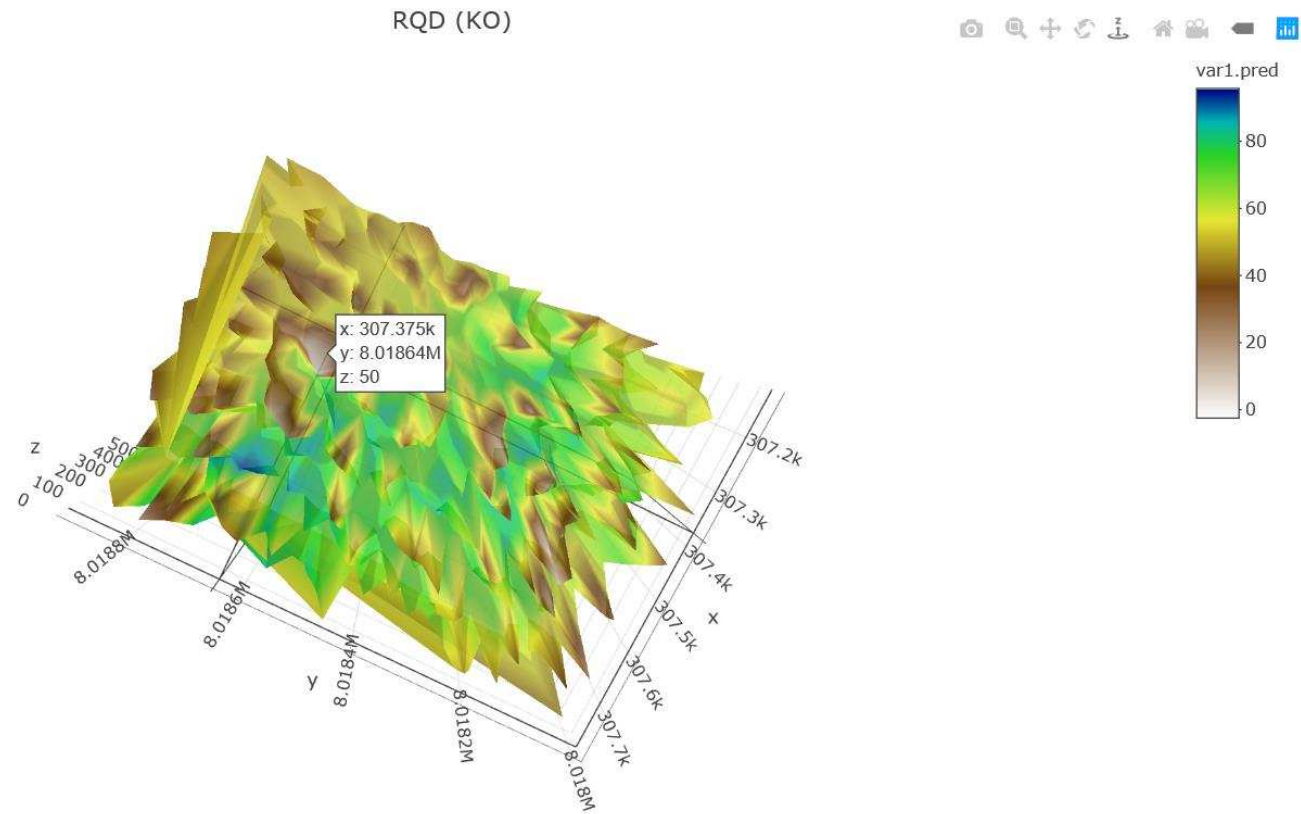
Fonte: Própria autora.

Figura 52 - Modelo geomecânico do RQD obtido pela KO na superfície (A), a 140 m de profundidade (B), a 220 m de profundidade (C) e a 300 m de profundidade (D) – subsetor Norte_Norte



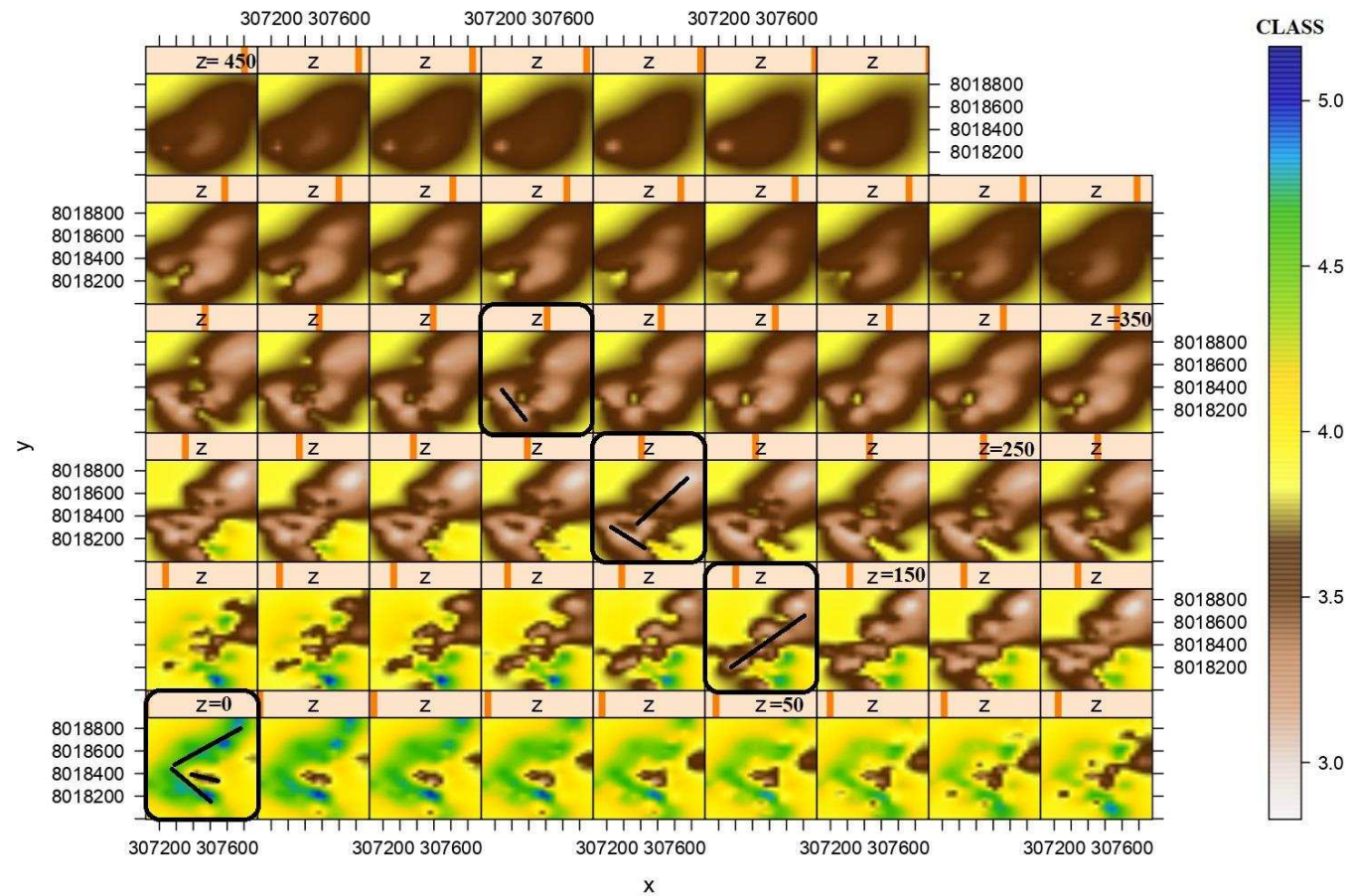
Fonte: Própria autora.

Figura 53 - Visualização do gráfico 4D do modelo geomecânico da variável RQD com o emprego da KO – subsetor Norte_Norte



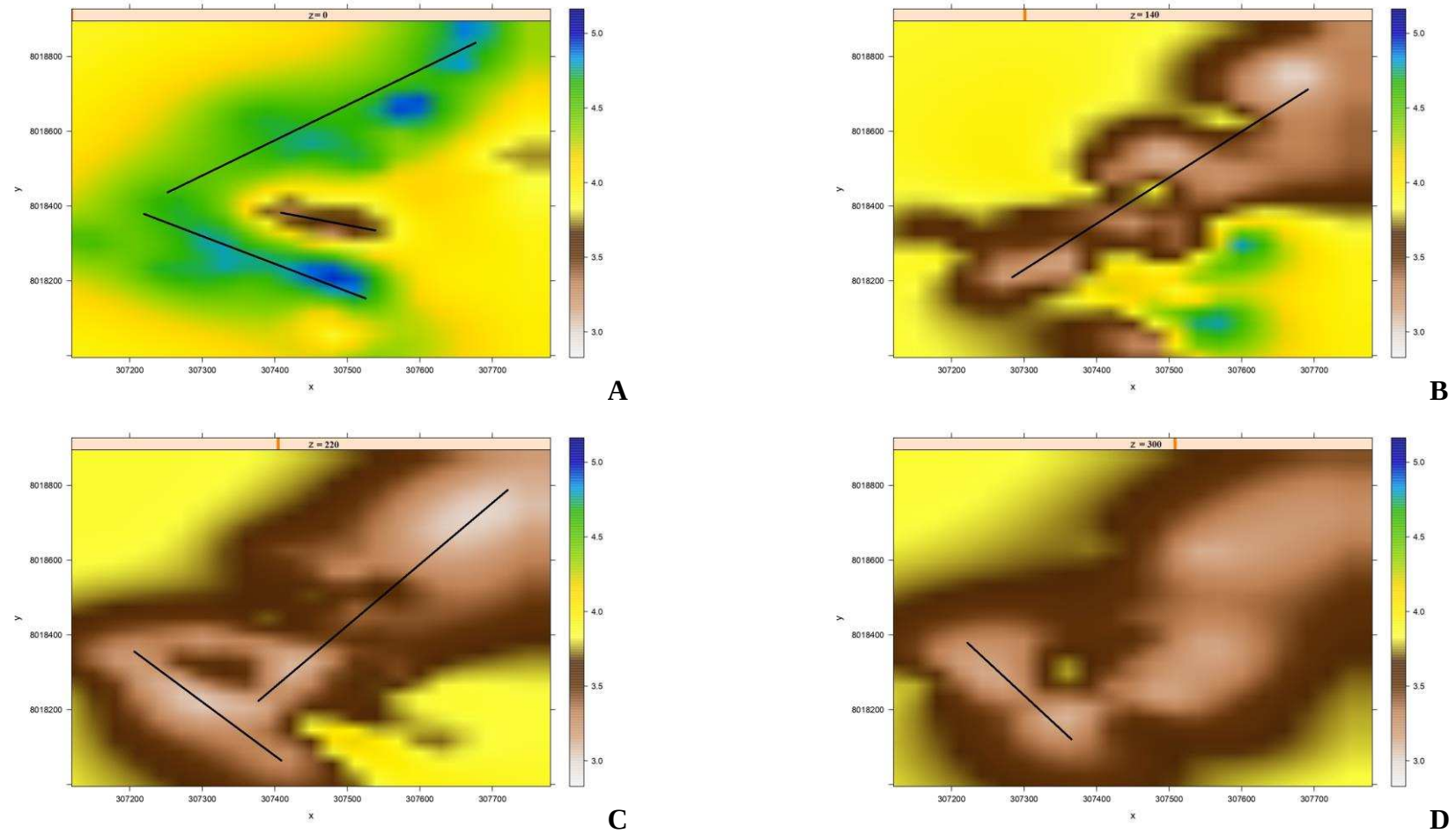
Fonte: Própria autora.

Figura 54 - Modelo geomecânico da variável CLASS obtida com emprego da KO - subsetor Norte_Norte



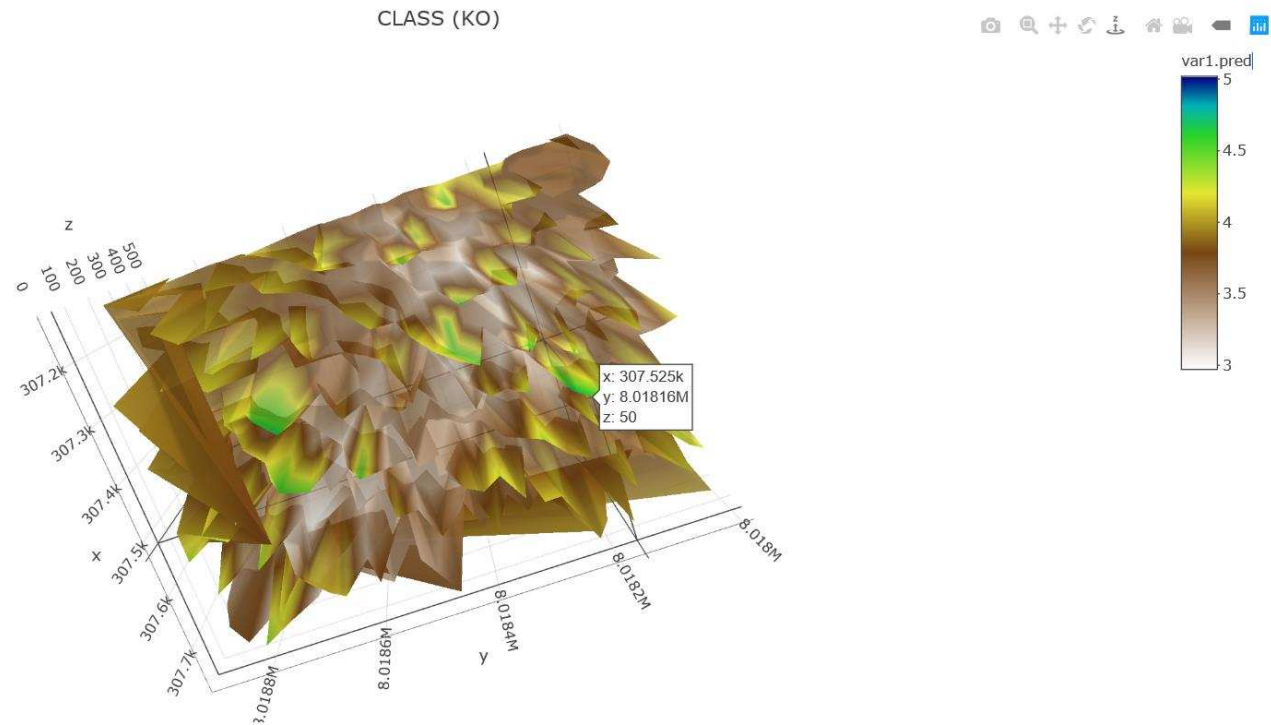
Fonte: Própria autora.

Figura 55 - Modelo geomecânico da CLASS obtido pela KO para superfície (A), a 60 m de profundidade (B), a 260 m de profundidade (C) e a 500 m de profundidade (D) – subsetor Norte_Norte



Fonte: Própria autora.

