

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais -
PPGEM

ESTIMATIVA DE QUALIDADE DE CARVÃO USANDO KRIGAGEM DOS INDICADORES
APLICADOS A DADOS OBTIDOS POR PERFILAGEM GEOFÍSICA

Tiago Webber

DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA

Porto Alegre
2008

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais -
PPGEM

ESTIMATIVA DE QUALIDADE DE CARVÃO USANDO KRIGAGEM DOS INDICADORES
APLICADOS A DADOS OBTIDOS POR PERFILAGEM GEOFÍSICA

Tiago Webber
Engenheiro de Minas

Trabalho realizado no Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa e Tecnologia Mineral

Porto Alegre
2008

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

Orientador:

Prof. Dr. João Felipe Coimbra Leite Costa

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Jair Carlos Koppe (DEMIN/UFRGS)

Geól. Dr. Diniz Tamantini Ribeiro (Vale)

Prof. Dr. André Cezar Zingano (DEMIN/UFRGS)

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGEM

“The processes that actually do create an ore deposit, a petroleum reservoir or a hazardous waste site are certainly extremely complicated, and our understanding of them may be so poor that their complexity appears as random behavior to us, but this does not mean that they are random; it simply means that we are ignorant.”

E. H. Isaaks & R. M. Srivastava

Aos meus pais Regina e Dolar (in memoriam)
e irmãos Rosana e Daniel
e à minha querida Raquel pelo apoio e amor incondicionais

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. João Felipe C. L. Costa, pela orientação na elaboração desse trabalho, pela disposição, oportunidades de crescimento profissional e principalmente pelo seu interesse no crescimento não só meu, mas de todos seus alunos.

Ao Prof. Dr. Paulo Salvadorette pelas valiosas contribuições para evolução e crescimento deste trabalho e pela parceria em diversas saídas de campo.

Ao Engenheiro de Minas Leandro José de Oliveira (Diretor) por ter a solução para quase tudo.

À UFRGS e à Escola de Engenharia por propiciarem condições para o ensino e desenvolvimento de trabalhos de pesquisa.

Ao Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro (LPM), pelo aprendizado e prática em métodos computacionais aplicados em geologia e mineração e pela oportunidade de aplicar os conhecimentos adquiridos.

A todos os colegas de laboratório, especialmente Diego Marques, Elves, Leandro Koppe, Vanessa Koppe, Maria Noel e Luis Eduardo, que direta ou indiretamente contribuíram na elaboração deste trabalho. Claro que não posso deixar de agradecer ao Vinicius.

A Copelmi Mineração, principalmente aos Engenheiros Adolfo, Alexandre, Feijó e Ana Paula e ao Geólogo Gustavo Bastiani, pelo apoio e disponibilização de importantes informações.

Ao Prof. José Tullio Moro e toda a equipe do Serviço de Proteção Radiológica (SPR) pelo apoio nos trabalhos que envolveram materiais radioativos.

Ao Prof. Wilton Pereira da Silva da Universidade Federal de Campina Grande por importantes contribuições para a minha compreensão sobre ajustes matemáticos.

À CAPES pelo auxílio financeiro.

À minha família pelo apoio e força para seguir adiante.

À minha amada Raquel Kirst que sempre esteve presente e tolerante em todos os bons e maus momentos.

À Deus, pela vida e vontade de aprender mais e mais.

SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas.....	xxviii
Resumo.....	xxxii
Abstract.....	xxxiv
Capítulo 1.....	1
Introdução.....	1
1.1 Estado da Arte	3
1.1.1 Perfilagem Geofísica.....	3
1.1.2 Geoestatística	5
1.2 Objetivos dessa Dissertação.....	6
1.2.1 Objetivos Específicos	6
1.3 Etapas.....	7
1.4 Organização dessa Dissertação.....	8
Capítulo 2.....	9
Fundamentos de Perfilagem Geofísica.....	9
2.1 Conceitos Básicos.....	12
2.1.1 Volume de Investigação.....	12
2.1.2 Profundidade de Investigação	13
2.1.3 Resolução Vertical.....	14
2.1.4 Colimação.....	14
2.1.5 Efeito de Poço.....	15
2.2 Perfilagem Elétrica	16
2.2.1 Resistência e Resistividade	16
2.2.2 Influência da Litologia.....	18
2.2.3 Princípio de Funcionamento das Sondas de Resistividade.....	19

2.2.3.1 Sonda de Resistividade Pontual.....	20
2.2.3.2 Sonda de Resistividade com Focalizadores.....	21
2.3 Física Nuclear Básica para Aplicação em Perfilagem Geofísica	23
2.3.1 Radiação Nuclear.....	23
2.3.1.1 Decaimento Radioativo	24
2.3.1.2 Interação de Feixe Radioativo	25
2.3.2 Radiação Gama	26
2.3.2.1 Interação de Raios Gama com o Meio	26
2.3.2.1.1 Efeito Fotoelétrico.....	27
2.3.2.1.2 Espalhamento Compton	28
2.3.2.1.3 Produção de Pares.....	29
2.3.2.2 Atenuação de Raios Gama	29
2.4 Perfilagem Geofísica Nuclear	31
2.4.1 Detectores.....	31
2.4.1.1 Cintilômetros de Iodeto de Sódio.....	32
2.4.2 Unidades de Medida.....	32
2.4.2.1 Contagens Por Segundo.....	32
2.4.2.2 API	32
2.4.3 Perfilagem Geofísica Nuclear Passiva: Gama Natural.....	33
2.4.3.1 Fontes de Radiação Natural.....	34
2.4.3.1.1 Gama Natural em Formações Carboníferas	35
2.4.4 Perfilagem Geofísica Nuclear Ativa: Gama Retroespalhado	36
2.4.4.1 Princípio de Funcionamento.....	36
Capítulo 3.....	43
Krigagem Não Linear, Krigagem dos Indicadores e uso de Dados com Limites de Restrição	43

3.1 Krigagem.....	43
3.2 Krigagem Não Linear.....	44
3.3 Krigagem Dos Indicadores (KI)	45
3.4 Distribuição dos Indicadores.....	46
3.4.1 Dados Primários.....	47
3.4.2 Dados com Limites de Restrição	47
3.5 Medidas de Continuidade e Variabilidade Espacial Aplicadas a Indicadores.....	48
3.5.1 Função de Covariância dos Indicadores	48
3.5.2 Correlograma dos Indicadores	49
3.5.3 Semivariograma dos Indicadores.....	49
3.5.4 Interpretação Gráfica.....	49
3.6 Estimando através da Krigagem de Indicadores.....	50
3.6.1 Krigagem Simples dos Indicadores (KSI).....	51
3.6.2 Krigagem Ordinária dos Indicadores (KOI)	52
3.6.3 Krigagem dos Indicadores com a Mediana (KIm)	55
3.7 Valor Médio de z_k através de Probabilidades Condicionais	55
Capítulo 4.....	57
Área de Estudo, Dados de Sondagem e Perfilagem Geofísica	57
4.1 Área de Estudo	57
4.1.1 Localização	57
4.1.2 Geologia	58
4.1.2.1 Geomorfologia e Geologia Regional	58
4.1.2.2 Geologia Local.....	60
4.2 Sondagem com Recuperação de Testemunhos.....	65
4.3 Execução da Perfilagem Geofísica.....	67
4.3.1 Coleta dos Dados por Perfilagem Geofísica.....	68

4.3.1.1 Sonda GLOG® - <i>Focussed Electric (Guard) Log Sonde</i>	68
4.3.1.2 Sonda SWDS® - <i>Sidewall Density Sonde</i>	70
4.4 Tratamento dos Dados	73
4.4.1 Dados de Análise de Recuperação de Testemunho de Sondagem	73
4.4.1.1 Determinação da Densidade (ρ).....	74
4.4.1.2 Determinação do Teor de Cinzas (<i>Cz</i>).....	78
4.4.2 Tratamento dos Dados Obtidos Por Perfilagem Geofísica.....	87
4.4.3 Conciliação entre Dados de Perfilagem Geofísica e Sondagem	89
4.5 Análise dos Dados.....	94
4.5.1 Cenário Real/Cenário Hipotético	94
4.5.2 Construção do Banco de Dados Real.....	97
4.5.3 Construção do Banco de Dados Hipotético	100
4.5.3.1 Banco de Dados Primários (<i>Hard Data</i>).....	100
4.5.3.2 Banco de Dados Secundário (<i>Soft Data</i>)	101
Capítulo 5.....	119
Estudo de Caso	119
5.1 Análise Estatística.....	119
5.1.1 Agrupamento e Desagrupamento	120
5.1.2 Camada S.....	123
5.1.3 Camada M1.....	123
5.1.4 Camada M2.....	124
5.1.5 Camada I1	125
5.2 Modelagem Geoestatística	125
5.2.1 Continuidade Espacial dos Valores Originais dos Atributos	130
5.2.1.1 Camada S.....	130
5.3.1.2 Camada M1	132

5.2.1.3 Camada M2	134
5.2.1.4 Camada I1.....	136
5.2.2 Continuidade Espacial dos Atributos Codificados por Indicadores	138
5.2.2.1 Definição dos Limites z_k e Distribuição dos Indicadores.....	139
5.2.2.2 Camada S.....	142
5.2.2.3 Camada M1	145
5.2.2.4 Camada M2	148
5.2.2.5 Camada I1.....	151
5.3 Estimativas	154
5.3.1 Krigagem Ordinária.....	156
5.3.2 Krigagem dos Indicadores com a Mediana.....	162
5.3.2.1 Camada S.....	163
5.3.2.2 Camada M1	173
5.3.2.3 Camada M2	182
5.3.2.4 Camada I1.....	192
5.4 Considerações Finais.....	202
Capítulo 6.....	205
Conclusões e Recomendações	205
6.1 Conclusões	205
6.2 Recomendações para os Próximos Trabalhos.....	208
Referências Bibliográficas.....	209
ANEXO A.....	214
Perfis geofísicos e descrições litológicas.....	214

ANEXO B.....	219
Modelos dos semivariogramas usados nas estimativas por KIm, obtidos a partir das proporções dos parâmetros do modelo do semivariograma médio ou mediano	219
ANEXO C.....	228
Especificações do equipamento utilizado para realização do trabalho – Fabricante <i>Robertson Geologging Limited</i>	228

Lista de Figuras

Figura 2.1: Exemplo de representação gráfica de um perfil geofísico de poço.....	9
Figura 2.2: Representação em forma de texto de um perfil de poço (Copelmi Mineração Ltda.).....	10
Figura 2.3: Exemplo da execução da perfilagem geofísica (figura ilustrativa e sem escala) (Oliveira, 2005).....	11
Figura 2.4: Três importantes conceitos da perfilagem geofísica (Oliveira, 2005).....	12
Figura 2.5: Exemplo de um volume de investigação de forma esférica.....	13
Figura 2.6: Resolução vertical em uma sonda com volume de investigação esférico (Oliveira, 2005).....	14
Figura 2.7: Efeito de diferentes colimações no volume de investigação e profundidade de investigação.....	15
Figura 2.8: Três efeitos de poço que alteram o registro do parâmetro lido (Oliveira, 2005).....	16
Figura 2.9: Exemplo do volume (de investigação da resistência) (Oliveira, 2005).....	17
Figura 2.10: Diagrama esquemático do equipamento de perfilagem de resistência pontual (Oliveira, 2005).....	21
Figura 2.11: A esquerda é apresentada a distribuição dos eletrodos na sonda e a direita é mostrado o volume de investigação (Oliveira, 2005).	22
Figura 2.12: Linhas equipotenciais e de corrente em sondas para medir a resistividade com focalizadores (Oliveira, 2005).	22

Figura 2.13: Exemplo da penetração dos três tipos de radiação citados.....	23
Figura 2.14: Fluxo de radiação atravessando um bloco.....	25
Figura 2.15: Tipo de interação presente entre raios gama e a matéria dependendo da energia do raio gama e número atômico (adaptado de Evans, 1967).	27
Figura 2.16: Efeito fotoelétrico (adaptado de Hearst et al., 2000).	27
Figura 2.17: Espalhamento Compton (adaptado de Hearst et al., 2000).....	29
Figura 2.18: Formação de pares (adaptado de Hearst et al., 2000).	29
Figura 2.19: Comportamento do coeficiente de atenuação de massa para o alumínio variando com a energia do raio gama incidente(Ellis & Singer, 2007).	31
Figura 2.20: Exemplo de um registro de emissão de radiação gama natural medido em API (escala do perfil variando de 0 a 300 API).....	35
Figura 2.21: Valores médios de emissão de radiação gama natural para algumas formações.	36
Figura 2.22: Sonda composta de fonte radioativa, cinco cintilômetros e braço mecânico (adaptado de Mathis & Mickael, 1997).....	37
Figura 2.23: Visualização do fenômeno de medida de radiação retroespalhada na perfilagem geofísica.	38
Figura 2.24: Função de resposta característica para sondas de perfil de radiação gama retroespalhada para materiais de diversas densidades (Hofmann et al., 1982).....	39
Figura 2.25: Valores médios de densidade natural para algumas formações.	41

Figura 2.26: Exemplo de um perfil geofísico obtido com a sonda de radiação gama retroespalhada.....	42
Figura 3.1: Interpretação gráfica das estatísticas espaciais dos indicadores (adaptado de Goovaerts, 1997).....	50
Figura 3.2: Exemplo da aplicação da KI: 3.2a mostra os dados originais, 3.2b apresenta o semivariograma de cada limite e 3.2c mostra o resultado das estimativas (adaptado de Goovaerts, 1997).....	54
Figura 4.1: Localização da área de estudo.....	58
Figura 4.2: Mapa geológico da região do baixo Jacuí com localização da área B3.....	59
Figura 4.3: Mapa geológico local.	62
Figura 4.4: Perfil geológico tipo observado na Área B3.	63
Figura 4.5: Localização das sondagens com recuperação de testemunhos.....	65
Figura 4.6: Perfuratriz Sullivan 22 usada para a execução dos furos de sondagem.....	66
Figura 4.7: Recuperação de testemunho de sondagem disposto na caixa.	67
Figura 4.8: Localização dos furos de sondagem perfilados.	67
Figura 4.9: Esboço da sonda GLOG®.	69
Figura 4.10: Sonda GLOG® sendo introduzida no furo de sondagem.....	69
Figura 4.11: Exemplo do perfil obtido com a sonda GLOG®.....	70
Figura 4.12: Esboço da sonda SWDS® detalhando a região dos cintilômetros.	71

Figura 4.13: Acoplamento da fonte radioativa na sonda SWDS®.....	71
Figura 4.14: Introdução da sonda SWDS® no furo de sondagem.....	72
Figura 4.15: Exemplo do perfil obtido com a sonda SWDS®.....	73
Figura 4.16: Trecho de uma coluna estratigráfica de um dos furos de sondagem da Área B3.	74
Figura 4.17: Preparação de um meio denso com Bromofórmio.....	75
Figura 4.18: Meio denso sendo despejado na cuba.....	76
Figura 4.19: Coleta do material flutuado com ajuda de uma concha.....	76
Figura 4.20: Material afundado coletado com ajuda de um cesto.....	77
Figura 4.21: Pesagem da amostra.....	78
Figura 4.22: Cadinhos contendo as amostras sendo inseridos no forno de mufla.	79
Figura 4.23: Perfil geofísico em formato texto usando 1 cm de discriminação (Copelmi Mineração Ltda.).....	88
Figura 4.24: Fusão entre os perfis geofísicos feitos pelas duas ferramentas.....	88
Figura 4.25: Coluna estratigráfica obtida com a sondagem convencional ao lado do perfil geofísico fundido.	89
Figura 4.26: Definição trecho do perfil geofísico representativo à camada de carvão.....	90
Figura 4.27: Definição do trecho de interesse no perfil geofísico através da conciliação dos dados e cálculo da média dos registros geofísicos.....	90

Figura 4.28: Gráfico com a distribuição dos resultados de análise de laboratório de densidade e teor de cinzas para carvões e ajuste linear efetuado.....	101
Figura 4.29: Exemplo visual do efeito suavizador da distância entre fonte e cintilômetro no sinal e radiação gama retroespalhada	102
Figura 4.30: Efeito da pouca espessura de camadas de carvão sobre o sinal geofísico.	103
Figura 4.31: Sinal geofísico representativo devido a espessura da camadas de carvão superior à resolução vertical.....	103
Figura 4.32: Gráfico de dispersão feito com todos os resultados disponíveis de análise laboratorial de densidade e registro geofísico do cintilômetro LSD.	104
Figura 4.33: Gráfico de dispersão feito com os resultados disponíveis de análise laboratorial de densidade e registro geofísico do cintilômetro LSD para as camadas de espessura superior a 31 cm.....	105
Figura 4.34: Fotos dos pontos de calibração, cuba com água à esquerda e bloco de alumínio a direita.....	106
Figura 4.35: Gráfico de dispersão com feito com dados de densidade e registro geofísico de materiais de espessura superior a 31 cm e dados de calibração.....	107
Figura 4.36: Gráfico de dispersão dos dados de densidade e teor de cinzas dos furos B3-03, B3-12, B3-13 e B3-18 com o ajuste da equação linear.....	108
Figura 4.37: Equação ajustada para inferência de densidade de perfilagem geofísica e seus limites de confiança.....	111
Figura 4.38: Equação ajustada para inferência de teor de cinzas de perfilagem geofísica e seus limites de confiança.....	111

Figura 5.1: Polígonos de influência de cada ponto amostral dependendo da camada em análise: a, Camada S, b, Camada M1, c, Camada M2 e d, Camada I1.....	121
Figura 5.2: Histogramas e estatística básica dos atributos ρ_r , Cz_r e Cz_h da Camada S.....	123
Figura 5.3: Histogramas e estatística básica dos atributos ρ_r , Cz_r e Cz_h da Camada M1..	124
Figura 5.4: Histogramas e estatística básica dos atributos ρ_r , Cz_r e Cz_h da Camada M2..	124
Figura 5.5: Histogramas e estatística básica dos atributos ρ_r , Cz_r e Cz_h da Camada I1....	125
Figura 5.6: Exemplo gráfico de um semivariograma.....	126
Figura 5.7: Semivariograma modelado por uma função esférica.....	127
Figura 5.8: Pares selecionados para o cálculo de um semivariograma onidirecional hipotético.....	128
Figura 5.9: Pares selecionados para a construção de um semivariograma direcional....	Erro! Indicador não definido.
Figura 5.10: Semivariograma onidirecional do atributo ρ_r da Camada S com modelo ajustado.....	131
Figura 5.11: Semivariograma onidirecional do atributo Cz_r da Camada S com modelo ajustado.....	131
Figura 5.12: Semivariograma onidirecional do atributo Cz_h da Camada S com modelo ajustado.....	132
Figura 5.13: Semivariograma onidirecional do atributo ρ_r da Camada M1 com modelo ajustado.....	133

Figura 5.14: Semivariograma onidirecional do atributo Cz_r da Camada M1 com modelo ajustado.....	133
Figura 5.15: Semivariograma onidirecional do atributo Cz_h da Camada M1 com modelo ajustado.....	134
Figura 5.16: Semivariograma onidirecional do atributo ρ_r da Camada M2 com modelo ajustado.....	135
Figura 5.17: Semivariograma onidirecional do atributo Cz_r da Camada M2 com modelo ajustado.....	135
Figura 5.18: Semivariograma onidirecional do atributo Cz_h da Camada M2 com modelo ajustado.....	136
Figura 5.19: Semivariograma onidirecional do atributo ρ_r da Camada I1 com modelo ajustado.....	137
Figura 5.20: Semivariograma onidirecional do atributo Cz_r da Camada I1 com modelo ajustado.....	137
Figura 5.21: Semivariograma onidirecional do atributo Cz_h da Camada I1 com modelo ajustado.....	138
Figura 5.22: Semivariograma onidirecional (limite z_5) dos indicadores do atributo ρ_h da Camada S.....	142
Figura 5.23: Semivariograma onidirecional (limite z_5) dos indicadores do atributo Cz_h da Camada S.....	144
Figura 5.24: Semivariograma onidirecional (limite z_5) dos indicadores do atributo ρ_h da Camada M1.....	146

Figura 5.25: Semivariograma onidirecional (limite z_5) dos indicadores do atributo Cz_h da Camada M1.....	147
Figura 5.26: Semivariograma onidirecional (limite z_5) dos indicadores do atributo ρ_h da Camada M2.....	149
Figura 5.27: Semivariograma onidirecional (limite z_5) dos indicadores do atributo Cz_h da Camada M2.....	150
Figura 5.28: Semivariograma onidirecional (limite z_5) dos indicadores do atributo ρ_h da Camada I1.....	152
Figura 5.29: Semivariograma onidirecional (limite z_5) dos indicadores do atributo Cz_h da Camada I1.....	153
Figura 5.30: Polígonos de extrapolação das diferentes camadas e malha de blocos para estimativa. a, Camada S; b, Camada M1; c, Camada M2 e d, Camada I1.....	155
Figura 5.31: Histogramas e mapa das estimativas por KO para o atributo ρ_r da Camada S.....	157
Figura 5.32: Histogramas e mapa das estimativas por KO para o atributo Cz_r da Camada S.....	157
Figura 5.33: Histogramas e mapa das estimativas por KO para o atributo ρ_r da Camada M1.....	158
Figura 5.34: Histogramas e mapa das estimativas por KO para o atributo Cz_r da Camada M1.....	158
Figura 5.35: Histogramas e mapa das estimativas por KO para o atributo ρ_r da Camada M2.....	159

Figura 5.36: Histogramas e mapa das estimativas por KO para o atributo Cz_r da Camada M2.....	159
Figura 5.37: Histogramas e mapa das estimativas por KO para o atributo ρ_r da Camada I1.....	160
Figura 5.38: Histogramas e mapa das estimativas por KO para o atributo Cz_r da Camada I1.....	161
Figura 5.39: Nove probabilidades calculadas por KIm para o atributo ρ_h da Camada S, onde cada mapa representa a chance que o valor do atributo ρ_h de cada bloco possui de ser inferior ao limite z_k que foi base da distribuição dos indicadores 0 e 1.....	164
Figura 5.40: Estimativa E-type do atributo ρ_h (mapa a esquerda) e estimativa por KO para o atributo ρ_r (mapa a direita), ambos da Camada S.....	165
Figura 5.41: Erro absoluto (mapa da esquerda) e erro porcentual (mapa da direita) da estimativa do atributo ρ_h da Camada S por KIm em comparação com o resultado da KO para o atributo ρ_r	166
Figura 5.42: Histogramas das estimativas por E-type para ρ_h e KO para ρ_r (canto superior esquerdo e direito respectivamente) e histogramas dos erros absoluto e porcentual (cantos inferiores esquerdo e direito respectivamente) referentes a Camada S.....	166
Figura 5.43: Gráfico de dispersão comparando as estimativas de ρ_h por KIm no eixo x e de ρ_r por KO no eixo y, do atributo densidade para a Camada S.....	167
Figura 5.44: Mapas de probabilidades calculadas por KIm para o atributo Cz_h da Camada S, onde cada mapa representa a chance que o valor do atributo Cz_h de cada bloco possui de ser inferior ao limite z_k	168
Figura 5.45: Estimativa E-type do atributo Cz_h (mapa a esquerda) e estimativa por KO para o atributo Cz_r (mapa a direita), ambos da Camada S.....	170

- Figura 5.46: Erro absoluto (mapa da esquerda) e erro porcentual (mapa da direita) da estimativa do atributo Cz_h da Camada S por KIm em comparação com o resultado da KO para o atributo Cz_r 170
- Figura 5.47: Histogramas das estimativas por E-type para Cz_h e KO para Cz_r (canto superior esquerdo e direito respectivamente) e histogramas dos erros absoluto e porcentual (cantos inferiores esquerdo e direito respectivamente) referentes a Camada S..... 171
- Figura 5.48: Mapa da estimativa do atributo Cz_h por KIm para a Camada S cujos blocos com erro fora dos limites estabelecidos se apresentam destacados pela cor magenta e gráfico de dispersão apresentando as estimativas por KIm no eixo x e por KO no eixo y, comparando os valores e destacando em vermelho os blocos estimados por KIm com erro excessivo..... 172
- Figura 5.49: Mapas de probabilidades calculadas por KIm para o atributo ρ_h da Camada M1, onde cada mapa representa a chance que o valor do atributo ρ_h de cada bloco possui de ser inferior ao limite z_k 174
- Figura 5.50: Estimativa E-type do atributo ρ_h (mapa a esquerda) e estimativa por KO para o atributo ρ_r (mapa a direita), ambos da Camada M1..... 174
- Figura 5.51: Erro absoluto (mapa da esquerda) e erro porcentual (mapa da direita) da estimativa do atributo ρ_h da Camada M1 por KIm em comparação com o resultado da KO para o atributo ρ_r 175
- Figura 5.52: Histogramas das estimativas por E-type para ρ_h e KO para ρ_r (canto superior esquerdo e direito respectivamente) e histogramas dos erros absoluto e porcentual (cantos inferiores esquerdo e direito respectivamente) referentes a Camada M1..... 176
- Figura 5.53: Gráfico de dispersão comparando as estimativas de ρ_h por KIm no eixo x e de ρ_r por KO no eixo y, do atributo densidade para a Camada M1..... 177

- Figura 5.54: Mapas de probabilidades calculadas por KIm para o atributo Cz_h da Camada M1, onde cada mapa representa a chance que o valor do atributo Cz_h de cada bloco possui de ser inferior ao limite z_k 178
- Figura 5.55: Estimativa E-type do atributo Cz_h (mapa a esquerda) e estimativa por KO para o atributo Cz_r (mapa a direita), ambos da Camada M1..... 179
- Figura 5.56: Erro absoluto (mapa da esquerda) e erro porcentual (mapa da direita) da estimativa do atributo Cz_h da Camada M1 por KIm em comparação com o resultado da KO para o atributo Cz_r 180
- Figura 5.57: Histogramas das estimativas por E-type para Cz_h e KO para Cz_r (canto superior esquerdo e direito respectivamente) e histogramas dos erros absoluto e porcentual (cantos inferiores esquerdo e direito respectivamente) referentes a Camada M1..... 181
- Figura 5.58: Mapa da estimativa do atributo Cz_h por KIm para a Camada M1 cujos blocos com erro fora dos limites estabelecidos se apresentam destacados pela cor magenta e gráfico de dispersão apresentando as estimativas por KIm no eixo x e por KO no eixo y, comparando os valores e destacando em vermelho os blocos estimados por KIm com erro excessivo..... 182
- Figura 5.59: Mapas de probabilidades calculadas por KIm para o atributo ρ_h da Camada M2, onde cada mapa representa a chance que o valor do atributo ρ_h de cada bloco possui de ser inferior ao limite z_k 183
- Figura 5.60: Estimativa E-type do atributo ρ_h (mapa a esquerda) e estimativa por KO para o atributo ρ_r (mapa a direita), ambos da Camada M2..... 184
- Figura 5.61: Erro absoluto (mapa da esquerda) e erro porcentual (mapa da direita) da estimativa do atributo ρ_h da Camada M2 por KIm em comparação com o resultado da KO para o atributo ρ_r 184

Figura 5.62: Histogramas das estimativas por E-type para ρ_h e KO para ρ_r (canto superior esquerdo e direito respectivamente) e histogramas dos erros absoluto e porcentual (cantos inferiores esquerdo e direito respectivamente) referentes a Camada M2..... 185

Figura 5.63: Mapa da estimativa do atributo ρ_h por KIm para a Camada M2 cujos blocos com erro fora dos limites estabelecidos se apresentam destacados pela cor magenta e gráfico de dispersão apresentando as estimativas por KIm no eixo x e por KO no eixo y, comparando os valores e destacando em vermelho os blocos estimados por KIm com erro excessivo..... 186

Figura 5.64: Mapas de probabilidades calculadas por KIm para o atributo Cz_h da Camada M2, onde cada mapa representa a chance que o valor do atributo Cz_h de cada bloco possui de ser inferior ao limite z_k 187

Figura 5.65: Estimativa E-type do atributo Cz_h (mapa a esquerda) e estimativa por KO para o atributo Cz_r (mapa a direita), ambos da Camada M2. 188

Figura 5.66: Erro absoluto (mapa da esquerda) e erro porcentual (mapa da direita) da estimativa do atributo Cz_h da Camada M2 por KIm em comparação com o resultado da KO para o atributo Cz_r 189

Figura 0.67: Histogramas das estimativas por E-type para Cz_h e KO para Cz_r (canto superior esquerdo e direito respectivamente) e histogramas dos erros absoluto e porcentual (cantos inferiores esquerdo e direito respectivamente) referentes a Camada M2. 190

Figura 5.68: Mapa da estimativa do atributo Cz_h por KIm para a Camada M2 cujos blocos com erro fora dos limites estabelecidos se apresentam destacados pela cor magenta e gráfico de dispersão apresentando as estimativas por KIm no eixo x e por KO no eixo y, comparando os valores e destacando em vermelho os blocos estimados por KIm com erro excessivo..... 191

- Figura 5.69: Mapas de probabilidades calculadas por KIm para o atributo ρ_h da Camada I1, onde cada mapa representa a chance que o valor do atributo ρ_h de cada bloco possui de ser inferior ao limite z_k 193
- Figura 5.70: Estimativa E-type do atributo ρ_h (mapa a esquerda) e estimativa por KO para o atributo ρ_r (mapa a direita), ambos da Camada I1. 194
- Figura 5.71: Erro absoluto (mapa da esquerda) e erro porcentual (mapa da direita) da estimativa do atributo ρ_h da Camada I1 por KIm em comparação com o resultado da KO para o atributo ρ_r 195
- Figura 5.72: Histogramas das estimativas por E-type para ρ_h e KO para ρ_r (canto superior esquerdo e direito respectivamente) e histogramas dos erros absoluto e porcentual (cantos inferiores esquerdo e direito respectivamente) referentes a Camada I1. 196
- Figura 5.73: Mapa da estimativa do atributo ρ_h por KIm para a Camada I1 cujos blocos com erro fora dos limites estabelecidos se apresentam destacados pela cor magenta e gráfico de dispersão apresentando as estimativas por KIm no eixo x e por KO no eixo y, comparando os valores e destacando em vermelho os blocos estimados por KIm com erro excessivo. 197
- Figura 5.74: Mapa de probabilidades calculadas por KIm para o atributo Cz_h da Camada I1, onde cada mapa representa a chance que o valor do atributo Cz_h de cada bloco possui de ser inferior ao limite z_k 198
- Figura 5.75: Estimativa E-type do atributo Cz_h (mapa a esquerda) e estimativa por KO para o atributo Cz_r (mapa a direita), ambos da Camada I1. 199
- Figura 5.76: Erro absoluto (mapa da esquerda) e erro porcentual (mapa da direita) da estimativa do atributo Cz_h da Camada I1 por KIm em comparação com o resultado da KO para o atributo Cz_r 199

Figura 5.77: Histogramas das estimativas por E-type para Cz_h e KO para Cz_r (canto superior esquerdo e direito respectivamente) e histogramas dos erros absoluto e porcentual (cantos inferiores esquerdo e direito respectivamente) referentes a Camada I1..... 200

Figura 5.78: Mapa da estimativa do atributo Cz_h por KIm para a Camada I1 cujos blocos com erro fora dos limites estabelecidos se apresentam destacados pela cor magenta e gráfico de dispersão apresentando as estimativas por KIm no eixo x e por KO no eixo y, comparando os valores e destacando em vermelho os blocos estimados por KIm com erro excessivo..... 201

Figura A.1: Perfis geofísicos e descrição geológica resumida do furo de sondagem B3-03..... 215

Figura A.2: Perfis geofísicos e descrição geológica resumida do furo de sondagem B3-12.....**Erro! Indicador não definido.**

Figura A.3: Perfis geofísicos e descrição geológica resumida do furo de sondagem B3-13.....217

Figura A.4: Perfis geofísicos e descrição geológica resumida do furo de sondagem B3-18.....218

Figura B.1: Nove modelos de semivariograma que representam a distribuição espacial do atributo ρ_h da Camada S..... 220

Figura B.2: Nove modelos de semivariograma que representam a distribuição espacial do atributo Cz_h da Camada S..... 221

Figura B.3: Nove modelos de semivariograma que representam a distribuição espacial do atributo ρ_h da Camada M1..... 222

Figura B.4: Nove modelos de semivariograma que representam a distribuição espacial do atributo Cz_h da Camada M1.	223
Figura B.5: Nove modelos de semivariograma que representam a distribuição espacial do atributo ρ_h da Camada M2.....	224
Figura B.6: Nove modelos de semivariograma que representam a distribuição espacial do atributo Cz_h da Camada M2.	225
Figura B.7: Nove modelos de semivariograma que representam a distribuição espacial do atributo ρ_h da Camada I1.....	226
Figura B.8: Nove modelos de semivariograma que representam a distribuição espacial do atributo Cz_h da Camada I1.....	227
Figura C.1: Diagrama da sonda GLOG®.....	228
Figura C.2: Diagrama da sonda SWDS®.....	230
Figura C.3: Guincho com unidade de aquisição acoplada.....	231
Figura C.4: Unidade de aquisição.....	232

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Exemplos de valores de resistividade em alguns minerais em rochas (Geldart et al., 1990)	17
Tabela 4.1: Coordenadas das sondagens com recuperação de testemunhos	65
Tabela 4.2: Resultado da análise de laboratório da recuperação dos testemunhos da área B3	80
Tabela 4.3: Classificação usada para a qualidade expedita de carvão de acordo com Australian Standard AS 2519/1993.....	87
Tabela 4.4: Valor médio de radiação retroespalhada para camadas de carvão e trechos de calibração nos quatro furos perfilados.....	91
Tabela 4.5: Real situação do banco de dados utilizado neste trabalho	94
Tabela 4.6: Banco de dados hipotético	96
Tabela 4.7: Banco de dados real da Camada S.....	97
Tabela 4.8: Banco de dados real da Camada M1.....	98
Tabela 4.9: Banco de dados real da Camada M2.....	98
Tabela 4.10: Banco de dados real da Camada I1	99
Tabela 4.11: Dados primários.....	100
Tabela 4.12: Dados de calibração em materiais de densidade conhecida.....	106

Tabela 4.13: Registro de radiação retroespalhada usado para construção do banco de dados secundário	109
Tabela 4.14: Dados secundários referentes à Camada S com seus limites de confiança.....	112
Tabela 4.15: Dados secundários referentes à Camada M1 com seus limites de confiança.....	112
Tabela 4.16: Dados secundários referentes à Camada M2 com seus limites de confiança.....	113
Tabela 4.17: Dados secundários referentes à Camada I1 com seus limites de confiança.....	114
Tabela 4.18: Banco de dados hipotético da Camada S incluindo dados primários e secundários.....	114
Tabela 4.19: Banco de dados hipotético da Camada M1 incluindo dados primários e secundários.....	115
Tabela 4.20: Banco de dados hipotético da Camada M2 incluindo dados primários e secundários.....	116
Tabela 4.21: Banco de dados hipotético da Camada I1 incluindo dados primários e secundários.....	117
Tabela 5.1: Médias agrupadas e desagrupadas para os atributos da Camada S.....	122
Tabela 5.2: Médias agrupadas e desagrupadas para os atributos da Camada M1.....	122
Tabela 5.3: Médias agrupadas e desagrupadas para os atributos da Camada M2.....	122

Tabela 5.4: Médias agrupadas e desagrupadas para os atributos da Camada I1	122
Tabela 5.5: Valores dos quantis usados como limites z_k para a Camada S.....	139
Tabela 5.6: Valores dos quantis usados como limites z_k para a Camada M1	139
Tabela 5.7: Valores dos quantis usados como limites z_k para a Camada M2	139
Tabela 5.8: Valores dos quantis usados como limites z_k para a Camada I1	140
Tabela 5.9: Variância <i>a priori</i> , variabilidade natural do depósito e variância da estrutura esférica dos modelos dos semivariograma dos dados codificados (indicadores) de ρ_h da camada S respeitando as proporções calculadas pelo modelo que representa o semivariograma dos dados codificados pelo limite z_5	143
Tabela 5.10: Variância <i>a priori</i> , variabilidade natural do depósito e variância da estrutura esférica dos modelos dos semivariogramas dos dados codificados (indicadores) de Cz_h da camada S respeitando as proporções calculadas pelo modelo que representa o semivariograma dos dados codificados pelo limite z_5	145
Tabela 5.11: Variância <i>a priori</i> , variabilidade natural do depósito e variância da estrutura esférica dos modelos dos semivariogramas dos dados codificados (indicadores) de ρ_h da camada M1 respeitando as proporções calculadas pelo modelo que representa o semivariograma dos dados codificados pelo limite z_5	146
Tabela 5.12: Variância <i>a priori</i> , variabilidade natural do depósito e variância da estrutura esférica dos modelos dos semivariogramas dos dados codificados (indicadores) de Cz_h da camada M1 respeitando as proporções calculadas pelo modelo que representa o semivariograma dos dados codificados pelo limite z_5	148
Tabela 5.13: Variância <i>a priori</i> , variabilidade natural do depósito e variância da estrutura esférica dos modelos dos semivariogramas dos dados codificados	

(indicadores) de ρ_h da camada M2 respeitando as proporções calculadas pelo modelo que representa o semivariograma dos dados codificados pelo limite z_5 149

Tabela 5.14: Variância *a priori*, variabilidade natural do depósito e variância da estrutura esférica dos modelos dos semivariogramas dos dados codificados (indicadores) de Cz_h da camada M2 respeitando as proporções calculadas pelo modelo que representa o semivariograma dos dados codificados pelo limite z_5 151

Tabela 5.15: Variância *a priori*, variabilidade natural do depósito e variância da estrutura esférica dos modelos dos semivariogramas dos dados codificados (indicadores) de ρ_h da camada I1 respeitando as proporções calculadas pelo modelo que representa o semivariograma dos dados codificados pelo limite z_5 152

Tabela 5.16: Variância *a priori*, variabilidade natural do depósito e variância da estrutura esférica dos modelos dos semivariogramas dos dados codificados (indicadores) de ρ_h da camada I1 respeitando as proporções calculadas pelo modelo que representa o semivariograma dos dados codificados pelo limite z_5 (continuação).....153

Tabela 5.17: Variância *a priori*, variabilidade natural do depósito e variância da estrutura esférica dos modelos dos semivariogramas dos dados codificados (indicadores) de Cz_h da camada I1 respeitando as proporções calculadas pelo modelo que representa o semivariograma dos dados codificados pelo limite z_5 154

Tabela C.1: Especificações da sonda GLOG® 229

Tabela C.2: Especificações da sonda SWDS® 230

Tabela C.3: Especificações referentes ao guincho..... 232

Tabela C.4: Especificações referentes à unidade de aquisição 233

Resumo

O processo de avaliação de um depósito mineral é compreendido de duas grandes etapas: a coleta e análise de amostras que fornecerão informações importantes que servirão de base para as estimativas e a estimativa propriamente dita, onde serão aplicados métodos matemáticos aos dados obtidos pela amostragem.