Figura 56 - Visualização do gráfico 4D do modelo geomecânico da variável CLASS com o emprego da KO – subsetor Norte_Norte



Fonte: Própria autora.

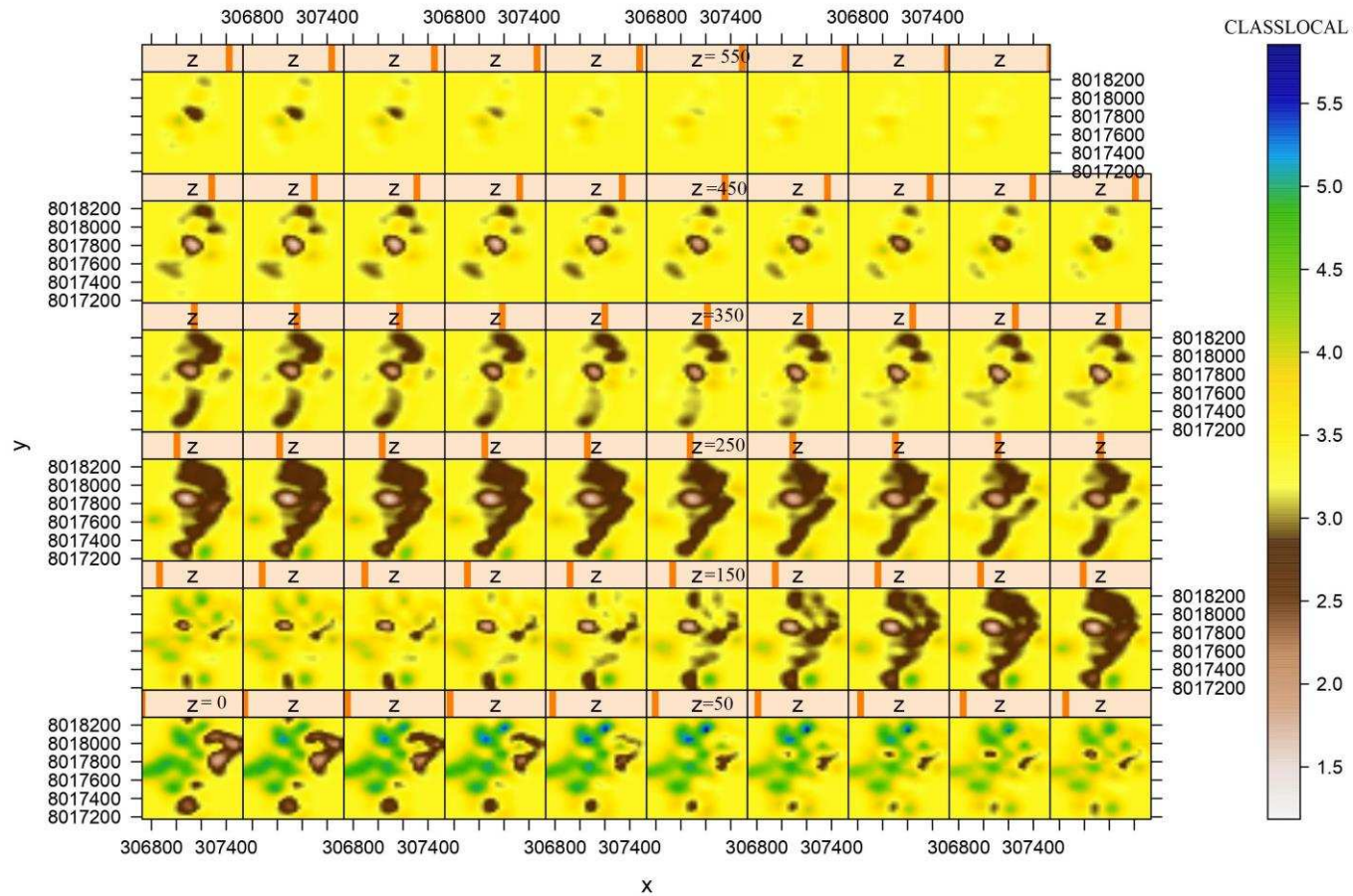
Comparando os resultados dos modelos de RQD dos três subsetores – Figura 39, Figura 45 e Figura 51 – observa-se que o Norte_Norte é o que apresenta maiores áreas com os menores valores de RQD, para os 150 primeiros metros de profundidade. O Norte_Central, por sua vez, é o que apresenta os maiores valores de RQD (este resultado já havia sido identificado na análise exploratória dos dados) seguindo pelo Norte_Sul. Em relação às direções de alinhamento, tanto de pontos com altos quanto com baixos valores de RQD, constatou-se que os três subsetores apresentam as mesmas direções para basicamente as mesmas profundidades.

Quando se faz a comparação entre os três subsetores, Figura 42, Figura 48 e Figura 54, para os modelos da classificação RMR simplificada (CLASS), notou-se que o mesmo comportamento já descrito para a variável RQD para os três subsetores.

De maneira análoga ao que foi realizado para o interpolador IDW, tentou-se elaborar os modelos da variável classificação geomecânica local (CLASSLOCAL) empregando a KO para os três subsetores. Comparando o modelo do subsetor Norte_Central, Figura 57, com o modelo da variável CLASS (Figura 48) tem-se que os resultados são condizentes, exceto para os 100 primeiros metros. Para esta profundidade, a CLASSLOCAL não delimitou regiões com baixa resistência geomecânica, como era esperado.

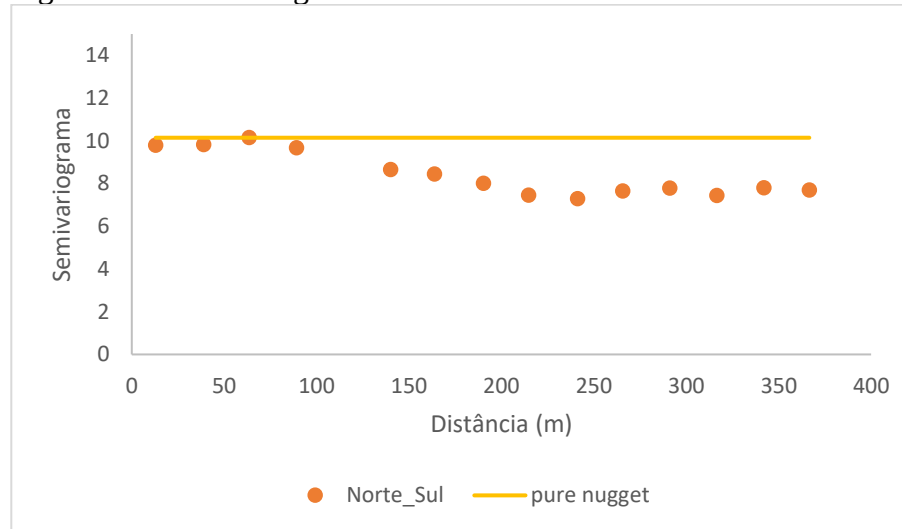
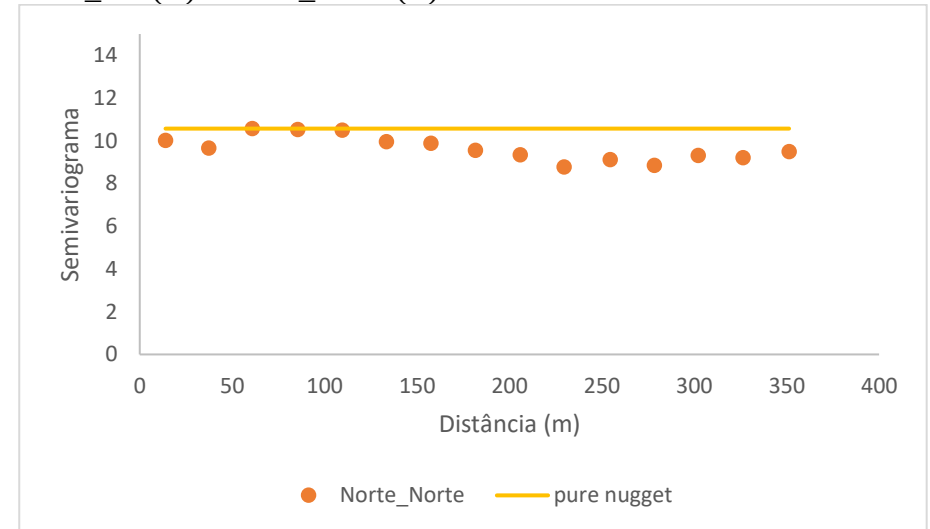
Já quando se confronta os resultados do modelo da variável CLASSLOCAL com o RQD, ainda para o subsetor Norte-Central, observa-se boa aderência dos resultados, ou seja, locais com altos valores de RQD apresentam boa classificação local; sendo inclusive observado no trecho de 130 a cerca de 250 m de profundidade o mesmo alinhamento com direção NW-SW. Contudo, para os subsetores Norte_Sul e Norte_Norte não foi possível gerar os modelos, pois foi verificada a presença de efeito pepita puro, Figura 58, indicando assim, que a variável CLASSLOCAL não possui dependência espacial para estes subsetores, ou seja, o comportamento da variável é puramente aleatório. Este resultado é extremamente questionável, pois uma classificação geomecânica é totalmente depende do espaço no qual a mesma foi empregada no maciço rochoso.

Figura 57 - Modelo geomecânico da variável CLASSLOCAL obtida com emprego da KO - subsetor Norte_Central



Fonte: Própria autora.

Figura 58 - Semivariograma da variável CLASSLOCAL dos subsetores Norte_Sul (A) e Norte_Norte (B)

**A****B**

Fonte: Própria autora.

Conforme já relatado em vários outros momentos do presente trabalho, a mineradora parceira não forneceu os dados geológicos estruturais locais para a realização deste trabalho. Assim, foi realizada uma busca na literatura técnica na tentativa de se obter informações sobre a área de estudo. Em linhas gerais, tem-se que na região do Extremo Norte de Vazante ocorre o contato entre duas diferentes formações geológicas, Serra do Garrote e Serra do Poço Verde, e as duas direções de alinhamento, NE-SW e NW-SE, observadas em todos os subsetores, estão relacionados com a Falha Vazante e com as descontinuidades que conduzem água para o interior do maciço.

O subsetor Norte_Sul “corta” uma falha normal, certamente a Falha Vazante e o Norte_Norte, além da falha também apresenta lineamentos em seu grid de análise. Assim, tem-se que a presença destes controles estruturais justificam o fato destes subsetores terem apresentado extensas regiões com baixos valores de RQD e classificação geomecânica ruim. Já no grid do subsetor Norte_Central não “corta” a Falha Vazante e não apresenta lineamentos no seu interior. Logo, este fato pode explicar o motivo deste subsetor ter apresentado os maiores valores de RQD e boa classificação de maciço, indicando um maciço rochoso de melhor resistência geomecânica.

O fato de se ter para as variáveis analisadas altos valores próximos a baixos valores, pode ser explicado pela presença de rochas cársticas, que sofrem diferentes graus de intemperismo de forma bastante abrupta em curtos intervalos de espaço. Assim, apesar do Extremo Norte como um todo apresentar os mesmos litotipos que são as brechas e os dolomitos, tem-se desde rochas sãs até a presença de fendas no interior do maciço. Outra possível explicação é que quanto maior a complexidade geológica de uma região, mais expressivo é o seu intemperismo (AYALEW; REIK; BUSCH, 2002).

Assim sendo, tem-se que o subsetor Norte_Sul possui, além do controle estrutural representado pela Falha Vazante, uma elevada presença de fendas. Esta associação de fatores pode ajudar a esclarecer o fato deste subsetor ter apresentado menores valores de RQD, principalmente em profundidade, quando comparado com o subsetor Norte_Norte que também apresenta controle estrutural.

A associação entre a geologia e o controle estrutural faz com que os resultados dos modelos da classificação ainda não possam ser considerados definitivos. Exadaktylos e Stavropoulou (2008) argumentam que utilizar sistemas de classificação geomecânica possui a

desvantagem de compilar em um único número várias propriedades complexas do maciço rochoso. E a variável CLASS trata-se de uma classificação RMR simplificada que não foi validada em campo.

Foi realizada uma busca na literatura técnica para verificar a existência de elaboração de modelos geomecânicos com uso da geoestatística, tendo como dados básicos informações de furos de sondagem e o emprego de programas livres. Ao longo dos anos alguns trabalhos foram realizados na área de geomecânica empregando geoestatística. Contudo, não é usual a construção de modelos geomecânicos utilizando furos de sondagem e programas livres.

4.6 Análises conjuntas

Ao longo do presente trabalho, os modelos 4D das variáveis RQD e CLASS de cada um dos três subsetores foram apresentados, tanto para o IDW quanto para a KO. Especificamente, foram apresentadas visualizações planificadas e interativas para cada variável analisada por subsetor. Além destes modelos foram confeccionados gráficos interativos 5D e animações em que é possível realizar análises conjuntas de diferentes variáveis do banco de dados. Este tópico visa apresentar os recursos de análise em conjunto das variáveis. Todavia, não será explicado as razões pelas quais os gráficos possuem os comportamentos apresentados. Entende-se que toda a justificativa está relacionada a geologia local e regional, que já foi apresentada na ocasião da explicação dos mapas com visualização planificada. Tampouco estes dados foram fornecidos pela mineradora parceira.

Dentre os gráficos interativos tem-se o gráfico da Figura 59A em que é possível visualizar a classificação RMR simplificada e a litologia. Neste gráfico tem-se que a variável CLASS foi interpolada pela KO e os pontos coloridos indicam quais os litotipos foram observados em campo. Tem-se uma associação entre os valores preditos da variável CLASS com os pontos amostrados da litologia – sendo que a informação dos litotipos é oriunda do furo de sondagem. Este gráfico possui os mesmos recursos computacionais dos demais já apresentados e é acrescido com a possibilidade de desabilitar algumas informações. Assim sendo, tem-se na Figura 59B uma visualização apenas com as fendas (FD) e é possível, por exemplo, verificar que algumas regiões de classificação RMR ruim ($CLASS > 4$) estão associadas à presença das fendas.

Para o gráfico CLASS x RQD, Figura 60A, tem-se o mesmo raciocínio do gráfico anterior, ou seja, a variável CLASS está interpolada e o RQD (para este gráfico) apresenta os valores advindos dos dados do banco de dados. Na Figura 60B nota-se que regiões com RQD excelente estão relacionados com CLASS igual a 3, para o sub setor Norte_Sul. Ressalta-se que este resultado foi constatado na ocasião da explanação sobre o modelo planejado.

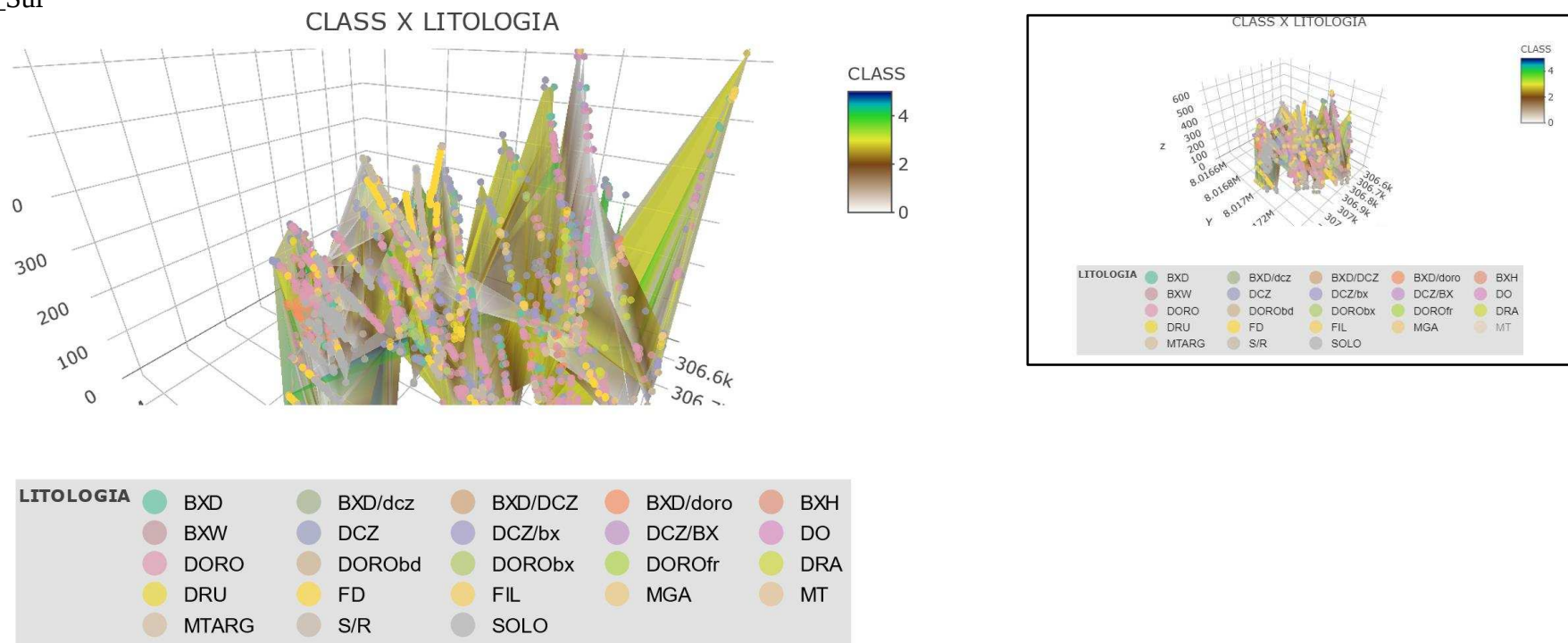
Observando o gráfico CLASS x Alteração, Figura 61A tem-se que a variável CLASS foi interpolada e os dados da variável alteração mostrados são valores medidos. Na Figura 61B pode-se notar que a alteração igual a 2 está atrelada a várias classes RMR simplificada para o subsetor Norte_Norte.

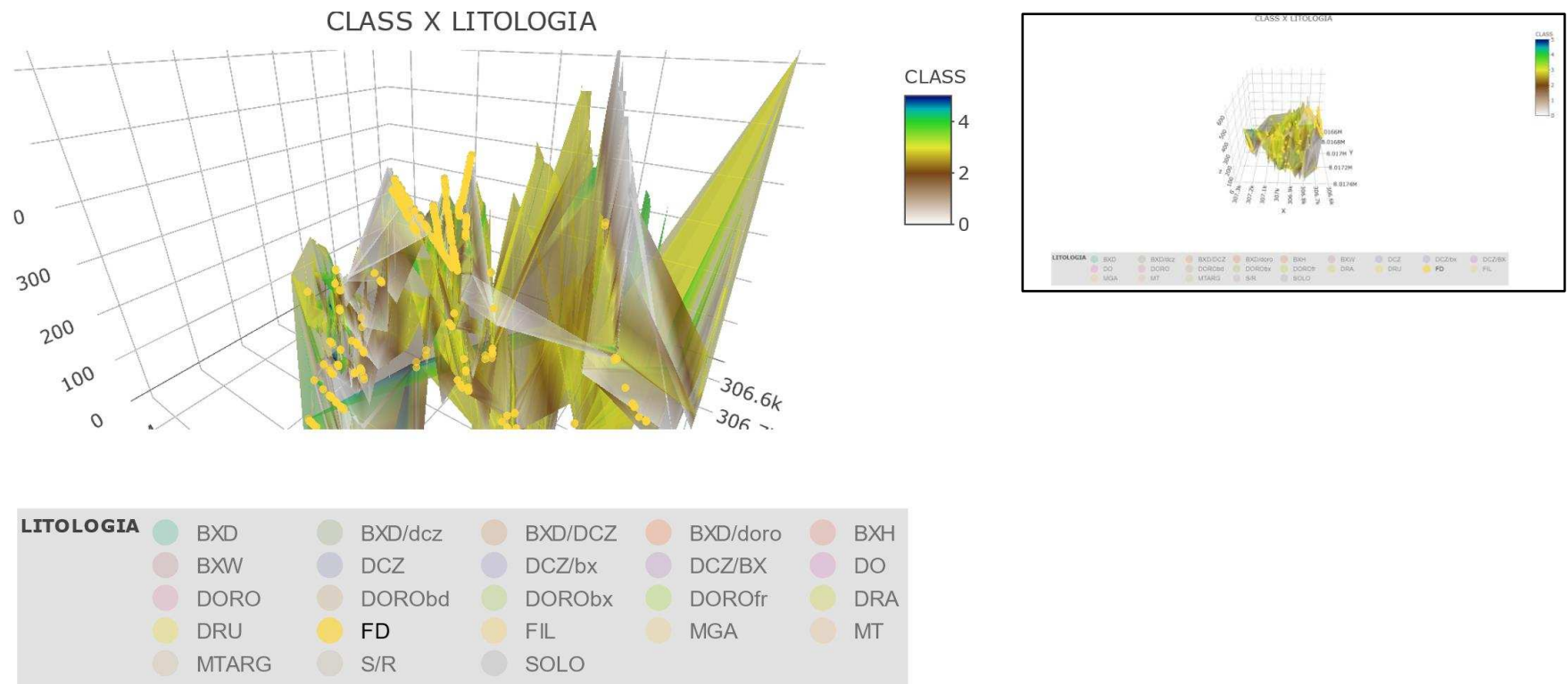
Também foram gerados gráficos interativos para análise conjunta da CLASS com a profundidade e, ainda, os mesmos gráficos mencionados para a classificação também foram gerados para o RQD, como por exemplo, RQD x Alteração.

Ainda como ferramenta de análise tem-se que foram criadas animações em que três ou mais variáveis foram analisadas conjuntamente. Por exemplo, litologia x fraturamento x CLASS, conforme se mostra na Figura 62, ou litologia x fraturamento x RQD, como mostrado na Figura 6. Novamente, ressalta-se que apresentar/explicar este tipo de ferramenta empregando apenas o plano do papel (2D) prejudica o entendimento, uma vez que se pode apenas visualizar uma imagem congelada e não a animação como um todo.

Estes gráficos interativos possuem duas grandes vantagens. A primeira é permitir uma análise rápida da relação/associações (ou não) das variáveis analisadas nos gráficos, pois em um gráfico RQD x Alteração, por exemplo, é possível visualizar pontos/regiões no interior do maciço rochoso que possuem baixos valores de RQD e verificar como a variável alteração se comporta nestes mesmos locais. A outra vantagem é permitir uma melhor compreensão por profissionais de áreas correlatas. Herwanger (2019) defende que os modelos geomecânicos 3 e 4D integram dados de várias disciplinas diferentes e, assim sendo, permite que cientistas e engenheiros colaborem e comuniquem entre si na busca por tomadas de decisão mais acertadas.

Figura 59 - Visualização do gráfico interativo entre a CLASS x Litologia com todos os litotipos (A) e somente com as fendas (B)– subsetor Norte_Sul

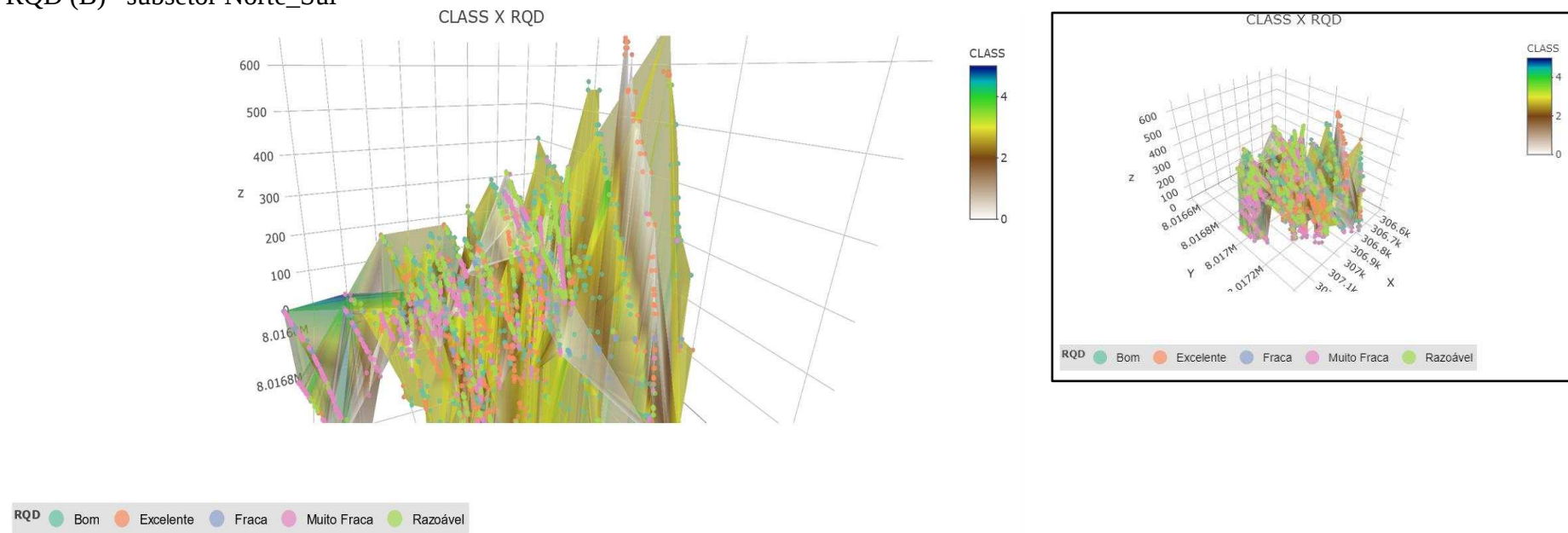




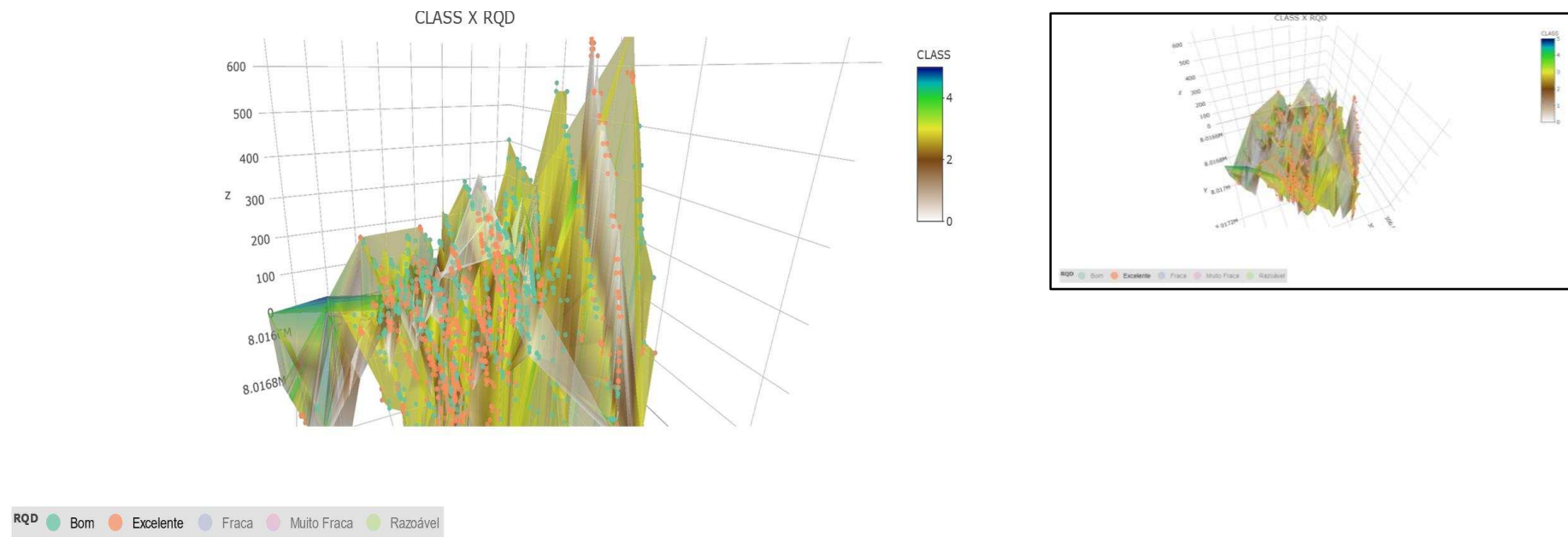
B

Fonte: Própria autora.