Ambas as etapas apresentam diversos problemas e empecilhos. Em relação à amostragem, o método usualmente aplicado é a perfuração rotativa com recuperação de testemunhos. Este método possui um custo bastante elevado, podendo um furo de poucos metros custar centenas de dólares e levar dias para ser feito. Outro problema associado com este método é a probabilidade de não se ter uma elevada recuperação do material, isto é, perda de material durante a execução da perfuração. Já na etapa de análise do material recuperado, uma das dificuldades mais freqüentes é a impossibilidade de se avaliar a flutuabilidade do valor estimado, ou seja, geralmente se estima um valor de atributo para a amostra e se considera esse valor único e real para ela, porém, sabe-se que, com análise em laboratório, é impossível se estimar o valor exato do atributo de uma amostra e, portanto, deve-se realizar uma série de análises e efetuar o cálculo da média e desvio padrão do valor do atributo da amostra, porém, muitas vezes não se tem material físico (amostras) disponível para um grande número de análises.

Quanto à avaliação do depósito, o principal problema está relacionado à impossibilidade de se considerar essa flutuabilidade do valor do atributo das amostras no momento da estimativa. A grande maioria dos métodos de estimativa usada para avaliação de depósitos carece de mecanismos que permitam a incorporação da incerteza do valor do atributo.

Portanto, os objetivos desse trabalho foram: (i) encontrar uma maneira de aprimorar a coleta de informações de um depósito mineral e em contrapartida facilitar a estimativa da flutuabilidade do valor dos atributos das amostras e (ii) encontrar um método de avaliação de depósitos que permita a incorporação dessa incerteza do valor das amostras. Para solucionar os problemas apresentados pela amostragem, esta dissertação apresenta a perfilagem geofísica como uma ferramenta versátil e de fácil manuseio em campo, que permite a obtenção de um grande número de informações de

caráter indireto e por meio de ferramentas matemáticas ainda permite o cálculo da flutuação do valor do atributo.

Em relação à avaliação de depósitos, será utilizada a krigagem dos indicadores, método de estimativa não linear que permite a incorporação da incerteza dos valores dos atributos de uma maneira rápida no momento do cálculo das áreas de interesse.

Descobriu-se que a aplicação da perfilagem geofísica foi bastante eficiente e prática contanto que a equipe responsável tenha o conhecimento das ferramentas utilizadas e como é a interação entre a ferramenta e o meio geológico. A eficácia do método geoestatístico foi comprovada através da comparação do resultado da krigagem dos indicadores que incorporou dados secundários provenientes da perfilagem geofísica com o resultado de uma estimativa usualmente feita em avaliação de depósitos baseada somente em dados primários (sondagem com recuperação de testemunhos).

Abstract

The process of evaluation of a mineral deposit is constituted of two great stages: the collection and analysis of samples that will supply important information, which it will be the base for the evaluation and the estimating of the deposit where they will be applied mathematical methods on the data obtained from the sampling.

Both stages present several problems and difficulties. In relation to the sampling, the method usually applied it is the rotary drilling with ore recovering. This method is expensive, a hole of few meters will probably cost hundreds of dollars and take days to be done. Another problem associated with this method is the probability of not having a high recovery of the material, that is, material loss during the execution of the drilling. About the analysis of the recovered material, one of the most frequent difficulties is the impossibility of evaluating the floatability of the estimated value, in other words, is usually estimated an attribute value for the sample and it is considered unique and real value for it, however, it is known that, with laboratory analysis, it is impossible to obtain the exact value of the attribute of a sample and, therefore, it should be done a series of analyses to calculate the average and standard deviation of the value of the attribute of the sample, however, most of times a great quantity of physical material (samples) are not available for a great number of analyses.

For the evaluation of the deposit, the main problem is related to the impossibility of considering that floatability of the value of the attribute of the samples in the moment of the estimate. The great majority of the estimate methods used for evaluation of deposits lacks of mechanisms that allow the incorporation of the uncertainty of the value of the attribute.

Therefore, the objectives of this research project are: to find a way to optimize the collection of information of a mineral deposit and in consequence to facilitate the estimate of the floatability of the value of the attributes of the samples and to find a method of evaluation of deposits that allow the incorporation of that uncertainty of the value of the samples. To solve the problems presented by the sampling, this dissertation presents the borehole logging as a versatile tool and of easy to handle in the field, which allows to obtain a great number of information with indirect features and it allows the calculation of the floatability of the value of the attribute through mathematical tools.

In relation to the evaluation of the deposits it will be use the indicator kriging. A non-linear method that allows the incorporation of the uncertainty of the values of the attributes in a fast way in the moment of the calculation of the areas of interest.

It was discovered that the application of the borehole logging with indirect methods was quite efficient and practice as long as the responsible team has the knowledge of the use of the tools and about the interaction between the logging results and the geological formations. The effectiveness of the geostatistic method was proven through the comparison of the result of the indicator kriging executed with secondary obtained with borehole logging with the result of an estimate done usually in evaluation of deposits based only in primary data (survey ore recovery).

Capítulo 1

Introdução

A avaliação de depósitos minerais inicia com uma campanha de amostragem onde o objetivo é determinar a extensão e a geometria do corpo mineralizado. Por meio da análise físico-química do material coletado pela campanha de amostragem, determinam-se valores para os atributos de interesse tais como teores e para o caso de depósitos de carvão densidade, teor de cinzas, matéria volátil e poder calorífico. A amostragem de recursos minerais deve fornecer o maior número de informações representativas dos atributos de interesse pelo menor custo financeiro possível e no menor espaço de tempo.

Na indústria mineral, o método de amostragem mais aplicado é a sondagem rotativa com recuperação de testemunhos. A amostragem por sondagem é um método de investigação direto, que fornece material físico, proveniente dos testemunhos para a análise laboratorial e definição dos valores dos atributos. É um método bastante confiável, porém demorado (a execução de um furo de sondagem com centenas de metros pode levar semanas de trabalho) e com custo bastante elevado podendo chegar a centenas de dólares. Outro problema que pode ocorrer com este método é a baixa recuperação, isto é, não se consegue recuperar todo o material durante a perfuração devido à baixa qualidade do material perfurado (friabilidade).

Outro problema relacionado com a etapa de obtenção de dados é referente à análise laboratorial das amostras. Na grande maioria dos casos, o resultado da análise de uma amostra é assumido como o valor real da mesma e não é atribuída nenhuma incerteza ao valor que aquela amostra possa assumir

Com o término da amostragem, análise das amostras e preparação dos dados, inicia-se a etapa de avaliação do depósito propriamente dita que envolve a

aplicação de métodos matemáticos e geométricos para a delimitação do corpo mineral e estimativa dos atributos de qualidade em locais não amostrados (blocos ou nós em uma malha). O método geoestatístico mais usado a krigagem ordinária (Matheron, 1963), que estima valores levando em consideração o comportamento da correlação espacial entre os valores obtidos em laboratório mediante a análise das amostras obtidas com sondagem. Portanto, mesmo conhecendo a incerteza do valor da amostra, não seria possível levá-la em consideração, pois não só a krigagem ordinária como tantos outros métodos geoestatísticos não permitem a sua incorporação dos limites máximos e mínimos do valor que a amostra pode assumir em um determinado local (ou ponto amostrado).

Neste trabalho são propostas soluções para os problemas apresentados nas duas etapas descritas acima que são tornar a amostragem mais ágil e de menor custo financeiro avaliando a aplicação do método geofísico conhecido por perfilagem geofísica. Com este método, obtêm-se associado ao valor lido, os limites para os valores que os atributos podem assumir. Além disso, investiga-se a krigagem dos indicadores, que permite a incorporação da incerteza do valor do atributo para realizar estimativas dos atributos usando dados oriundos de sondagem convencional e perfilagem geofísica.

A perfilagem geofísica é um método de amostragem indireta aplicada a furos de sondagem e poços, com baixo custo de operação e versatilidade de manuseio. A aplicação deste método em depósitos de carvão e metalíferos tem aumentado consideravelmente devido ao desenvolvimento de novas tecnologias para medições de diferentes atributos indicadores de qualidade. A versatilidade do método permite a sua aplicação em poços de diversos tipos, desde furos de sondagem com recuperação de testemunhos a poços de água mineral e furos sem recuperação destinados ao desmonte de rochas. Dessa maneira, a densidade amostral oferecida pela perfilagem geofísica pode ser bastante elevada.

Contudo, como os métodos geofísicos possuem um caráter indireto, isto é, o valor do atributo medido pelo método geofísico não é diretamente obtido e não apresenta uma precisão igual à obtida com o valor medido por um método direto, o peso atribuído as informações de perfilagem geofísica deve ser distinto ao peso dado a informações provenientes de testemunhos de sondagem no momento do cálculo de estimativas. Portanto, os dados de perfilagem geofísica são considerados

dados secundários (*soft data*) que auxiliam a estimativa final utilizando também os dados obtidos por sondagem com testemunhos que são considerados primários (*hard data*).

A krigagem dos indicadores trata da distribuição de indicadores binários aos locais de amostra de acordo com limites pré estabelecidos e por meio da resolução de sistemas lineares são calculadas as probabilidades dos blocos de uma malha serem inferiores ou superiores a certo valor de atributo (Journel, 1983). A krigagem dos indicadores difere das outras ferramentas de krigagem, pois permite a incorporação da incerteza do valor do atributo no momento de distribuir os indicadores.

Por fim, esse trabalho busca analisar a perfilagem geofísica como método de amostragem e a krigagem dos indicadores como método de estimativa que incorpora incertezas usando a combinação de ambos para tornar a amostragem de depósitos minerais mais rápida, de menor custo e ainda provendo estimativas acuradas e precisas.

1.1 Estado da Arte

Nesse item, serão abordados, resumidamente, o desenvolvimento da perfilagem geofísica e os métodos para incorporação dos dados amostrais secundários com sua incerteza por meio da krigagem dos indicadores.

1.1.1 Perfilagem Geofísica

A primeira perfilagem geofísica ocorreu no dia 5 de setembro de 1927, em um campo de petróleo exaurido localizado em Pechelbronn, França (Ellis & Singer, 2007). Neste dia, os irmãos Schlumberger e H. Doll obtiveram uma medida semi-contínua de resistividade utilizando uma sonda rudimentar que consistia de um cilindro de baquelite com dois eletrodos metálicos no seu exterior. O aparato era conectado a superfície mediante um cabo. Desde então, a perfilagem geofísica tem

evoluído muito atingindo hoje aplicações em diversas áreas da geologia e mineração.

Durante os primeiros 40 anos, a perfilagem geofísica era direcionada quase que totalmente a prospecção de poços de petróleo, mas por volta do ano 1965 houve um grande crescimento do uso de equipamentos de perfilagem geofísica aplicado ao carvão (Oliveira, 2005), devido a características contrastantes que os carvões costumam ter com as formações vizinhas como alta resistividade natural e emissão natural de radiação gama.

Ainda na década de 60, foi desenvolvido o método que tornou a perfilagem geofísica amplamente usada em depósitos de carvão: perfilagem de radiação gama retroespalhada ou perfilagem gama – gama. Esse método surgiu devido à necessidade de uma ferramenta eficiente para determinar a densidade *in situ* de depósitos minerais e devido à importância do atributo densidade na mineração de carvão, esse método foi logo adotado pela indústria carbonífera resultando em resultados animadores. O método gama – gama provou que a combinação de energia nuclear, física e geologia poderiam auxiliar na pesquisa mineral e os resultados positivos da aplicação do método gama – gama provocaram, na década de 80 e 90, um grande crescimento no desenvolvimento de novas tecnologias e técnicas.

Atualmente, existem técnicas que permitem uma análise qualitativa de diversos tipos de depósitos minerais como ferro, níquel e chumbo, mediante a aplicação de fontes de nêutrons (Borsaru & Charbucinski, sem data de publicação), e também sondas que medem a velocidade de propagação de ondas usadas para inferência de qualidade de maciços rochosos (Haterly & Medhurst, 2004). Porém, os métodos mais eficientes requerem o uso de fontes radioativas que quando mal operadas podem provocar danos a saúde humana. Devido a essa restrição, alguns trabalhos para determinação de qualidade de depósitos de carvão têm sido feitos com base nos dados obtidos por sondas não nucleares como de resistividade e gama natural (Das & Kayal, 1981).

Os últimos desenvolvimentos feitos nesta área buscaram construir ferramentas de sondagem que executam o perfil geofísico durante a perfuração, método conhecido como LWD (*Log While Drilling*) (Ellis & Singer, 2007), e sondas

que usam fontes radioativas de pequeno porte para reduzir o risco à saúde dos operadores do equipamento (Almasoumi et al., sem data de publicação).

1.1.2 Geoestatística

A geoestatística se trata da análise estatística de dados que possuem uma dependência (correlação) definida no espaço e/ou no tempo. Ela fornece ferramentas para estimativa em posições não amostradas por meio do conhecimento adquirido com as informações obtidas em posições amostradas.

Ela teve seu grande desenvolvimento na década de 60 devido à necessidade de uma metodologia para avaliar reservas recuperáveis em depósitos minerais (Goovaerts, 1997). Foi nesse período, que Georges Matheron (1963) desenvolveu a teoria das variáveis regionalizadas e sua estimativa, culminando com a teoria da krigagem baseado no trabalho de mestrado de Daniel Gerhardus Krige (1951), pioneiro no estudo de métodos estatísticos para estimativa de teores em depósitos minerais. Muitos trabalhos surgiram após o desenvolvimento da krigagem entre eles os de Journel e Huijbregts (1978).

Por muito tempo, a krigagem, foi executada sem o auxílio de informações secundárias ou indiretas para aprimorar a qualidade da estimativa, como por exemplo, um atributo secundário que mantém um comportamento proporcional com o atributo primário. O aproveitamento dessa informação secundária na krigagem iniciou-se com a cokrigagem apresentada por Marechal (1970), porém os diversos métodos de cokrigagem não consideram a incerteza de um valor amostrado, assumindo que o valor do atributo é livre de erro.

A krigagem dos indicadores (Journel, 1983) envolve a aplicação dos métodos de krigagem aos valores dos atributos amostrados codificados em zeros e uns e fornece como resultado as probabilidades desse atributo nos diversos locais estimados na área de interesse. Permite ainda, a conversão dessas probabilidades nas unidades dos atributos estimados através da análise da função de probabilidades estimadas acumulada. O diferencial da krigagem dos indicadores é que, de acordo com Goovaerts (1997) e Deutsch & Journel (1998), a transformação de valores reais em indicadores pode considerar ou não a incerteza do valor da

amostra disponível dependendo apenas da disponibilidade dos valores dos limites que o atributo possa assumir.

1.2 Objetivos dessa Dissertação

Essa dissertação apresenta duas metas:

- Avaliar a perfilagem geofísica como um método alternativo para obtenção de parâmetros (informações) importantes na avaliação de um depósito de carvão.
- Aplicar a krigagem dos indicadores como um método de estimativa que permite a incorporação de dados secundários, obtido por perfilagem geofísica, sem desconsiderar o erro associado ao valor.

1.2.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos dessa dissertação relativos à perfilagem geofísica incluem:

- Apresentar um resumo da teórica existente sobre a geofísica nuclear com uso de fonte de Césio 137 para obtenção de densidade e perfilagem geofísica nuclear passiva para obtenção de medidas de emissão de radiação gama natural.
- Descrever a coleta dos dados usados no estudo de caso. As etapas incluem amostragem por método direto (sondagem com recuperação de testemunho) e método indireto (perfilagem geofísica).
- Desenvolver procedimento para tratamento dos dados obtidos por perfilagem geofísica para serem aplicados em geoestatística.

Os objetivos específicos dessa dissertação relativos à geoestatística:

- Estimar os atributos de interesse através da krigagem dos indicadores, usando dados obtidos por métodos diretos e indiretos de amostragem.
- Avaliar as diferenças entre as estimativas calculadas com dados obtidos por métodos diretos e indiretos.

1.3 Etapas

A metodologia empregada para alcançar os objetivos foi:

- Estudar a perfilagem geofísica e suas aplicações bem como a relação entre a densidade natural das formações e as taxas de radiação retroespalhada das mesmas.
- Acompanhar uma campanha de sondagem com recuperação de testemunhos e posterior análise química do material recuperado entendendo o processo como um todo, suas limitações e fontes de erro.
- Realizar, nos furos feitos por sondagem com recuperação, a perfilagem geofísica com diferentes sondas para identificação do posicionamento da camada de carvão e obtenção de valores para as taxas de radiação retroespalhada para carvões e outros materiais de interesse.
- Efetuar a conciliação entre os dados dos sensores de perfilagem geofísica e dos resultados laboratoriais obtidos com as amostras de testemunho de sondagem para obtenção de funções de ajuste.
- Revisar o método geoestatístico empregado para estimativa de parâmetros indicadores de qualidade de carvão por meio das informações primária e secundária com a segunda tendo incertezas associadas a seus valores amostrais.
- Comparar estimativas feitas somente com dados primários e estimativas que incorporaram os dados primários e as informações obtidas por perfilagem geofísica (dados secundários).

1.4 Organização dessa Dissertação

Os capítulos seguintes estão organizados da seguinte forma:

- Capítulo 2 apresenta o tema perfilagem geofísica, incluindo alguns conceitos gerais e a teoria por trás das ferramentas de perfilagem geofísica usadas neste estudo de caso.
- Capítulo 3 apresenta uma revisão sobre a krigagem dos indicadores.
- Capítulo 4 inclui o estudo de caso, mostrando a área de estudo bem como a coleta de dados por sondagem com recuperação e por perfilagem geofísica. A análise dos dados é discutida, apresentando a preparação do banco de dados para a aplicação dos métodos geoestatísticos.
- Capítulo 5 mostra a análise geoestatística dos dados, modelagem dos semivariogramas e resultados das estimativas por krigagem ordinária e krigagem dos indicadores com a mediana, além da discussão dos resultados.
- Capítulo 6 inclui conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentos de Perfilagem Geofísica

O perfil de um poço ou furo de sondagem é o registro gráfico ou em forma de texto de características ou propriedades das litologias que compõem as paredes do mesmo. Esse registro é, na maioria das vezes, apresentado em formato gráfico (Figura 2.1), e em forma de texto (Figura 2.2).

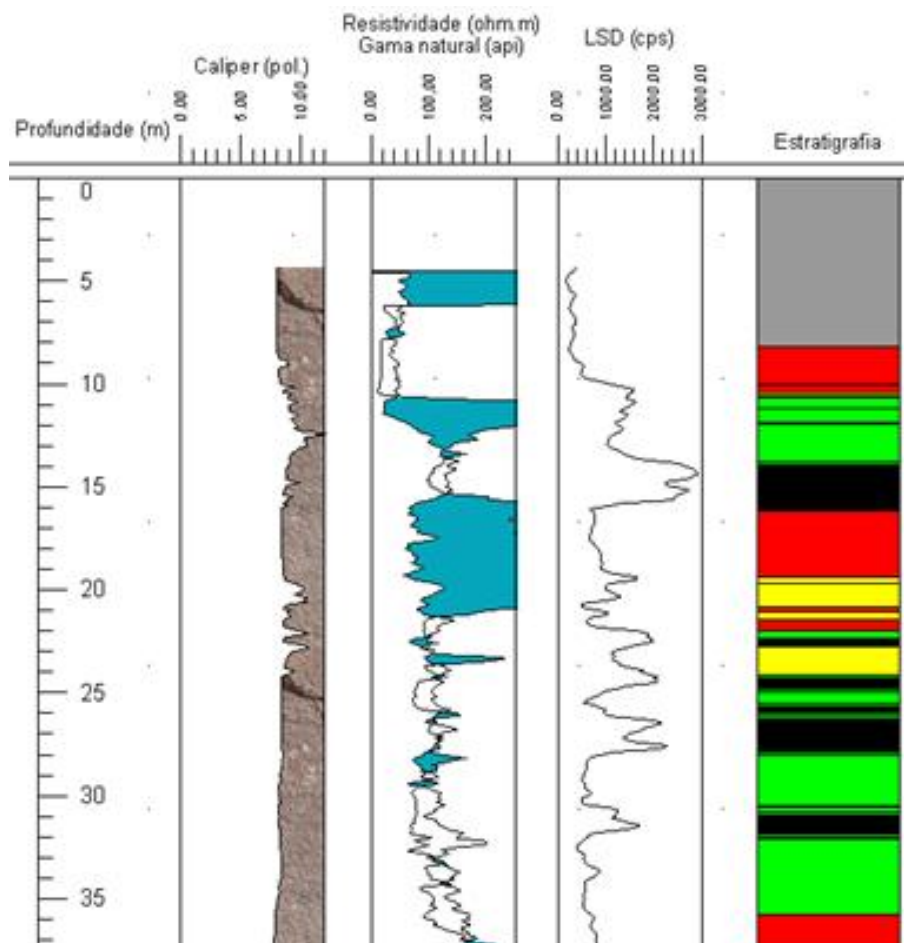


Figura 2.1: Exemplo de representação gráfica de um perfil geofísico de poço.

```

#Written by Robertson Geologging winLogger v1.0/312
~VERSION INFORMATION
-----
VERS. 2.0 : CWLS LOG ASCII STANDARD - VERSION 2.0
WRAP. NO : ONE LINE PER DEPTH STEP
~WELL INFORMATION
#MNEM.UNIT      DATA      DESCRIPTION OF MNEMONIC
-----
STRT.M          4.6000      : START DEPTH
STOP.M          53.8000     : STOP DEPTH
STEP.M          0.1000      : STEP VALUE
NULL.           -999.2500     : NULL VALUE
COMP.           Projeto Cerro : COMPANY NAME
WELL.           N/A       : WELL NAME
FLD.            N/A       : FIELD NAME
LOC.            N/A       : LOCATION
PROV.           RIO GRANDE DE SUL : PROVINCE
SRVC.           N/A       : SERVICE COMPANY NAME
DATE.           28 Apr 06  : DATE
UWI.            N/A       : UNIQUE WELL IDENTIFIER
~PARAMETER INFORMATION
#MNEMO.UNIT      VALUE      DESCRIPTION OF MNEMONIC
-----
~OTHER INFORMATION SECTION
-----
~CURVE INFORMATION
#MNEMO.UNIT      API CODE   CURVE DESCRIPTION
-----
DEPTH.M          : 0         Depth
RES.Ohm-m        : 1         Formation Resistivity
NGAM.API         : 2         Natural Gamma
-----
~A  DEPTH      RES      NGAM
    4.60      65535.00    64.09
    4.70      65535.00    67.64
    4.80      65535.00    67.20
    4.90      65535.00    57.96
    5.00      65535.00    48.57
    5.10      23358.36    55.08
    5.20      37785.55    60.03
    5.30      65535.00    60.92
    5.40      65535.00    55.67
    5.50      65464.27    48.05
    5.60      32854.55    49.83
    5.70      1571.91    53.30
    5.80      3980.45    55.74

```

Figura 2.2: Representação em forma de texto de um perfil de poço (Copelmi Mineração Ltda.)

A perfilagem geofísica de um poço é um método indireto usado em pesquisa mineral, que consiste em obter o perfil de um poço com o uso de diversos tipos de sensores que percorrem os poços medindo diversos parâmetros de interesse. Essas sondas movimentam-se dentro do poço e, durante essa movimentação, é feito o registro do parâmetro desejado. A Figura 2.3 mostra a seqüência de uma perfilagem geofísica de poço, onde a sonda é primeiro colocada no fundo do poço. Confere-se, então, a integridade do furo e sua profundidade total. Posteriormente, a sonda é içada até a superfície a uma determinada velocidade efetuando o registro dos parâmetros referentes ao sensor usado.

Sondas geofísicas são constituídas por longas hastes de metal cujo comprimento pode variar de um até dezenas de metros. Uma sonda pode ser desenvolvida para o registro de apenas um ou mais parâmetros e/ou pode permitir a conexão de diversas sondas entre si para facilitar o registro de mais parâmetros simultaneamente em furos muito profundos.

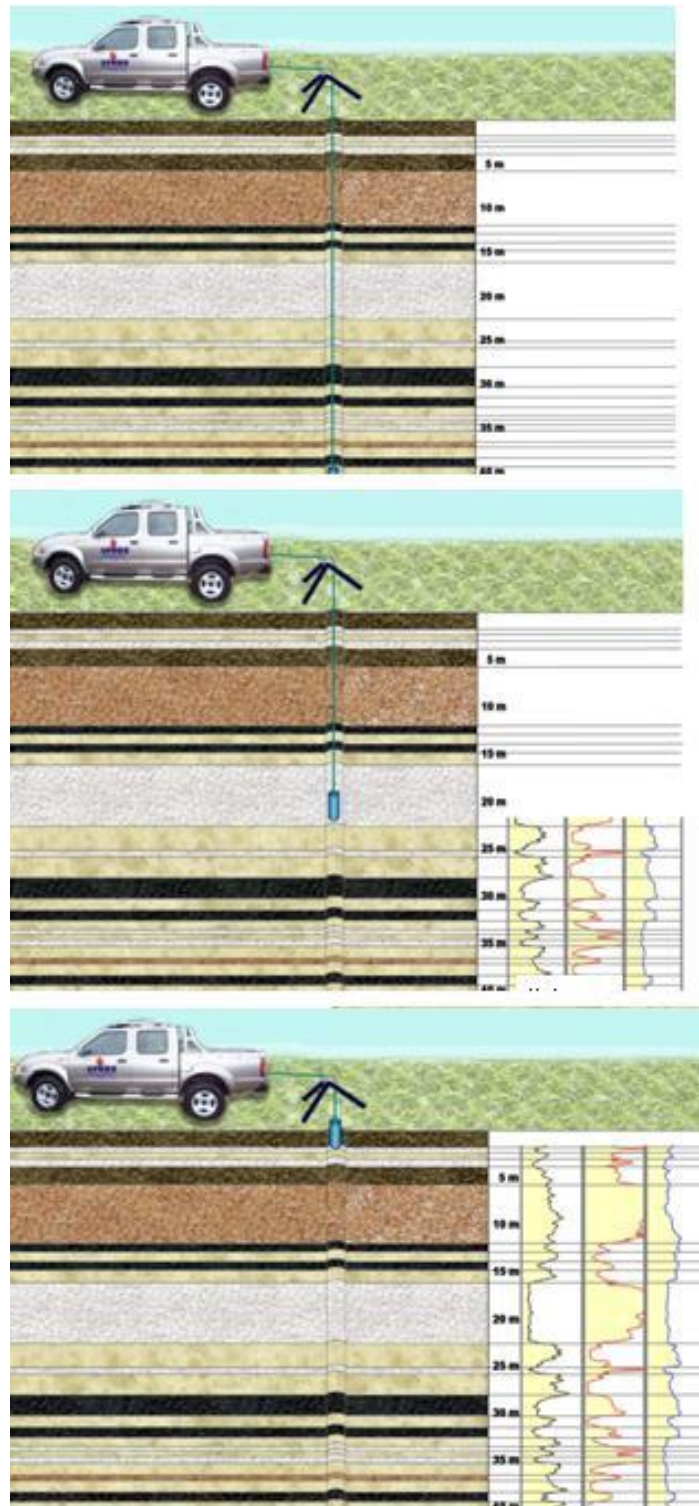


Figura 2.3: Exemplo da execução da perfilagem geofísica (figura ilustrativa e sem escala) (Oliveira, 2005).

Desde a primeira perfilagem durante a década de 20, esse método foi sendo adaptado e aperfeiçoado para ser aplicável em diversos tipos de aplicações na indústria mineral, os equipamentos se tornaram mais robustos permitindo a sua

aplicação desde poços profundos de petróleo até simples furos de desmorte em bancada de mina. Durante muitos anos, o registro dos parâmetros era desenhado em bobinas de papel que corriam sob penas. Atualmente, foram desenvolvidos *softwares* específicos para o registro, apresentação e processamento de dados de perfilagem geofísica (Robertson WinLogger® e Strater® da Golden Softwares).

2.1 Conceitos Básicos

O desenvolvimento de sondas leva em consideração diversos conceitos, os mais importantes são o volume de investigação, resolução vertical e profundidade de investigação (Figura 2.4). Esses conceitos estão interligados, sendo que a mudança do valor de um afeta os outros.

Neste item, serão descritos alguns conceitos e definições da perfilagem geofísica para facilitar a sua compreensão.

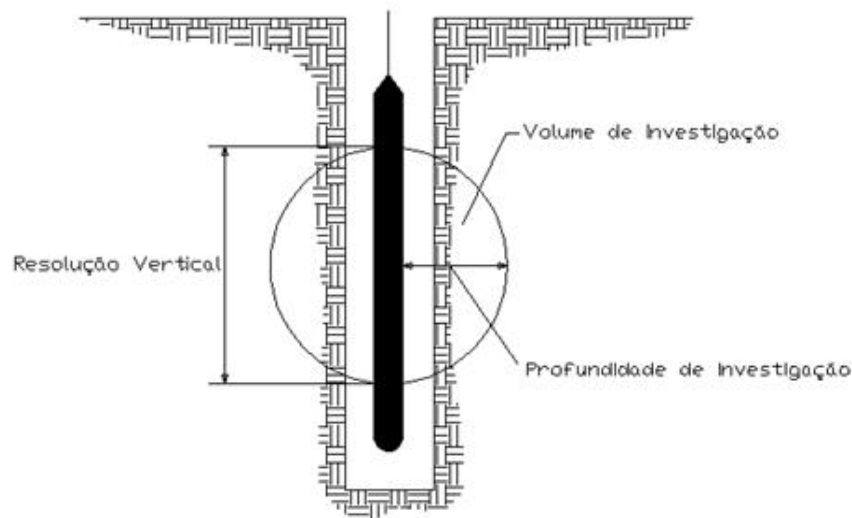


Figura 2.4: Três importantes conceitos da perfilagem geofísica (Oliveira, 2005).

2.1.1 Volume de Investigação

O volume de investigação é um campo imaginário e todo material contido neste campo é levado em consideração quando a ferramenta efetua a medida dos

parâmetros. O formato e dimensão do volume de investigação podem ser esférico, elipsoidal, formato de disco e cone (Figura 2.5).

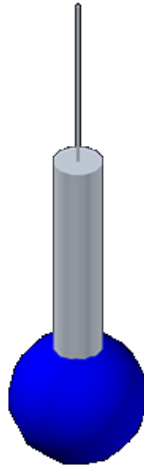


Figura 2.5: Exemplo de um volume de investigação de forma esférica.

O que define o volume de investigação é a maneira como a sonda foi construída e qual o seu objetivo de uso. Se uma sonda pretende buscar informações de materiais rochosos perpendicularmente distantes das paredes do poço ela deve ter um volume de investigação grande. Caso o objetivo seja apenas coletar informações referentes às porções das formações mais próximas da sonda ou informações quanto à presença de revestimentos e zonas de infiltração, o volume de investigação deve ser pequeno.

2.1.2 Profundidade de Investigação

A profundidade ou raio de investigação é a profundidade máxima alcançada pelo volume de investigação perpendicularmente ao eixo do poço. No caso de um volume de investigação esférico, a profundidade de investigação será igual ao raio do mesmo. A medida que aumenta a profundidade de investigação, os parâmetros medidos serão referentes ao material mais afastado perpendicularmente da sonda e, também, maior será o volume de investigação.

2.1.3 Resolução Vertical

A resolução vertical é a dimensão mínima de um litotipo que a sonda consegue distinguir. A leitura do sensor representa o valor médio do parâmetro característico das formações presentes dentro da dimensão da resolução vertical.

A resolução vertical é a capacidade que a sonda apresenta para medir o parâmetro de uma única camada, ao invés de uma média das camadas no entorno (Figura 2.6). Sondas capazes de medir camadas poucas espessas são chamadas de sondas de alta resolução.

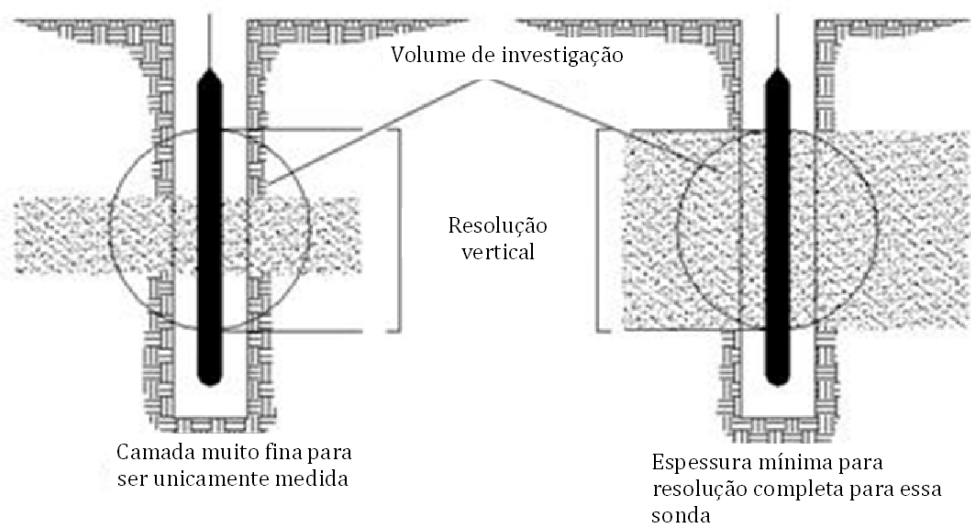


Figura 2.6: Resolução vertical em uma sonda com volume de investigação esférico (Oliveira, 2005).

2.1.4 Colimação

A colimação é uma ferramenta para direcionar o fluxo de algum feixe radioativo para algum local específico das formações ou para captar alguma informação de algum local específico. Diferentes colimações afetam os três conceitos já descritos (2.1.1 a 2.1.3). A Figura 2.7 mostra como diferentes colimações afetam a forma do volume de investigação e o alcance da profundidade de investigação. Esse é um conceito que não afeta todas as sondas de perfilagem

geofísica, pois muitas delas não precisam de nenhum tipo de colimação, porém, uma das sondas usadas neste trabalho depende da colimação.

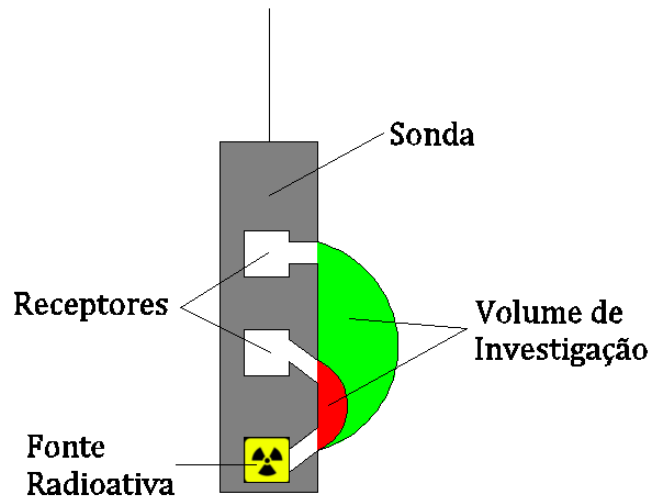


Figura 2.7: Efeito de diferentes colimações no volume de investigação e profundidade de investigação.

Na Figura 2.7 pode-se notar que a colimação da fonte radioativa (que serve para emitir um feixe radioativo na direção das formações) e a colimação do receptor mais próximo da fonte (cuja função é medir o resultado da interação entre a radiação da fonte e as formações) fizeram com que o formato do volume de investigação fosse elipsoidal, enquanto que a colimação do receptor mais afastado da fonte gerou um volume de investigação mais próximo do esférico.

2.1.5 Efeito de Poço

Para se ter uma medida confiável do parâmetro desejado, não só o equipamento de perfilagem deve estar em perfeitas condições de funcionamento, como o poço deve apresentar condições favoráveis à prática da perfilagem geofísica. Uma das grandes razões para descarte de dados coletados por perfilagem geofísica é a má qualidade das paredes do poço, isto é, se existirem caimentos e formação de cavernas nas paredes. A diferença de diâmetro do furo afeta as leituras. Adicionalmente, a penetração de fluido de furação nos vazios das paredes dos furos altera as leituras, pois ocorre a alteração das propriedades físico –

químicas das litologias perfiladas. A Figura 2.8 mostra alguns exemplos de efeito de poço.

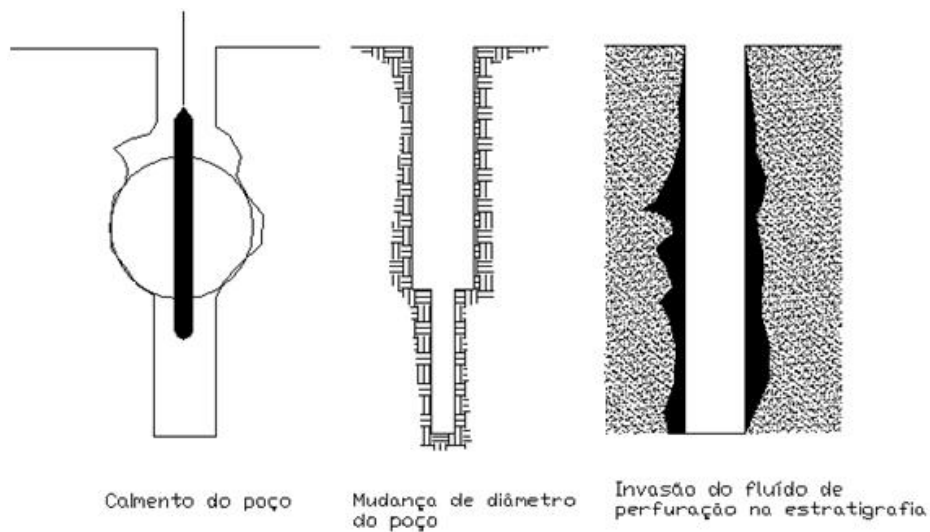


Figura 2.8: Três efeitos de poço que alteram o registro do parâmetro lido (Oliveira, 2005).

2.2 Perfilagem Elétrica

A perfilagem elétrica responde ao fluxo de corrente elétrica entre a sonda e as litologias na parede do furo.

2.2.1 Resistência e Resistividade

Resistência e resistividade são parâmetros distintos, e, para a interpretação de um registro geofísico, essa diferença deve ser perfeitamente compreendida. A resistência de um material varia conforme o volume do material medido (Figura 2.9 e Equação 2.1). Assim, quando uma corrente passa através de um fio, a resistência depende somente do comprimento total do fio e seu material. A resistência é uma medida absoluta em ohms em quaisquer condições de volume, temperatura e pressão existente no momento da medida.

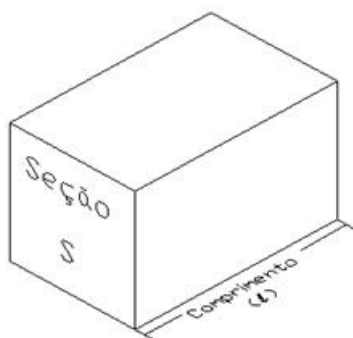


Figura 2.9: Exemplo do volume (de investigação da resistência) (Oliveira, 2005).

A equação da resistência em função da resistividade e volume do material é dada por:

$$R = \frac{r \cdot l}{S}, \quad \text{Equação 2.1}$$

onde R é a resistência, r é a resistividade, l é o comprimento do material e S é a área da seção.

A resistividade de um material homogêneo medida em dadas condições de temperatura, saturação, é constante e independe do volume. Resistividade é normalmente medida em ohms.metro e é definida como a resistividade de um material quando uma corrente de 1 ampere é aplicada em 1 metro de comprimento de material de seção de 1 metro quadrado, nas condições normais de temperatura e pressão (Hoffman et al., 1982).

Na Tabela 2.1, são apresentados valores de resistividades (Telford et al., 1990). A partir dessa tabela, pode-se concluir que com apenas um único parâmetro não é possível identificar o tipo de litologia.

Tabela 2.1: Exemplos de valores de resistividade em alguns minerais em rochas (Geldart et al., 1990)

Mineral / Rocha	Resistividade (variação ou valor médio em ohm.m)
Bauxita	200 - 6000
Água superficial (doce)	10 - 100

Tabela 2.1: Exemplos de valores de resistividade em alguns minerais em rochas
(Geldart et al., 1990) (continuação)

Mineral / Rocha	Resistividade (variação ou valor médio em ohm.m)
Água do mar	0,2
Grafite	$10^4 - 5.10^3$
Granito porfirítico (saturado)	$4,5.10^3$
Diabásio	$20 - 5.10^7$
Basalto	$10 - 1,3.10^7$
Xisto	20.10^4
Gnaisse	3.10^6
Quartzito	$10 - 2.10^8$
Argilas consolidadas	$20 - 2.10^3$
Argilas inconsolidadas (úmidas)	20
Conglomerados	$2.10^3 - 10^4$
Arenito	$1 - 6,4.10^8$
Calcário	50.10^7

2.2.2 Influência da Litologia

Perfis de resistividade e de resistência envolvem o fluxo de corrente elétrica entre o equipamento e a estratigrafia. Dois processos controlam o fluxo de corrente: condução eletrolítica e a troca de íons. Cada litologia apresenta uma maneira de condução de corrente elétrica. A salinidade e a porosidade facilitam a condução do fluxo de corrente e reduzem a resistividade. A forma, distribuição dos grãos, cimentação e a matriz da rocha, também, afetam o fluxo de corrente e a resistividade. Se os poros não são interligados, o fluxo de corrente é reduzido e a resistividade aumenta.

O mais importante estudo de resistividades das rochas foi realizado por Archie (1942). Archie estabeleceu que a resistividade de uma amostra (r_o)

completamente saturada com água salgada é proporcional à resistividade da água salgada (r_w).

$$r_o = F \cdot r_w, \quad \text{Equação 2.2}$$

onde r_o é a resistividade, r_w é a resistividade da água salgada e F é o fator de formação.

Além disso, determinando F e porosidade () a partir de diversas amostras, Archie estabeleceu a seguinte relação:

$$F = \phi^{-m}, \quad \text{Equação 2.3}$$

onde o expoente m é um fator de ajuste que varia entre 1,8 a 2,0 em arenitos, porém, em areias inconsolidadas esse valor pode chegar a 1,3. Devido a essa dependência do estado de consolidação, o expoente m é chamado de expoente de cimentação (Hearst et al., 2000).

Uma modificação realizada na equação de Archie realizada por Winsauer et al. (1952), após um estudo com amostras de arenito, introduziu a seguinte fórmula empírica:

$$F = a \cdot \phi^{-m}, \quad \text{Equação 2.4}$$

sendo a um segundo fator de ajuste.

2.2.3 Princípio de Funcionamento das Sondas de Resistividade

Uma corrente é gerada no equipamento o qual é transmitida ao eletrodo simples na sonda, que é chamado de eletrodo de corrente. A corrente passa entre esse eletrodo, o fluido do poço e a estratigrafia por condução eletrolítica nos fluídos e por troca de íons em minerais argilosos. A corrente aplicada no eletrodo é mantida constante. Então, a diferença de potencial elétrico entre o eletrodo de corrente e um eletrodo de referência aterrado é proporcional à soma das

resistências de todos os materiais. A resistência pode ser obtida conforme a equação desenvolvida por George Simon Ohm, lei de ohm, em 1827.

$$R = \frac{E}{I}, \quad \text{Equação 2.5}$$

onde E é a diferença de potencial em volts, I corrente em ampères e R é a resistência em ohms.

Nesse método, a resistência medida é a soma entre a resistência do fluido e da estratigrafia. Dependendo do método, a obtenção da resistência não é feita com um volume de investigação fixo ou definível, nesse caso, nenhuma interpretação quantitativa de resistividade pode ser obtida (item 2.2.1).

2.2.3.1 Sonda de Resistividade Pontual

O equipamento de perfilagem resistência pontual é mostrado na Figura 2.10, onde a sonda é provida de um eletrodo de corrente. O tamanho do eletrodo de corrente controla a profundidade de investigação. Se o eletrodo for esférico, o volume efetivo de investigação será aproximadamente cinco vezes o diâmetro do eletrodo (Guyod, 1944b).

Os eletrodos de equipamentos de medição de resistividade devem, sempre, serem imersos em líquido para que a corrente seja transmitida da sonda para a parede do furo.

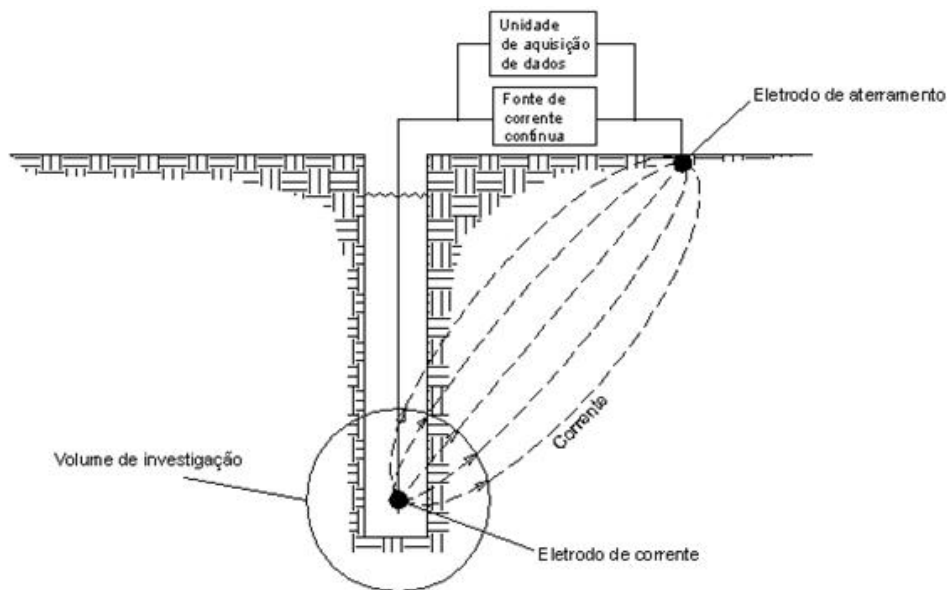


Figura 2.10: Diagrama esquemático do equipamento de perfilagem de resistência pontual (Oliveira, 2005).

2.2.3.2 Sonda de Resistividade com Focalizadores

Dispositivos focalizadores foram introduzidos para definir mais precisamente camadas pouco espessas, particularmente resistivas, e medir sua resistividade. Esse tipo de ferramenta é considerado fundamental para medir a resistividade verdadeira da camada. Cálculos para resistividade verdadeira em equipamentos de perfilagem de resistividade com focalizadores são discutidos em Guyod (1951). Esses equipamentos são providos de eletrodos auxiliares (eletrodos focalizadores) colocados acima e abaixo do eletrodo de corrente.

Esses equipamentos são providos de três eletrodos principais (isolados entre si), sendo um localizado no centro da sonda (eletrodo de corrente) e dois eletrodos auxiliares (eletrodos focalizadores) colocados acima e abaixo do eletrodo de corrente (Figura 2.11). Uma corrente contínua é aplicada ao eletrodo central. A corrente é confinada pelos eletrodos focalizadores para que o fluxo de corrente entre o eletrodo central e a estratigrafia tenha forma de disco (Figura 2.11).

Este modelo apresenta algumas vantagens como o volume de investigação conhecido, grande profundidade de investigação e boa resolução vertical.

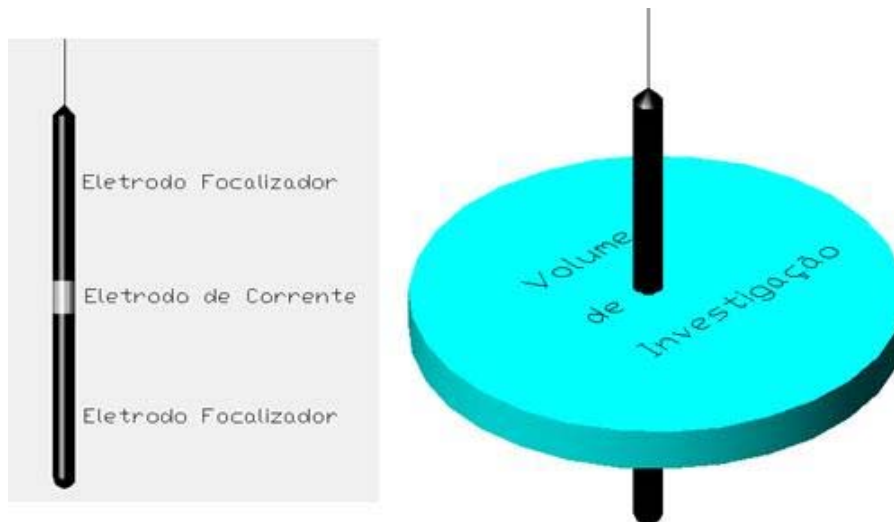


Figura 2.11: A esquerda é apresentada a distribuição dos eletrodos na sonda e a direita é mostrado o volume de investigação (Oliveira, 2005).

Os eletrodos focalizadores são alimentados por uma tensão fornecida pelo equipamento que é idêntica ao eletrodo de corrente. Sempre que o potencial elétrico for idêntico nos três eletrodos, a distribuição das linhas de corrente e equipotenciais se apresentam conforme mostra a Figura 2.12.



Figura 2.12: Linhas equipotenciais e de corrente em sondas para medir a resistividade com focalizadores (Oliveira, 2005).

Uma mudança de resistividade da camada adjacente ao eletrodo de corrente produz uma mudança do potencial elétrico nesse eletrodo conforme a lei de Ohm, já apresentada no item 2.2.3. Esta diferença é medida e convertida em

resistividade de acordo com a geometria do volume de investigação, que é particular e conhecida de cada fabricante de equipamentos de perfilagem.

2.3 Física Nuclear Básica para Aplicação em Perfilagem Geofísica

2.3.1 Radiação Nuclear

Nas primeiras investigações sobre materiais radioativos, três tipos de radiação foram identificados e nomeados, alfa (α), beta (β) e gama (γ). A radiação alfa e beta consistem de partículas carregadas eletricamente e sua interação com a matéria segue a lei de Coulomb. Isto leva a excitação ou ionização atômica, qual sejam as interações são com os elétrons do meio. As partículas alfa e beta rapidamente perdem energia quando a transferem para os elétrons do meio durante a sua passagem por ele. Seus alcances de penetração são limitados e na maioria dos materiais é função das propriedades do meio (Z , número de elétron por átomo e densidade) e da energia da partícula. Conseqüentemente, elas não possuem nenhuma importância prática para a perfilagem geofísica. Raios gama, por outro lado, são extremamente penetrantes, fato que os torna importantes para a perfilagem geofísica de poços. Na Figura 2.13, observamos um exemplo da penetração dos três tipos de radiação citados.

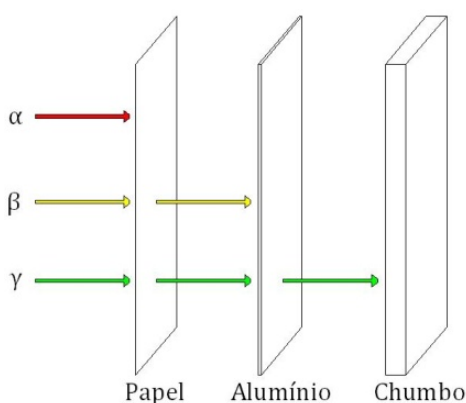


Figura 2.13: Exemplo da penetração dos três tipos de radiação citados.

Antes de discutir os raios gama, algumas definições devem ser apresentadas para a melhor compreensão dos mecanismos de interação e atenuação de feixe radioativo.

2.3.1.1 Decaimento Radioativo

O decaimento radioativo é propriedade do núcleo do átomo, no qual, a transição de um estado de energia para um inferior ocorre espontaneamente. Essa transição provoca um excesso de energia que é liberada pelo núcleo por meio de uma das radiações citadas anteriormente. O fato experimental básico associado com a radioatividade é a probabilidade de qualquer núcleo decair, em um intervalo de tempo dt ; isto é, ele é independente de influências externas, incluindo o decaimento de outros núcleos, temperatura e pressão. Todas as espécies de um mesmo nuclídeo possuem a mesma probabilidade de decaimento por unidade de tempo. A probabilidade de um núcleo decair em um instante dt é λdt onde λ é conhecida por constante de decaimento do nuclídeo. Então, o número de decaimentos por unidade de tempo para uma fonte que possui inicialmente N_i núcleos é (Ellis & Singer, 2007):

$$N(t) = N_i \cdot e^{-\lambda \cdot t}, \quad \text{Equação 2.6}$$

onde $N(t)$ é o número de nuclídeos remanescentes após o instante t .

Podemos, então, calcular a atividade de uma amostra, ou o número de decaimentos por unidade de tempo de acordo com:

$$\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N_i \cdot e^{-\lambda \cdot t}. \quad \text{Equação 2.7}$$

Portanto, a atividade de uma fonte radiativa decai exponencialmente com o passar do tempo.

2.3.1.2 Interação de Feixe Radioativo

A Figura 2.14 mostra um feixe de radiação (gama ou nêutrons) de intensidade ψ_i penetrando em um material, transpassando-o e saindo com uma intensidade ψ_f .

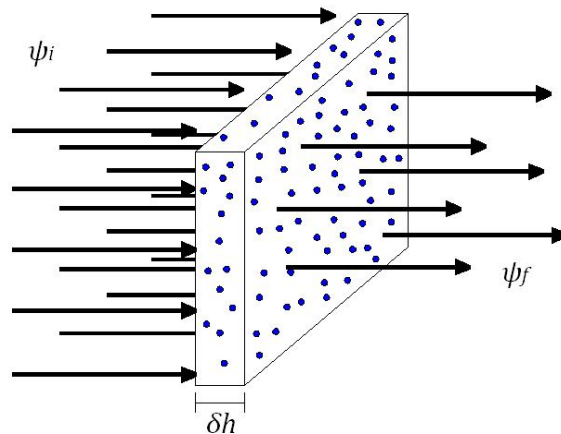


Figura 2.14: Fluxo de radiação atravessando um bloco.

A intensidade ψ da radiação representa um fluxo com dimensão definida pelo número de partículas por unidade de área por unidade de tempo. Um bloco de um dado material possui um número de partículas ou núcleos por unidade de volume, N_p , no qual o fluxo radioativo deverá interagir. Referências mostraram que após passar por um bloco de espessura δh , uma fração das partículas incidentes sofre interações. Essa fração é proporcional a espessura do bloco, número de núcleos e fluxo incidente. Isso pode ser expresso como:

$$\delta\psi = \psi_i - \psi_f = \sigma \cdot \psi \cdot N_p \cdot \delta h, \quad \text{Equação 2.8}$$

onde σ é uma constante de proporcionalidade chamada de *cross section* da interação. *Cross section*, na definição clássica, representa a área aparente que cada núcleo apresenta para o fluxo incidente. A unidade prática do *cross section* é chamada de *barn* e é definida como 10^{-24} cm^2 .

A *cross section* macroscópica, Σ , é o produto entre σ e N_p e sua dimensão é o inverso da distância. Partindo de σ , Σ pode ser facilmente calculada, pois N_p é

relacionado ao número de Avogadro, N_{Av} , e a densidade do material ρ_b pela da equação:

$$N_p = \frac{N_{Av}}{M} \cdot \rho_b, \quad \text{Equação 2.9}$$

onde M é o peso molecular do material alvo para uma única partícula por molécula.

Usualmente, a *cross section* para a maioria das reações precisa ser determinada experimentalmente.

2.3.2 Radiação Gama

Radiação gama ou raios gama são ondas eletromagnéticas com frequências muito elevadas. A sua emissão pode ocorrer quando um núcleo instável absorve um dos elétrons que orbita o átomo ou quando um elétron orbitante muda de nível de energia, de um estado excitado para um estado menos excitado. Devido a suas altíssimas frequências, os raios gama são considerados formados de partículas conhecidas como fótons.

2.3.2.1 Interação de Raios Gama com o Meio

Existem três tipos de interação dos raios gama com as formações que nos interessam: efeito fotoelétrico, espalhamento Compton e produção de pares. A probabilidade de ocorrer uma específica interação vai depender do número atômico do material e da energia dos raios gama incidentes. A ordem das interações descritas neste trabalho segue a ordem crescente de energia do raio gama incidente como observado na Figura 2.15.

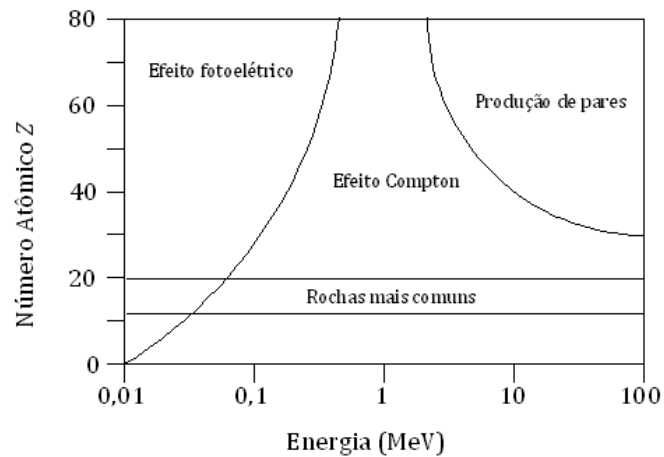


Figura 2.15: Tipo de interação presente entre raios gama e a matéria dependendo da energia do raio gama e número atômico (adaptado de Evans, 1967).

2.3.2.1.1 Efeito Fotoelétrico

O efeito fotoelétrico resulta da interação de um raio gama com um átomo do material (Figura 2.16). Neste processo, o raio gama incidente desaparece e transfere sua energia para um elétron. Se a energia do raio gama é grande o suficiente, o elétron é ejetado do átomo e começa a interagir com os materiais adjacentes. Normalmente, o elétron ejetado é substituído por outro de um nível energético mais interno acompanhado da emissão de um raio-X com uma energia (geralmente inferior a 100 keV) que é dependente do número atômico do material.

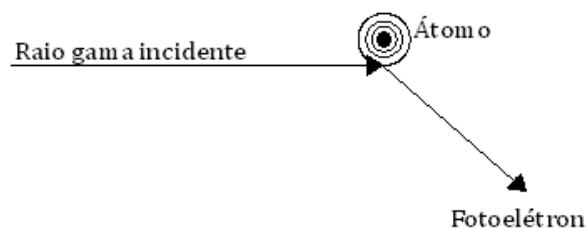


Figura 2.16: Efeito fotoelétrico (adaptado de Hearst et al., 2000).

2.3.2.1.2 Espalhamento Compton

Subindo na escala de energia, o próximo processo é o espalhamento Compton, que envolve a interação de raios gama com elétrons individuais (Figura 2.17). A radiação gama é espalhada a partir de um elétron com energia de ligação desprezível quando comparada com a energia dos raios gama. Somente uma parte da energia dos raios gama é dada ao elétron e a energia gama resultante (é espalhada) e pode ser calculada através da lei de conservação de energia e momento. Para se ter uma apreciação do efeito do espalhamento Compton, em um material com átomos de massa A e número atômico Z , devemos nos ater ao coeficiente de absorção linear. Essa *cross section* macroscópica é a *cross section* puramente Compton, σ_{Co} , multiplicada pelo número de elétrons por centímetro cúbico (N_e):

$$\Sigma_{Co} = \sigma_{Co} \cdot N_e \cdot \quad \text{Equação 2.10}$$

O número de elétrons por centímetro cúbico (N_e) é dado por:

$$N_e = \frac{N_{Av}}{A} \cdot \rho_b \cdot Z \cdot \quad \text{Equação 2.11}$$

Unindo as equações 2.10 e 2.11 obtemos:

$$\Sigma_{Co} = \sigma_{Co} \frac{N_{Av}}{A} \cdot \rho_b \cdot Z \cdot \quad \text{Equação 2.12}$$

O fator Z no final das equações 2.11 e 2.12 considera que o número de elétrons por átomo é igual a Z . Conseqüentemente, a atenuação dos raios gama causados por espalhamento Compton será função da densidade ρ_b e da razão Z/A .

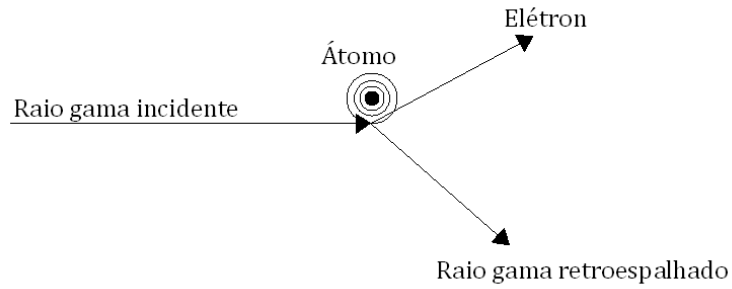


Figura 2.17: Espalhamento Compton (adaptado de Hearst et al., 2000).

2.3.2.1.3 Produção de Pares

Como o efeito fotoelétrico, a produção de pares está mais relacionada com absorção do que com espalhamento. Neste caso, o raio gama interage com o campo elétrico de um núcleo e, se a energia do raio gama é acima de 1022 MeV, ele desaparece e um par elétron-positron é formado (Figura 2.18).

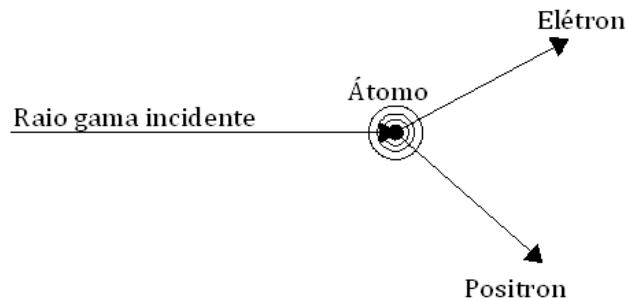


Figura 2.18: Formação de pares (adaptado de Hearst et al., 2000).

2.3.2.2 Atenuação de Raios Gama

Para entendermos a lei da atenuação, devemos observar a Equação 2.8 de interação de feixe radioativo, que por sua vez é similar a lei de decaimento radioativo (Equação 2.7), resultando em:

$$\psi_f = \psi_i \cdot e^{-N_p \cdot \sigma \cdot h}, \quad \text{Equação 2.13}$$

onde ψ_i é o fluxo incidente em um meio de espessura h , N_p é o número de meios espalhadores por unidade de volume e σ é a *cross section* do meio e ψ_f é o fluxo que deixa o meio. Para raios gama com energia na ordem das centenas de keV, a interação predominante é o espalhamento Compton, neste caso os espalhadores são elétrons e a *cross section* igual a σ_{Co} . Isso resulta na seguinte expressão de atenuação da fonte de raios gama:

$$\psi_f = \psi_i \cdot e^{-N_e \cdot \sigma_{Co} \cdot h}. \quad \text{Equação 2.14}$$

E como $N_e \cdot \sigma_{Co}$ é igual a Σ_{Co} temos:

$$\psi_f = \psi_i \cdot e^{-\rho_b \cdot \frac{Z}{A} \cdot N_{Av} \cdot \sigma_{Co} \cdot h}. \quad \text{Equação 2.15}$$

Como pode ser observada, a atenuação dos raios gama é proporcional a espessura do material h , a densidade natural e a razão Z/A .

Outro fator importante é aquele que agrupa os termos $\frac{Z}{A} \cdot N_{Av} \cdot \sigma_{Co}$, esse fator é conhecido como coeficiente de absorção de massa e é denotado pela letra μ e possui unidade cm^2/g .

Então, a equação que descreve a atenuação de raios gama pode ser reescrita como:

$$\psi_f = \psi_i \cdot e^{-\rho_b \cdot \mu \cdot h}. \quad \text{Equação 2.16}$$

A Figura 2.19 apresenta o comportamento do coeficiente de atenuação de massa para o alumínio.

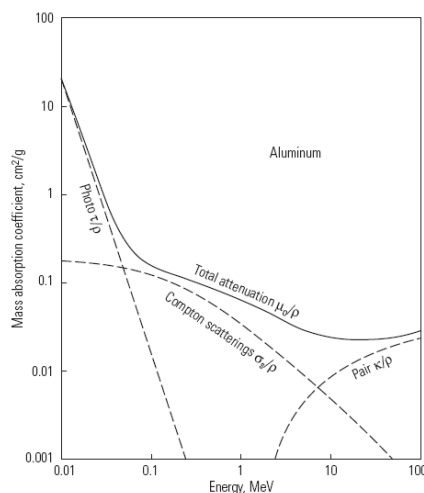


Figura 2.19: Comportamento do coeficiente de atenuação de massa para o alumínio variando com a energia do raio gama incidente(Ellis & Singer, 2007).