Figura 60 - Visualização do gráfico interativo entre a CLASS x RQD para todos os valores (A) e somente para alguns valores excelentes de RQD (B)– subsetor Norte_Sul



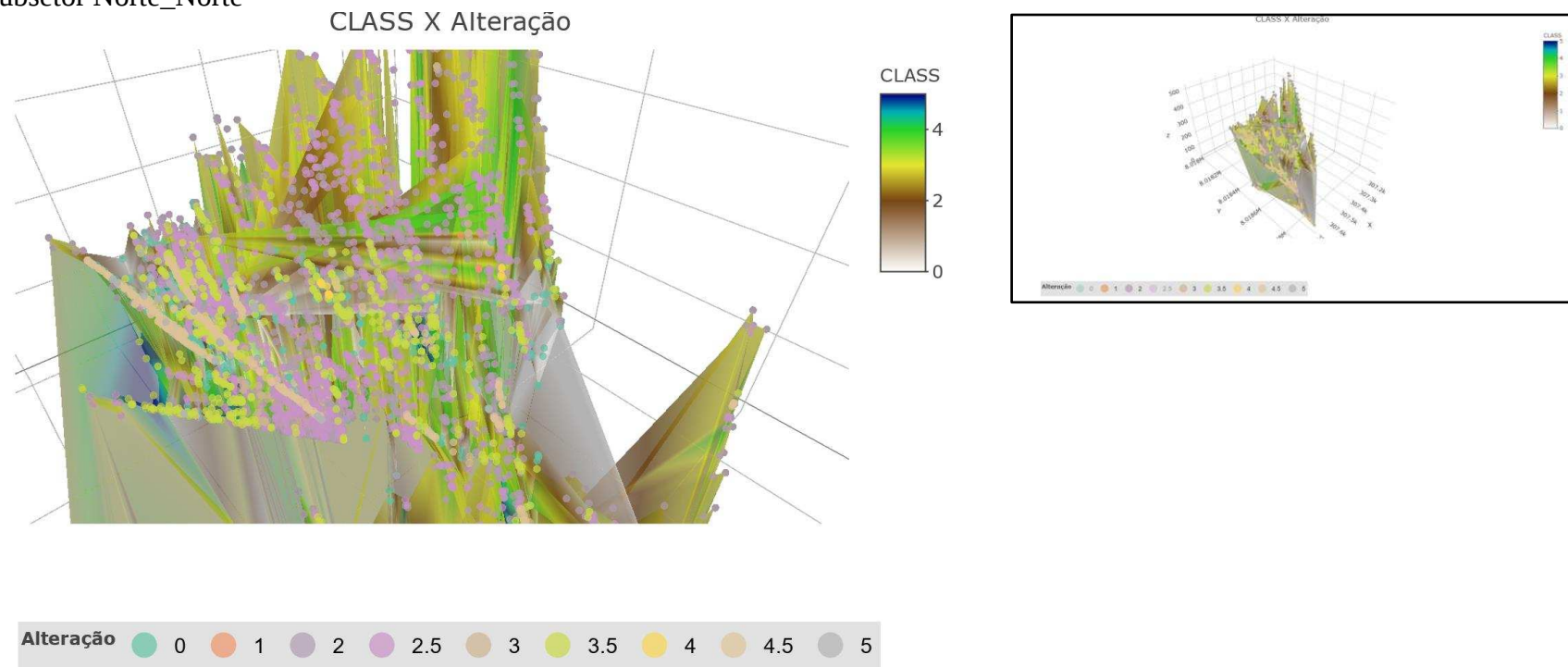
A



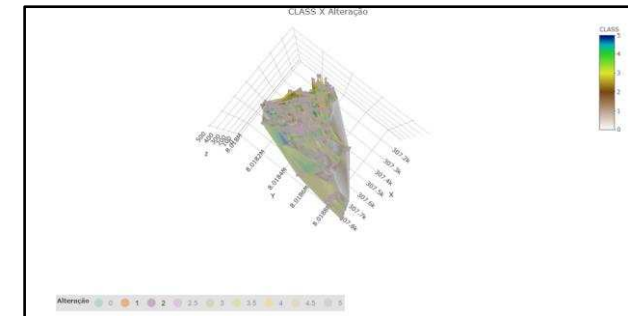
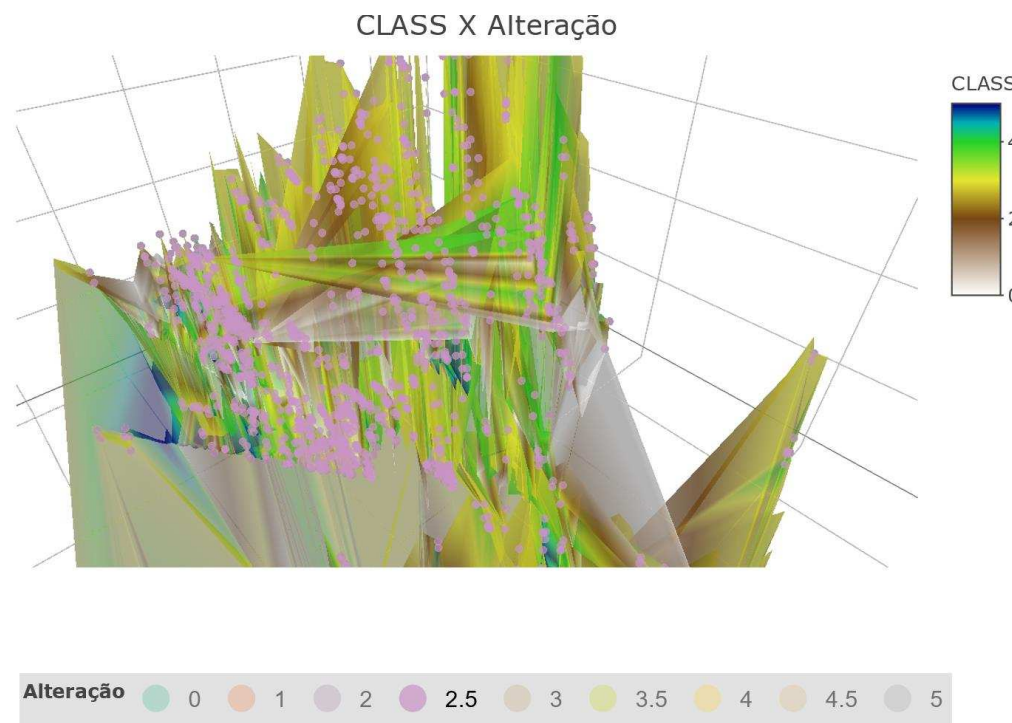
B

Fonte: Própria autora.

Figura 61 - Visualização do gráfico interativo entre a CLASS x alteração para todos os valores (A) e somente para alguns valores de alteração (B)– subsetor Norte_Norte



A

**B**

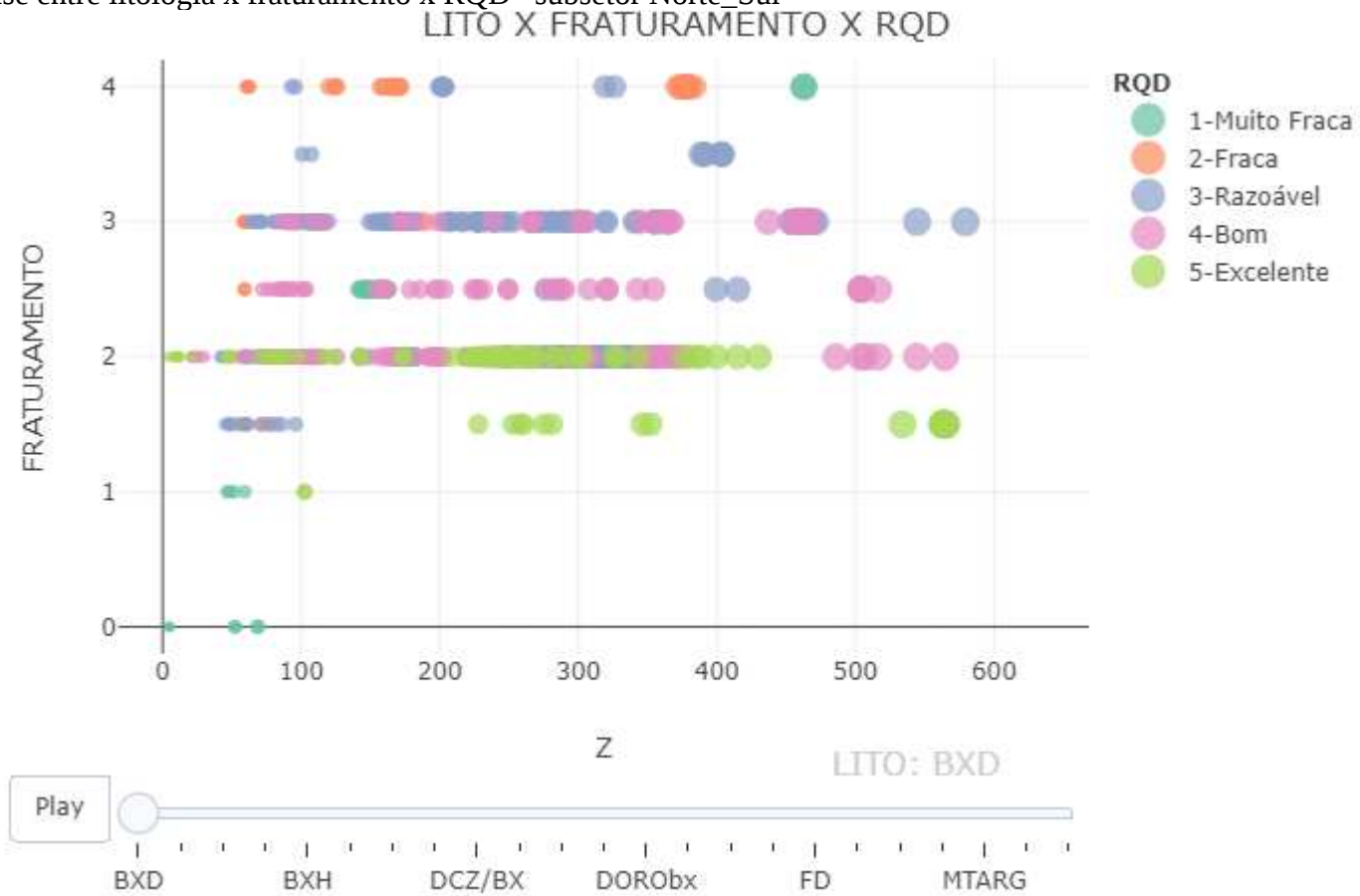
Fonte: Própria autora.

Figura 62 - Análise entre litologia x fraturamento x class– subsetor Norte_Sul



Fonte: Própria autora.

Figura 63 - Análise entre litologia x fraturamento x RQD– subsetor Norte_Sul



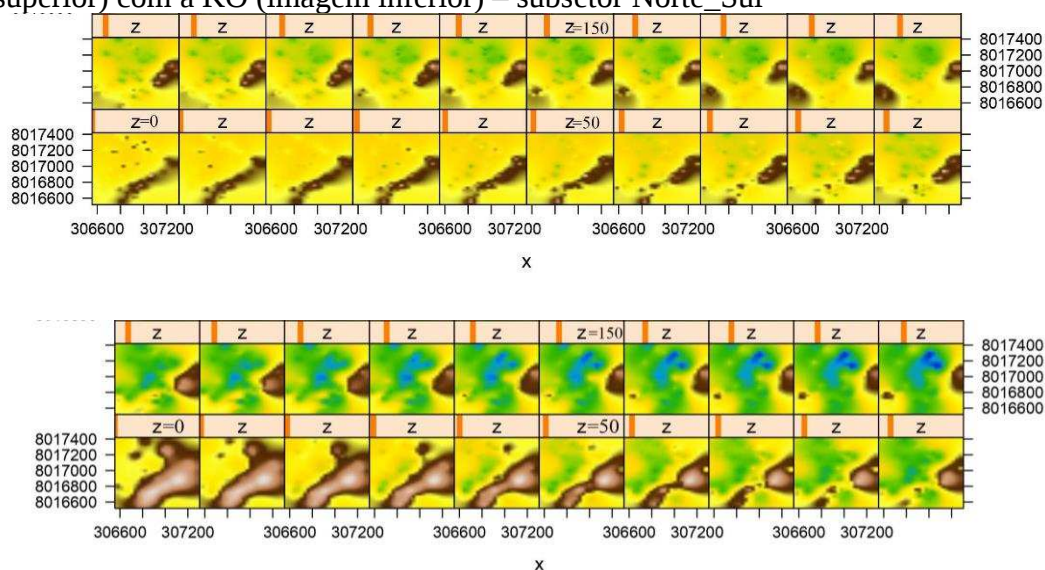
Fonte: Própria autora.

4.7 Comparação entre IDW e KO

Os resultados obtidos para a variável RQD e para a classificação RMR simplificada (CLASS) para os modelos gerados pelo interpolador IDW foram comparados com os modelos da Krigagem Ordinária (KO) tanto qualitativa quanto quantitativamente.

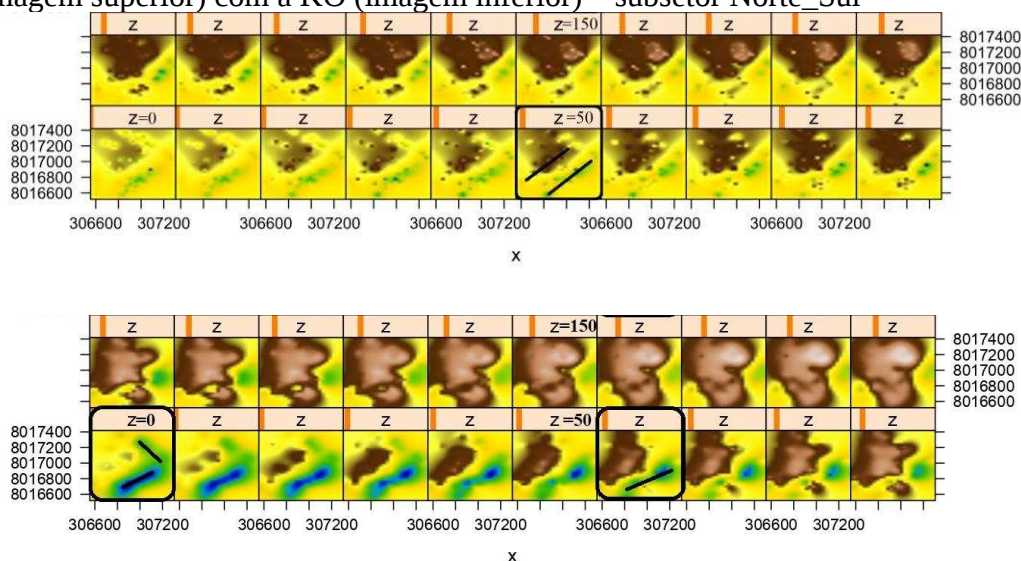
Qualitativamente, tem-se que para o RQD do subsetor Norte_Sul os resultados da KO foram mais expressivos tanto na variação de tamanho das áreas com os diferentes valores da variável, quanto na questão das direções de alinhamentos dos pontos. A título de exemplificação, na Figura 64 tem-se uma comparação destes resultados para os primeiros 190 m de profundidade, onde é possível observar um aumento da área com baixos valores de RQD nas profundidades iniciais e o aparecimento de pontos com RQD igual a 100, alinhados segundo a direção NE-SW, a partir dos 100 m de profundidade. A variável CLASS apresentou o mesmo comportamento, Figura 65.

Figura 64 - Comparação dos resultados do modelo do RQD obtidos via IDW (imagem superior) com a KO (imagem inferior) – subsetor Norte_Sul



Fonte: Própria autora.

Figura 65 - Comparação dos resultados do modelo do CLASS obtidos via IDW (imagem superior) com a KO (imagem inferior) – subsetor Norte_Sul



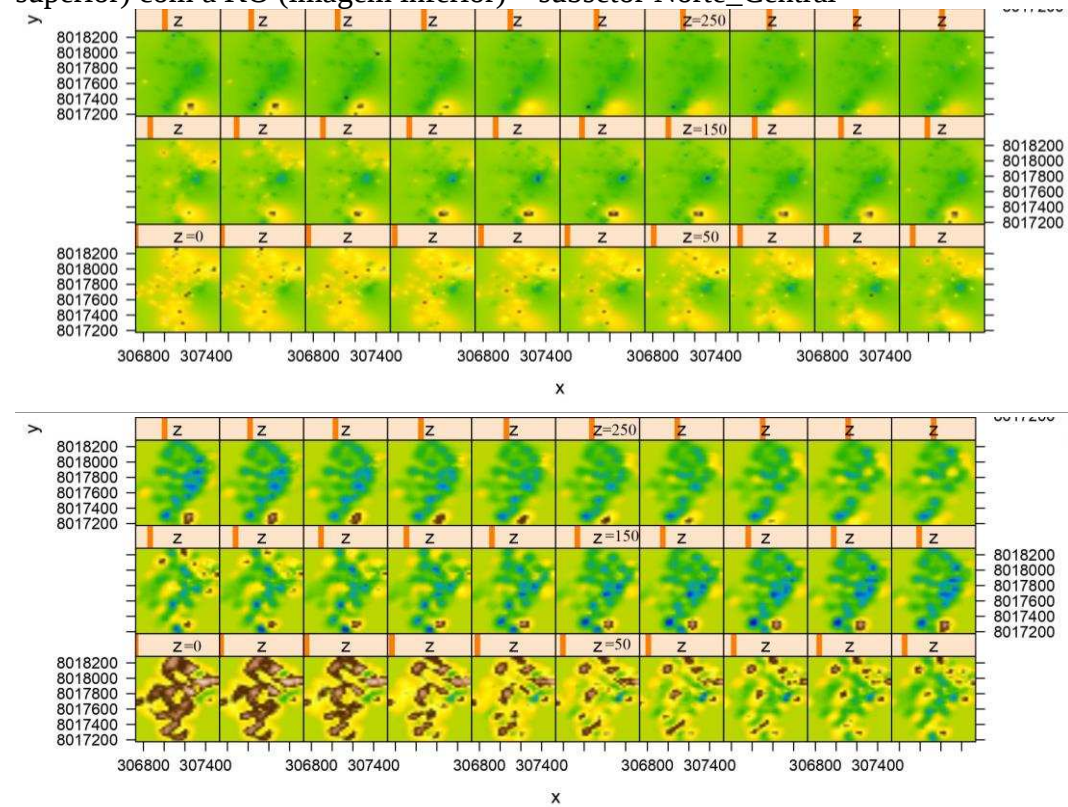
Fonte: Própria autora.

Para o subsetor Norte_Central tem-se que a diferença entre os resultados obtidos para a variável RQD é notável, principalmente quanto aos valores de baixo RQD para menores profundidades e os de alto RQD ($RQD = 100$) para maiores profundidades. No modelo gerado pelo IDW tem-se, por exemplo, uma “sombra” de pontos com tais valores alinhados na direção NE-SW no intervalo compreendido entre 100 e 290 m, imersos numa região de RQD igual a 70. No mesmo trecho de profundidade no modelo gerado pela KO aparecem, nitidamente, aglomeração de pontos com RQD igual a 100 e, ainda, uma delimitação de pontos com altos valores de RQD, Figura 66.

Outra diferença significativa ocorreu nos primeiros 50 metros de profundidade. No IDW tem-se pontos medianos alinhados segundo duas direções NE-SW e NW-SE formando uma área e alguns poucos pontos de RQD abaixo ($RQD < 20$) entranhados no interior daqueles pontos. Já no modelo da KO tem-se que a área com valores médios se transformam num amontoado de pontos com baixos valores de RQD sem uma direção preferencial de alinhamento. Para a variável CLASS ocorre uma situação semelhante em relação as “sombras” dos pontos com classificação igual a 3.5. E, além disso, para os 50 primeiros metros de profundidade tem-se para o modelo obtido via IDW, uma extensa região com classificação igual

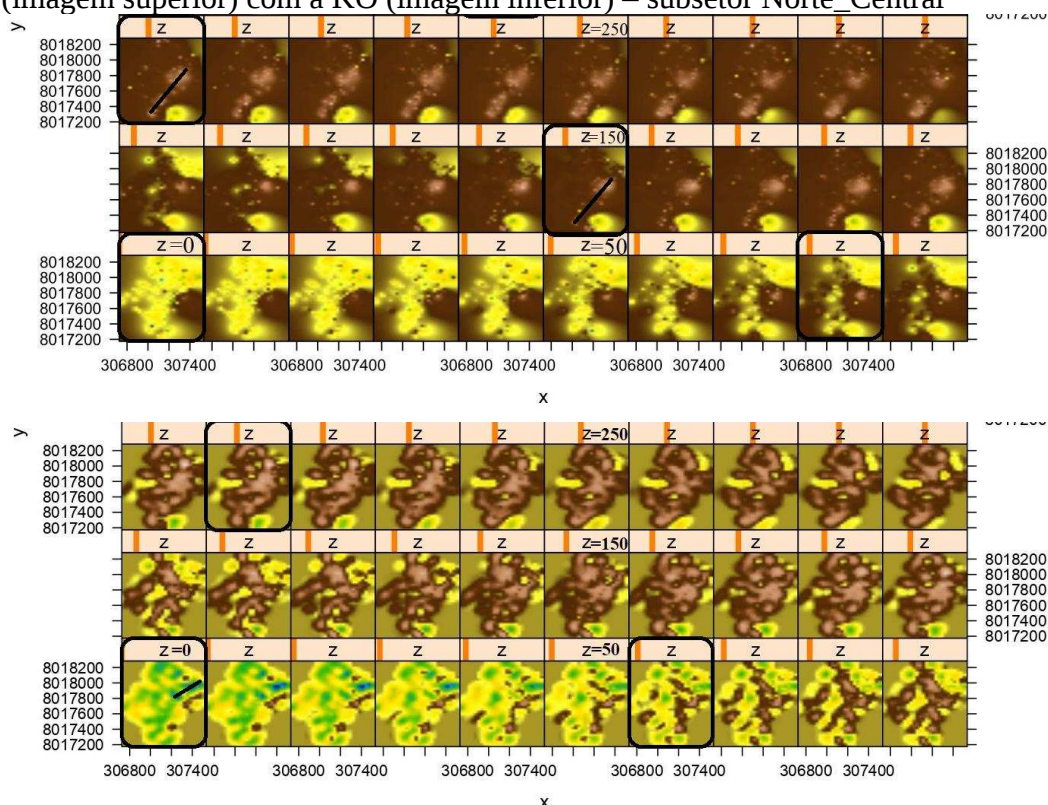
a 4 e, no modelo da KO para esta mesma região foram observados pontos com piores classificações geomecânicas, ou seja, de menor resistência, Figura 67.

Figura 66 - Comparação dos resultados do modelo do RQD obtidos via IDW (imagem superior) com a KO (imagem inferior) – subsetor Norte_Central



Fonte: Própria autora.

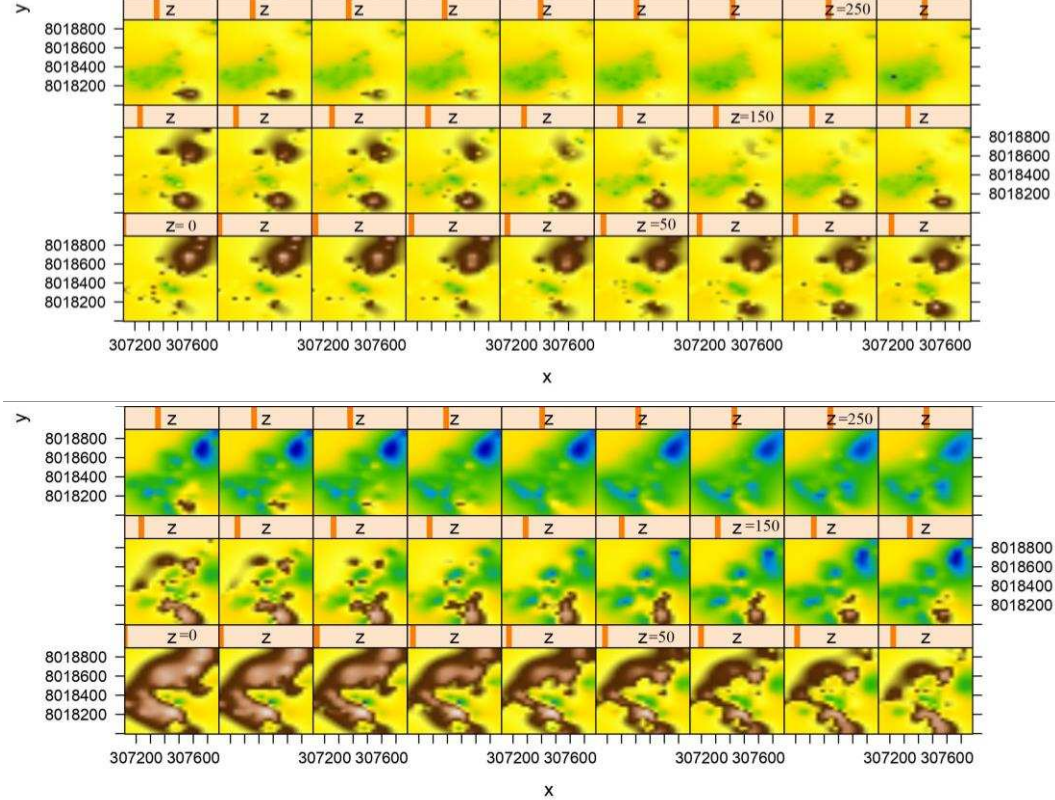
Figura 67 - Comparação dos resultados do modelo do CLASS obtidos via IDW (imagem superior) com a KO (imagem inferior) – subsetor Norte_Central



Fonte: Própria autora.

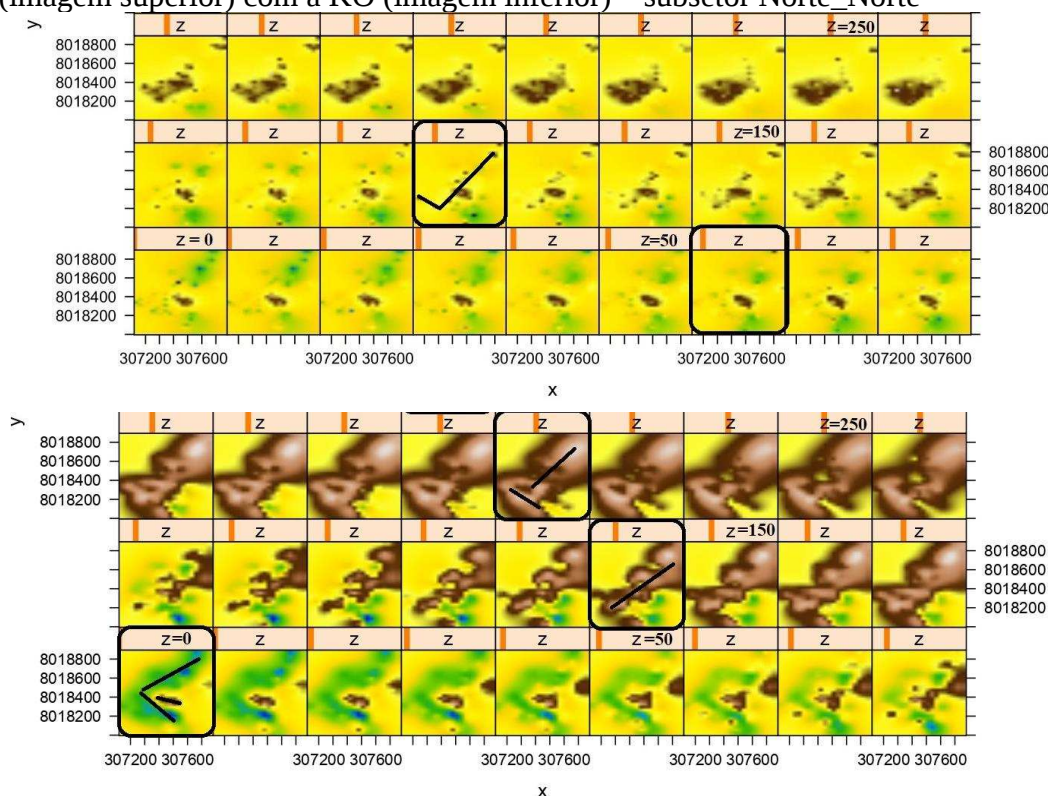
Para o subsetor Norte_Norte tem-se que a diferença entre os resultados obtidos para a variável RQD é significativa, sendo dos três subsetores o que apresentou as maiores variações. Nos primeiros 90 m de profundidade nota-se que a extensa região de valores médios do modelo do IDW deu lugar a áreas extensas com baixos valores de RQD, Figura 68. Além disso, tem-se que entre 50 e 170 m de profundidade houve uma diminuição das áreas com altos e altíssimos valores de RQD do modelo IDW para o modelo da KO. Tem-se, ainda, que para os valores de RQD igual a 100 ocorre um alinhamento dos mesmos com a direção NE-SW. Para a classificação RMR simplificada também nota-se variações relevantes, principalmente nos primeiros 170 m de profundidade em que ocorre um aumento da área com valores de piores classificações geomecânicas no modelo da KO em comparação com ao do IDW, tendo inclusive direção de alinhamento, Figura 69.

Figura 68 - Comparação dos resultados do modelo do RQD obtidos via IDW (imagem superior) com a KO (imagem inferior) – subsetor Norte_Norte



Fonte: Própria autora.

Figura 69 - Comparação dos resultados do modelo do CLASS obtidos via IDW (imagem superior) com a KO (imagem inferior) – subsetor Norte_Norte



Fonte: Própria autora.

A comparação quantitativa entre a KO e o IDW, também, foi realizada através do método de validação K-fold, conforme pode ser observado no Quadro 16. Nota-se que para ambas as variáveis analisadas, considerando os três setores do Extremo Norte, a KO apresentou menores erros, tanto o RMSE quanto o MAE. Assim, os modelos obtidos via krigagem possuem melhores resultados do que os advindos do IDW. Este resultado já era esperado uma vez que a krigagem tende a apresentar melhores resultados que o IDW, porque se trata de uma técnica de regressão que busca minimizar a variância da variável estimada a partir de um modelo prévio que supõe dependência estocástica entre os dados distribuídos no espaço (KRAVCHENKO; BULLOCK, 1999). Silva et al. (2007) comparando atributos de solo e Shahab et al. (2013) comparando teores de reserva de minério de ferro também obtiveram melhores resultados para a KO do que para o IDW.