2.4 Perfilagem Geofísica Nuclear

A perfilagem geofísica nuclear é uma subdivisão da perfilagem geofísica convencional. Usualmente, ela é dividida em dois grupos: perfilagem geofísica nuclear passiva e perfilagem geofísica nuclear ativa. Na perfilagem passiva, as emissões de radiação natural que ocorrem pelos materiais das paredes dos furos são medidas por detectores apropriados localizados na ferramenta que percorre o poço. Na perfilagem ativa, uma fonte radioativa presa na ferramenta fornece a radiação que sofre as interações já descritas com as paredes do furo para então serem medidas por um detector preso à ferramenta.

2.4.1 Detectores

A detecção de raios gama é composta de dois passos. Primeiro, o raio gama interage com algum material e então, parte ou a totalidade de sua energia é convertida em radiação ionizante. O segundo passo é a conversão dessa radiação ionizante composta de elétrons em um sinal elétrico possível de ser observado. Na primeira fase, os detectores mais comuns se aproveitam das três interações descritas no item 2.3.2.1. Atualmente, três tipos de detectores são usados:

contadores de descarga de gás, detector de estado sólido e cintilômetros de iodeto de sódio (NaI). Os cintilômetros de NaI são os mais usados em ferramentas de perfilagem geofísica nuclear passiva e ativa, por isso será dada ênfase na descrição de seu funcionamento.

2.4.1.1 Cintilômetros de Iodeto de Sódio

É o detector de raios gama mais comum e mais usado na indústria. São constituídos por um cristal de iodeto de sódio (NaI) ativado por uma pequena quantidade de Tálcio, que quando ionizado pela radiação incidente, emite luz visível. Essa emissão de luz é proporcional a energia do raio gama ionizante e é detectada pelo segundo componente do cintilômetro, um tubo fotomultiplicador que está conectado ao cristal de NaI. Esse tubo fotomultiplicador produz um pulso elétrico cuja amplitude é proporcional à energia do raio gama incidente.

2.4.2 Unidades de Medida

O decaimento radioativo é uma grandeza física que possui unidades próprias.

2.4.2.1 Contagens Por Segundo

Essa unidade representa o número de partículas que decaíram em um segundo, onde cada decaimento representa uma contagem.

2.4.2.2 API

As contagens realizadas pelo detector de radiação gama natural pode ser influenciada pela radiação gama natural de fundo (*background*) do local ou,

também, pelo tipo e tamanho do detector utilizado. Para realizar comparações entre as contagens com equipamentos diferentes, ou contagens realizadas em épocas diferentes, foi criada a norma API (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 1974) que padroniza a contagem com uma fonte de atividade conhecida onde a influência da radiação de fundo e o tipo de detector são eliminados.

Para realizar a calibração, é importante conferir a posição dos cintilômetros. Esse procedimento pode ser feito percorrendo a fonte de calibração por toda a extensão da sonda. Assim, onde o equipamento registrar o maior número de contagens é o ponto onde o cintilômetro está localizado.

A padronização API é feita com a fonte de calibração acoplada em uma haste, ficando a uma distância de um metro da sonda na posição do cintilômetro na sonda. É importante salientar, que a calibração API envolve o uso de uma fonte radioativa e que mesmo sendo de baixo nível, deve ser feita por pessoas habilitadas para o manuseio de fontes radioativas e respeitados os procedimentos descritos no Plano de Rádio Proteção. São necessários cuidados com a distância e tempo de exposição, bem como o uso dos dosímetros pessoais, contadores Geiger Muller, pinças, etc.

A calibração API deve ser realizada conforme a decisão do geofísico. Devido ao desgaste e fragilidade do cintilômetro, a calibração deve ser freqüente. Após transporte ou manuseio da fonte, que pode danificar o equipamento, recomenda-se à calibração API. A atividade da fonte de calibração deve ser atualizada de acordo com o tempo de meia vida, que varia conforme o nuclídeo utilizado.

2.4.3 Perfilagem Geofísica Nuclear Passiva: Gama Natural

Como o nome já diz, a perfilagem geofísica nuclear de gama natural é referente à radiação gama natural emitida pelas rochas. Deve-se ater a origem dessa radiação gama natural, isto é, aos poucos isótopos instáveis que são responsáveis por elas.

A perfilagem de radiação gama natural foi introduzida no fim da década de 30 e foi o primeiro método de perfilagem geofísica não elétrico. Imediatamente, mostrou a sua capacidade de distinguir entre formações xistosas alteradas e sãs.

A medida de radiação gama natural emitida pelas rochas pode ser feita de dois modos diferentes, dependendo da ferramenta usada. A maneira mais simples é quando se mede a radiação total emitida pelas formações, e indicada para uma análise quantitativa. A segunda maneira é gravando o espectro de energia dos raios gama captados pelo detector. Essa maneira é mais complexa que a primeira, mas com ela é possível determinar a concentração de alguns elementos do meio. Esse último modo é mais conhecido como gama espectral. Ambos os modos possuem profundidades de investigação semelhantes e podem ser aplicados em poços secos ou preenchidos com líquido e moderadamente afetados por paredes de poço irregulares, revestimentos e fluidos de perfuração.

2.4.3.1 Fontes de Radiação Natural

Para se ter uma idéia de quais isótopos são responsáveis pela emissão de radiação gama natural, devemos comparar a meia vida deles com a idade estimada da Terra, que é aproximadamente 4.10^9 anos. Existem apenas três isótopos dos elementos potássio, tório e urânio com meias vidas dessa magnitude: K^{40} (meia vida de $1,3.10^9$ anos), Th^{232} ($1,4.10^{10}$ anos) e U^{238} ($4,4.10^9$ anos). O decaimento do K^{40} é acompanhado pela emissão de um único e característico raio gama com uma energia de 1,46 MeV. Tório e urânio decaem seguindo duas diferentes séries formadas por diferentes isótopos até chegar em um isótopo estável de chumbo.

A maior fonte de radiação gama natural é o potássio que é bastante comum na crosta terrestre, principalmente em formações sedimentares que possuem diversos minerais que contem potássio. Feldspato, que após o quartzo, é o mineral mais abundante em arenitos, possui uma família com membros ricos em potássio. Em contrapartida, minerais com o tório e urânio são raros. A solubilidade de compostos de urânio facilita o seu transporte, tornando freqüente a sua ocorrência em xistos orgânicos. O tório é freqüentemente associado como minerais pesados como monazita e zircônio. Diferente do potássio, que pode alcançar concentrações na casa de alguns percentuais, o urânio e tório não passam de algumas partes por milhão.

2.4.3.1.1 Gama Natural em Formações Carboníferas

Como um dos focos do trabalho é o uso de perfilagem geofísica de gama natural em carvão, a emissão característica de gama natural por formações carboníferas é importante de ser compreendida.

A intensidade de radiação gama emitida pelas rochas depende de sua composição química. Xistos apresentam quantidades significativas de potássio, conseqüentemente, as formações xistosas se destacam em um perfil geofísico de gama natural que registra uma alta emissão de raios gama. Carvão, por sua vez, quase não possui potássio em sua composição e raramente apresenta urânio e tório, então, o carvão apresenta as mais baixas emissões de radiação gama natural. Conseqüentemente, é fácil distinguir camadas de carvão de formações xistosas e carbonosas. O sinal de radiação gama natural medido pela ferramenta de perfilagem geofísica em carvão é muito semelhante ao sinal apresentado por arenitos, por isso é aconselhável não usar apenas o perfil de gama natural e sim uma combinação de perfis. A Figura 2.20 mostra um exemplo de perfil geofísico de radiação gama natural.

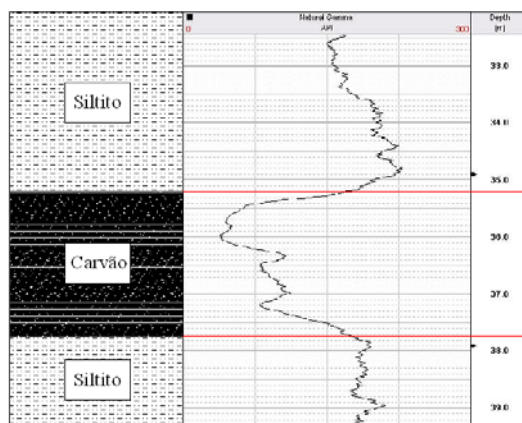


Figura 2.20: Exemplo de um registro de emissão de radiação gama natural medido em API (escala do perfil variando de 0 a 300 API)

O uso do perfil geofísico de gama natural é bastante aplicado na pesquisa de carvão em combinação com outras sondas. Comumente, é usado para uma

identificação quantitativa da espessura das camadas. Na Figura 2.21 observam-se alguns valores médios de radiação gama natural para diferentes formações.

Tipo de rocha		Parâmetro	Raios gama		
			0	API	150
Folhelho	Marinho				■
	Não marinho			■	
Carvão	Betuminoso		■		
	Inferior		■		
	Linhito		■		
	Antracito		■		
Arenito	Poroso		■		
	Compacto		■		
Siltito				■	
Calcáreo	Poroso		■		
	Compacto		■		

Figura 2.21: Valores médios de emissão de radiação gama natural para algumas formações.

2.4.4 Perfilagem Geofísica Nuclear Ativa: Gama Retroespalhado

Esta técnica de perfilagem geofísica é amplamente utilizada para a inferência de densidade das formações. É, também, conhecida como perfil de densidade e perfil gama – gama. Por ser um método de perfilagem ativo, ele utiliza uma fonte de radiação gama, e por meio das medidas dos resultados das interações dos raios gama emitidos por esta fonte com as formações, ele é capaz de inferir densidades das formações.

2.4.4.1 Princípio de Funcionamento

A sonda de perfilagem gama retroespalhada é composta de dois importantes itens: uma fonte radioativa e cintilômetros. A fonte radioativa mais utilizada é a composta por sais de Césio 137 (Cs^{137}) que emite radiação gama com energia de 662 keV. Os cintilômetros usados foram descritos no item 2.4.1, e as sondas mais antigas apresentavam apenas um cintilômetro enquanto que as atuais podem apresentar até quatro distribuídos a diferentes distâncias da fonte

radioativa no corpo da sonda. A Figura 2.22 mostra um exemplo de uma sonda comercial com cinco cintilômetros.

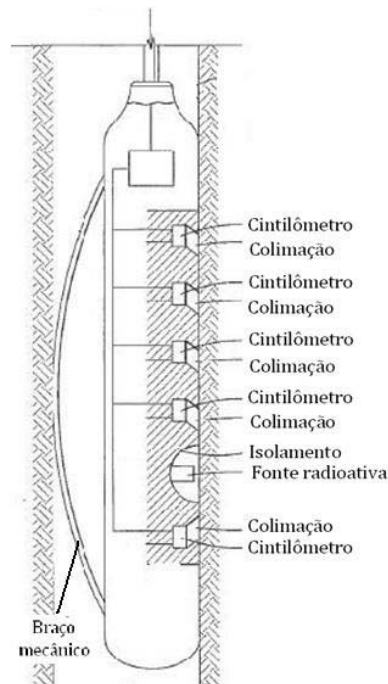


Figura 2.22: Sonda composta de fonte radioativa, cinco cintilômetros e braço mecânico (adaptado de Mathis & Mickael, 1997).

O braço mecânico mostrado na Figura 2.22 está presente na grande maioria das sondas de perfilagem de radiação retroespalhada. A radiação captada pelos cintilômetros deve interagir somente com as formações geológicas da parede do furo e, portanto, não deve haver nenhum material entre a sonda e a parede como lama da furação ou água. Por isso, a sonda deve estar em total contato com a parede do furo, e o braço mecânico providencia esse contato forçando a sonda contra a parede.

Os cintilômetros usados são construídos e colimados especialmente para captar apenas os raios gama retroespalhados originados da fonte de Cs^{137} . Como já foi dito, a fonte emite apenas raios gama com energia de 662 keV, e de acordo com a Figura 2.15, a única interação que ocorre entre os raios gama da fonte e as formações presentes nas paredes do poço é o espalhamento Compton.

No item 2.3.2.1.2, foi mostrado que a interação de raios gama por espalhamento Compton é dependente apenas do número de elétrons espalhadores

presentes, e isso por sua vez é diretamente proporcional a densidade natural do meio. Assim, a redução de um fluxo de raios gama por um meio de espessura x é dado por:

$$\psi_f = \psi_i \cdot e^{-\rho_b \cdot \frac{Z}{A} \cdot N_{Av} \cdot \sigma_{Co} \cdot x} \quad \text{Equação 2.17}$$

Portanto, para a inferência de densidades na perfilagem geofísica com o método de medição de radiação gama retroespalhada, é assumido (baseado na Equação 2.17) que ψ_f é a taxa de radiação retroespalhada registrada pelo cintilômetro, ψ_i é a intensidade inicial da fonte radioativa presente na sonda, $\rho_b \frac{Z}{A} N_{Av}$ é o número de elétrons presentes na formação, σ_{Co} é o *cross section* puramente Compton e x é aproximadamente o espaçamento entre fonte radioativa e cintilômetro. A Figura 2.23 apresenta uma visualização do fenômeno.

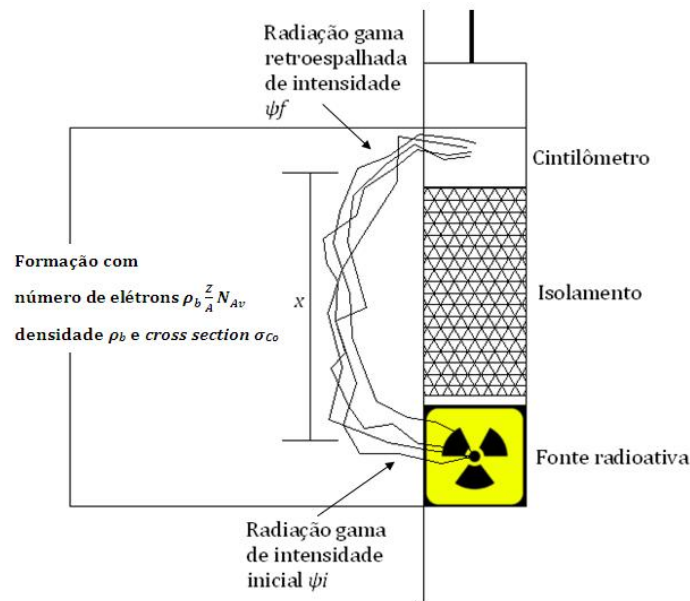


Figura 2.23: Visualização do fenômeno de medida de radiação retroespalhada na perfilagem geofísica.

Logo, o princípio de funcionamento da perfilagem geofísica de radiação gama retroespalhada se baseia no fato de que as taxas de radiação retroespalhada obedecem a regra da atenuação de feixe radioativo (Equação 2.15). Esta, por sua

vez, segue a lei de decaimento radioativo (Equação 2.6), logo, a taxas de radiação retroespalhada são dadas pela Equação 2.17.

Deve-se ressaltar que a Equação 2.17 mostra que a atenuação do feixe radioativo é relacionada com a densidade natural (ρ_b) das formações apenas se a relação entre número atômico e massa atômica (Z/A) permanece constante, fato que ocorre na grande maioria dos materiais com um valor igual a 0,5, porém, alguns elementos apresentam uma relação Z/A variável (o hidrogênio, por exemplo, possui a relação Z/A aproximadamente igual a 1), por isso é conveniente definir a densidade de elétrons da formação, ρ_e , dada por:

$$\rho_e = 2 \cdot \frac{Z}{A} \cdot \rho_b \cdot \text{Equação 2.18}$$

Uma simplificação do fenômeno é dizer que em materiais de baixa densidade eletrônica (e conseqüentemente baixa densidade natural) o receptor irá medir altas taxas de radiação gama retroespalhada e em matérias de alta densidade eletrônica (e conseqüentemente alta densidade natural) o receptor irá informar baixas taxas de radiação gama retroespalhada. A Figura 2.24 mostra um gráfico da função de resposta da sonda de perfil gama retroespalhado para materiais de diversas densidades.

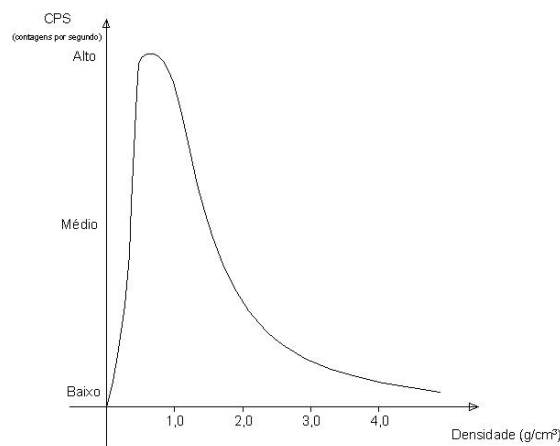


Figura 2.24: Função de resposta característica para sondas de perfil de radiação gama retroespalhada para materiais de diversas densidades (Hofmann et al., 1982).

O motivo das taxas medidas de radiação retroespalhada serem nulas à densidade zero é que na ausência total de matéria (isto é, a sonda está cercada de um meio de densidade 0 t/m^3) não existe meio para a interagir com a radiação vinda da fonte, logo, não há radiação retroespalhada. Conforme a densidade do meio sobe para 1 t/m^3 a taxa de retroespalhamento cresce até encontrar o ponto de inflexão. A partir deste ponto, a curva obedece a uma exponencial negativa, decrescendo até o infinito onde o meio retroespalhador é tão denso que toda a radiação é absorvida por ele.

Na maioria dos casos, não é possível determinar a *cross section* do material, valores de Z e A de minerais complexos e até mesmo o fluxo de radiação inicial de uma fonte, por isso, muitas campanhas de perfilagem geofísicas para estimativa de densidade são baseadas em funções calibradas. Através de perfis geofísicos feitos em furos que possuem análise de recuperação de testemunhos, é possível construir um gráfico de dispersão do tipo densidade natural (obtida por análise de testemunhos) *versus* taxas de radiação retroespalhada (obtidas por perfilagem geofísica nos furos testemunhados) e sobre ele, com o auxílio de modelos matemáticos, ajustar uma função do tipo:

$$y = A_0 \cdot e^{-B_0 \cdot x}, \quad \text{Equação 2.19}$$

onde y é a variável dependente representando as taxas de radiação retroespalhada, x é a variável independente representando as densidades e A_0 e B_0 são constantes obtidas no ajuste da equação. Então, através da Equação 2.19 ajustada, é possível perfilar furos feitos sem recuperação de testemunhos e inferir valores de densidade.

Na Figura 2.25, podemos observar alguns valores de densidade para algumas formações.

O resultado do perfil geofísico de gama retroespalhado é bastante sensível a caimentos e paredes irregulares presentes no poço, por essa razão, as ferramentas desenvolvidas para esse método apresentam um compasso calibrador no corpo. Esse compasso é um braço mecânico que faz com que o lado da ferramenta que possui a direção de colimação da fonte radioativa e dos cintilômetros seja pressionada contra a parede do poço, evitando qualquer espaço vazio entre a

ferramenta e parede do poço. Além de fornecer a pressão entre parede e ferramenta, a presença do compasso calibrador fornece um novo perfil geofísico que mostra graficamente o comportamento da parede do furo. Na Figura 2.26, tem-se um exemplo de um registro geofísico feito pela ferramenta usada neste trabalho. Nesta figura, pode-se observar as taxas de radiação retroespalhadas medidas pelos três cintilômetros, a irregularidade da parede do poço e seu efeito sobre as medias dos cintilômetros.

Tipo de rocha	Parâmetro	Densidade	
		1	3
Folhelho	Marinho		
	Não marinho		
Carvão	Betuminoso		
	Inferior		
	Linhito		
	Antracito		
Arenito	Poroso		
	Compacto		
Silito			
Calcáreo	Poroso		
	Compacto		

Figura 2.25: Valores médios de densidade natural para algumas formações.

Na Figura 2.26, observa-se do lado esquerdo o perfil do compasso calibrador apresentado em polegadas com escala variando de 0 a 8. No lado direito, tem-se o registro geofísico dos três detectores presentes na sonda, a trilha em vermelho é o receptor conhecido por LSD (*long space density*) que está mais afastado da fonte radioativa, ele apresenta um escala em CPS (contagens por segundo) variando de 0 a 5000. A trilha em azul é o receptor intermediário conhecido por HRD (*high resolution density*) e sua escala vai de 0 a 10000 CPS e finalmente temos a trilha em verde que é o cintilômetro BRD (*bed resolution density*) que está mais próximo da fonte, a sua escala vai de 10000 a 30000 CPS. É importante observar como a taxa de radiação retroespalhada é maior conforme o receptor se aproxima da fonte radioativa.

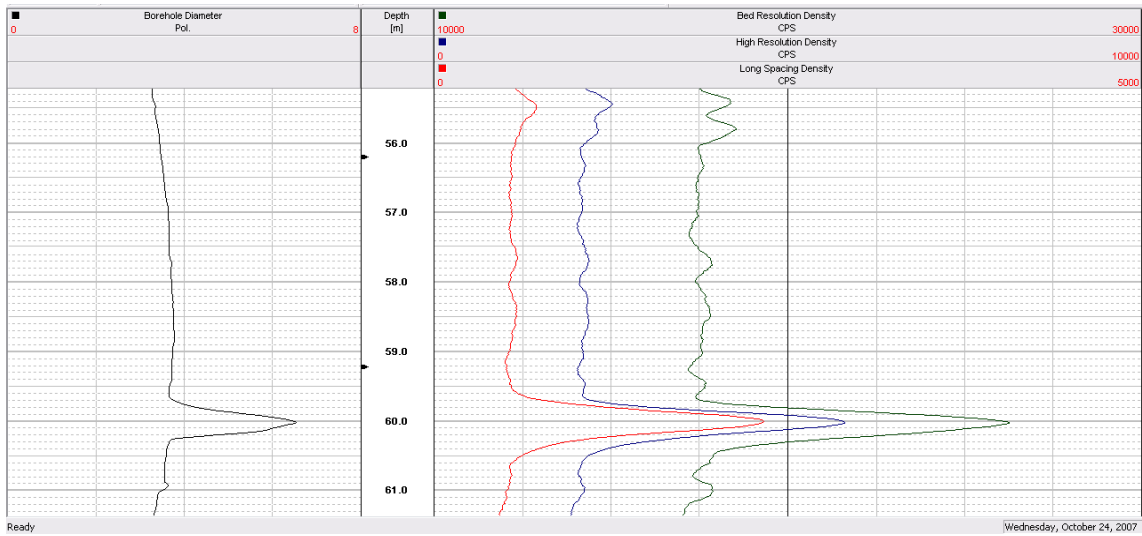


Figura 2.26: Exemplo de um perfil geofísico obtido com a sonda de radiação gama retroespalhada.

Capítulo 3

Krigagem Não Linear, Krigagem dos Indicadores e uso de Dados com Limites de Restrição

Neste capítulo, será apresentada uma breve introdução sobre krigagem de variáveis regionalizadas e krigagem não linear. Será dada uma maior ênfase na krigagem de indicadores e na incorporação de dados com intervalos de restrição (*soft data*).

3.1 Krigagem

Krigagem é um termo genérico aplicado a uma gama de métodos de estimativa que dependem da minimização do erro de estimativa (Blackwell & Sinclair, 2004). Esse nome foi dado por G Matheron e P. Carlier, que desenvolveram a teoria geoestatística baseados no trabalho sobre estimativas de teores em minas de ouro na África do Sul por D. Krige.

Vários métodos específicos estão incluídos no termo krigagem, incluindo krigagem simples (KS), krigagem ordinária (KO) (Matheron, 1963), krigagem de indicadores (KI) (Journel, 1982), krigagem universal (KU) (Marechal, 1970), krigagem de probabilidades (KP) (Sullivan, 1984) e krigagem de múltiplos indicadores (KIM). Todos se baseiam no conceito que a autocorrelação de uma variável regionalizada pode ser modelada por uma função matemática inferida através dos dados da variável regionalizada e usada para auxiliar na estimativa.

O objetivo da krigagem é providenciar a melhor estimativa para um local não amostrado usando a informação fornecida por dados contidos na grande área na qual o local a ser estimado também está incluído. Os dados conhecidos são

utilizados em um somatório de equações lineares onde cada termo somado é constituído por duas partes, uma delas é o valor do dado conhecido e a outra é um peso conhecido como peso de krigagem. O peso de krigagem é obtido através da resolução de uma matriz constituída pelas covariâncias entre os dados conhecidos, e entre os dados conhecidos e o ponto a ser estimado. As covariâncias são estimadas através do modelo ajustado aos dados amostrais disponíveis.

Em resumo, para se estimar o valor de um atributo contínuo z em um local não amostrado \mathbf{u} , usando apenas os valores conhecidos de z dentro de uma área de estudo A , a variável randômica resultante da krigagem, conhecida como $Z^*(\mathbf{u})$ é definida por:

$$Z^*(\mathbf{u}) - m(\mathbf{u}) = \sum_{a=1}^{n(\mathbf{u})} \lambda_a(\mathbf{u}) \cdot [Z(\mathbf{u}_a) - m(\mathbf{u}_a)], \quad \text{Equação 3.1}$$

onde $\lambda_a(\mathbf{u})$ é o peso dado à amostra $z(\mathbf{u}_a)$ que é uma das realizações da variável randômica $Z(\mathbf{u}_a)$, $m(\mathbf{u})$ é a média da variável randômica $Z(\mathbf{u})$ e $m(\mathbf{u}_a)$ é a média da variável randômica $Z(\mathbf{u}_a)$.

3.2 Krigagem Não Linear

Todos os métodos de krigagem não linear são aplicações de krigagem linear (KS ou KO) a dados que sofreram transformações matemáticas não lineares. O nome dado ao método de krigagem não linear depende da transformação sofrida pelos dados, alguns exemplos listados por Deutsch & Journel (1998) são:

- Krigagem Lognormal: Trata-se da krigagem aplicada a dados alterados por transformações logarítmicas.
- Krigagem Multi-Gaussiana: Krigagem aplicada a dados transformados em uma distribuição normal.
- Krigagem Rank: Krigagem aplicada a dados que foram ranqueados.
- Krigagem dos Indicadores: Krigagem aplicada a dados codificados por indicadores binários (0 e 1).

- Krigagem Disjuntiva: Krigagem aplicada a dados alterados por transformações polinomiais específicas.

Dentre os métodos listados, o mais aplicável ao banco de dados usado neste trabalho é a krigagem dos indicadores, pois ele apresenta uma metodologia diferenciada para a incorporação de dados gerados por funções de ajuste que possuem limites de confiança. Por essa razão, o método de krigagem não linear que será abordado neste capítulo será o de krigagem dos indicadores.

3.3 Krigagem Dos Indicadores (KI)

A krigagem de indicadores envolve a codificação dos dados originais em zeros e uns, isto é, os valores a serem krigados não são mais os valores originais dos dados e sim o código (0 ou 1) atribuído a cada valor original de acordo com regras pré-estabelecidas. Essa transformação ou codificação pode ser de duas maneiras:

- De acordo com a posição do valor original em relação a um limite definido. Por exemplo, definido um teor de corte de 100 ppm, todas as amostras com teor inferior a esse teor receberão o indicador 1 e todas as amostras iguais ou superiores receberão o indicador 0. Essa distribuição é aplicada a variáveis contínuas.
- De acordo com a presença ou ausência de um atributo geológico. Por exemplo, a ausência de um tipo de solo no local amostrado codifica a amostra com o indicador 0 enquanto que a presença codifica com o indicador 1.

Apesar dos resultados da KI serem valores entre 0 e 1, o que interessa é o significado desse resultado, isto é, a KI fornece na verdade uma estimativa da função da distribuição condicional acumulada para um dado limite z_k :

$$\begin{aligned} [i(\mathbf{u}; z_k)]^* &= E\{I(\mathbf{u}; z_k | (n))\}^* \\ &= \text{Prob}^* \{Z(\mathbf{u}) \leq z_k | (n)\} \end{aligned} \quad \text{Equação 3.2}$$

onde $[i(\mathbf{u}; z_k)]^*$ é o resultado da krigagem dos indicadores no local \mathbf{u} usando o limite z_k , $E\{I(\mathbf{u}; z_k | (n))\}^*$ é a valor esperado para a variável randômica I no local \mathbf{u} usando o limite z_k e (n) a informação disponível da vizinhança de busca.

O processo da KI é repetido para um número K de limites z_k que discretizam o intervalo de variabilidade do valor real e contínuo de z . Através das estimativas da KI para cada limite z_k , é possível construir uma função de distribuição condicional acumulada para cada local \mathbf{u} estimado, e esta função representa um modelo probabilístico sobre a incerteza dos valores não amostrados $z(\mathbf{u})$.

Se $z(\mathbf{u})$ já é uma variável binária, isto é, o indicador 1 representa a ocorrência de um certo tipo de rocha no local \mathbf{u} enquanto que o indicador 0 é a ausência, a krigagem direta de $z(\mathbf{u})$ fornece um modelo da probabilidade de $z(\mathbf{u})$ ser o indicador 1.

Se $z(\mathbf{u})$ é uma variável contínua, deve-se fazer uma seleção cuidadosa do limites z_k a serem usados para a distribuição dos indicadores. Muitos limites tornam o trabalho cansativo e laborioso enquanto que a seleção de poucos limites implica a perda de importantes informações (Deutsch & Journel, 1998).

3.4 Distribuição dos Indicadores

A codificação com indicadores deve ser feita após a seleção da quantidade de limites e seus valores, é aconselhável que a quantidade não ultrapasse 15 e não seja menor que 5 (Goovaerts, 1997). Os valores dos limites podem ser escolhidos seguindo diferentes regras, podendo ser um teor de corte que divide o material entre minério e estéril, uma concentração de contaminante que necessita de remediação caso os valores sejam superiores e mais usualmente o valor dos nove decimais obtidos através da análise do histograma acumulado dos dados. Definido o número de limites e seu valor, parte-se à distribuição dos indicadores dependendo

do caráter conferido aos dados, isto é, se são dados primários ou com limites de restrição (*soft data*).

3.4.1 Dados Primários

Os dados primários, $z(\mathbf{u}_\alpha)$ são as medidas precisas do atributo de interesse z na área A e não existe incerteza significativa em relação ao seu valor no local amostrado \mathbf{u}_α . Dessa maneira, os indicadores são distribuídos seguindo a regra (Goovaerts, 1997):

$$i(\mathbf{u}_\alpha; z_k) = \begin{cases} 1 & \text{se } z(\mathbf{u}_\alpha) \leq z_k, k = 1, \dots, K. \\ 0 & \text{outro caso} \end{cases} \quad \text{Equação 3.3}$$

3.4.2 Dados com Limites de Restrição

Todo medida de um dado está acompanhada de alguma incerteza, em alguns casos essa incerteza pode ser negligenciada como mostrado no item anterior. Porém, quando a imprecisão da medida não pode ser ignorada, a distribuição dos indicadores será limitada a certos limites de restrição.

Neste caso, o valor de $z(\mathbf{u}_\alpha)$ pode assumir um valor entre a_α e b_α , então a distribuição dos indicadores seguirá a seguinte regra (Goovaerts, 1997):

$$i(\mathbf{u}_\alpha; z_k) = \begin{cases} 1 & \text{se } b_\alpha \leq z_k \\ \text{indefinido (não estimado)} & \text{se } z_k \in (a_\alpha, b_\alpha], k = 1, \dots, K, \\ 0 & \text{se } a_\alpha > z_k \end{cases} \quad \text{Equação 3.4}$$

3.5 Medidas de Continuidade e Variabilidade Espacial Aplicadas a Indicadores

A transformação dos dados originais $z(\mathbf{u})$ em indicadores $i(\mathbf{u}, z_k)$ não nos abstém da análise da estatística espacial dos dados, logo, as funções de cálculo de covariância e semivariograma são ainda utilizadas para definição dos parâmetros de krigagem.

3.5.1 Função de Covariância dos Indicadores

A covariância experimental dos indicadores a um dado afastamento \mathbf{h} é calculada por:

$$C_I(\mathbf{h}; z_k) = \frac{1}{N(\mathbf{h})} \sum_{\alpha=1}^{N(\mathbf{h})} i(\mathbf{u}_\alpha; z_k) \cdot i(\mathbf{u}_\alpha + \mathbf{h}; z_k) - F_{-\mathbf{h}}(z_k) \cdot F_{+\mathbf{h}}(z_k), \quad \text{Equação 3.5}$$

$$C_I(\mathbf{h}; z_k) = F(\mathbf{h}; z_k) - F_{-\mathbf{h}}(z_k) \cdot F_{+\mathbf{h}}(z_k)$$

com:

$$F_{-\mathbf{h}}(z_k) = \frac{1}{N(\mathbf{h})} \sum_{\alpha=1}^{N(\mathbf{h})} i(\mathbf{u}_\alpha; z_k) \quad \text{e} \quad F_{+\mathbf{h}}(z_k) = \frac{1}{N(\mathbf{h})} \sum_{\alpha=1}^{N(\mathbf{h})} i(\mathbf{u}_\alpha + \mathbf{h}; z_k), \quad \text{Equação 3.6}$$

onde $F_{-\mathbf{h}}(z_k)$ e $F_{+\mathbf{h}}(z_k)$ são as proporções dos valores separados de \mathbf{h} que não excedem o valor limite z_k .

A covariância dos indicadores $C_I(\mathbf{h}; z_k)$ aparece como sendo o centro das freqüências acumuladas $F(\mathbf{h}; z_k)$. Essa freqüência mede o quanto dois valores do mesmo atributo z separados por um vetor \mathbf{h} são juntamente menores que o valor limite z_k . Para pequenos valores limites z_k , $F(\mathbf{h}; z_k)$ mede a conectividade entre os baixos teores separados por um vetor \mathbf{h} : quanto maior $F(\mathbf{h}; z_k)$, melhor estarão conectados no espaço os baixos teores de z . A conectividade espacial entre valores altos (valores superiores a um elevado limite z_k) podem ser medidos por $F(\mathbf{h}; z_k)$, onde o indicador é agora $j(\mathbf{u}_\alpha; z_k) = 1 - i(\mathbf{u}_\alpha; z_k)$.

3.5.2 Correlograma dos Indicadores

O correlograma dos indicadores é a estandarização da função de covariância dos indicadores que foi apresentada no item anterior.

$$\rho_I(\mathbf{h}; z_k) = \frac{C_I(\mathbf{h}; z_k)}{\sqrt{\sigma_{-\mathbf{h}}^2(z_k) \cdot \sigma_{+\mathbf{h}}^2(z_k)}} \in [-1, +1], \quad \text{Equação 3.7}$$

onde $\sigma_{-\mathbf{h}}^2(z_k) = F_{-\mathbf{h}}(z_k)[1 - F_{-\mathbf{h}}(z_k)]$ é a variância dos indicadores do início do vetor de separação \mathbf{h} e $\sigma_{+\mathbf{h}}^2(z_k) = F_{+\mathbf{h}}(z_k)[1 - F_{+\mathbf{h}}(z_k)]$ é a variância dos indicadores do extremo do vetor de separação \mathbf{h} .