Quadro 16 -Comparação entre os erros da validação entre a KO e o IDW

		RQD		CLASS	
		RMSE (Erro quadrado médio)	MAE (Erro médio absoluto)	RMSE (Erro quadrado médio)	MAE (Erro médio absoluto)
Norte_Sul	KO	25.14	20.06	0.64	0.41
	IDW	31.92	23.83	0.84	0.70
Norte_Central	KO	23.96	17.74	0.59	0.35
	IDW	27.12	19.85	0.67	0.45
Norte_Norte	KO	23.24	18.10	0.62	0.50
	IDW	27.50	20.39	0.75	0.55

Fonte: Própria autora

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho foi motivado pela possibilidade de se construir modelos geomecânicos multidimensionais tendo como dados de entrada informações de furos de sondagem já existentes numa determinada área. Além disso, foi uma premissa que esta construção seria embasada em conhecimentos já consolidados sobre geoestatística e que os modelos seriam confeccionados através da utilização de linguagem de programação livre, o R.

Assim, para desenvolvimento do trabalho foi firmada uma parceria com a mineradora Nexa Resources para fornecimento do banco de dados dos três subsetores, Norte_Sul, Norte_Central e Norte_Norte, da região do Extremo Norte da Mina de Vazante. Especificamente, foram disponibilizados um total de 513 furos de sondagem já compilados em planilhas, ou seja, os boletins dos furos não foram disponibilizados. Deste total, foram utilizados 70 furos para elaboração do modelo no subsetor Norte_Sul, 254 do Norte_Central e 149 do Norte_Norte. Estes furos de sondagem continham informações sobre sua localização espacial, profundidade, litologia, alteração, fraturamento, recuperação, RQD e sobre uma classificação de maciço rochoso local.

De posse dos dados dos furos de sondagem foi realizado, já no R, um tratamento dos dados, em que um percentual entre 4 e 12% dos furos dos subsetores foram suprimidos por apresentarem alguma inconsistência. As informações sobre recuperação foram retiradas do banco de dados e elaborou-se uma variável, denominada CLASS, referente à uma classificação geomecânica RMR simplificada. Aos litotipos FD (fenda), S/R ou R/S (sem recuperação) e SOLO foram atribuídos valores iguais a zero para as propriedades geomecânicas, haja vista que estes litotipos não poderiam apresentar parâmetros de rocha. Ressalta-se que um banco de dados com qualidade é essencial para elaboração de um modelo geomecânico.

Após o tratamento do banco de dados, foi realizada uma análise exploratória dos dados dos três subsetores estudados. Esta análise possibilitou compreender de modo geral como as variáveis do banco de dados se comportavam sob o ponto de vista estatístico.

Na sequência, empregou-se a técnica de aprendizado de máquina, via algoritmo do Random Forest (RF), na busca pelo ranqueamento de importância da variável que mais influenciaria no comportamento geomecânico do maciço rochoso estudado. Dentre as variáveis

analisadas (x, y, z, litologia, alteração, fraturamento e RQD) a que melhor explicou o comportamento geomecânico do maciço rochoso dos subsetores do Extremo Norte da Mina de Vazante foi o RQD. Este resultado já era esperado, uma vez que, este índice traduz o resultado da associação entre o fraturamento e a alteração; duas outras variáveis também importantes.

Diante do resultado do RF foram elaborados modelos geomecânicos das variáveis RQD e CLASS para cada um dos três subsetores. Para tal foram utilizados o interpolador IDW e interpoladores geoestatísticos, as krigagens ordinária (KO) e simples (KS), donde foi possível observar que:

- O subsetor Norte_Central possui o maciço rochoso mais resistente, apresentando os maiores valores de RQD. Os modelos dos subsetores Norte_Sul e Norte_Norte apresentaram regiões com menores valores de RQD, sendo que para o Norte_Sul este comportamento foi observado até elevados valores de profundidade. A justificativa para os resultados obtidos está relacionada com a associação entre informações da litologia e da geologia estrutural. A presença da Falha Vazante, de lineamentos e de maior ou menor presença das fendas oriundas de dissolução das rochas carbonáticas, no interior nos grids de análise justificam os maiores ou menores valores do RQD observados.
- Em relação aos modelos da classificação RMR simplificada, notou-se que os resultados apresentam o mesmo padrão da variável RQD.
- Em ambos os modelos – RQD e CLASS – pôde-se observar alinhamentos de pontos com maiores ou menores valores com as direções NE-SW e NW-SE. De acordo com a literatura técnica, estas direções são condizentes com a Falha Vazante e com as estruturas que conduzem água para o interior dos maciços.

Também foi realizada comparações entre os modelos gerados pelo emprego das krigagens e com o IDW. A comparação entre as krigagens ordinária e simples para verificar qual das duas estava errando menos na predição dos resultados foi realizada pela comparação entre das médias e dos desvios-padrão dos modelos gerados por ambas as krigagens. Os resultados obtidos não permitiram determinar qual das duas apresentaram melhores resultados. Além disso, visando definir qual das duas krigagens apresentou melhores resultados, foi realizada a validação empregando o método k-fold, adotando k igual a 10. Todavia, não foi possível escolher, uma vez os valores dos erros foram muito próximos. Como a KO é mais

usual no setor mineral e em programas de geoestatística optou-se por apresentar os modelos obtidos com este tipo de krigagem. Já a comparação entre o IDW e a KO tem-se que qualitativamente houve uma individualização dos resultados desta quando confrontados com aquele. E quantitativamente a KO foi superior ao IDW.

A metodologia desenvolvida para confecção dos modelos geomecânicos multidimensionais, tanto para o IDW quanto para as krigagens, mostrou-se promissora. Além de possibilitar a visualização do ajuste do modelo matemático aos dados do variograma experimental, os modelos apresentaram resultados condizentes com os dados da geologia e da geologia estrutura regional, indicando uma boa conexão. Tem-se que a visualização dos modelos é excelente e superior a de outros programas. Contudo, a metodologia ainda, precisa implantar outros métodos de validação de baixo esforço computacional que não o k-fold para comparar os resultados obtidos pelas krigagens. Por fim, a interatividade dos resultados também é algo a se destacar, haja vista que foi possível, inclusive, analisar duas ou mais variáveis do banco de dados simultaneamente.

Contudo, para a classificação RMR simplificada faz-se necessário redistribuir os pesos a fim do resultado ser mais fidedigno com a realidade de campo. Além disso, tem-se que a classificação RMR simplificada necessita de uma validação em campo dos valores obtidos para o maciço rochosos estudado. Situação idêntica é a da classificação local. O modelo gerado para esta variável (CLASSLOCAL) usou como dados de entrada os dados vindos do banco de dados bruto, ou seja, não foi realizado nenhuma modificação nos valores apresentados para esta variável. Contudo, empregando a KO os subsetores Norte_Sul e Norte_Norte apresentaram efeito pepita puro, sugerindo que não há dependência espacial entre os valores da variável analisada. Resultado este extremamente questionável, visto que toda e qualquer classificação geomecânica varia no espaço do maciço analisado.

Por fim, recomenda-se que esta pesquisa seja continuada e que numa nova etapa os dados de geologia locais sejam disponibilizados e comparados com os resultados obtidos. Além disso, sugere-se que seja realizada uma validação in situ, ou seja, de posse do modelo interpolado ir a campo e verificar se o que foi modelado é representativo da situação observada. Alternativamente, pode-se, também, realizar o estudo em uma área em que já se tenha o modelo 3D disponível, permitindo comparar os resultados alcançados em termos quantitativos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AALIANVARI, A.; SOLTANI-MOHAMMADI, S.; RAHEMI, Z. Estimation of geomechanical parameters of tunnel route using geostatistical methods. **Geomechanics and Engineering**, v. 14, n. 5, p. 453–458, 2018.
- ACHILLEOS, G. Errors within the inverse distance weighted (IDW) interpolation procedure. **Geocarto International**, v. 23, n. 6, p. 429–449, 2008.
- ACHILLEOS, G. A. The Inverse Distance Weighted interpolation method and error propagation on mechanism - creating a DEM from an analogue topographical map. **Journal of Spatial Science**, v. 56, n. 2, p. 283–304, 2011.
- ANDRIOTTI, J. L. S. Notas de geoestatística. **Acta Geologica Leopodensia**, v. 24, n. 55, p. 3–14, 2002.
- ANDRIOTTI, J.L.S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo: Editora Unisinos, 2013.
- ANNELS, A. E.; DOMINY, S. C. Core recovery and quality: important factors in mineral resource estimation. **Applied Earth Science: IMM Transactions section B**, v. 112, n. 3, p. 305–312, 2003.
- ARAÚJO, E. E.; NASCIMENTO, G. C. S.; BESSA, V. Modelamento hidrogeológico regional em LEAPFROG/FEFLOW da região de VAZANTE, MG. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 19., 2016, Campinas. **Anais...**Campinas, 2016.
- ARMSTRONG, M. **Basic linear geostatistics**. 1998 ed. New York: Springer Berlin Heidelberg, 1989. 155p.
- AYALEW, L.; REIK, G.; BUSCH, W. Characterizing weathered rock masses—a geostatistical approach. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 39, n. 1, p. 105–114, 2002.
- BADDELEY, A.; RUBAK, E.; TURNER, R. (2015). Spatial Point Patterns: Methodology and Applications with R. London: Chapman and Hall/CRC Press, 2015. URL <http://www.crcpress.com/Spatial-Point-Patterns-Methodology-and-Applications-with-R/Baddeley-Rubak-Turner/9781482210200/>.
- BARTON, N.; LIEN, R; LUNDE, J. Engineering classification of rock masses of rock masses for the design of tunnel support. **Rock Mechanics**, v.6, n.4, p. 183-236, 1974.
- BHATTACHARYA, S.; GHAHFAROKHI, P.K.; CARR, T.R.; PANTALEONE, S. Application of predictive data analytics to model daily hydrocarbon production using petrophysical, geomechanical, fiber-optic, completions, and surface data: A case study from the Marcellus Shale

, North America. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 176, n. November 2018, p. 702–715, 2019.

BHERING, A.P. **Classificação do maciço rochoso e caracterização das brechas da mina subterrânea de Vazante – MG**. 2009. 185 p. Dissertação (Departamento Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

BIAU, G. Analysis of a Random Forests Model. **Jornal of Machine Learning Research**, v. 13, p. 1063–1095, 2012.

BIENIAWSKI, Z.T. Engineering classification of jointed rock masses. **Transactions of the South African Institution of Civil Engineers**, v.15, n.12. p. 335-344, 1973.

BIENIAWSKI, Z.T. **Engineering Rock Mass Classification: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering**, USA, 1989.

BILLAUX, D.; CHILES, J.P.; HESTIR, K.; LONG, J. Three-dimensional statistical modelling of a fractured rock mass - an example from the Fanay-Augères mine. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, v. 26, n. 3-4, p. 281-299, 1989.

BITTENCOURT, C.; REIS NETO, J. M. DO. O sistema cárstico de Vazante - carste em profundidade em metadolomitos do Grupo Vazante - MG. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 42, n. 1, p. 1–10, 2012.

BIVAND, R.; KEITT, T.; ROWLINGSON, B. (2019). rgdal: Bindings for the 'Geospatial' Data Abstraction Library. R package version 1.4-8. <https://CRAN.R-project.org/package=rgdal>

BIVAND, R.; LEWIN-KOH, N. (2019). maptools: Tools for Handling Spatial Objects. R package version 0.9-9. <https://CRAN.R-project.org/package=maptools>.

BIVAND, R.; RUNDEL, C. (2020). rgeos: Interface to Geometry Engine - Open Source ('GEOS'). R package version 0.5-3. <https://CRAN.R-project.org/package=rgeos>.

BLÖSCHL, G. Geostatistics for Environmental Scientists. **Vadose Zone Journal**, v.1, n. 2, p. 321, 2002.

BORRA, S.; CIACCIO, A. Di. Measuring the prediction error. A comparison of cross-validation, bootstrap and covariance penalty methods. **Computational Statistics & Data Analysis**, v. 54, n. 12, p. 2976-2989, 2010.

BREIMAN, L. Random forests. **Machine Learning**, v. 45, n. 1, p. 5–32, 2001.

BURMAN, P. A comparative study of ordinary cross-validation, r-foldcross-validation and the repeated learning-testing methods. **Biometrika**, v. 76, n. 3, p. 503-514, 1989.

CALLE, M. L.; URREA, V. Letter to the editor: Stability of Random Forest importance measures. **Briefings in Bioinformatics**, v. 12, n. 1, p. 86–89, 2011.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J.S. **Geoprocessamento para projetos ambientais**. V1, Online Book, São José dos Campos, INPE, 1998.

CAMPOS, Lucas Almeida. **Correlações entre classificações geomecânicas ajustadas, estudo de caso em maciços rochosos do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil**. 2018. 171 f. Dissertação (Magister Scientiae) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

CARMO, E.J.; RODRIGUES, D.D.; SANTOS, G.R. Avaliação dos interpoladores krigagem e topo to raster para geração de modelos digitais de elevação a partir de um “as built”. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 21, p.674-690, 2015.

CARVALHO, Hialo Muniz. **Aprendizado de Máquina voltado para Mineração de Dados : Árvores de Decisão**. 2014. 90 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Software) - Faculdade UnB Gama, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

CARVALHO JUNIOR, W. de; CALDERANO FILHO, B.; CHAGAS, C.da SILVA.; BHERING, S.B.; PEREIRA, N. R.; PINHEIRO, H.S.K. Regressão linear múltipla e modelo Random Forest para estimar a densidade do solo em áreas montanhosas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1428–1437, 2016.

CHARBEL, Paulo André. **Gerenciamento de risco aplicado à diluição de minério**. 2015. 448 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2015.

CHEN, W. et al. GIS-based landslide susceptibility evaluation using a novel hybrid integration approach of bivariate statistical based random forest method. **Catena**, v. 164, p. 135–149, 2018.

CHIESSI, V.; D'OREFICE, M.; MUGNOZZA, G.S.; VITALE, V.; CANNESE, C. Geological, geomechanical and geostatistical assessment of rockfall hazard in San Quirico Village (Abruzzo, Italy). **Geomorphology**, v. 119, n. 3–4, p. 147–161, 2010.

CHILÉS, J. Fractal and geostatistical method for modelling a fracture network. **Mathematical Geology**, v. 20, n. 6, p.467 – 479, 1988.

CHOI, Y.; LEE, C.I. An estimation of rock mass rating using 3D-indicator kriging approach with uncertainty assessment of rock mass classification. **In: Proceedings of the 11th congresso of the international Society for rock mechanics**, Lisbon, vol.2, 2007; p. 1285-88.

CHOI, Y.; YOON, S.; PARK, H. Tunneling analyst: a 3D GIS extension for rock mass classification and fault zone analysis in tunneling. **Computers and Geosciences**, v. 35, n., p. 1322-1333, 2009.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – CPRM/Serviço Geológico do Brasil. **Metalogenia das Províncias Minerais do Brasil: Distrito Zincífero de Vazante, MG – Estado de Minas Gerais: texto e mapa metalogenético, escala 1:75.000**. Paulo H.A.Dias, Marcelo de S. Marinho, Francisco T. Vilela, Marcus, P. Sotero, Caio A. Matos, Eduardo D. Marques, Orgs. Belo Horizonte: CPRM, 2015.

- CORREIA, Pedro. **Modelação e estimação, uma introdução à geoestatística**. Paraná, 2010.
- CUNHA, João Paulo Zanola. **Um estudo comparativo das técnicas de validação cruzada aplicadas a modelos mistos**. 2019. 59 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.
- CUTLER, A.; CUTLER, D. R.; STEVENS, J. R. Random Forests. In: ZHANG, C.; MA, Y. **Ensemble Machine Learning: Methods and Applications**. Edição 2012. Springer, New York, 2012. p. 157-175.
- DARDENE, M.A. The Brasilia Fold Belt. In: U.G. Cordani, E.J. Milani, A. Thomaz Filho & D.A. Campos. 2000. Tectonic evolution of South America. 31 st International Geological Congress, Rio de Janeiro, SBG. p. 231-263.
- DEERE, D.U; DEERE, D.W. **The rock quality designation (RQD) index in practice**. Rock classification system engineering purposes – ASTM STP 984. Ed. American Society for Testing and Materials, 1988.
- DONG, L-J; LI, X-B; PENG, K. Prediction of rockburst classification using Random Forest Learning. **Trans. Nonferrous Met. Soc. China**, v. 23, n. 2, p. 472–477, 2013.
- DOWD, P.; XU, C.; MARDIA, K.V.; FOWELL R.J. A comparison of methods for the stochastic simulation of rock fractures. **Mathematical Geology**, v. 39, n. 7, p. 697-714, 2007.
- EGAÑA, M.; ORTIZ, J. Assessment of rmr and its uncertainty by using geostatistical simulation in a mining project. **Journal of GeoEngineering**, v. 8, n. 3, p. 83-90, 2013.
- ELLEFMO, S. L.; EIDSVIK, Jo. Local and spatial joint frequency uncertainty and its application to rock mass characterization. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 42, n. 4, p. 667-688, 2009.
- EL-SAYED, E. O. Improving the Prediction Accuracy of Soil Mapping through Geostatistics. **International Journal of Geosciences**, v. 3, n. July, p. 574–590, 2012.
- EXADAKTYLOS, G.; STAVROPOULOU, M. A specific upscaling theory of rock mass parameters exhibiting spatial variability: Analytical relations and computational scheme. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 45, n. 7, p. 1102–1125, 2008.
- FABRÍCIO, J. F.; ABICHEQUER, L.A.; DE SOUZA, L.E.; OLIVEIRA NETO, R.; GONÇALVES, I.G. Análise e interpretação de parâmetros de qualidade de maciço para proposição de modelo geomecânico. **Revista Monografias Ambientais**, v. 14, n. 1972, p. 62–79, 2015.
- FERRARI, Federica. **Rock Mass Characterization and Spatial Estimation of Geomechanical Properties through Geostatistical Techniques**. 2013. 232 f. Tese (Doutorado em Ricerca in Scienze della Terra) - Università Degli Studi di Milano, 2013.

FERRARI, F.; APUANI, T.; GIANI, G. Rock Mass Rating spatial estimation by geostatistical analysis. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 70, n., p. 162-176, 2014.

FIGUEIREDO, Lucas Torrent. **Avaliação de estabilidade de escavações em meios descontínuos, a partir de testemunhos de sondagem da mina subterrânea de Vazante/MG**. 2016. 238 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2016.

FRIENDLY, M.; DALZELL, C.; MONKMAN, M.; MURPHY, D.; FOOT, V.; ZAKI-AZAT, J. (2019). Lahman: Sean 'Lahman' Baseball Database. R package version 7.0-1. <https://CRAN.R-project.org/package=Lahman>.

GARDIMAN JUNIOR, B. S.; MAGALHÃES, I.A.; DE FREITAS, C.A.A.; CECÍLIO, R.A. Análise de técnicas de interpolação para espacialização da precipitação pluvial na bacia do rio Itapemirim (ES) / Analysis of interpolation techniques for spatial rainfall distribution in river basin Itapemirim (ES). **Revista Ambientia**, v. 8, n. 1, p. 61–71, 2012.

GENTIER, S.; RISS, J.; ARCHAMBAULT, G.; FLAMAND, R.; HOPLINS, D. Influence of fracture geometry on shear behavior. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 37, n. 1–2, p. 161–174, 2000.

GIACOMIN, G.; DE CARVALHO, M.B.; DOS SANTOS, A. de P.; MEDEIROS, N. das G.; FERRAZ, A.S. Análise Comparativa entre métodos interpoladores de modelos de superfícies. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 66, n. 6, p. 1315–1329, 2014.

GIROLAMO NETO, Cesare Di. **Potencial de técnicas de mineração de dados para o mapeamento de áreas cafeeiras**. 2014. Monografia (referente a disciplina SER-300) - INPE, São José dos Campos, 2014. Disponível em: <http://wiki.dpi.inpe.br/lib/exe/fetch.php?media=ser300:alunos2014:cesare_monografia.pdf>. Acesso em: 04 Jul. 2020.

GOOVAERTS, P. **Geostatistics for natural resource evaluation**. New York: Oxford University Press, 1997. 496 p.

GROSJEAN, Ph. (2019). SciViews: A GUI API for R. UMONS, Mons, Belgium. URL <http://www.sciviews.org/SciViews-R>.

GUERRA, P. A. **Geoestatística Operacional**. Brasília: Ministério das Minas e Energia - Departamento Nacional de Produção Mineral, 1988.

GUMIAUX, C.; GAPAIS, D.; BRUM, J. Geostatistics applied to best-fit interpolation of orientation data. **Tectonophysics**, v. 376, n., p. 241-259, 2003.

HACK, R.; ORLIC, B.; OZMUTLU, S.; ZHU, S.; RENGERS, N. Three and more dimensional modelling in geo-engineering. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 65, n. 2, p. 143–153, 2006.

HADJIGEORGIOU, J. Where do the data come from? **Mining Technology**, v. 121, n. 4, p. 236–247, 2012.

HARRIS, J. R.; GRUNSKY, E. C. Predictive lithological mapping of Canada 's North using Random Forest classification applied to geophysical and geochemical data. **Computers and Geosciences**, v. 80, p. 9-25. 2015.

HENGL, T. A Practical guide to Geostatistical Mapping of Environmental Variables. **JRC Scientific and Technical Reports**. Office for Official Publication of the European Communities, Luxembourg, 2007.

HENGL, T. (2020). GSIF: Global Soil Information Facilities. R package version 0.5-5.1. <https://CRAN.R-project.org/package=GSIF>.

HENGL, T.; ROUDIER, P.; BEAUDETTE, D.; PEBESMA, E. (2015). plotKML: Scientific Visualization of Spatio-Temporal Data. *Journal of Statistical Software*, 63(5), 1-25. URL <http://www.jstatsoft.org/v63/i05/>.

HIJMANS, R.J. (2020). raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package version 3.1-5. <https://CRAN.R-project.org/package=raster>.

HOTHORN, T.; HORNIK, K.; ZEILEIS, A. (2006). Unbiased Recursive Partitioning: A Conditional Inference Framework. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 15(3), 651–674.

IKECHUKWU, M. N.; EBINNE, E.; IDORENYIN, U.; RAPHAEL, N.I. Accuracy Assessment and Comparative Analysis of IDW, Spline and Kriging in Spatial Interpolation of Landform (Topography): An Experimental Study. **Journal of Geographic Information System**, v. 9, n. 3, p. 354–371, 2017.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geoestatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561 p.

JAKOB, A. A. E.; YOUNG, A. F. O uso de métodos de interpolação espacial de dados nas análises sociodemográficas. In: Encontro Nacional de Estudos Populacionais, 15., 2006, Caxambu. **Anais...** Caxambu, 2006. p. 22.

JAKUBEC, J.; ESTERHUIZEN, G. S. Use of mining rock mass rating (MRMR) classification: industry experience. In: Workshop on Rock mass classification in underground mining, (ed. C. Mark et al.), NIOSH Information Circular, 2007. **Anais...** 2007. p. 73-78.

JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, C. J. **Mining Geostatistics**. New Jersey: The Blackburn Press, 1978. 610 p.

KARAMI, R.; AFZAL, P. Estimation of element distributions by combining artificial neural network and inverse distance weighted (IDW) based on lithogeochemical data in Kahang Porphyry Deposit, Central Iran. **Universal Journal of Geoscience**, v. 3, n. 2, p. 59–65, 2015.

KAUFMANN, O.; MARTIN, T. Reprint of “3D geological modelling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines” [Comput. Geosci. 34 (2008) 278-290]. **Computers and Geosciences**, v. 35, n. 1, p. 70–82, 2009.

KIM, J-H. Estimating classification error rate: Repeated cross-validation, repeated hold-out and bootstrap. **Computational Statistics & Data Analysis**, v. 53, n. 11, p. 3735-3745, 2009.

KOHAVI, R. Measuring the prediction error. a comparison of c. **Computational Statistics & Data Analysis**, v. 1, n., p. 2976–2989, 1995.

KOIKE, K. Development and application of 3D spatial modeling techniques for characterizing regional mechanical and hydraulic properties of rock masses. **International Journal of the JCRM**, v. 6, n. 1, p. 17–22, 2010.

KOMSTA, L.; NOVOMESTKY, F. (2015). moments: Moments, cumulants, skewness, kurtosis and related tests. R package version 0.14. <https://CRAN.R-project.org/package=moments>.

KRAVCHENKO, A.; BULLOCK, D. G. A Comparative Study of Interpolation Methods for Mapping Soil Properties. **Agronomy journal**, v. 91, n. 3, p. 393-400, 1999.

KUHN, M. (2020). caret: Classification and Regression Training. R package version 6.0-86. <https://CRAN.R-project.org/package=caret>.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo: Fundação Editora da UNESP, 1998. 256 p.

LA POINTE, P. R. Analysis of the spatial variation in rock mass properties through geostatistics. In: Proceedings of the 21st US rock mechanics symposium, 21., 1980, Estados Unidos. **Anais ...**1980. p. 570-580.

LEAPFROG. **Leapfrog Geo user manual**, 2017.

LEISCH, F.; DIMITRIADOU, E. (2010). mlbench: Machine Learning Benchmark Problems. R package version 2.1-1.

LEMOS, Mariana Gazieri. **Caracterização geológica e tecnológica do minério de zinco do Extremo Norte da Mina de Vazante, Minas Gerais**. 2011. 193 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

LI, B.; YANG, G.; WAN, R.; HORMANN, G.; HUANG, J.; FOHRER, N.; ZHANG, L. Combining multivariate statistical techniques and random forests model to assess and diagnose the trophic status of Poyang Lake in China. **Ecological Indicators**, v. 83, n. April, p. 74–83, 2017.

LI, J.; HEAP, A. D. A review of spatial interpolation methods for environmental scientists. **Canberra: Geoscience Australia**, v. 137, n. 2008/23, p. 154, 2008.

LIAW; WIENER, M. (2002). Classification and Regression by randomForest. R News 2(3), 18--22.

LICHTENSTERN, Andreas. **Kriging methods in spatial statistics**. 2013. 105 f. Bachelor's Thesis - Department of Mathematics, Technische Universität München, Garching, 2013.

LIGGES, U.; MÄCHLER, M. (2003). Scatterplot3d - an R Package for Visualizing Multivariate Data. **Journal of Statistical Software**, 8(11), 1-20.

LIN, Y.; JEON, Y. Random forests and adaptive nearest neighbors. **Journal of the American Statistical Association**, v. 101, n. 474, p. 578–590, 2006.

LONG, J.; BILLAUX, D. From field data to fracture network modelling: an example incorporating spatial structure. **Water Resour. Res.**, v. 23, n. 7, p. 1201-1216, 1987.

MAGALHÃES, M.N.; LIMA, A.C.P. Noções de probabilidade e estatística. São Paulo: Edusp, 2010.

MARCUZZO, F. F. N.; ANDRADE, L. R. DE; MELO, D. C. R. Métodos de Interpolação Matemática no Mapeamento de Chuvas do Estado do Mato Grosso. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 4, p. 1275–1291, 2011.

MATIN, S.S.; FARAHZADI, L.; MAKAREMI, S.; CHELGANI, S.C.; SATTARI, G. Variable selection and prediction of uniaxial compressive strength and modulus of elasticity by random forest. **Applied Soft Computing Journal**, v. 70, p. 980–987, 2018.

MEYER, D.; DIMITRIADOU, E.; HORNIK, K.; WEINGESSEL, A.; LEISCH, F.; CHANG, C.; LIN, C. (2019). e1071: Misc Functions of the Department of Statistics, Probability Theory Group (Formerly:E1071), TU Wien. R package version 1.7-3. <https://CRAN.R-project.org/package=e1071>.

MICROSOFT CORPORATION; WESTON, S. (2019). doParallel: Foreach Parallel Adaptor for the 'parallel' Package. R package version 1.0.15. <https://CRAN.R-project.org/package=doParallel>.

MING, J.; PAN, M.; QU, H.; GE, Z. GIS: A 3D geological multi-body modeling system from netty cross-sections with topology. **Computers and Geosciences**, v. 36, n. 6, p. 756–767, 2010.

MIRANDA, Gisele Horta Barroso. **Análise de amostragem e interpolação na geração de MDE**. 2017. 65f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2017.

MOHAMMADY, M.; POURGHASEMI, H. R.; AMIRI, M. Land subsidence susceptibility assessment using random forest machine learning algorithm. **Environmental Earth Sciences**, v. 78, n. 16, p. 1–12, 2019.

MORAIS, Rafael Lima de. **Uso de Árvores Aleatórias para Classificação Sensorial de Arroz Cozido** Rafael Lima de Moraes. 2017, 72 f. Monografia (Bacharelado em Estatística) – In

stituto de Exatas, Departamento de Estatística, Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2017.

MPANZA, Mbalenhle. **A Comparison of Ordinary and Simple Kriging on a PGE Resource in the Eastern Limb of the Bushveld Complex**. 2015. 129 f. Dissertação (Master of Science in Engineering) - Faculty of Engineering and the Built Environment, University of the Witwatersrand, Johannesburg 2015.

NEVES, L.P. **Características descritivas e genéticas do depósito de Zn-Pb Morro Agudo, Grupo Vazante**. 2011. 186p. Dissertação (Instituto de Geociências) – Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

OH, S.; CHUNG, H.; LEE, D. K. Geostatistical integration of MT and borehole data for RMR evaluation. **Environmental Geology**, v. 46, n. 8 spec. iss., p. 1070-1078, 2004.

OLEA, R. A. **Geostatistics for engineers and earth scientists**. Kansas: Kluwer Academic Publishers, 1999.

OLIVER, M. A.; WEBSTER, R. A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. **Catena**, v. 113, p. 56–69, 2014.