3.5.3 Semivariograma dos Indicadores

O cálculo do semivariograma dos indicadores pode ser obtido com:

$$\gamma_I(\mathbf{h}; z_k) = \frac{1}{2 \cdot N(\mathbf{h})} \cdot \sum_{\alpha=1}^{N(\mathbf{h})} [i(\mathbf{u}_\alpha; z_k) - i(\mathbf{u}_\alpha + \mathbf{h}; z_k)]^2. \quad \text{Equação 3.8}$$

O variograma dos indicadores $2\gamma_I(\mathbf{h}; z_k)$ mede o quanto dois valores z separados por um vetor \mathbf{h} estão em lados opostos do valor limite z_k . Em outras palavras, $2\gamma_I(\mathbf{h}; z_k)$ mede a frequência de transição entre duas classes de valores de z em função de \mathbf{h} .

3.5.4 Interpretação Gráfica

Os valores das funções de semivariograma e covariância dos indicadores podem ser graficamente interpretados como proporções de pontos (pares de

dados) que caem em áreas específicas do gráfico de dispersão do vetor \mathbf{h} conforme mostrado na Figura 3.1.

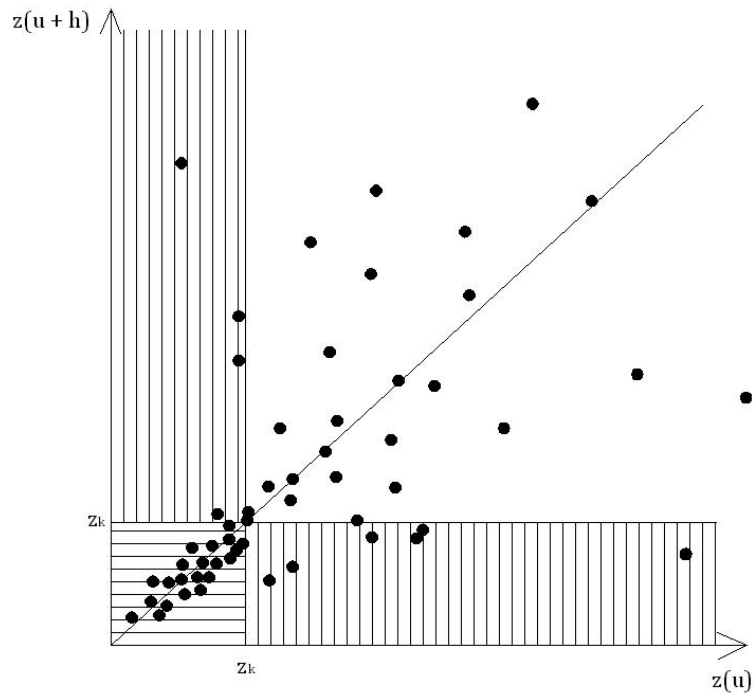


Figura 3.1: Interpretação gráfica das estatísticas espaciais dos indicadores (adaptado de Goovaerts, 1997).

A covariância dos indicadores não centrada $F(\mathbf{h}; z_k)$, representa a proporção dos pares de dados $(z(\mathbf{u}_\alpha), z(\mathbf{u}_\alpha + \mathbf{h}))$ que são juntamente inferiores ao valor limite z_k (área destacada por linhas horizontais na Figura 3.1). Os únicos pares de dados que contribuem para o variograma dos indicadores $2\gamma_I(\mathbf{h}; z_k)$ são aqueles cujos valores $(z(\mathbf{u}_\alpha), z(\mathbf{u}_\alpha + \mathbf{h}))$ estão em lados opostos do valor limite z_k . O valor do variograma corresponde a proporção de pontos que caem na área destacada por linhas verticais na Figura 3.1.

3.6 Estimando através da Krigagem de Indicadores

Para se estimar o indicador $i(\mathbf{u}; z_k)$ em qualquer local \mathbf{u} usando os dados z transformados em indicadores após a seleção do limite z_k , deve-se usar o estimador linear apresentado na Equação 3.1 em termos de indicadores, isto é:

$$\left[I(\mathbf{u}; z_k) \right]^* - E\{I(\mathbf{u}; z_k)\} = \sum_{\alpha=1}^{n(\mathbf{u})} \lambda_{\alpha}(\mathbf{u}; z_k) \cdot \left[I(\mathbf{u}_{\alpha}; z_k) - E\{I(\mathbf{u}_{\alpha}; z_k)\} \right], \text{ Equação 3.9}$$

onde $\lambda_{\alpha}(\mathbf{u}; z_k)$ é o peso atribuído ao indicador $i(\mathbf{u}_{\alpha}; z_k)$ interpretado como uma realização da variável randômica $I(\mathbf{u}_{\alpha}; z_k)$. Assim como a krigagem dos valores originais z , dois tipos de krigagem dos indicadores são importantes, dependendo do comportamento da média na área de interesse A .

3.6.1 Krigagem Simples dos Indicadores (KSI)

O estimador da krigagem simples dos indicadores considera a média dos indicadores conhecida e constante por toda a área A , isto é:

$$E\{I(\mathbf{u}; z_k)\} = F(z_k), \text{ conhecido } \forall \mathbf{u} \in A. \quad \text{Equação 3.10}$$

Desta maneira, o estimador linear mostrado na Equação 3.9 é escrito como uma combinação linear das $(n(\mathbf{u})+1)$ partes de informações, do $n(\mathbf{u})$ indicador da variável randômica $I(\mathbf{u}_{\alpha}; z_k)$ e de $F(z_k)$:

$$\begin{aligned} \left[F(\mathbf{u}; z_k | (n)) \right]_{sIK}^* &= \left[I(\mathbf{u}; z_k) \right]_{sIK}^* \\ &= F(z_k) + \sum_{\alpha=1}^{n(\mathbf{u})} \lambda_{\alpha}^{SK}(\mathbf{u}; z_k) \cdot \left[I(\mathbf{u}_{\alpha}; z_k) - F(z_k) \right], \quad \text{Equação 3.11} \\ &= \sum_{\alpha=1}^{n(\mathbf{u})} \lambda_{\alpha}^{SK}(\mathbf{u}; z_k) \cdot I(\mathbf{u}_{\alpha}; z_k) + \lambda_m^{SK}(\mathbf{u}; z_k) \cdot F(z_k) \end{aligned}$$

onde o peso da média é definido como:

$$\lambda_m^{SK}(\mathbf{u}; z_k) = 1 - \sum_{\alpha=1}^{n(\mathbf{u})} \lambda_{\alpha}^{SK}(\mathbf{u}; z_k). \quad \text{Equação 3.12}$$

A média dos indicadores pode ser estimada pela frequência acumulada das amostras $F^*(z_k)$ e os pesos de krigagem podem ser obtidos através da resolução de um sistema de krigagem do tipo:

$$\sum_{\beta=1}^{n(\mathbf{u})} \lambda_{\beta}^{SK}(\mathbf{u}; z_k) \cdot C_I(\mathbf{u}_{\alpha} - \mathbf{u}_{\beta}; z_k) = C_I(\mathbf{u}_{\alpha} - \mathbf{u}; z_k),$$

$$\alpha = 1, \dots, n(\mathbf{u})$$

Equação 3.13

onde $C_I(\mathbf{u}; z_k)$ é a função de covariância da função randômica $I(\mathbf{u}; z_k)$ a um limite z_k .

3.6.2 Krigagem Ordinária dos Indicadores (KOI)

A krigagem ordinária dos indicadores permite levar em consideração as flutuações locais do valor da média dos indicadores através da limitação do domínio da estacionaridade da média à uma vizinhança local ($W(\mathbf{u})$):

$$E\{I(\mathbf{u}'; z_k)\} = \text{constante mas desconhecida } \forall \mathbf{u}' \in W(\mathbf{u}).$$

Equação 3.14

O estimador de krigagem ordinária dos indicadores é a combinação linear dos $n(\mathbf{u})$ indicadores randômicos produzidos por $I(\mathbf{u}_{\alpha}; z_k)$ na vizinhança $W(\mathbf{u})$:

$$\left[F(\mathbf{u}; z_k | (n)) \right]_{oIK}^* = \left[I(\mathbf{u}; z_k) \right]_{oIK}^*$$

$$= \sum_{\alpha=1}^{n(\mathbf{u})} \lambda_{\alpha}^{OK}(\mathbf{u}; z_k) \cdot I(\mathbf{u}_{\alpha}; z_k),$$

Equação 3.15

onde os pesos de krigagem são dados por um sistema de krigagem ordinária do tipo:

$$\sum_{\beta=1}^{n(\mathbf{u})} \lambda_{\beta}^{OK}(\mathbf{u}; Z_k) \cdot C_I(\mathbf{u}_{\alpha} - \mathbf{u}_{\beta}; Z_k) + \mu_{OK}(\mathbf{u}; Z_k) = C_I(\mathbf{u}_{\alpha} - \mathbf{u}; Z_k)$$

$$\sum_{\beta=1}^{n(\mathbf{u})} \lambda_{\beta}^{OK}(\mathbf{u}; Z_k) = 1 \quad \alpha = 1, \dots, n(\mathbf{u})$$

Equação 3.16

Um exemplo extraído de Goovaerts (1997) auxilia na compreensão da krigagem dos indicadores seja simples ou ordinária. Considere 10 amostras de Cádmio (Cd) nos locais \mathbf{u}_0 até \mathbf{u}_{10} (Figura 3.2a) e quatro limites para distribuição dos indicadores (0,8; 1,38; 1,88 e 2,26 ppm). Para cada limite, foi calculado o semivariograma com os dados disponíveis codificados pelos indicadores (Figura 3.2b). O resultado da oIK, sIK e média aritmética dos indicadores calculados com dados disponíveis para o limite 0,8 ppm pode ser visto na Figura 3.2c. Os resultados representam apenas a probabilidade dos dados excederem o limite de 0,8 ppm.

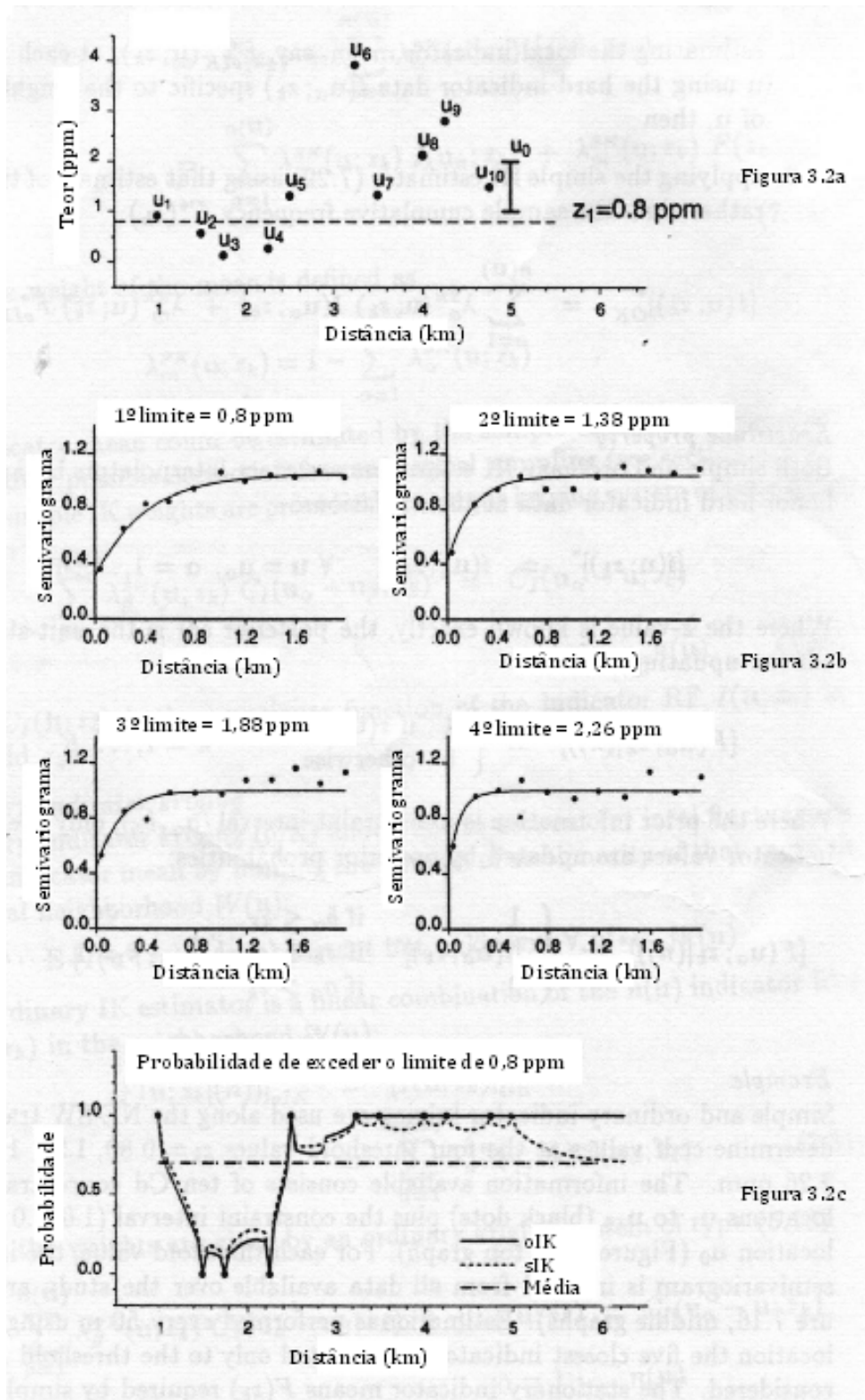


Figura 3.2: Exemplo da aplicação da KI: 3.2a mostra os dados originais, 3.2b apresenta o semivariograma de cada limite e 3.2c mostra o resultado das estimativas (adaptado de Goovaerts, 1997).

3.6.3 Krigagem dos Indicadores com a Mediana (KIm)

Na krigagem dos indicadores, o número K de limites z_k , geralmente, é escolhido para que as correspondentes covariâncias dos indicadores $C_I(\mathbf{u}; z_k)$ sejam significativamente diferentes uma das outras. Entretanto, existem casos em que a covariância e semivariograma das amostras parecem ser proporcionais uns aos outros. O correspondente modelo da função randômica $Z(\mathbf{u})$ é então chamado do modelo mosaico (Deutsch & Journel, 1998), tal que:

$$\rho_Z(\mathbf{h}) = \rho_I(\mathbf{h}; z_k) = \rho_I(\mathbf{h}; z_k, z_{k'}), \quad \forall z_k, z_{k'}, \quad \text{Equação 3.17}$$

onde $\rho_Z(\mathbf{h})$ e $\rho_I(\mathbf{h}; z_k, z_{k'})$ são os correlogramas e correlogramas cruzados dos indicadores da função randômica contínua $Z(\mathbf{u})$.

Então, a única função correlograma é mais bem ajustada diretamente do correlograma das amostras z ou do correlograma dos indicadores com um limite $z_k = M$, tal que $F(M) = 0,5$. De fato, um limite de central ou mediano irá distribuir equivalentemente os zeros e uns aos dados.

A krigagem dos indicadores com a mediana é um procedimento simples e rápido, pois necessita apenas de um modelo de semivariograma de indicadores que será usado em todos os limites z_k , apenas com uma alteração no *sill* dependendo do limite usado.

3.7 Valor Médio de z_k através de Probabilidades Condicionais

A krigagem dos indicadores é usada para gerar probabilidades condicionais, isto é, valores de 0 a 1 associados ao local \mathbf{u} . Em muitos casos, é de interesse descobrir qual é o valor médio do atributo z no local \mathbf{u} através das probabilidades geradas por KI ou a média da função da distribuição condicional acumulada. Essa estimativa de $z(\mathbf{u})$ é chamada de E-type (Deutsch & Journel, 1998) e definida como:

$$\begin{aligned}
 [z(\mathbf{u})]_E^* &= \int_{-\infty}^{+\infty} z dF(\mathbf{u}; z | (n)) \\
 &\approx \sum_{k=1}^{K+1} z'_k \cdot [F(\mathbf{u}; z_k | (n)) - F(\mathbf{u}; z_{k-1} | (n))] ,
 \end{aligned}
 \tag{Equação 3.18}$$

onde $z_k, k = 1, \dots, K$ são os limites usados, e $z_0 = z_{min}, z_{K+1} = z_{max}$ são os valores mínimo e máximo do atributo z utilizado. O valor da média condicional z'_k entre cada classe $[z_{k-1}, z_k]$ é obtido através de específicos procedimentos de interpolação.

Como a função da distribuição condicional acumulada resultante da KI honra os valores de z e os intervalos de restrição, a estimativa E-type correspondente também honra essa informação.

Capítulo 4

Área de Estudo, Dados de Sondagem e Perfilagem Geofísica

Neste capítulo, é apresentada a área de estudo onde foram feitos os testes utilizando a perfilagem geofísica. Descreve-se a geologia local e etapas da coleta de dados por sondagem com recuperação de testemunhos, bem como as etapas da coleta de dados por perfilagem geofísica. Por fim, o tratamento dos dados obtidos por geofísica para sua incorporação como dado secundário na avaliação de propriedades qualitativas do carvão deste depósito.

4.1 Área de Estudo

4.1.1 Localização

A área de estudo (Área B3) localiza-se no município de Butiá, distante 86 km de Porto Alegre/RS (Figura 4.1). O local pertence à empresa Copelmi Mineração Ltda. e trata-se de uma área em fase final de pesquisa mineral.



Figura 4.1: Localização da área de estudo.

4.1.2 Geologia

4.1.2.1 Geomorfologia e Geologia Regional

A Área B3 situa-se na Depressão Periférica Central do Rio Grande do Sul, na zona de transição entre o Escudo e a bacia sedimentar intracratônica. O relevo, na zona de ocorrência das camadas de carvão, caracteriza-se por coxilhas alongadas com vertentes suaves passando a áreas planas em zonas de planícies aluvionares. Ao sul do bloco, na zona de domínio do escudo cristalino, o relevo torna-se mais íngreme, com encostas mergulhando para norte em direção à bacia sedimentar.

Regionalmente, a Área B3 situa-se no extremo leste da Bacia Carbonífera Butiá-Leão que está localizada na borda sul da Bacia do Paraná, a maior bacia intracratônica brasileira. Essa bacia carbonífera possui uma área total de 1070 km², sendo dividida pela Falha do Leão que define áreas passíveis de lavra a céu aberto, a leste, caso da Área B3 e áreas passíveis de lavra em subsolo a oeste, no caso as Minas do Leão.

Na região da Área B3, afloram sedimentitos gonduânicos depositados, principalmente, durante as eras Paleozóica e Mesozóica, sendo limitados ao sul pelo escudo Sul-rio-grandense e, ao norte, pelas escarpas dos derrames vulcânicos da Formação Serra Geral.

O mapa geológico regional com as unidades estratigráficas é apresentado na Figura 4.2, onde são demonstradas as diversas formações geológicas ocorrentes na região.

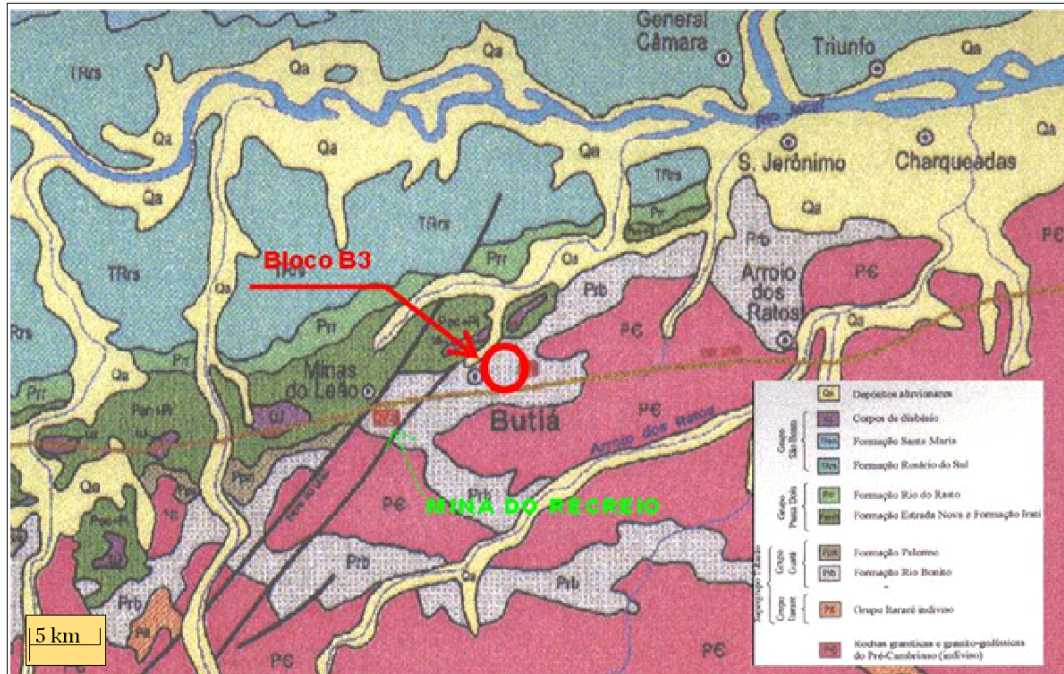


Figura 4.2: Mapa geológico da região do baixo Jacuí com localização da área B3.

Os depósitos de carvão localizam-se estratigraficamente na Formação Rio Bonito pertencente ao Grupo Guatá de idade Permiana Inferior. Essa Formação no estado do Rio Grande do Sul é composta por três seqüências sedimentares denominadas seqüência basal, seqüência média e seqüência superior.

A seqüência superior é constituída por uma sedimentação pelítica, sendo que, na mesma, localizam-se as jazidas de carvão de Charqueadas, Butiá-Leão, Faxinal, Gravataí e Chico Lomã.

Além de siltitos, argilitos e camadas de carvão, ocorrem na base dessa seqüência sedimentitos imaturos e relativamente grosseiros relacionados a deslizamentos subaquáticos e canais que carreavam detritos para dentro das turfeiras. Essas rochas foram denominadas, informalmente, de pedra-areia, e petrograficamente são paraconglomerados cujos clastos de quartzo e feldspato estão imersos em uma matriz pelítico-carbonosa.

De uma maneira genérica, o ambiente deposicional, onde foram geradas as camadas de interesse econômico (Formação Rio Bonito), é caracterizado por

canais meandrantos com camadas de carvão de origem lacustre, sotopostas a um espesso pacote pelítico. Posteriormente, toda a bacia foi recoberta por sedimentação marinha, marcando a transgressão permiana.

4.1.2.2 Geologia Local

A bacia carbonífera de Butiá está inserida no contexto da Bacia Sedimentar do Paraná. Na região, afloram rochas sedimentares gonduânicas depositadas, principalmente, durante as eras Paleozóica e Mesozóica, com cobertura de sedimentos quaternários associados.

Na área B3, distinguem-se as seguintes unidades litoestratigráficas: Granito Butiá, Embasamento Metamórfico Indiferenciado, Formação Rio Bonito, Formação Palermo, Formação Irati, Formação Serra Geral e Sedimentos Recentes.

As unidades geológicas que ocorrem na área são caracterizadas de forma sucinta a seguir:

- Granito Butiá: o denominado Granito Butiá tangencia a porção sul da Área B3/B4. Caracteriza-se por sua textura granular grosseira, cores avermelhadas com mineralogia composta por acentuada proporção de feldspato alcalino e quartzo, com escassa biotita.
- Embasamento Metamórfico Indiferenciado: utiliza-se esta denominação para as rochas metamórficas registradas nos diversos furos de sondagem, identificados na Área B4, desde gnaisses, xistos até quartzitos.

À medida que tais rochas estão inseridas num contexto de tectônica de *horst* e *grabens* as mesmas estão fortemente influenciadas por fenômenos cataclásticos, tendo por consequência hidrotermalização, formação de milonitos e uma forte foliação cataclástica, impedindo, localmente, a própria identificação da rocha original. O hidrotermalismo se manifesta pela extensiva formação de epidotização e silicificação.

A Formação Rio Bonito é a principal unidade estratigráfica da área, sendo que, nesta formação, está inserido o pacote carbonoso de interesse econômico. Trata-se de uma unidade litoestratigráfica de idade Permo-carbonífera, depositada sobre um substrato topograficamente irregular do embasamento granítico. O pacote carbonoso foi gerado em um ambiente lacustre não oxidante, sempre associado a intercalações pelíticas de coloração normalmente escura. A deposição dos pelitos efetuou-se num ambiente aquático calmo, relacionado à subsidência lenta e gradual da Bacia do Paraná, como evento amplo e regional. Escorregamentos subaquáticos de material mais grosseiro, denotando períodos de maior instabilidade da bacia, também, ocorreram.

Litologicamente, a Formação Rio Bonito é constituída por siltitos, argilitos, folhelhos com intercalações de camadas de carvão, pertencentes à fácies de topo da formação. Na base desse pacote, predominam paraconglomerados e arenitos grosseiros. Pequenas variações faciológicas decorrentes de microambientes sedimentares, também, ficaram registradas nas rochas da área.

Dois áreas de pesquisa foram estudadas, B3 e B4 (Figura 4.3). A Área B3 apresenta um zoneamento em função da profundidade das camadas de carvão e aumento da espessura do pacote carbonoso. No extremo sul da área, especialmente na região das sondagens B3-09, B3-10 e B3-05 (Figura 4.5) a Camada A (Figura 4.4) encontra-se erodida e coberta por sedimentos quaternários, os quais, nessa zona, pela proximidade do embasamento granítico, são formados por areias médias a grosseiras. Nessa região, a Camada M apresenta-se errática e a Camada I1 não é registrada. Em direção ao Norte, na zona de influência da sondagem B3-03, a Camada M já apresenta boa continuidade, com início de registro da Camada A.

Na porção norte da área, já a partir da sondagem B3-02, o pacote encontra-se completo com a Camada I1 atingindo espessuras em torno de 2 metros. Essa condição permanece até o extremo norte da área, sendo que a partir da linha dos furos B3-14, B3-19 e B3-20, a Camada A adquire espessuras em torno de 1 m o que poderá viabilizar sua lavra no futuro.

Em toda essa zona, a Formação Palermo ocorre sobre o pacote carbonoso. Nas sondagens B3-18 e B3-22, registra-se a ocorrência de uma camada de carvão adicional denominada Camada I2. Na zona de ocorrência desses furos, os

sedimentos quaternários, com espessuras em torno de 4 m e composição areno-argilosa, ocorrem sobre a Formação Palermo como pode ser observado no mapa geológico local (Figura 4.3).

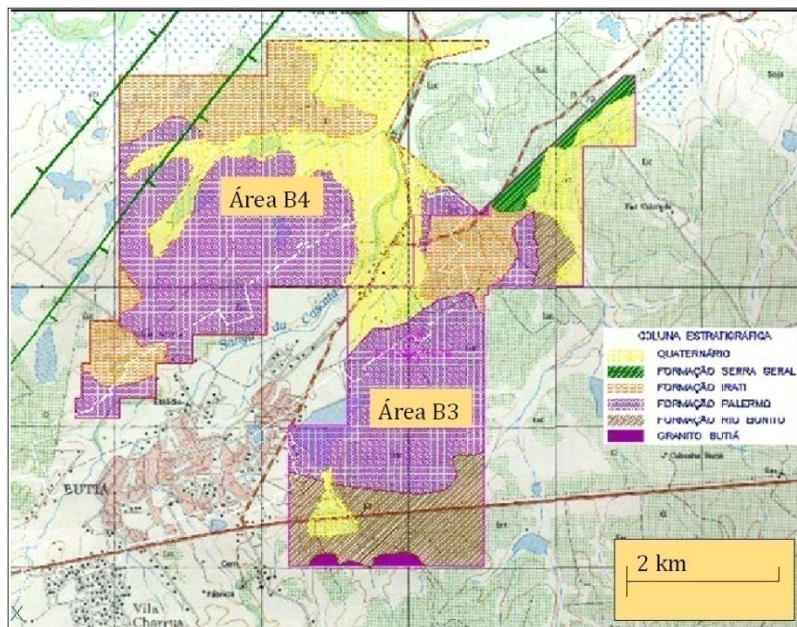


Figura 4.3: Mapa geológico local.

A cobertura da jazida é composta, em média, por 1 m de solo argiloso que se sobrepõem a 10 m de siltitos com níveis de arenito fino pertencentes à Formação Palermo e uma espessura variável de 15 a 20 m de folhelhos de coloração cinza médio a escuro pertencentes à seqüência deposicional pelítica da Formação Rio Bonito.

Sotoposta a essa litologia, ocorre a primeira camada de carvão, denominada Camada A. A espessura média da cobertura da área sobre a Camada A varia de 25 a 35 metros. A cobertura apresenta-se muito alterada pela ação intempérica conferindo características friáveis ao pacote e favorecendo a descobertura para a lavra a céu aberto sem a necessidade de desmonte por explosivos em sua maior parte.

O pacote carbonoso da Área B3/B4 é composto por quatro camadas de carvão principais, denominadas A, S, M1/M2 e I1, alcançando uma espessura média de pacote carbonoso de 21,4 metros. O perfil geológico médio das áreas B3/B4 é apresentado na Figura 4.4.

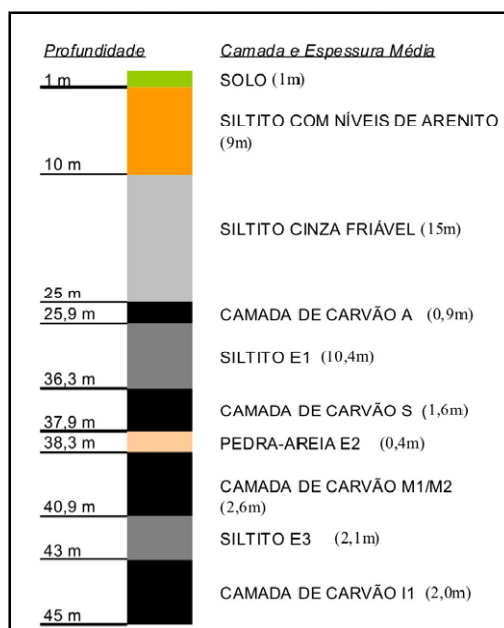


Figura 4.4: Perfil geológico tipo observado na Área B3.

A Camada A ocorre, na área, apenas como registro estratigráfico, com espessura total de até 0,9 m, sendo composta por alternância de leitos de vitrênio com leitos de siltito carbonoso, de aspecto friável, evidenciando baixo grau de diagênese. São características dessa camada a grande quantidade de nódulos de pirita e *cleats* com carbonato. Essa camada apresenta-se contínua, principalmente, na porção norte da área com aumento de espessura e melhora de qualidade.

O estéril intermediário entre as Camadas A e S é constituído por siltitos cinza, friável a fragmentado, com algumas gradações carbonosas, apresentando espessura média de 10,4 m, passíveis de desmonte com o uso de explosivos, podendo ser realizado desmonte mecânico no meio desta camada, como ocorre atualmente na Área B2 (Mina do Butiá Leste).

A Camada S apresenta espessura média de 0,98 m, normalmente sem presença de estéril intermediário, exceto em alguns furos com pequenos níveis de siltito (0,11 m), devendo ser minerada sem seletividade. Nessa camada, predomina o carvão brilhante resultado da grande quantidade de vitrinita, com raros *partings* de siltito carbonoso. É comum a presença de leitos de vitrênio e grandes nódulos de pirita.

O estéril intermediário entre as Camadas S e M1/M2 é constituído por paraconglomerados, denominado de pedra-areia, com espessura média de 0,84 m e que será excluído por seletividade durante a lavra. Essa rocha foi formada por

fluxos de detritos para o interior da bacia durante a deposição do pacote carbonoso.

A Camada M1/M2 possui espessura média de 1,58 m, com intercalação de *parting* de siltito carbonoso. Quando a espessura desse *parting* for menor que 0,25 m entre as Camadas M1 e M2 esse será incorporado ao carvão. Quando maior, este será removido por seletividade. Com relação à qualidade do carvão, a Camada M1 é composta pela alternância de leitos de carvão brilhante, fosco e siltito carbonoso. A Camada M2 caracteriza-se pela alta razão CC/CT (camada de carvão/camada total), próxima de 100%, com predomínio de carvão do tipo brilhante. Essa camada apresenta-se mais homogênea na porção norte da área, com pequenas variações de espessura. Na porção sul, são comuns variações de espessura dessa camada, e/ou erosão sindeposicional, fenômenos comuns na borda da bacia.

Por sua vez, o estéril intermediário entre as Camadas M1/M2 e I1 é constituído por siltitos cinza, por vezes paraconglomerático, com espessura média de 4,03 m, passível de desmonte por explosivos.

A Camada I1 possui espessura média de 1,20 m, que, a princípio, será minerada como camada total. Nessa camada, predominam os carvões foscos com média a baixa concentração de vitrinita. Esta camada está presente na maioria dos novos furos realizados na campanha de 2006, exceto na porção sul da área, onde, pela condição de borda de bacia, a camada não ocorre.

A seqüência basal ao pacote carbonoso é constituída por intercalações de siltitos e paraconglomerados depositados em ambiente de alta energia. Nesse pacote, eventualmente, ocorre uma camada de carvão de interesse econômico denominada Camada I2, cuja continuidade e aproveitamento estão em investigação.

A geologia não é complexa e o entendimento do comportamento das camadas que compõem o depósito de carvão é conhecido. Dessa forma, o modelo geológico é de domínio da equipe técnica facilitando a interpretação dos furos de sondagem, emprestando confiabilidade ao modelo estabelecido. A lavra de carvão em áreas próximas, na Mina do Recreio e do Butiá Leste, permite assumir as premissas do modelo geológico para avaliação dos recursos de carvão.

4.2 Sondagem com Recuperação de Testemunhos

A campanha de sondagem com recuperação de testemunhos foi composta de 23 furos dispersos em uma malha de espaçamento irregular conforme pode ser observado na Figura 4.5 e as coordenadas na Tabela 4.1.