ÖZTÜRK, C. A.; NASUF, E. Geostatistical assessment of rock zones for tunneling. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 17, n. 3, p. 275–285, 2002.

ÖZTÜRK, C. A.; SIMDI, E. Geostatistical investigation of geotechnical and constructional properties in Kadikoy-Kartal subway, Turkey. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 41, n. 1, p. 35–45, 2014.

PATIAS, J.; FERNANDES, D. DE O.; YAMAMOTO, J. K. Modelagem geológica e geotécnica da fundação integrada com dados piezométricos. In: XXXI Seminário Nacional de Grandes Barragens, Comitê de Barragens. 2017. Belo Horizonte, Minas Gerais. **Anais**. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil: Comitê Brasileiro de Barragens, 2017. 1 CD-ROM.

PEBESMA, E.J. (2004). Multivariable geostatistics in S: the gstat package. *Computers & Geosciences*, 30: 683-691.

PEBESMA, E. J. (2012). spacetime: Spatio-Temporal Data in R. *Journal of Statistical Software*, 51(7), 1-30. URL <http://www.jstatsoft.org/v51/i07/>.

PEBESMA, E.J.; BIVAND, R.S. (2005). Classes and methods for spatial data in R. *R News* 5 (2), <https://cran.r-project.org/doc/Rnews/>.

PELLS, P.J.; BIENIAWSKI, Z.T.; HENCHER, S.R.; PELLIS, S.E. Rock quality designation (RQD): Time to rest in peace. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 54, n. 6, p. 825-834, 2017.

PINHEIRO, M.; VALLEJOS, J.; MIRANDA, T.; EMERY, X. Geostatistical simulation to map the spatial heterogeneity of geomechanical parameters: A case study with rock mass rating. **Engineering Geology**, v. 205, p. 93–103, 2016.

PRIEST, S.D.; HUDSON, J.A. Discontinuity spanings in rock. **J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech.** Abstr. Pergamon Press – Vol. 13, p. 135-148, 1976.

R Core Team (2017). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.

RAFFIE, A.; VINCHES, M. Application of geostatistical characteristics of rock mass fracture systems in 3D model generation. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 45, n. 4, p. 644-652, 2008.

RAMÍREZ, José Enrique Gutierrez. **Variabilidade espacial do parâmetro geomecânico RQD no Depósito Mineral Animas - Peru**. 2009. 167 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

REVELLE, W. (2019) psych: Procedures for Personality and Psychological Research, Northwestern University, Evanston, Illinois, USA, <https://CRAN.R-project.org/package=psych> Versão = 1.9.12.

RIBEIRO Jr, P. J.; DIGGLE, P.J.; CHRISTENSEN, O.; SCHLATHER, M.; BIVAND, R.; RIPLEY, B. (2020). geoR: Analysis of Geostatistical Data. R package version 1.8-1. <https://CRAN.R-project.org/package=geoR>

RODRIGUES, Marco Antônio dos Santos. **Árvores de Classificação**. 2004/2005. 34 f. Monografia – Departamento de Matemática, Universidade dos Açores, Ponta Delgada, 2005.

SAJID, A. H.; RUDRA, R. P.; PARKIN, G. Systematic evaluation of kriging and inverse distance weighting methods for spatial analysis of soil bulk density. **Canadian Biosystems Engineering / Le Genie des biosystems au Canada**, v. 55, n. 1983, p. 1–13, 2013.

SANTOS, Daniel Dantas Nascimento. **Extração de características de RNAs não-codificados longos utilizando o algoritmo Random Forest**. 2016. 118 f. Monografia (Bacharelado e m Engenharia da Computação) – Instituto de Ciências Exatas, Departamento de Ciência da Computação, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

SANTOS, V.; DA SILVA, P. F.; BRITO, M. G. Estimating RMR values for underground excavations in a rock mass. **Minerals**, v. 8, n. 3, p. 1–15, 2018.

SARAIVA, G. S.; BONOMO, R.; DE SOUZA, J. M. Avaliação de interpoladores geoestatísticos e determinísticos da evapotranspiração de referência diária para o estado do Espírito Santo. **Revista Agro@Mambiente on-Line**, v. 11, n. 1, p. 21, 2017.

SARKAR, D. (2008) Lattice: Multivariate Data Visualization with R. Springer, New York. ISBN 978-0-387-75968-5.

SCHLOERKE, B.; COOK, D.; LARMARANGE, J.; BRIATTE, F.; MARBACH, M.; THOEN, E.; ELBER, A.; TOOMET, O.; CROWLEY, J.; HOFMANN, H.; VICKHA, H. (2020). GG

ally: Extension to 'ggplot2'. R package version 1.5.0. <https://CRAN.R-project.org/package=Gally>.

SEGURET, S. A.; GUAJARDO, C. Geostatistical evaluation of rock-quality designation and its link with linear fracture frequency. **Proceedings of IAMG 2015 - 17th Annual Conference of the International Association for Mathematical Geosciences**, n. September, p. 1043–1051, 2015.

SHAHAB, S.; PEYMAN, A.; PARVIZ, M.; MANIA, Q. Comparison between ordinary kriging (OK) and inverse distance weighted (IDW) based on estimation error. Case study: Dardevey iron ore deposit, NE Iran. **Arab J Geosci**, v.7, n.9, p.3693-3704, 2013.

SIEVERT, C. (2020). Interactive Web-Based Data Visualization with R, plotly, and shiny. Chapman and Hall/CRC Florida, 2020.

SIGNORELL, A. et al. (2020). DescTools: Tools for descriptive statistics. R package version 0.99.34.

SILVA, S. A.; ALVES, A.I.; SOUZA, G.S.; SILVA, M. A.; OLIVEIRA, R.B.; LIMA, J.S.S. Krigem ordinária e inverso do quadrado da distância para interpolação de atributos do solo. In: Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, 5., 2007. **Anais ...**São José dos Campos: UNIVAP, 2007.

SOUZA, R. A.; CABRAL, I. E. Incorporation of geological uncertainty in pit optimization with geostatistics simulation. **REM International Engineering Journal**, v. 70, n. 3, p. 325–329, 2017.

SOUFI, A.; BAHI, L.; QUADIF, L. Contribution of geostatistical analysis for the assessment of RMR and geomechanical parameters. **ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 13, n. 24, p. 9359-9374, 2018.

STAVROPOULOU, M.; EXADAKTYLOS, G.; SARATIS, G. A combined three-dimensional geological-geostatistical-numerical model of underground excavations in rock. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 40, p. 213-243, 2007.

TAVCHANDJIAN, O.; ROULEAU, A.; ARCHAMBAULT, G.; DAIGNEAULT, R.; MARCOTTE, D. Geostatistical analysis of fractures in shear zones in the Chibougamau area: applications to structural geology. **Tectonophysics**, v. 269, n. 1–2, p. 51–63, 1997.

THERNEAU, T.; ATKINSON, B. (2019). rpart: Recursive Partitioning and Regression Trees. R package version 4.1-15. <https://CRAN.R-project.org/package=rpart>.

TYRIAKI, B. Predicting intact rock strength for mechanical excavation using multivariate statistics, artificial neural networks, and regression trees. **Engineering Geology**, v. 99, n. 1-2, p. 51-60, 2008.

- VAIDYANATHAN, R.; XIE, Y.; ALLAIRE, J.J.; CHENG, J.; SIEVERT, C. (2019). htmlwidgets: HTML Widgets for R. R package version 1.5.1. <https://CRAN.R-project.org/package=htmlwidgets>.
- VENABLES, W. N.; RIPLEY, B. D. (2002) Modern Applied Statistics with S. Fourth Edition . Springer, New York. ISBN 0-387-95457-0.
- VERIKAS, A.; GELZINIS, A.; BACAUSKIENE, M. Mining data with random forests: A survey and results of new tests. **Pattern Recognition**, v. 44, n. 2, p. 330–349, 2011.
- VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 1, n. August, p. 1–54, 2000.
- VOTORANTIM METAIS. **Classificação geomecânica: Mina Subterrânea Vazante**. Vazante: relatório interno, 2013, 31 p.
- VOTORANTIM METAIS Zinco comunicação pessoal.
- WACKERNAGEL, H. **Multivariate geostatistics: an introduction with applications**. 3. ed. Fontainebleau: Springer Science & Business Media, 2003. 388 p.
- WEBBER, T.; COSTA, J. F. C. L.; SALVADORETTI, P. Using borehole geophysical data as soft information in indicator kriging for coal quality estimation. **International Journal of Coal Geology**, v. 112, p. 67–75, 2013.
- WEI, T.; SIMKO, V. (2017). R package "corrplot": Visualization of a Correlation Matrix (Version 0.84). Available from <https://github.com/taiyun/corrplot>.
- WICKHAM, H. (2016) ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York, 2016.
- WICKHAM, H. (2019). nycflights13: Flights that Departed NYC in 2013. R package version 1.0.1. <https://CRAN.R-project.org/package=nycflights13>.
- WICKHAM, H.; BRYAN, J. (2019). readxl: Read Excel Files. R package version 1.3.1. <https://CRAN.R-project.org/package=readxl>.
- WICKHAM, H.; FRANÇOIS, R.; HENRY, L.; MU, K. (2020). dplyr: A Grammar of Data Manipulation. R package version 0.8.5. <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>.
- WRIGHT, M. N.; ZIEGLER, A. (2017). ranger: A Fast Implementation of Random Forests for High Dimensional Data in C++ and R. *Journal of Statistical Software*, 77(1), 1-17. doi:10.18637/jss.v077.i01.
- XIE, Q.; PENG, K. Space-Time Distribution Laws of Tunnel Excavation Damaged Zones (EDZs) in Deep Mines and EDZ Prediction Modeling by Random Forest Regression. **Advances in Civil Engineering**, v. 2019, 2019.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: Conceitos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2013. 215 p.

YAMAMOTO, J. K. **Apostila curso do Geokrige**, 2017.

YOU, K.; LEE, J. Estimation of rock mass classes using the 3-dimensional multiple indicator kriging technique. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 21, n. 3-4, p. 229, 2006.

YU, Y. F.; MOSTIN, G.R. Spatial correlation of rock joints. In: K. S. LI; S. -C. R. Lo. **Probabilistic methods in geotechnical engineering**. Camberra: Balkema, 1993, p. 241-255.

ZAIMES, G. N.; GOUNARIDIS, D.; SYMEONAKIS, E. Assessing the impact of dams on riparian and deltaic vegetation using remotely-sensed vegetation indices and Random Forests modelling. **Ecological Indicators**, v. 103, p. 630–641, 2019.

ZHU, L.; LI, M.; LI, C.; SHANG, J.; CHEN, G.; ZHANG, B.; WANG, X. Coupled modeling between geological structure fields and property parameter fields in 3D engineering geological space. **Engineering Geology**, v. 167, p. 105–116, 2013.

ANEXOS

ANEXO I – GEOLOGICAL - GEOTECHNICAL CHARACTERIZATION OF DIFFERENT LITHOTYPES IN AN UNDERGROUND MINE

Geosciences
Geociências

Geological - geotechnical characterization of different lithotypes in an underground mine

<http://dx.doi.org/10.1590/0370-44672020740049>

Luana Claudia Pereira^{1,2}

<https://orcid.org/0000-0001-7275-984X>

Douglas José Coelho^{1,3}

<https://orcid.org/0000-0003-4447-9300>

Archange Michael Ilambwetsi^{1,4}

<https://orcid.org/0000-0001-5505-6085>

Tatiane Robaina R. de Carvalho^{1,5}

<https://orcid.org/0000-0003-3561-0653>

Pablo de Azevedo Rocha^{1,6}

<https://orcid.org/0000-0001-9581-9622>

Eduardo Antonio Gomes Marques^{1,7}

<https://orcid.org/0000-0002-3476-8558>

¹Universidade Federal de Viçosa - UFV, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas (CCE), Departamento de Engenharia Civil, Viçosa - Minas Gerais - Brasil.

E-mails:

²luanac_pereira@hotmail.com, luanac.pereira@ufv.com.

³douglascoelho@outlook.com, ⁴archange2@gmail.com.

⁵tatianemcarvalho@gmail.com, ⁶pab_zulu@yahoo.com.br.

⁷emarques@ufv.br

Abstract

A mineralogical, geological and geotechnical characterization of several rock types (phyllite, dolomite, breccia and marl) from an underground mine site aimed, among other things, to identify its mineral composition and to provide parameters to support the understanding of rock mass behavior. For this purpose, it was possible to perform laboratory and in situ tests or use existing empirical correlations. In this manuscript, the results of the following laboratory tests are presented and analysed - physical indices, point load test, Schmidt Hammer, uniaxial compression strength, wave propagation, micropetrographic description and X-ray diffraction. It was verified that the results obtained are consistent with other studies carried out in the region and also with results from the technical literature for similar lithotypes. Finally, the results contributed to improve the existing database on correlations among different trials.

Keywords: metamorphic rocks, carbonatic rocks, geological-geotechnical characterization.

ANEXO II – CONSTRUÇÃO DE UM MODELO GEOMECÂNICO 3D ATRAVÉS DO PROGRAMA LEAPFROG GEO (Publicado no 16 CNG_Portugal)

Pereira, Luana Claudia; *Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, luanacpereira@ufv.br*
Côelho, Douglas; *Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, douglascoelho@outlook.com*
Marques, Eduardo Antonio Gomes; *Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, emarques@ufv.br*
Santos, Gerson Rodrigues dos; *Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, gerson.santos@ufv.br*

RESUMO

O entendimento do comportamento de um maciço rochoso requer o conhecimento de seus parâmetros geomecânicos que são obtidos *in situ* ou através de ensaios laboratoriais. Todavia, a informação adquirida é pontual, a partir de testemunhos de sondagem ou mapeamento de campo. Entender e representar a variabilidade espacial desses parâmetros, através de modelos geomecânicos 3D, ainda é um desafio para a área de mecânica das rochas. O programa Leapfrog Geo foi utilizado para construção de um modelo geomecânico de um setor de uma mina subterrânea no Brasil. O Leapfrog Geo, segundo Gouveia *et al.* (2015), faz uso da modelagem implícita, na qual gera-se, de maneira fácil e rápida, superfícies a partir de um conjunto de informações descritas a partir apenas da função de base radial. Foram utilizados 156 furos de sondagem para construção do modelo 3D, sendo que as seguintes propriedades foram consideradas: litologia, RQD, recuperação, alteração, fraturamento, classificação geomecânica local e a RMR simplificada. Após a construção do modelo foi possível obter a espacialização das informações pontuais com visualização de boa qualidade e, consequentemente, inferir sobre o comportamento do maciço. Todavia, as ferramentas geoestatísticas empregadas para realização das interpolações das propriedades citadas possuem deficiências, como por exemplo, a impossibilidade de visualização e ajuste do variograma. Estas limitações nas interpolações podem acarretar em um modelo 3D não fidedigno às condições observadas em campo em que tem-se um entendimento equivocado sobre as condições geomecânicas reais do maciço rochoso estudado.