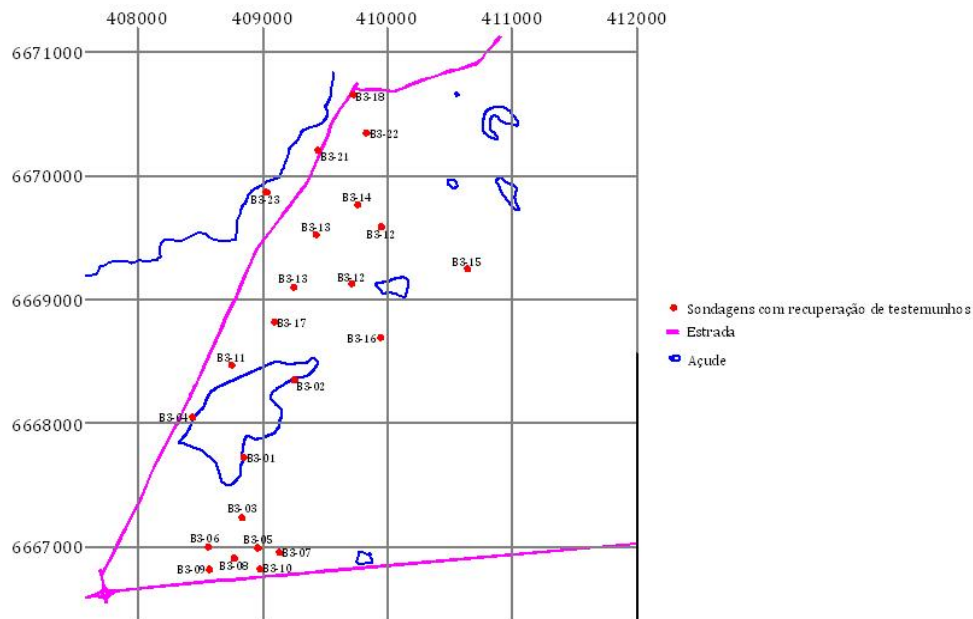


Figura 4.5: Localização das sondagens com recuperação de testemunhos.

Tabela 4.1: Coordenadas das sondagens com recuperação de testemunhos

Furo	Coordenada Norte	Coordenada Leste
B3-01	408847,26	6667726,48
B3-02	409255,03	6668347,49
B3-03	408832,40	6667235,96
B3-04	408434,29	6668049,65
B3-05	408960,22	6666991,97
B3-06	408560,03	6667000,00
B3-07	409134,22	6666956,16
B3-08	408771,49	6666906,45
B3-09	408572,26	6666818,09
B3-10	408974,95	6666820,21

Tabela 4.1: Coordenadas das sondagens com recuperação de testemunhos
(continuação)

Furo	Coordenada Norte	Coordenada Leste
B3-11	408750,00	6668471,00
B3-12	409712,13	6669126,50
B3-13	409248,56	6669099,04
B3-14	409948,83	6669588,40
B3-15	410640,00	6669249,95
B3-16	409945,70	6668691,56
B3-17	409093,43	6668819,38
B3-18	409724,83	6670656,33
B3-19	409428,11	6669522,14
B3-20	409759,92	6669764,15
B3-21	409441,91	6670204,91
B3-22	409830,64	6670346,79

Para a execução dos furos, foi utilizada uma sonda modelo Sullivan 22 da Joy (Figura 4.6) e o diâmetro dos furos executados foi de 2" padrão NW. Todos os furos foram feitos com recuperação de testemunhos, isto é, a cada manobra das hastes de sondagem um cilindro de material de no máximo 3 m de comprimento era sacado fora do furo e disposto em caixas de testemunhos (Figura 4.7).



Figura 4.6: Perfuratriz Sullivan 22 usada para a execução dos furos de sondagem.



Figura 4.7: Recuperação de testemunho de sondagem disposto na caixa.

4.3 Execução da Perfilagem Geofísica

Os trabalhos de perfilagem geofísica foram realizados em apenas quatro dos 23 furos feitos e neles foram executados os perfis de resistividade e gama retroespalhado. Os quatro furos em que foi executada a perfilagem geofísica são identificados como B3-03, B3-12, B3-13 e B3-18. Na Figura 4.8, observa-se a localização dos furos perfilados.

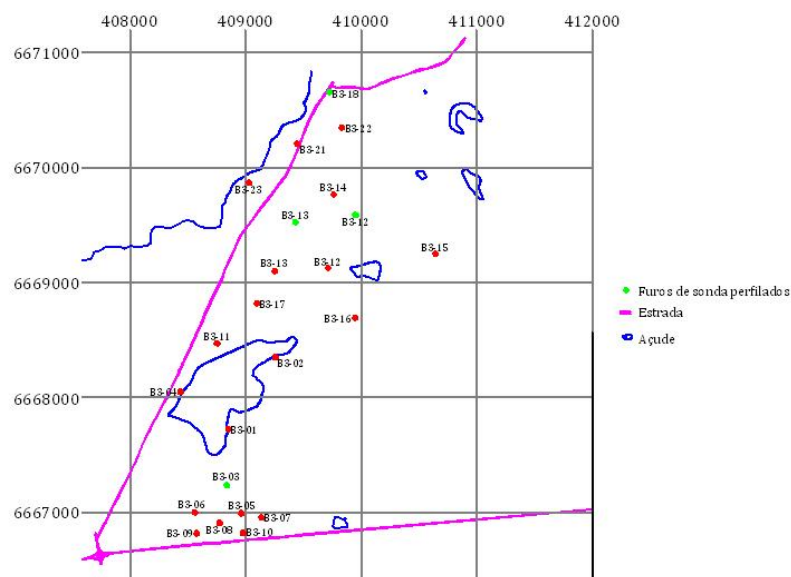


Figura 4.8: Localização dos furos de sondagem perfilados.

4.3.1 Coleta dos Dados por Perfilagem Geofísica

A aplicação da perfilagem geofísica na Área 3 foi efetuada com duas diferentes ferramentas, sonda GLOG® (*Focussed Electric (Guard) Log Sonde*) responsável pelo registro dos perfis de resistividade e emissão de radiação gama natural e sonda SWDS® (*Sidewall Density Sonde*) responsável pelo registro dos perfis de radiação gama retroespalhada, emissão de radiação gama natural e medidas de diâmetro e rugosidade de furo.

4.3.1.1 Sonda GLOG® - *Focussed Electric (Guard) Log Sonde*

Como, no primeiro momento, não se tem conhecimento da integridade do furo (possibilidade de caimento de paredes) é aconselhável efetuar o perfil geofísico da ferramenta mais simples. Além de obter os perfis geofísicos específicos da sonda, é possível conferir a integridade do furo e garantir a segurança para a execução do perfil com a sonda mais importante. Esse papel é executado pela sonda GLOG® que efetua a medida de resistividade das formações e emissão de radiação gama natural das rochas.

A sonda possui 2,76 m de comprimento e aproximadamente 8 kg e um diâmetro de 38 milímetros.

A GLOG® efetua a medida de resistividade com o uso de focalizadores conforme explicado no item 2.2.3.2. A medida de radiação natural gama é efetuada por um cintilômetro de Iodeto de Sódio (NaI) ativado com Tálcio (Tl) (item 2.4.1.1). Na Figura 4.9, temos um esboço da sonda GLOG®.

Como a sonda GLOG® possui focalizadores de corrente, o seu volume de investigação tende a ter um formato de disco (Figura 2.11) com uma resolução vertical do tamanho do eletrodo de corrente (localizados entre os eletrodos focalizadores) que de acordo com o fabricante possui 10 cm de comprimento.

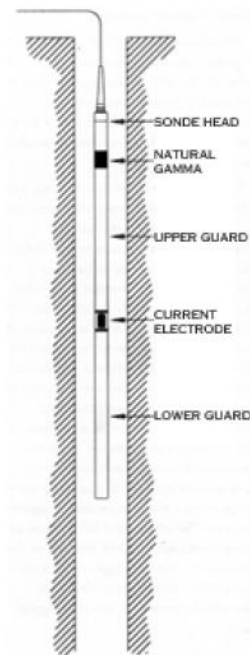


Figura 4.9: Esboço da sonda GLOG®.

A aplicação da sonda GLOG® é simples e não requer cuidados especiais, pois envolve apenas pequenas cargas elétricas. Na Figura 4.10, vemos a sonda GLOG® sendo introduzida no furo para a execução da perfilagem.



Figura 4.10: Sonda GLOG® sendo introduzida no furo de sondagem.

Na Figura 4.11, temos o registro dos dois parâmetros das formações. A esquerda da coluna central, que mostra a profundidade do perfil, está

representada pela linha vermelha, a emissão de radiação gama natural com uma escala em API variando de 0 a 200 e a direita da coluna de profundidade está o registro da resistividade das formações com uma escala em ohms.m variando de 0 a 800.

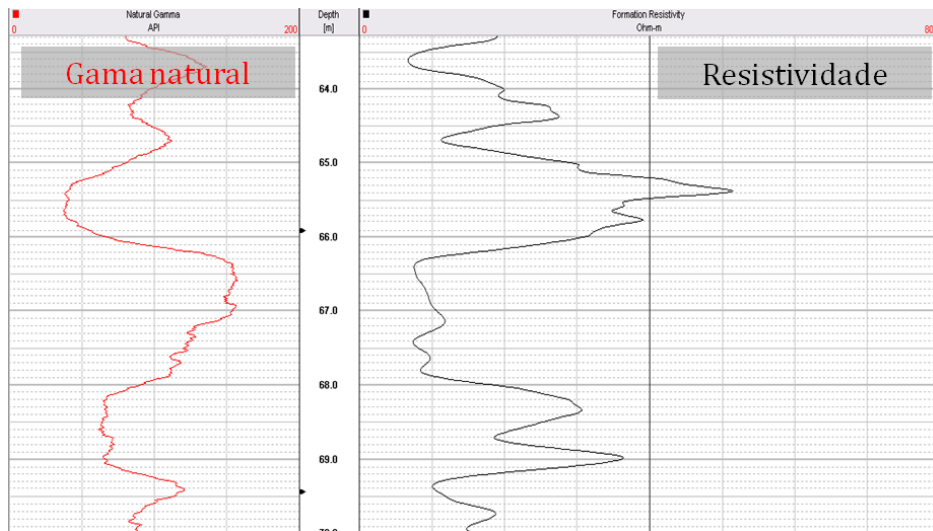


Figura 4.11: Exemplo do perfil obtido com a sonda GLOG®.

4.3.1.2 Sonda SWDS® - *Sidewall Density Sonde*

Esta ferramenta é a mais importante, pois é por meio das medidas realizadas por ela, é possível inferir valores de densidade e teor de cinzas das camadas de carvão. Esta sonda possui 2,89 m de comprimento, 20 kg e 50 mm de diâmetro.

Ela utiliza uma fonte de Césio 137 com 3,7 mCi de atividade que é fixada na extremidade inferior da sonda. Mais acima estão localizados os três cintilômetros que efetuam os registros de radiação retroespalhada, a 14 cm acima da fonte está localizado o cintilômetro BRD (*bed resolution density*), a 24 cm esta o cintilômetro HRD (*high resolution density*) e a 30 cm o cintilômetro LSD (*long space density*). Esses três cintilômetros são do tipo apresentado no item 2.4.1.1 Entre a fonte e os cintilômetros existe uma blindagem de Chumbo para evitar que os cintilômetros capturem a radiação diretamente da fonte. O elevado peso da ferramenta é devido a presença dessa blindagem. A SWDS® possui ainda um cintilômetro de Iodeto de

Sódio (NaI) ativado com Tório (Th) para medição de radiação gama natural e um braço mecânico (*caliper*) para registro do diâmetro do furo e rugosidade das paredes. Na Figura 4.12, há um esboço da sonda SWDS® detalhando a região dos cintilômetros.

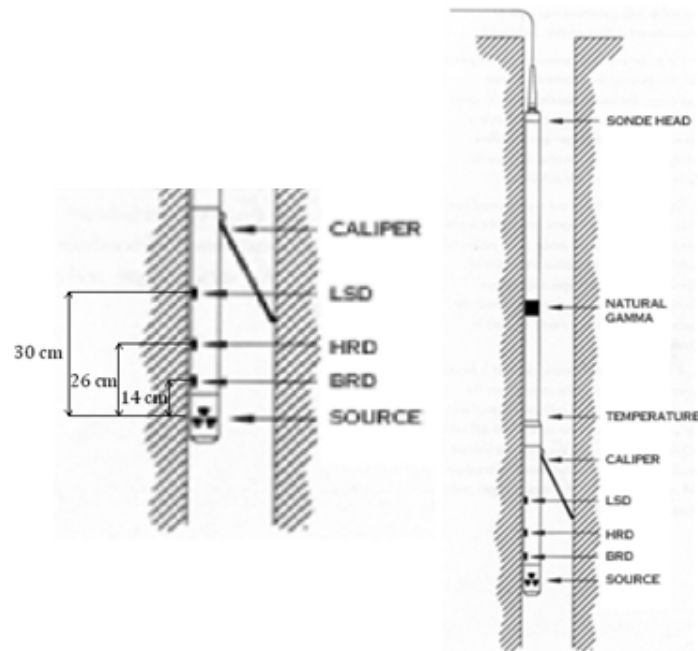


Figura 4.12: Esboço da sonda SWDS® detalhando a região dos cintilômetros.

Durante o manuseio desta sonda, é necessário que estejam presentes apenas o pessoal credenciado para trabalhar com radiações ionizantes e equipados com dosímetros para controle de exposição a radiações. As Figuras 4.13 e 4.14 mostram respectivamente o acoplamento da fonte radiativa na sonda e a introdução da mesma no furo.



Figura 4.13: Acoplamento da fonte radioativa na sonda SWDS®.

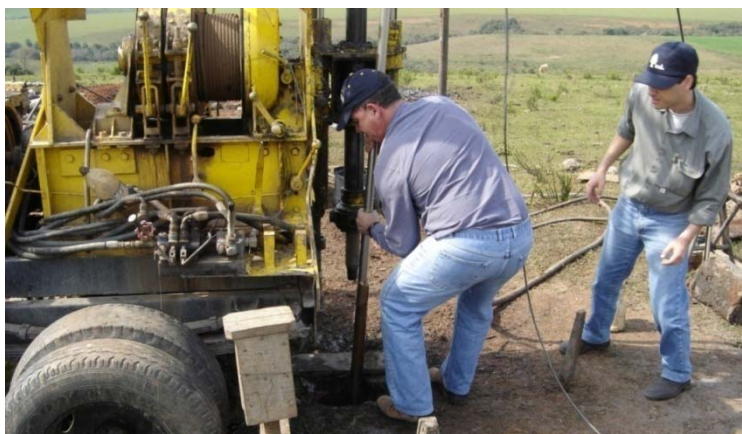


Figura 4.14: Introdução da sonda SWDS® no furo de sondagem.

Na Figura 4.15, é possível observar uma imagem da tela do programa durante a aplicação da sonda SWDS®. Ela mostra o registro de três parâmetros pela exibição de cinco linhas. A esquerda da coluna central, que registra a profundidade, temos a linha azul que representa a emissão de radiação gama natural com uma escala em API com valores de 0 a 400, e a linha preta (diâmetro do furo em polegadas) que representa o comportamento da parede do furo do poço no trecho exemplificado (observa-se que na profundidade de 70,40 m a 71,00 m temos a ocorrência de um caimento na parede do furo). A direita da coluna central aparece três linhas que representam o registro de radiação gama retroespalhada, a linha em vermelho é o registro do cintilômetro LSD (mais afastado da fonte radiativa) com escala em CPS variando de 0 a 5000, em azul temos o registro do cintilômetro HRD (receptor intermediário) com escala em CPS variando de 0 a 10000 e a linha verde que representa o cintilômetro BRD (receptor mais próximo da fonte) com escala em CPS variando de 10000 a 30000.

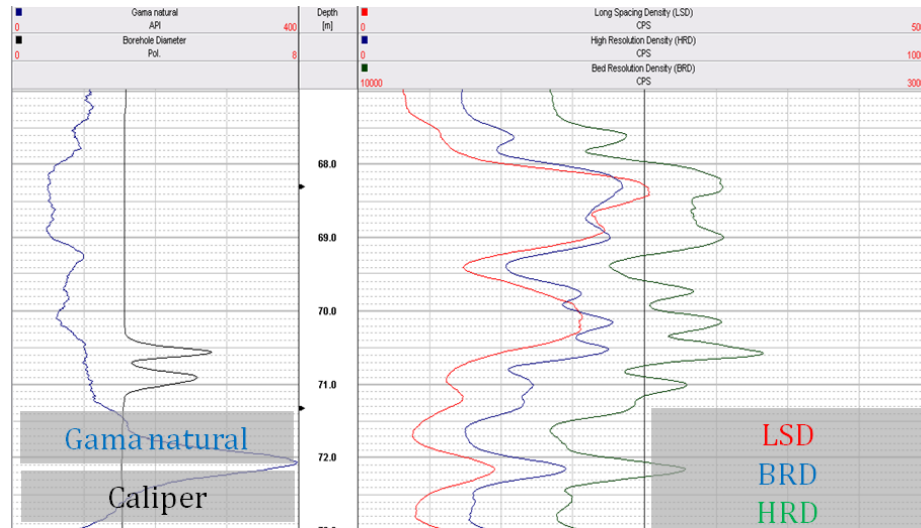


Figura 4.15: Exemplo do perfil obtido com a sonda SWDS®.

4.4 Tratamento dos Dados

O tratamento dos dados obtidos pela pesquisa na Área B3 foi dividido em dois diferentes grupos: tratamento dos dados obtidos por sondagem com recuperação de testemunhos e tratamento dos dados obtidos por perfilagem geofísica.

4.4.1 Dados de Análise de Recuperação de Testemunho de Sondagem

As informações obtidas da sondagem com recuperação de testemunhos foram feitas mediante a análise do material recuperado. Antes de efetuada a análise laboratorial dos testemunhos, o material presente nas caixas foi descrito, para elaboração de uma coluna estratigráfica para cada furo de sondagem. O conjunto de colunas estratigráficas de uma malha de sondagem é a principal ferramenta para a modelagem e avaliação de depósitos minerais.

Na Figura 4.16, apresenta-se um trecho de uma das colunas estratigráficas da Área B3.

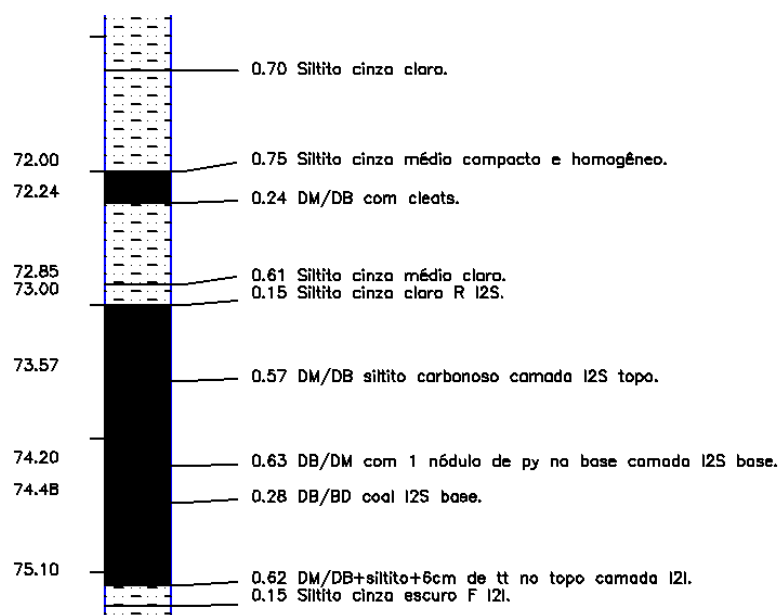


Figura 4.16: Trecho de uma coluna estratigráfica de um dos furos de sondagem da Área B3.

Após a descrição do material e construção da coluna litológica, foram separadas as amostras destinadas a análise. As amostras enviadas ao laboratório foram compostas por todo material disponível recuperado pela sondagem, que representava as camadas de carvão em sua totalidade, o material imediatamente superior e inferior às camadas de carvão conhecidos como *roof* e *floor*, que são constituídos de 15 cm de material localizado acima e abaixo da camada de carvão, e trechos de material que apresentaram comportamento homogêneo por um longo trecho como siltitos e arenitos.

As análises foram realizadas pela própria empresa pelo método afunda – flutua para determinação da densidade (ρ) e fornos para a medida do teor de cinzas (*Cz*).

4.4.1.1 Determinação da Densidade (ρ)

Para a determinação da densidade das amostras, seguiu-se a norma ISO 7936 “Coal Cleaning Tests – General Directions for the Determination and Presentation of Float and Sink Characteristics” que descreve os procedimentos e

utensílios necessários para determinar características de flutuabilidade de carvões em meios de densidade relativa diferentes.

O procedimento se iniciou com o espalhamento do material sobre um material impermeável para uma secagem parcial para facilitar a posterior homogeneização da amostra.

Para a obtenção dos meios com densidade relativa contrastante foi utilizada uma mistura de água e Bromofórmio (CHBr_3), cuja elevada densidade relativa de aproximadamente $2,76 \text{ g/cm}^3$ permite a obtenção de diversos meios densos. De acordo com a norma seguida, foram preparados nove meios densos de densidade 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2,0; 2,1 e $2,2 \text{ g/cm}^3$. Para facilitar a preparação dos meios, foi utilizada a seguinte equação que auxilia na determinação dos volumes necessários:

$$V_m = V_t \cdot \frac{\rho_t - \rho_p}{\rho_m - \rho_p}, \quad \text{Equação 4.1}$$

onde V_m é o volume de Bromofórmio necessário, V_t é o volume da mistura desejada (volume do recipiente), ρ_m é a densidade relativa do líquido mais denso, ρ_t é a densidade desejada da mistura e ρ_p é a densidade relativa do líquido menos denso.

Na Figura 4.17, é possível observar a preparação de um meio denso com o uso de Bromofórmio e na Figura 4.18 o meio denso sendo despejado na cuba usada para a separação do material.



Figura 4.17: Preparação de um meio denso com Bromofórmio.



Figura 4.18: Meio denso sendo despejado na cuba.

O teste iniciou com a introdução da amostra na cuba contendo o meio denso de menor densidade ($1,4 \text{ g/cm}^3$). Uma leve agitação manual facilita a flutuação de material preso e após alguns minutos de espera foi possível coletar o material flutuado com a ajuda de uma concha (Figura 4.19).



Figura 4.19: Coleta do material flutuado com ajuda de uma concha.

O material flutuado foi lavado e secado para retirar qualquer resíduo do meio denso e após a sua pesagem foi armazenado para a futura análise de teor de cinzas.

O material afundado é coletado com ajuda de um cesto adaptado ao interior da cuba e despejado em uma base para secagem e descontaminação do meio denso (Figura 4.20).



Figura 4.20: Material afundado coletado com ajuda de um cesto.

Após a completa secagem do material afundado, ele foi levado até o meio denso de densidade relativa imediatamente superior ($1,5 \text{ g/cm}^3$) e repetiu-se todo o processo até o meio denso de densidade $2,2 \text{ g/cm}^3$.

Tendo o peso da massa flutuada em cada uma das frações, incluindo a massa afundada no meio denso de $2,2 \text{ g/cm}^3$, estimou-se a massa total da amostra, então, sabendo as densidades dos meios, massa das frações e massa total, calculou-se a média ponderada para estimar a densidade natural das amostras de acordo com:

$$\rho = \sum_{n=1}^N \rho_{tn} \cdot \frac{m_{tn}}{M}, \quad n = 1, \dots, N, \quad \text{Equação 2.2}$$

onde ρ é a densidade da amostra, ρ_{tn} é a densidade do meio denso n , m_{tn} é a massa da amostra flutuada no meio denso n e M é a massa total da amostra. Neste cálculo, a fração de massa que afundou no meio denso de densidade $2,2 \text{ g/cm}^3$ foi considerada flutuada em um meio denso hipotético de densidade $2,3 \text{ g/cm}^3$.

Os valores obtidos para as análises de densidade natural podem ser observados na coluna 6 da Tabela 4.2

4.4.1.2 Determinação do Teor de Cinzas (Cz)

Para a determinação do Teor de Cinzas (Cz) foram seguidos os passos descritos na norma NBR 8289 de dezembro de 1983 intitulada “Carvão Mineral – Determinação do Teor de Cinzas”. O método baseia-se na determinação da massa do resíduo mineral, resultante da combustão dos componentes orgânicos e oxidação dos inorgânicos da amostra em forno mufla, sob rígido controle de massa, temperatura, tempo e atmosfera.

O procedimento iniciou com a calcinação e pesagem dos cadinhos usados para armazenamento das amostras. Com o auxílio de uma espátula, foi coletou-se aproximadamente 1 g de amostra (m_1) com precisão de 0,0001 g. Nesta etapa, é necessário coletar uma amostra duplicada. A pesagem da amostra pode ser vista na Figura 4.21.



Figura 4.21: Pesagem da amostra.

Os cadinhos (amostra mais duplicata) são colocados no forno de mufla a uma temperatura de 775 ± 25 °C, primeiramente, próximos da entrada do forno por 2 minutos para evitar arraste mecânico de material. Após os 2 minutos, os cadinhos são posicionados no interior do forno e lá mantidos por 60 minutos. Passado esse tempo, confere-se se houve a combustão completa pela da inspeção visual em busca de pontos negros no material. Quando não á combustão completa, os cadinhos são devolvidos ao forno e mantidos lá por mais 30 minutos. Na Figura

4.22, mostra-se uma imagem dos cadinhos sendo colocados no interior do forno de mufla.



Figura 4.22: Cadinhos contendo as amostras sendo inseridos no forno de mufla.

Após serem retirados do forno de mufla, os cadinhos são posicionados sobre uma placa de amianto para a redução de temperatura. Logo que a temperatura dos cadinhos alcança a temperatura ambiente, são efetuadas as pesagens (m_2).

Para a determinação dos resultados, foram utilizadas as seguintes equações:

$$\% \text{ de cinzas (base umida)} = \frac{m_1}{m_2} \cdot 100 \quad \text{Equação 4.3}$$

e

$$\% \text{ de cinzas (base seca)} = \frac{\% \text{ de cinzas (base umida)}}{100 - U_A} \cdot 100, \quad \text{Equação 4.4}$$

onde m_1 é a massa da amostra em gramas, m_2 é a massa do resíduo após a queima em gramas e U_A é a percentagem da umidade de análise ou de higroscopia (conforme a NBR 8293).

Os resultados obtidos podem ser observados na coluna 7 da Tabela 4.2

Tabela 4.2: Resultado da análise de laboratório da recuperação dos testemunhos da área B3

Furo	Estrato	Material	De (m)	Até (m)	ρ (g/cm ³)	Cz (%)
B3-01	RS	Siltito carbonoso com galhas de vitrênio	26,2	26,35	-	75,9
	S	BD/BB	26,35	27,38	-	40,88
	FS	Pedra - areia	27,38	27,53	-	88,13
	M1	BD/BB	29,53	30,29	-	43,5
	P M1-M2	Siltito cinza carbonoso	30,29	30,66	-	84,89
	M2	BD/Siltito carbonoso alterado	30,66	32,42	-	60,93
	FM2	Pedra - areia	32,42	32,57	-	79,43
B3-02	RS	Siltito cinza médio compacto e homogêneo	44,14	44,29	2,12	88,66
	S	BD/BB com TT na base	44,29	46,02	1,73	44,9
	FS	Pedra - areia + siltito	46,02	46,1	-	71,04
	M1	BD/BB com pirita na base	46,1	47,56	1,66	38,12
	P M1-M2	Siltito cinza médio	47,56	47,9	2,44	77,45
	M2	DM/DB	47,9	48,7	-	59,58
	FM2	Siltito cinza escuro	48,7	48,87	-	78,67
	RI1	Siltito cinza escuro carbonoso	53,02	53,63	-	67,95
	I1	DB com lentes de pirita	53,63	54,28	-	48,51
FI1	Siltito carbonoso com grânulos	54,28	54,4	-	58,82	
B3-03	RS	Siltito cinza friável	10,95	11,1	2,4	72,62
	S	BD/BB com pirita e TT na base	11,1	12,21	1,77	47,39
	FS	Siltito carbonoso + pedra - areia	12,21	12,36	2,01	72,62
	M1	BD/BB	12,36	12,64	1,73	38,69
	P M1-M2	Siltito carbonoso + cinza claro + BD + Pedra - areia	12,64	13,08	2,03	78,98
	M2	BD/DB com DM na base	13,08	13,78	1,92	56,98
	FM2	Pedra - areia	13,78	13,93	2,45	83,19
B3-04	RM1	Siltito cinza médio compacto e homogêneo	31,61	31,76	-	75,29
	M1	BD/BB com siltito e pirita intercalados	31,76	33,12	1,8	47,96
	P M1-M2	Siltito carbonoso	33,12	33,26	2,52	83,15
	M2	BD/BB com pirita	33,26	33,46	1,89	54,59
	FM2	Pedra - areia	33,46	33,61	-	83,2
	RI1	Pedra - areia	36,91	37,06	1,9	82,24
	I1	DM/DD	37,06	37,71	1,95	69,85
	FI1	Siltito + Pedra - areia	37,71	37,86	2,4	83,31
B3-05	RS	Siltito oxidado cinza claro carbonoso na base	13,25	13,4	2,44	85,18
	S	BD/BB com abundante pirita fragmentado	13,4	13,98	-	51,38
	FS	Pedra - areia	13,98	14,13	1,94	74,69
	M1	DM/DD	14,45	14,63	1,65	63,48
	RM2	Pedra - areia/Siltito na base	16,55	16,7	-	89,17
	M2	BD fragmentado	16,7	17	-	-
	M2	DB fragmentado	17	17,36	1,67	62,86
	M2	BD fragmentado	17,36	17,61	-	-
	FM2	Pedra - areia muito carbonoso no topo	17,61	17,76	1,79	74,9

Tabela 4.2: Resultado da análise de laboratório da recuperação dos testemunhos da área B3 (continuação)

Furo	Estrato	Material	De (m)	Até (m)	ρ (g/cm ³)	Cz (%)
B3-06	RS	Siltito oxidado cinza claro carbonoso na base	11,63	11,78	-	80,98
	S	BD/BB com ab. pirita fragmentado	11,78	12,48	1,77	47,97
	FS	Siltito + Pedra - areia	12,66	12,81	1,84	79,39
	M1	DM/DD	12,85	13	2,05	75,68
	RM2	Pedra - areia/Siltito na base	14,5	14,65	2,1	86,42
	M2	BD/BB fragmentado com siltito intercalado na base	14,65	15,65	1,93	58,27
	FM2	Siltito carbonoso com galhas de vitrênio	15,65	15,8	-	70,18
B3-08	RS	Siltito oxidado cinza claro carbonoso na base	11,55	11,7	2,08	75,71
	S	BD/BB com pirita	11,7	12,21		
		Siltito cinza médio	12,21	12,36	1,8	46,33
	S	BD/BB com pirita	12,36	12,6		
	FS	Pedra - areia	12,6	12,75	2,44	88,94
	M1	DB	13,31	13,53	2,01	54,81
	RM2	Pedra - areia	13,53	13,66	2,36	85,91
	M2	DB	13,66	13,9		
	M2	DM/DD	13,9	14,08		
		Siltito cinza escuro	14,08	14,2	2,08	68,25
	M2	DB	14,2	14,46		
	FM2	Paraconglomerado cinza	14,46	14,61	2,51	91,88
B3-09	RS	Siltito friável cinza claro	3,2	3,35	-	86,19
	S	BD	3,35	3,65		
		Siltito cinza claro	3,65	3,74	2,03	55,95
	S	BD/BB fragmentado	3,74	4,04		
	FS	Siltito cinza claro	4,04	4,19	-	90,91
	RM2	Siltito carbonosos	5,21	5,36	2,11	84,77
	M2	BD	5,36	5,91	1,49	42,88
	FM2	Siltito carbonoso/Pedra - areia	5,91	6,06	2,41	81,48
B3-10	RS	Siltito cinza escuro	12,78	12,93	2,05	89,2
	S	BD/BB	12,93	13,5	1,85	41,06
	FS	Siltito cinza escuro	13,5	13,65	2,1	84,47
	RM2	Siltito cinza médio	14,37	14,52	1,75	83,21
	M2	DM/DB no topo e BD na base	14,52	14,88	1,75	61,56
		FM2	Siltito carbonoso	14,88	15,03	2,2
B3-11	RS	Siltito cinza médio compacto e homogêneo carbonoso na base	34,11	34,26	2,45	89,28
	S	BD/BB com abundante pirita e TT na base	34,26	34,56		
	S	BB com cleats	34,56	35,73		
	S	BD com tonstein na base	35,73	35,9	1,6	38,35
	S	BB	35,9	36,34		
	FS	Pedra - areia	36,34	36,49	2,1	78,26
		I1	DB com pedra - areia	40,9	41,08	-

Tabela 4.2: Resultado da análise de laboratório da recuperação dos testemunhos da área B3 (continuação)

Furo	Estrato	Material	De (m)	Até (m)	ρ (g/cm ³)	Cz (%)
	A1	DM/DD	27,5	27,65	1,95	80,47
	A2	BD com nódulos de pirita	27,84	28,19	1,94	53,77
	B	DB	28,71	29,01	1,88	66,93
		Siltito cinza médio homogêneo	30	33,6	2,34	93,16
		Siltito cinza médio homogêneo	33,6	33,7	2,33	93,36
	RS	Siltito cinza médio homogêneo	38,9	38,95	2,28	89,79
	S	BD/BB com TT no topo	38,95	39,95	1,78	48,88
	FS	Siltito cinza médio	39,95	40,1	2,02	87,9
	RM1	Pedra - areia	40,1	40,2	2,55	85,09
	M1	BD/BB com pirita na base	40,2	41,16		
	M1	BD	41,16	41,33	1,69	46,26
		Siltito cinza escuro com galhas de vitrênio	41,33	41,46	2	73,28
B3-12	M1	DB/DM	41,46	41,92	1,97	67,28
	P M1-M2	Siltito cinza escuro carbonosos	41,92	42,42	2,26	82,63
	M2	DM/DB	42,42	43,12	1,76	58,12
	FM2	Siltito/Pedra - areia	43,12	43,27	2,38	81,57
		Paraconglomerado cinza claro	44,4	45	2,19	85,3
	RI1	Siltito cinza escuro	45,12	45,27	2,21	85,1
	I1	BD	45,27	45,75		
	I1	DM	45,75	45,99	1,75	50,95
	I1	DB/BD	45,99	46,94		
	FI1	Siltito carbonoso	46,94	47,09	2,25	82,55
		Siltito cinza médio	48,5	49,5	2,55	88,88
	I2	Siltito carbonoso/DD fragmentado	52,36	52,64	2,13	82,74
		Arenitos grosseiros quartzosos	54,3	56	2,43	95,83
		Siltito Cinza Médio Escuro	25	26,25	2,27	
	RA1	Siltito carbonoso com galhas de vitrênio	27,25	27,4	2,03	74,4
	A1	BD com cleats com carbonato	27,4	27,78	1,85	62,52
	P A1-A2	Siltito cinza médio com TT	27,78	27,91	2,63	85,73
	A2	BD com cleats com carbonato	27,91	28,18	1,79	56,34
	FA2	Siltito cinza claro	28,18	28,33	2,35	92,17
	B	BD	29	29,15	1,93	55
B3-13		Siltito cinza médio escuro	29,5	31	2,37	
		Siltito cinza médio escuro	35	37	2,42	
		Siltito cinza médio escuro	37	39	2,37	
	RS	Siltito cinza médio escuro	39,87	40,02	2,47	77,81
	S	BD/BB com TT no topo	40,02	40,9	1,53	38,26
	P S-S3	Pedra - areia	40,9	40,99	1,97	77,16
	S3	BD/BB	40,99	41,19		
	S3	Siltito carbonoso	41,19	41,34	1,78	55,49
	S3	BD	41,34	41,48		

Tabela 4.2: Resultado da análise de laboratório da recuperação dos testemunhos da área B3 (continuação)

Furo	Estrato	Material	De (m)	Até (m)	ρ (g/cm ³)	Cz (%)
B3-13	FS3	Siltito carbonoso com galhas e lâminas de vitrênio	41,48	41,63	2	60,81
	RM1	Siltito cinza escuro/Carbonoso	41,85	42	2,3	66,23
	M1	DB com partings de siltito carbonoso	42	42,76	1,66	44,86
	P M1-M2	Siltito carbonoso com galhas de vitrênio	42,76	42,98	2,13	73,68
	M2	BD/BB com fissuras com carbonato	42,98	44,48	1,61	32,63
	FM2	Siltito cinza escuro	4,48	44,63	2,17	87,02
	RI1S	Siltito cinza escuro carbonoso	46,45	46,6	2,41	80,06
	I1S	DB/Local DM	46,6	47,37	1,69	48,28
	I1I	DM/DD com partings de siltito com intercalações e pirita na base	47,37	48,5	1,93	63,1
	FI1I	Siltito cinza escuro fragmentado	48,5	48,65	2,86	90,59
		Siltito cinza claro friável	49	50	2,48	
		Paraconglomerado cinza claro	50,64	52	2,5	
	B3-14	RS	Siltito carbonoso	42,24	42,36	2,03
S		BD/DB com TT no topo	42,39	43		
S		BD/DB com 5cm de siltito intercalado	43	43,37	1,65	46,48
P S-M1		Siltito cinza escuro	43,37	43,61	2,41	81,79
M1		DB	43,61	43,85		
M1		BD	43,85	44,25	1,61	41,42
P M1-M2		Siltito cinza escuro carbonoso	44,25	44,6	2,05	71,98
M2		BD/BB com nódulos de pirita	44,6	45,45		
M2		BD/BB	45,45	45,89	1,53	33,04
FM2		Paraconglomerado cinza claro	45,89	46,04	2,99	95,59
RI1S		Paraconglomerado siltito cinza escuro	47,65	47,8	2,24	85,91
I1S		DM/DB	47,8	48,76	1,65	53,14
I1I		DB com 5cm DE SILTITO CARBONOSO NA BASE	48,76	49,25		
I1I		DB/BD	49,25	49,47		
I1I		Siltito cinza escuro	49,47	49,62	1,86	56,29
I1I		BD/DB com nódulos de pirita	49,62	50,08		
FI1I		Siltito cinza escuro/Paraconglomerado	50,08	50,23	2,52	89,97
B3-15	RS	Siltito cinza médio	51,57	51,72	2,32	77,94
	S	BD/BB com TT no topo	51,72	52,94	1,56	37
	FS	Pedra - areia	52,94	53,09	2,31	86,16
	M1	DB/BD com DM na base	53,42	53,84	1,61	53,54
	P M1-M2	Siltito cinza escuro a carbonoso	53,84	54,38	2,27	83,82
	M2	BD/DB	54,38	54,74	1,6	43,24
	FM2	Siltito cinza médio	54,74	54,89	2,39	85,06
	RI1S	Paraconglomerado cinza claro	60,17	60,32	2,25	94,3
	I1S	DB/BD	60,32	61,04	1,56	39,93
	P I1S-I1I	Pedra - areia	61,04	61,38	1,9	64,11
	I1I	DM/DD	61,38	61,83	1,82	68,25

Tabela 4.2: Resultado da análise de laboratório da recuperação dos testemunhos da área B3 (continuação)

Furo	Estrato	Material	De (m)	Até (m)	ρ (g/cm ³)	Cz (%)
B3-15	FI1	Pedra - areia	61,83	61,98	2,23	79,67
	RS	Siltito cinza médio carbonoso	42,72	42,87	2,48	85,63
	S	BD/BB com TT no topo	42,87	43,87	1,64	42,53
	FS	Siltito cinza médio/Carbonoso	43,87	44,02	2,55	77,56
	M1	DB com siltito carbonoso intercalado	44,11	44,7	2,01	66,88
	P M1-M2	Siltito cinza escuro	44,7	45,15	2,29	85,49
	M2	BD	45,15	45,52		
		Siltito cinza escuro	45,52	45,72	1,71	50,73
B3-16	M2	BD	45,72	46,42		
	FM2	Pedra - areia	46,42	46,57	2,9	88,56
	RI1S	Siltito cinza médio/Carbonoso	48,61	48,76	2,41	86,4
	I1S	DB	48,76	49,1		
	I1S	DD com siltito carbonoso na base	49,1	49,34	1,93	60,2
	I1I	DB	49,34	50,05		
	I1I	DM/DD com pirita na base	50,05	50,3	1,67	56,25
	FI1I	Siltito cinza claro com nódulos de pirita	50,3	50,45	2,27	66,93
	RS	Siltito cinza médio/Carbonoso	44,55	44,7	2,18	88,07
	S	BD/BB com TT no topo e pirita	44,7	45,88		
	S	Siltito carbonoso	45,88	46,05	1,68	46
	S	BD/BB	46,05	46,22		
	P S-M1	Pedra - areia	46,22	46,38	2,29	86,2
	M1	DB/BB	46,38	46,72		
	M1	BD	46,72	47,26	1,57	38,37
B3-17	P M1-M2	Siltito cinza escuro compacto e homogêneo	47,26	48,5	2,42	88,06
	M2	BD/DB	48,5	49,3	1,76	50,33
	FM2	Siltito cinza escuro	49,3	49,45	2,23	82,78
	RI1S	Siltito cinza médio/Carbonoso	51,6	51,75	2,53	79,74
	I1S	BD com pirita e siltito carbonoso	51,75	52,81	1,8	52,23
	I1I	Siltito carbonoso	52,81	52,93		
	I1I	DB/BD siltito carbonoso	52,93	53,42	1,95	66,89
	FI1I	Siltito cinza escuro	53,42	53,57	2,23	78,79
	RA1	Siltito carbonoso	49,44	49,59	2,21	69,57
	A1	BD/DB com cleats e leitões de siltito carbonoso	49,59	50,56	1,83	60,5
	P A1-A2	Siltito carbonoso com 8 cm de TT	50,56	50,86	2,11	85,38
	A2	BD/DB	50,86	51,08	1,58	50,15
B3-18	FA2	Siltito cinza escuro	51,08	51,23	1,77	89,18
	B	DM/DD	51,88	52,15	2,21	69,57
	RS	Siltito cinza médio/Carbonoso	61,67	61,82	2,53	88,71
	S	BD/BB com TT no topo	61,82	62,3		
		Siltito carbonoso com 5 cm de DM/DD intercalados	62,3	62,6	1,87	61,33
	S	DM/DD	62,6	62,85	1,87	61,33

Tabela 4.2: Resultado da análise de laboratório da recuperação dos testemunhos da área B3 (continuação)

Furo	Estrato	Material	De (m)	Até (m)	ρ (g/cm ³)	Cz (%)
B3-18	S	BD/DB/DM/Siltito carbonoso intercalados	62,85	63,47	1,87	61,33
	FS	Siltito cinza escuro	63,47	63,62	2,14	86,89
	RM1	Siltito cinza escuro	63,69	63,84	2,28	87,06
	M1	DB/BD com leitos de siltito carbonoso	63,84	64,54	1,66	47,63
	P M1-M2	Siltito cinza escuro com 5 cm de BD intercalados	64,54	66,45	2,17	76,76
	M2	BD/BB com cleats e nódulos de pirita	64,88	66,3	1,43	28,08
	FM2	Siltito cinza médio/Conglomerático	66,3	67,76	2,15	89,24
	RI1S	Siltito cinza escuro	67,76	67,91	2,17	85,93
	I1S	DB/Local DM fragmentado	67,91	68,76	1,66	46,21
	I1S	BD	68,76	69,2		
	I1I	Siltito carbonoso com 2 cm de BD	69,2	69,52	1,79	58,35
	I1I	DB/BD com pirita na base	69,52	70,4		
	RI2S	Siltito cinza claro	72,85	73	2,5	82,81
	I2ST	DM/DB Siltito carbonoso	73	73,57	1,9	67,03
	I2SB	DB/DM com 1 nódulo de pirita na base	73,57	74,2	1,76	54,14
	I2SB	DB/BD	74,2	74,48		
	I2I	DM/DB com siltito e 5 cm de TT no topo	74,48	75,1	1,9	72,62
	FI2I	Siltito cinza escuro	75,1	75,25	2,25	86,6
B3-19	RS	Siltito cinza claro compacto	43,55	43,7	2,43	88,58
	S	BD/BB com TT no topo e pirita	43,7	44,82	1,63	40,04
	P S-M1	Pedra - areia com siltito cinza médio compacto	44,82	45,05	2,47	82,28
	M1	DB/BD com leitos de siltito carbonoso	45,05	45,78	1,64	43,91
	P M1-M2	Siltito cinza escuro carbonoso	45,78	46,05	2,07	77,34
	M2	BD/BB com cleats e nódulos de pirita	46,05	47,43	1,76	32,31
	FM2	Siltito cinza claro	47,43	47,58	2,49	88,91
	RI1S	Paraconglomerado cinza grosseiro	50,48	50,63	2,48	93,82
	I1S	DB/Local DM fragmentado	50,63	51,63	1,65	44,47
	I1I	DM/DD com partings de siltito com intercalações de pirita na base	51,63	52,28	1,82	63
	FI1I	Pedra - areia siltito cinza claro	52,28	52,43	2,34	87,89
B3-20	RS	Siltito cinza médio escuro	46,62	46,77	2,2	81,13
	S	BD/BB com lentes de pirita	46,77	47,49	1,56	35,86
	S	BD fragmentado	47,49	47,95		
	M2	BD/BB fragmentado	49,75	50,17	-	34,47
	RI1S	Siltito cinza médio escuro	51,6	51,75	2	71,66
	I1S	DB/Local BD com nódulos de pirita	51,75	53,1	1,72	44,53
	I1I	Siltito cinza escuro carbonoso	53,1	53,23	1,83	54,85
	I1I	DB/Local BD	53,23	54,08		
FI1I	Siltito cinza claro	54,08	54,28	2,47	90,66	
B3-21	RS1	DB Siltito cinza escuro	62,72	62,89	2,06	80,39
	S1	BD/BB com cleats e pirita	62,89	63,3	1,57	44,56

Tabela 4.2: Resultado da análise de laboratório da recuperação dos testemunhos da área B3 (continuação)

Furo	Estrato	Material	De (m)	Até (m)	ρ (g/cm ³)	Cz (%)
B3-21	S1	BD com 8cm de siltito carbonoso no topo	63,3	63,76	1,57	44,56
	P S1-S2	Siltito cinza escuro carbonoso	63,76	64	2,16	78,42
	S2	BD/DB	64	64,27	1,53	42,46
	P S2-M1	Siltito cinza escuro carbonoso	64,27	64,53	2,4	80,33
	M1	BD/Local DB	64,53	65,46	-	45,48
	P M1-M2	Parting	65,46	65,62	2,28	81,88
	M2	BB/BD com nódulo de pirita	65,62	67,19	1,52	31,21
	FM2	Siltito cinza claro	67,19	67,34	-	75,5
	RI1S	Siltito cinza escuro carbonoso	69,17	69,33	2,19	84,04
	I1S	DB/BD	69,33	70,9	1,69	49,07
	I1I	Siltito carbonoso	70,9	71,06		
	I1I	DB/DM local BD	71,06	71,79	1,82	60,51
	I1I	DB/DM	71,79	72,39		
	FI1I	Siltito cinza escuro	72,39	72,55	2,19	86,15
B3-22	S	BD/BB com 15 cm de siltito intercalado	49,8	51,2	1,71	48,03
	P S-M1	Siltito carbonoso	51,2	51,4	-	78,4
	M1	DB/BD com 15 cm de siltito intercalado	51,4	52,15	1,8	63
	P M1-M2	Siltito cinza médio com galhas de vitrênio	52,15	52,35	2,06	79,31
	M2	BD/BB com nódulos de pirita	52,35	53,88	1,51	30,96
	FM2	Paraconglomerado cinza claro	53,88	54,03	2,19	93,25
	RI1S	Siltito cinza médio	54,68	54,83	1,96	85,01
	I1S	DB/BD com nódulos de pirita	54,83	56,31	1,71	44,39
	I1I	DB/DD Siltito carbonoso	56,31	57,04	1,78	62,11
	FI1I	Siltito cinza claro	57,04	57,19	2,79	90,17

Algumas amostras não apresentam resultados em algumas análises, pois não foi possível executar as medidas devido à baixa recuperação do testemunho. O código usado para classificar a presença de material carbonoso é baseado na inspeção visual do material em busca da presença de vitrênio, quanto maior a quantidade desse material melhor a qualidade do carvão, a classificação segue as especificações da Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Classificação usada para a qualidade expedita de carvão de acordo com Australian Standard AS 2519/1993

Classificação	Descrição
BR	Brilhante (vitrênio > 90 %)
BB	Brilhante com bandas foscas (entre 60 % e 90 % de vitrênio)
BD	Intercalações de bandas brilhantes e foscas (entre 40 % a 60 % de vitrênio)
DB	Predominância de material fosco com bandas brilhantes (entre 10 % e 40 % de vitrênio)
DM	Fosco com poucas bandas brilhantes (entre 1 % e 10 % de vitrênio)
DD	Fosco (vitrênio < 1 %)

4.4.2 Tratamento dos Dados Obtidos Por Perfilagem Geofísica

Os dados obtidos por perfilagem geofísica não requereram complicadas transformações ou tratamentos, apenas uma conversão no tipo de visualização dos dados. Os perfis geofísicos, que são automaticamente salvos no formato gráfico durante a perfilagem, foram convertidos para o formato texto, a fim de facilitar o cálculo dos valores dos parâmetros para cada formação. Após, estes parâmetros serão usados para a conciliação dos dados de perfilagem geofísica e sondagem com recuperação de testemunhos.

O formato textual pode ser apresentado em diferentes escalas de discriminação dos dados, podendo apresentar um valor médio a cada 10 cm ou a cada 1 cm de perfil. O cálculo dos dados discriminados em diferentes escalas é feito por uma média móvel que considera os registros contidos dentro da resolução vertical da ferramenta.

Na Figura 4.23, vemos um exemplo de um perfil no formato de texto apresentando valor medido a cada 1 cm.

```

-----#-----
~CURVE INFORMATION
#MNEMO. UNIT          API CODE          CURVE DESCRIPTION
-----#-----
DEPTH.M              : 0          Depth
LSD.CPS              : 1          Long Spacing Density
HRD.CPS              : 2          High Resolution Density
BRD.CPS              : 3          Bed Resolution Density
NGAM.CPS             : 4          Natural Gamma
CALP.INCH            : 5          Borehole Diameter
-----#-----
~A  DEPTH      LSD      HRD      BRD      NGAM      CALP
    6.77      210.02  1139.36  10354.65  83.60     3.10
    6.78      207.29  1140.95  10370.65  83.18     3.10
    6.79      209.54  1151.95  10385.48  81.58     3.10
    6.80      208.32  1159.95  10390.06  80.50     3.10
    6.81      208.65  1160.41  10392.90  79.48     3.10
    6.82      207.89  1161.41  10392.73  80.97     3.10
    6.83      206.77  1157.56  10400.50  80.48     3.10
    6.84      204.81  1157.27  10425.31  81.27     3.10
    6.85      206.13  1155.42  10424.54  83.08     3.10
    6.86      204.15  1155.59  10416.37  81.59     3.10
    6.87      202.33  1155.76  10401.60  80.96     3.10
    6.88      197.54  1151.74  10396.06  79.17     3.10
    6.89      195.25  1149.58  10376.73  81.77     3.10
    6.90      194.58  1147.42  10353.24  82.20     3.10
    6.91      195.41  1139.26  10335.13  82.51     3.10
    6.92      195.56  1133.94  10314.82  81.92     3.10
    6.93      197.71  1126.85  10288.49  81.40     3.10
    6.94      194.72  1118.88  10258.82  82.68     3.10
    6.95      192.74  1110.22  10245.03  81.69     3.10
    6.96      191.14  1109.60  10216.21  81.48     3.10
    6.97      188.99  1102.27  10180.36  81.86     3.10
    6.98      188.94  1095.77  10127.19  83.14     3.10
    6.99      188.11  1087.31  10084.45  82.28     3.10
    7.00      187.04  1079.47  10047.93  81.30     3.10
    7.01      184.73  1074.64  10015.35  82.58     3.10
    7.02      184.07  1068.18  9982.85   81.99     3.10
    7.03      183.61  1058.01  9937.00   80.92     3.10
    7.04      180.20  1049.13  9897.67   81.92     3.10
    7.05      182.03  1037.09  9881.67   83.11     3.10
    7.06      178.34  1027.45  9859.67   83.75     3.10
    7.07      176.19  1022.95  9844.17   81.61     3.10
    7.08      174.36  1016.31  9812.17   82.74     3.10
    7.09      174.20  1007.97  9775.55   82.91     3.10
    7.10      172.87  1005.21  9780.72   81.96     3.10
    7.11      174.17  1001.21  9777.85   83.24     3.10
    7.12      174.00  998.54   9764.43   85.61     3.10
    7.13      176.93  995.00   9747.18   87.32     3.10
    7.14      179.74  987.83   9745.18   85.82     3.10
    7.15      179.74  983.97   9747.62   83.93     3.10

```

Figura 4.23: Perfil geofísico em formato texto usando 1 cm de discriminação (Copelmi Mineração Ltda.).

Como para essa campanha de perfilagem geofísica foram utilizadas duas diferentes ferramentas, foi feita a fusão dos valores obtidos em um único perfil para facilitar a identificação das camadas de interesse. Um exemplo de um perfil fundido pode ser visto na Figura 4.24.

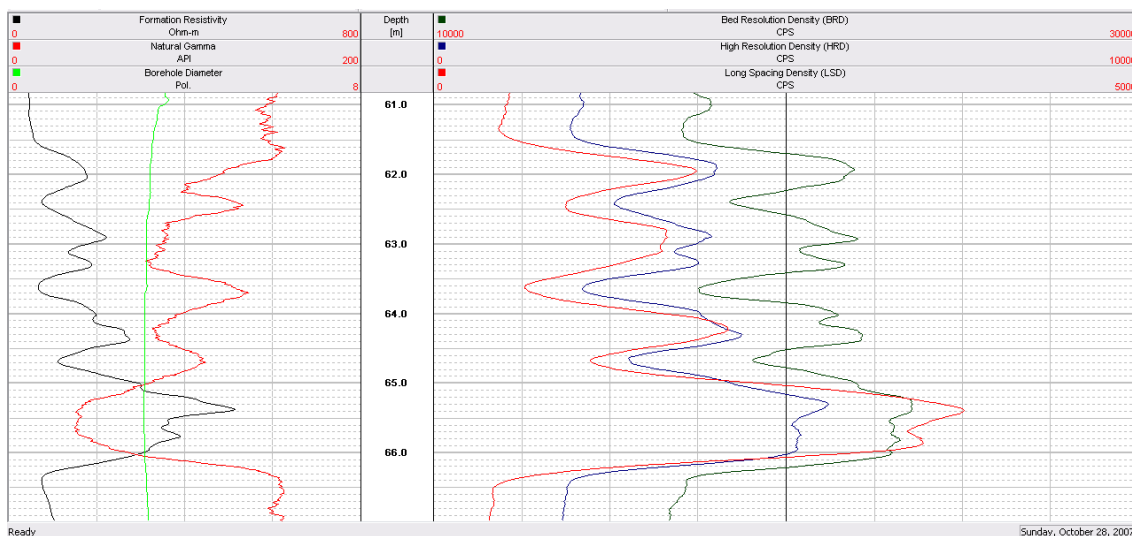


Figura 4.24: Fusão entre os perfis geofísicos feitos pelas duas ferramentas.

Na esquerda da coluna central, temos o registro geofísico de emissão de radiação gama natural (linha vermelha), resistividade (linha preta) e diâmetro do furo (linha verde claro) e a direita da coluna central temos o registro da radiação retroespalhada feito pelos três cintilômetros LSD, HRD e BRD.

4.4.3 Conciliação entre Dados de Perfilagem Geofísica e Sondagem

A conciliação dos dados teve como objetivo estimar o valor médio dos parâmetros medidos por geofísica das camadas de carvão e outras formações de interesse com os trechos de material homogêneo para calibração de ferramenta.

Essa conciliação parte da inspeção visual comparando o perfil geofísico fundido com a coluna estratigráfica, construída com a descrição da recuperação dos testemunhos como mostrado na Figura 4.25.

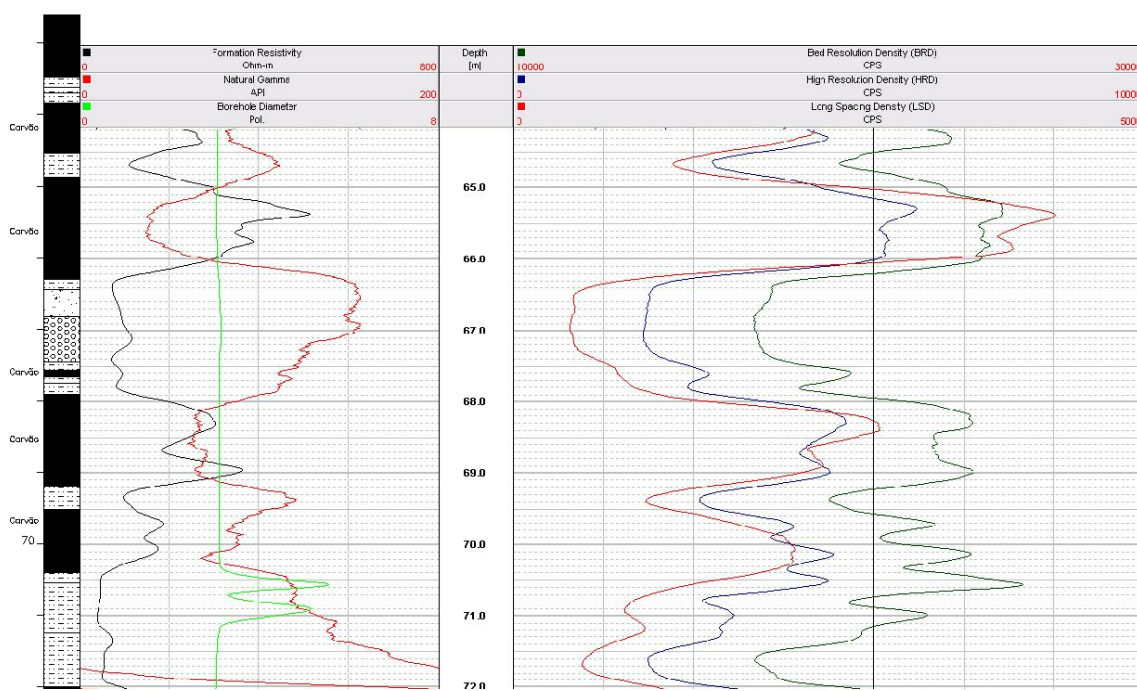


Figura 4.25: Coluna estratigráfica obtida com a sondagem convencional ao lado do perfil geofísico fundido.

Foi então possível definir quais trechos do perfil geofísico representavam os estratos de interesse (Figura 4.26).

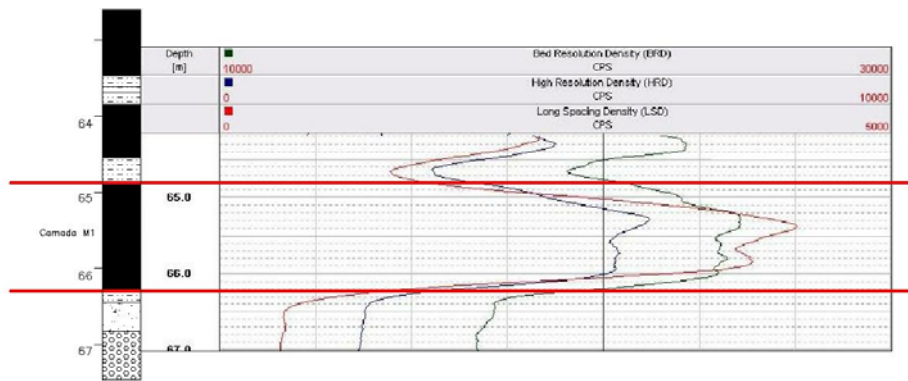


Figura 4.26: Definição trecho do perfil geofísico representativo à camada de carvão.

No exemplo da Figura 4.26, as barras horizontais vermelhas delimitam a camada de carvão M1 do furo B3-18 que está localizado entre as profundidades 64,8 e 66,2 m. Tendo a posição exata dos estratos, foi possível efetuar o cálculo da média aritmética dos parâmetros geofísicos para as formações.

Na Figura 4.27, apresenta-se o exemplo do cálculo feito para a Camada M1 do furo B3-18.

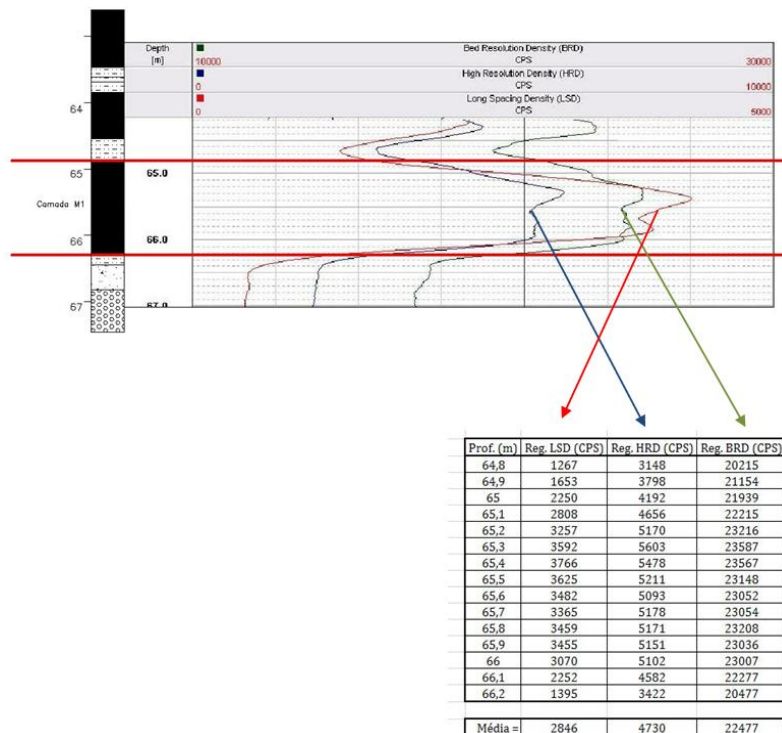


Figura 4.27: Definição do trecho de interesse no perfil geofísico através da conciliação dos dados e cálculo da média dos registros geofísicos.

Como somente o registro de radiação retroespalhada é usado para inferência de densidade, os demais perfis (resistividade, gama natural e caliper) foram usados somente para identificar a posição da camada de carvão no perfil, logo, nenhum tratamento foi efetuado com essas medidas.

Na Tabela 4.4, estão apresentadas as médias calculadas de radiação retroespalhada para as camadas de carvão e trechos de materiais homogêneos presentes nos quatro furos perfilados.

Tabela 4.4: Valor médio de radiação retroespalhada para camadas de carvão e trechos de calibração nos quatro furos perfilados

Furo	Estrato	Material	De (m)	Até (m)	Rad.	Rad.	Rad.	
					retroespalhada LSD (CPS)	retroespalhada HRD (CPS)	retroespalhada BRD (CPS)	
B3-03	RS	Siltito cinza friável	10,95	11,1	694	2233	18127	
	S	BD/BB com pirita e TT na base	11,1	12,21	1450	3449	20496	
	FS	Siltito carbonoso + pedra - areia	12,21	12,36	1428	3307	20777	
	M1	BD/BB	12,36	12,64	1550	3550	20614	
	P M1-	Siltito carbonoso + cinza claro +	12,64	13,08	949	2750	19533	
	M2	BD + Pedra - areia	13,08	13,78	1178	3213	20533	
	FM2	Pedra - areia	13,78	13,93	573	2145	18256	
B3-12	A1	DM/DD	27,5	27,65	870	2724	19283	
	A2	BD com nódulos de pirita	27,84	28,19	947	2809	19305	
	B	DB	28,71	29,01	827	2677	18655	
		Siltito cinza médio homogêneo	30	33,6	520	2054	17716	
		Siltito cinza médio homogêneo	33,6	33,7	536	2102	17846	
	RS	Siltito cinza médio homogêneo	38,9	38,95	700	2257	17794	
	S	BD/BB com TT no topo	38,95	39,95	1874	3915	21425	
	FS	Siltito cinza médio	39,95	40,1	807	2407	18924	
	RM1	Pedra - areia	40,1	40,2	1183	3140	20278	
	M1	BD/BB com pirita na base	40,2	41,16	1874	3915	21914	
		BD	41,16	41,33				
		Siltito cinza escuro com galhas de vitrênio	41,33	41,46	1461	3424	21195	
		M1	DB/DM	41,46	41,92	1042	3018	20453
		P M1-	Siltito cinza escuro carbonosos	41,92	42,42	612	2146	18063
	M2	DM/DB	42,42	43,12	1535	3707	21601	
	FM2	Siltito/Pedra - areia	43,12	43,27	814	2601	19418	
		Paraconglomerado cinza claro	44,4	45	402	1802	17156	
RI1	Siltito cinza escuro	45,12	45,27	942	2827	19401		
I1	BD	45,27	45,75	1716	3783	21665		

Tabela 4.4: Valor médio de radiação retroespalhada para camadas de carvão e trechos de calibração nos quatro furos perfilados (continuação)

Furo	Estrato	Material	De (m)	Até (m)	Rad. retroespalhada LSD (CPS)	Rad. retroespalhada HRD (CPS)	Rad. retroespalhada BRD (CPS)
	I1	DM	45,75	45,99			
	I1	DB/BD	45,99	46,94			
B3-12	F11	Siltito carbonoso	46,94	47,09	659	2192	18143
		Siltito cinza médio	48,5	49,5	397	1792	17007
	I2	Siltito carbonoso/DD fragmentado	52,36	52,64	600	2352	19129
		Arenitos grosseiros quartzosos	54,3	56	478	2064	17989
		Siltito Cinza Médio Escuro	25	26,25	545	2109	17803
	RA1	Siltito carbonoso com galhas de vitrênio	27,25	27,4	1001	2893	19779
	A1	BD com cleats com carbonato	27,4	27,78	1163	3229	20463
	P A1-A2	Siltito cinza médio com TT	27,78	27,91	1106	2961	20053
	A2	BD com cleats com carbonato	27,91	28,18	1175	3128	19948
	FA2	Siltito cinza claro	28,18	28,33	1019	3179	20551
	B	BD	29	29,15	848	2958	20090
		Siltito cinza médio escuro	29,5	31	496	2034	17683
		Siltito cinza médio escuro	35	37	534	2090	17930
		Siltito cinza médio escuro	37	39	478	2001	17696
	RS	Siltito cinza médio escuro	39,87	40,02	1013	2754	19322
	S	BD/BB com TT no topo	40,02	40,9	2737	4687	22961
	P S-S3	Pedra - areia	40,9	40,99	1848	3899	21760
B3-13	S3	BD/BB	40,99	41,19			
	S3	Siltito carbonoso	41,19	41,34	1300	3432	21099
	S3	BD	41,34	41,48			
	FS3	Siltito carbonoso com galhas e lâminas de vitrênio	41,48	41,63	808	2582	19308
	RM1	Siltito cinza escuro/Carbonoso	41,85	42	764	2357	18265
	M1	DB com partings de siltito carbonoso	42	42,76	2041	4200	22422
	P M1-	Siltito carbonoso com galhas de vitrênio	42,76	42,98	1473	3256	20700
	M2	BD/BB com fissuras com carbonato	42,98	44,48	3003	4879	23173
	FM2	Siltito cinza escuro	4,48	44,63	972	2761	19342
	RI1S	Siltito cinza escuro carbonoso	46,45	46,6	689	2254	18264
	I1S	DB/Local DM	46,6	47,37	1827	3968	22019
	I1I	DM/DD com partings de siltito com intercalações e pirita na base	47,37	48,5	1072	2954	19727

Tabela 4.4: Valor médio de radiação retroespalhada para camadas de carvão e trechos de calibração nos quatro furos perfilados (continuação)

Furo	Estrato	Material	De (m)	Até (m)	Rad. retroespalhada LSD (CPS)	Rad. retroespalhada HRD (CPS)	Rad. retroespalhada BRD (CPS)
B3-13	FI1I	Siltito cinza escuro fragmentado	48,5	48,65	814	2661	19822
		Siltito cinza claro friável	49	50	405	1810	17117
		Paraconglomerado cinza claro	50,64	52	410	1832	17257
RA1		Siltito carbonoso	49,44	49,59	1036	2771	19444
A1		BD/DB com cleats e leitos de siltito carbonoso	49,59	50,56	1470	3568	21123
P A1-A2		Siltito carbonoso com 8 cm de TT	50,56	50,86	982	2847	19710
A2		BD/DB	50,86	51,08	1052	3233	20190
FA2		Siltito cinza escuro	51,08	51,23	813	2616	19220
B		DM/DD	51,88	52,15	1129	3292	20314
RS		Siltito cinza médio/Carbonoso	61,67	61,82	1323	3558	21166
S		BD/BB com TT no topo	61,82	62,3			
		Siltito carbonoso com 5 cm de DM/DD intercalados	62,3	62,6			
S		DM/DD	62,6	62,85	1359	3355	20789
S		BD/DB/DM/Siltito carbonoso intercalados	62,85	63,47			
FS		Siltito cinza escuro	63,47	63,62	709	2269	18313
RM1		Siltito cinza escuro	63,69	63,84	788	2421	18438
M1		DB/BD com leitos de siltito carbonoso	63,84	64,54	1729	3871	21587
B3-18	P M1-	Siltito cinza escuro com 5 cm de	64,54	66,45	1243	3028	19990
	M2	BD intercalados					
	M2	BD/BB com cleats e nódulos de pirita	64,88	66,3	2919	4791	22818
	FM2	Siltito cinza médio/Conglomerático	66,3	67,76	633	2092	17682
	RI1S	Siltito cinza escuro	67,76	67,91	1047	2872	19528
	I1S	DB/Local DM fragmentado	67,91	68,76	1974	4088	22175
	I1S	BD	68,76	69,2			
	I1I	Siltito carbonoso com 2 cm de BD	69,2	69,52	1408	3348	20602
	I1I	DB/BD com pirita na base	69,52	70,4			
	RI2S	Siltito cinza claro	72,85	73	632	2082	17557
I2ST	DM/DB Siltito carbonoso	73	73,57	1182	3240	20612	
I2SB	DB/DM com 1 nódulo de pirita na base	73,57	74,2	1707	3760	21579	
I2SB	DB/BD	74,2	74,48				
I2I	DM/DB com siltito e 5 cm de TT no topo	74,48	75,1	996	2891	19866	
FI2I		Siltito cinza escuro	75,1	75,25	980	2671	19007

4.5 Análise dos Dados

Um dos objetivos dessa dissertação foi desenvolver o uso da krigagem de indicadores com *soft data* como meio de incorporar os dados gerados por perfilagem geofísica. Esse método exige que o dado secundário seja obtido em todos os pontos amostrais e que o dado primário exista apenas em alguns locais. Infelizmente, essa não é a situação dos dados onde tem-se amostras físicas de material sondado com recuperação de testemunhos (*hard data* ou dado primário) em todos os locais amostrados e amostras geofísicas (*soft data* ou dado secundário) em apenas quatro locais amostrados. Portanto, será criada uma situação hipotética para facilitar o desenvolvimento da metodologia para aplicação do método geoestatístico escolhido. A situação real comumente encontrada na indústria é exatamente a que foi criada neste cenário aqui chamado de hipotético.

4.5.1 Cenário Real/Cenário Hipotético

A real situação do banco de dados deste trabalho é apresentada na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Real situação do banco de dados utilizado neste trabalho

Furo	Amostragem por recuperação de testemunho (<i>hard data</i>)	Amostragem por perfilagem geofísica (<i>soft data</i>)
B3-01	Amostrado	Não amostrado
B3-02	Amostrado	Não amostrado
B3-03	Amostrado	Amostrado
B3-04	Amostrado	Não amostrado
B3-05	Amostrado	Não amostrado
B3-06	Amostrado	Não amostrado
B3-07	Amostrado	Não amostrado
B3-08	Amostrado	Não amostrado

Tabela 4.5: Real situação do banco de dados utilizado neste trabalho (continuação)

Furo	Amostragem por recuperação de testemunho (<i>hard data</i>)	Amostragem por perfilagem geofísica (<i>soft data</i>)
B3-09	Amostrado	Não amostrado
B3-10	Amostrado	Não amostrado
B3-11	Amostrado	Não amostrado
B3-12	Amostrado	Amostrado
B3-13	Amostrado	Amostrado
B3-14	Amostrado	Não amostrado
B3-15	Amostrado	Não amostrado
B3-16	Amostrado	Não amostrado
B3-17	Amostrado	Não amostrado
B3-18	Amostrado	Amostrado
B3-19	Amostrado	Não amostrado
B3-20	Amostrado	Não amostrado
B3-21	Amostrado	Não amostrado
B3-22	Amostrado	Não amostrado

Como mostrado na Tabela 4.5, conclui-se que existe maior quantidade de dados primários do que secundários, situação contrária àquela que o método geoestatístico escolhido exige, que é um banco de dados composto por dados primários em alguns pontos amostrais e dados secundários em todos os locais. Logo, o plano de amostragem ideal para o trabalho seria:

- Dos 23 locais de selecionados para amostragem, apenas em 4 (B3-03, B3-12, B3-13 e B3-18) efetuar a sondagem com recuperação de testemunhos, estes serão os furos de calibração pois através deles será obtida informação de perfilagem geofísica e de análise de material de sondagem.
- Executar os 19 furos restantes de forma destrutiva, isto é, sem recuperação de testemunhos, esses furos serão destinados somente à execução da perfilagem geofísica.

Seguindo o plano amostral descrito anteriormente, o banco de dados mostrado na Tabela 4.5 ficaria como mostrado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Banco de dados hipotético

Furo	Amostragem por recuperação de testemunho (<i>hard data</i>)	Amostragem por perfilagem geofísica (<i>soft data</i>)
B3-01	Não amostrado	Amostrado
B3-02	Não amostrado	Amostrado
B3-03	Amostrado	Amostrado
B3-04	Não amostrado	Amostrado
B3-05	Não amostrado	Amostrado
B3-06	Não amostrado	Amostrado
B3-07	Não amostrado	Amostrado
B3-08	Não amostrado	Amostrado
B3-09	Não amostrado	Amostrado
B3-10	Não amostrado	Amostrado
B3-11	Não amostrado	Amostrado
B3-12	Amostrado	Amostrado
B3-13	Amostrado	Amostrado
B3-14	Não amostrado	Amostrado
B3-15	Não amostrado	Amostrado
B3-16	Não amostrado	Amostrado
B3-17	Não amostrado	Amostrado
B3-18	Amostrado	Amostrado
B3-19	Não amostrado	Amostrado
B3-20	Não amostrado	Amostrado
B3-21	Não amostrado	Amostrado
B3-22	Não amostrado	Amostrado

Para tornar os dados reais de sondagem e perfilagem disponíveis práticos ao método geoestatísticos, algumas alterações foram feitas para adaptar os dados.

4.5.2 Construção do Banco de Dados Real

O banco de dados real foi constituído pelos resultados das análises de laboratório das amostras obtidas por sondagem com recuperação de testemunhos. Os valores que compõem o banco de dados real são apresentados nas Tabelas 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10. O símbolo usado pra representar a densidade e o teor de cinzas do banco de dados real são, respectivamente, ρ_r e Cz_r .

Observou-se que nenhuma das camadas foi interceptada por todos os furos de sondagem, logo, em alguns furos não se obteve resultados de densidade e teor de cinzas para algumas camadas, fato que será representado por um traço nas tabelas seguintes.

Tabela 4.7: Banco de dados real da Camada S

Furo	ρ_r (g/cm ³)	Cz_r (%)
B3-01	1,62	40,88
B3-02	1,73	44,90
B3-04	1,77	47,39
B3-05	-	-
B3-06	1,76	51,38
B3-08	1,77	47,97
B3-09	1,80	46,33
B3-10	2,03	55,95
B3-11	1,85	41,06
B3-14	1,60	38,35
B3-15	1,78	48,88
B3-16	1,64	46,44
B3-17	1,65	46,48
B3-19	1,56	37,00

Tabela 4.7: Banco de dados real da Camada S (continuação)

Furo	ρ_r (g/cm ³)	Cz_r (%)
B3-20	1,64	42,53
B3-21	1,68	46,00
B3-22	1,87	61,33

Tabela 4.8: Banco de dados real da Camada M1

Furo	ρ_r (g/cm ³)	Cz_r (%)
B3-01	1,66	43,50
B3-02	1,66	38,12
B3-04	1,73	38,69
B3-05	1,80	47,96
B3-06	1,65	63,48
B3-08	2,05	75,68
B3-09	2,01	54,81
B3-10	-	-
B3-11	-	-
B3-14	-	-
B3-15	1,79	53,92
B3-16	1,66	44,86
B3-17	1,61	41,42
B3-19	1,61	53,54
B3-20	2,01	66,88
B3-21	1,57	38,37
B3-22	1,66	47,63

Tabela 4.9: Banco de dados real da Camada M2

Furo	ρ_r (g/cm ³)	Cz_r (%)
B3-01	1,88	60,93
B3-02	1,86	59,58
B3-04	1,92	56,98
B3-05	1,89	54,59

Tabela 4.9: Banco de dados real da Camada M2 (continuação)

Furo	ρ_r (g/cm ³)	Cz_r (%)
B3-06	1,67	62,86
B3-08	1,93	58,27
B3-09	2,08	68,25
B3-10	1,49	42,88
B3-11	1,75	61,56
B3-14	-	-
B3-15	1,76	58,12
B3-16	1,61	32,63
B3-17	1,53	33,04
B3-19	1,60	43,24
B3-20	1,71	50,73
B3-21	1,76	50,33
B3-22	1,43	28,08

Tabela 4.10: Banco de dados real da Camada I1

Furo	ρ_r (g/cm ³)	Cz_r (%)
B3-01	-	-
B3-02	1,72	48,51
B3-04	-	-
B3-05	1,95	69,85
B3-06	-	-
B3-08	-	-
B3-09	-	-
B3-10	-	-
B3-11	-	-
B3-14	2,04	73,74
B3-15	1,75	50,95
B3-16	1,83	57,09
B3-17	1,77	54,96
B3-19	1,71	53,81

Tabela 4.10: Banco de dados real da Camada I1 (continuação)

Furo	ρ_r (g/cm ³)	Cz_r (%)
B3-20	1,77	57,74
B3-21	1,82	56,57
B3-22	1,72	52,06

4.5.3 Construção do Banco de Dados Hipotético

4.5.3.1 Banco de Dados Primários (*Hard Data*)

O banco de dados primário foi composto pelos resultados das análises de laboratório de densidade e teor de cinzas da recuperação dos furos de sondagem dos furos B3-03, B3-12, B3-13 e B3-18. Esses dados são considerados primários, pois foram obtidos por meio da análise de material físico adquirido por meio de um método de pesquisa mineral direto. A Tabela 4.11 apresenta os dados primários cujos valores são considerados valores médios para os atributos das camadas.

Tabela 4.11: Dados primários

Furo	Camada S		Camada M1		Camada M2		Camada I1	
	ρ (g/cm ³)	Cz (%)	ρ (g/cm ³)	Cz (%)	ρ (g/cm ³)	Cz (%)	ρ (g/cm ³)	Cz (%)
B3-03	1,77	47,39	1,73	38,69	1,92	56,98	-	-
B3-12	1,78	48,88	1,79	53,92	1,76	58,12	1,75	50,95
B3-13	1,64	46,44	1,66	44,86	1,61	32,63	1,83	57,09
B3-18	1,87	61,33	1,66	47,63	1,43	28,08	1,72	52,06

4.5.3.2 Banco de Dados Secundário (Soft Data)

O banco de dados secundário foi composto pelas estimativas de densidade e teor de cinzas feitas a partir das informações fornecidas pela perfilagem geofísica.

Porém, antes de efetuar as estimativas foi necessário preencher as lacunas da Tabela 4.2. Para isso, tomou-se proveito do comportamento proporcional que existe entre os parâmetros de densidade e teor de cinzas em carvões. Em carvões, quanto maior a densidade natural, maior é a quantidade de cinzas presente. Por meio dos resultados das análises de camadas de carvão mostradas nas colunas 6 e 7 da Tabela 4.2, foi construído um gráfico de dispersão e sobre a dispersão foi feito o ajuste de uma função linear conforme mostrado na Figura 4.28.

Isto é, com o ajuste de uma função sobre a distribuição das análises de laboratório de densidade e teor de cinza disponíveis para amostras de carvão foi possível inferir as densidades ausentes.

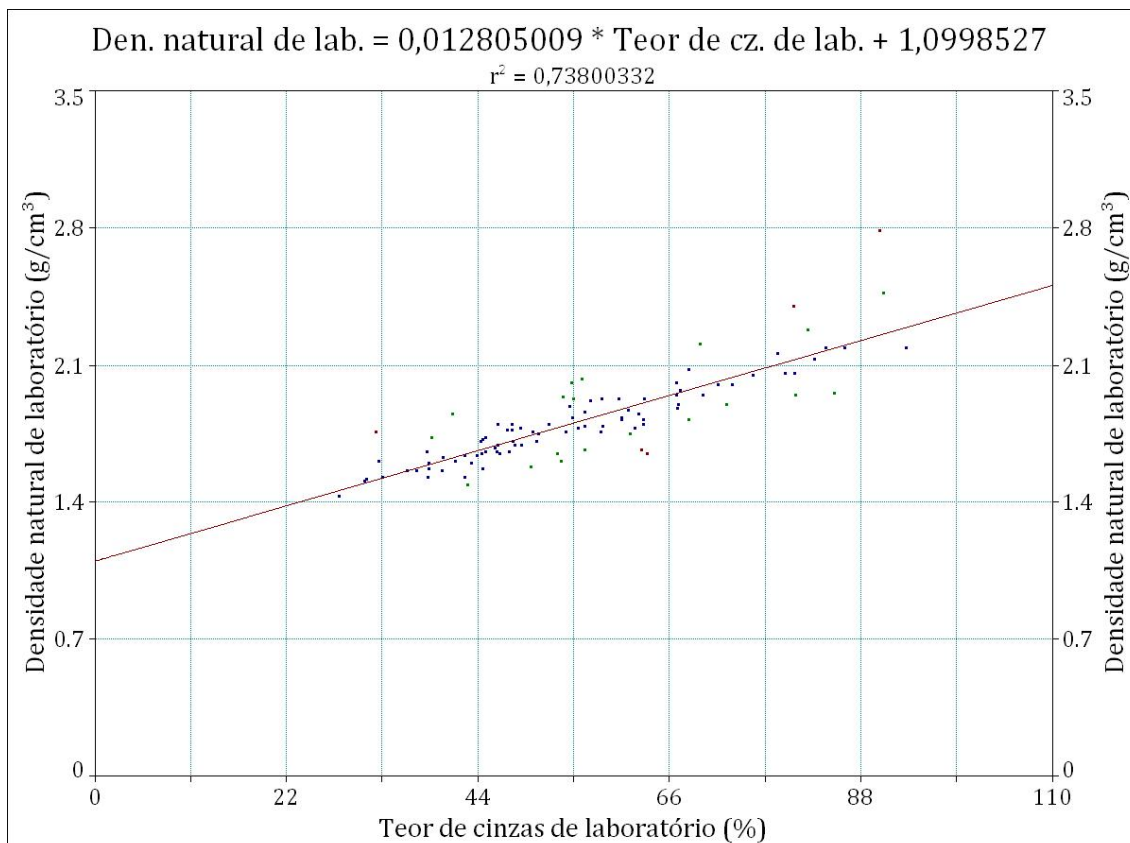


Figura 4.28: Gráfico com a distribuição dos resultados de análise de laboratório de densidade e teor de cinzas para carvões e ajuste linear efetuado.

Como as lacunas da Tabela 4.2, encontravam-se apenas na coluna de densidade, decidiu-se fazer um ajuste onde a variável dependente é a densidade natural e a variável independente o teor de cinzas. Dessa maneira é possível estimar-se valores de densidade em função do teor de cinzas.

A equação obtida foi:

$$\rho = 0,001.Cz + 1,099, \quad \text{Equação 4.5}$$

onde ρ é a densidade e Cz o teor de cinzas.

Tendo as lacunas preenchidas, foi possível construir o gráfico de dispersão dos dados de densidade e taxas de radiação retroespalhada. Para efetuar o ajuste, dentre os três cintilômetros disponíveis, foi escolhido o LSD por apresentar um maior afastamento da fonte de Cs^{137} (aproximadamente 31 cm).

Devido a este afastamento superior em relação aos outros cintilômetros, o volume e profundidade de investigação do LSD são maiores, fazendo com que o registro do LSD represente melhor os materiais mais profundos (mais afastados perpendicularmente da parede do furo) que, devido a isso, possuem menor chance de ter suas propriedades alteradas pelo ato de execução do furo como, por exemplo, penetração de lama de perfuração.

Um maior volume e profundidade de investigação também fazem com que o registro geofísico seja menos sensível a ocorrências de material não carbonoso presente nas camadas de carvão. Na Figura 4.29, apresenta-se um exemplo visual do efeito suavizador.

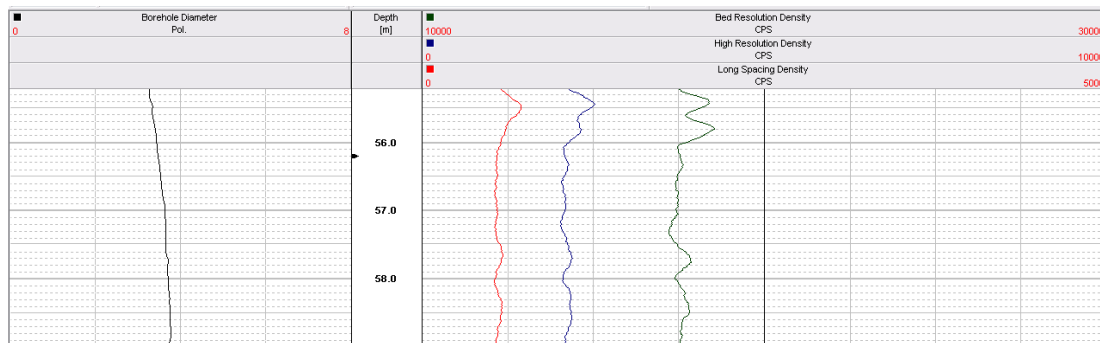


Figura 4.29: Exemplo visual do efeito suavizador da distância entre fonte e cintilômetro no sinal e radiação gama retroespalhada.

Na Figura 4.29, a linha vermelha mostra o registro do cintilômetro LSD que é bem mais suave e menos acidentado que o registro da linha azul (BRD). A aproximação do cintilômetro da fonte radioativa provoca uma redução no volume e profundidade de investigação fazendo com que o registro geofísico seja representativo dos materiais mais próximos da sonda que podem ter sofrido alterações em suas propriedades causadas pelo ambiente do furo. Um menor volume de investigação provoca um aumento da resolução vertical, fazendo com que a ferramenta consiga diferenciar corpos de pequena espessura, entretanto, no caso de depósitos de carvão, ferramentas de alta resolução vertical não são indicadas, pois a ocorrência de corpos estranhos dentro do carvão pode alterar significativamente o sinal medido pelo equipamento (um nódulo de pirita, por exemplo).

Como a resolução vertical do cintilômetro escolhido é de 31 cm, o sinal obtido pelo LSD será 100 % representativo das camadas se as mesmas apresentarem uma espessura igual ou superior a 31 centímetros. O efeito da espessura sobre o sinal pode ser visto nas Figuras 4.30 e 4.31.

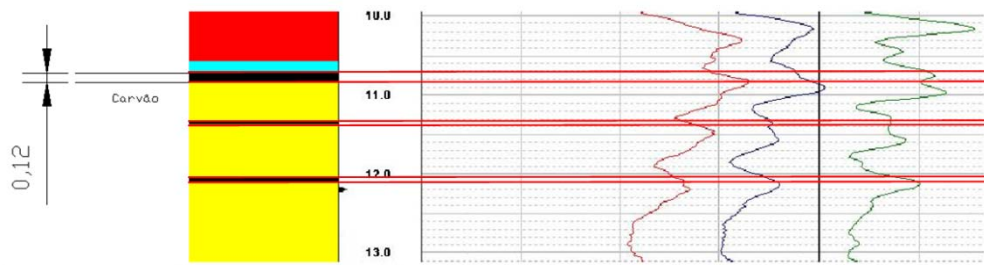


Figura 4.30: Efeito da pouca espessura de camadas de carvão sobre o sinal geofísico.

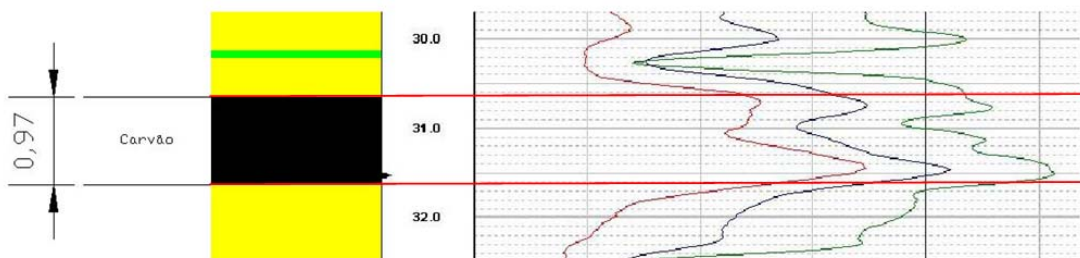


Figura 4.31: Sinal geofísico representativo devido a espessura da camadas de carvão superior à resolução vertical.

Após selecionar todos os registros do cintilômetro LSD que representavam camadas de carvão foi construído o gráfico que comparou as taxas de radiação retroespalhada com as densidades medidas em laboratório.

Após a seleção dos registros geofísicos do cintilômetro LSD que são representativos de camadas de carvão, foi construído o gráfico de dispersão que compara dados geofísicos e de laboratório

O próximo passo foi a construção do gráfico de dispersão dos dados. Conforme foi afirmado no item 2.4.4.1, o comportamento dessa dispersão deve obedecer ao mesmo comportamento decrescente de uma exponencial negativa. Fato este, que é comprovado na Figura 4.32, que apresenta o gráfico de dispersão construído com os todos os dados disponíveis com análise de recuperação de testemunho e registro de radiação retroespalhada.

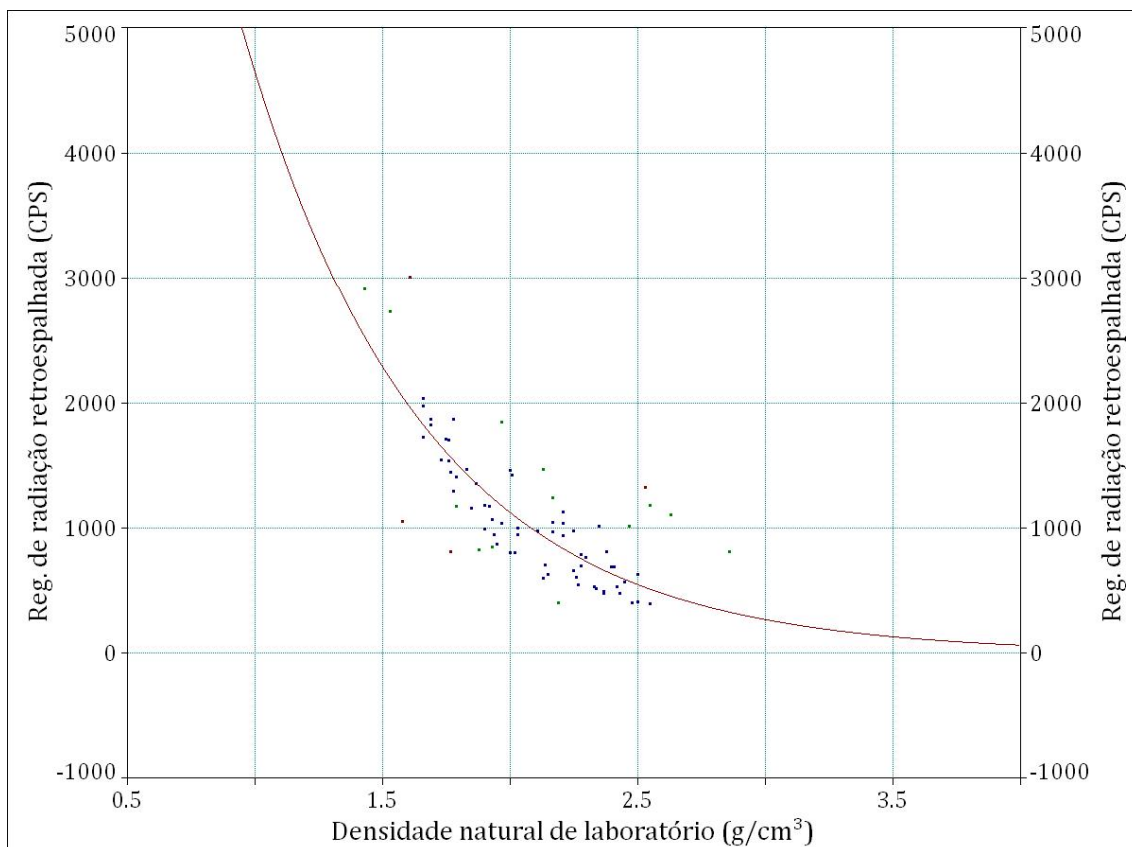


Figura 4.32: Gráfico de dispersão feito com todos os resultados disponíveis de análise laboratorial de densidade e registro geofísico do cintilômetro LSD.

Ao observar a Figura 4.26, notamos uma grande semelhança com a Figura 2.24 que descreve, também, um comportamento exponencial negativo.

Como descrito no item 2.4.4.1, não foi possível determinar alguns importantes parâmetros como número atômico Z , massa atômica A e coeficiente de atenuação de massa do carvão. Assim, usou-se o modelo empírico para ajustar uma equação exponencial negativa, similar a Equação 2.19, sobre o gráfico dos dados dispersos da Figura 4.32.

Antes de efetuar o ajuste foi necessário filtrar os dados da Figura 4.32, retirando todos aqueles representavam camadas inferiores a 30 centímetros. Essa filtragem resultou no gráfico da Figura 4.33.

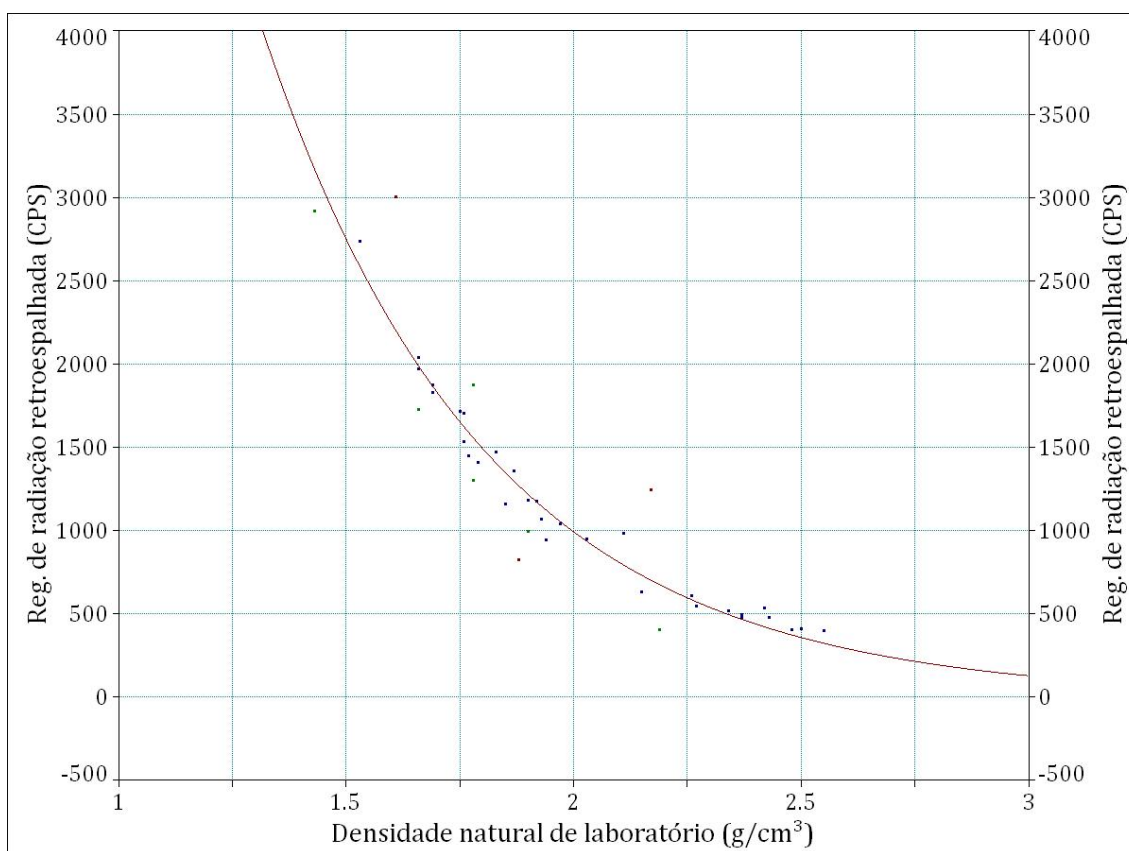


Figura 4.33: Gráfico de dispersão feito com os resultados disponíveis de análise laboratorial de densidade e registro geofísico do cintilômetro LSD para as camadas de espessura superior a 31 cm.

Ao comparar as Figura 4.32 e 4.33 notou-se que a retirada dos pontos que representam camadas de espessura inferior a 30 cm tornou o ajuste mais aderente à dispersão e em consequência se obteve uma equação que representa melhor o fenômeno.

Ainda, foram inseridos mais dois pontos importantes no gráfico da Figura 4.33. Esses pontos são importantes, pois representam os extremos da função ajustada e representam medidas realizadas em laboratório em corpos de prova de constituição homogênea e densidade conhecida. Para este trabalho, foi feita a medida em uma cuba com água de densidade conhecida 1 g/cm^3 e em um bloco de alumínio com densidade $2,5 \text{ g/cm}^3$. Na Figura 4.34, tem-se fotos de ambos os pontos de calibração.



Figura 4.34: Fotos dos pontos de calibração, cuba com água à esquerda e bloco de alumínio a direita.

Os resultados obtidos nos pontos de calibração podem ser vistos na Tabela 4.12.

Tabela 4.12: Dados de calibração em materiais de densidade conhecida

Material	Densidade (g/cm^3)	Reg. LSD (CPS)
Cuba com água	1	11000
Bloco de alumínio	2,5	390

Com o gráfico de dispersão da Figura 4.33 e os registros dos pontos de calibração foi possível construir o gráfico de dispersão completo que é

apresentado na Figura 4.35. Ainda na mesma figura, é apresentado o ajuste do tipo exponencial negativo sobre a dispersão.

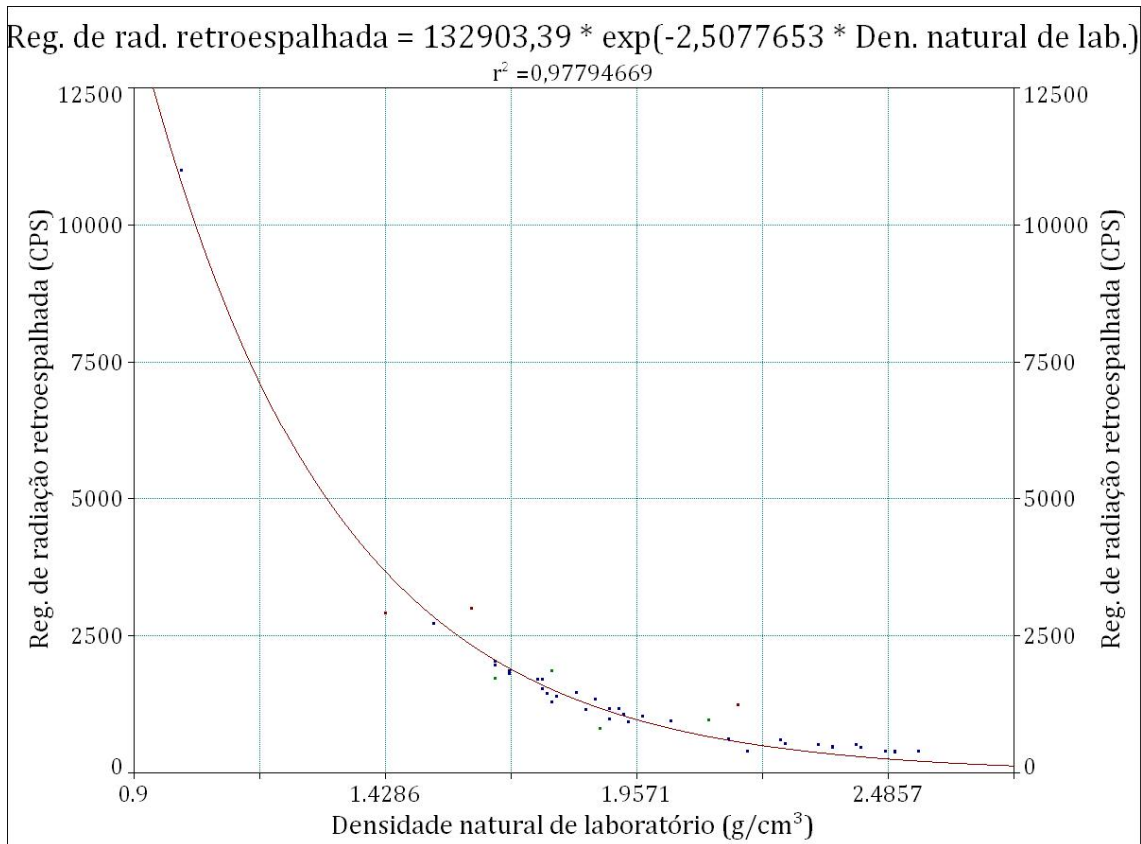


Figura 4.35: Gráfico de dispersão com feito com dados de densidade e registro geoffísico de materiais de espessura superior a 31 cm e dados de calibração.

A equação de ajuste obtida que é apresentada na Figura 4.35 é:

$$y = 132903,39.e^{-2,507.x} . \quad \text{Equação 4.6}$$

Sendo que as variáveis x e y são respectivamente a densidade de perfilagem (ρ_{pg}) e registro de radiação retroespalhada do cintilômetro LSD levando a:

$$Reg. LSD = 132903,39.e^{-2,507.\rho_{pg}} . \quad \text{Equação 4.7}$$

Isolando a densidade tem-se:

$$\rho_{pg} = -0,398 \cdot \ln\left(\frac{Reg. LSD}{132903,39}\right), \quad \text{Equação 4.8}$$

é possível estimar a densidade de perfilagem geofísica em função do registro de radiação retroespalhada do cintilômetro LSD.

Outro gráfico de dispersão de grande importância que foi utilizado para a confecção do banco de dados secundário é aquele que mostra o comportamento linear entre a densidade e o teor de cinzas dos carvões, pois foi com ele que foram estimados os teores de cinzas de perfilagem.

Como estamos assumindo que apenas os furos B3-03, B3-12, B3-13 e B3-18 foram executados com recuperação de testemunhos, o gráfico foi construído apenas com os resultados das análises desses quatro furos. O gráfico de dispersão pode ser visto na Figura 4.36.

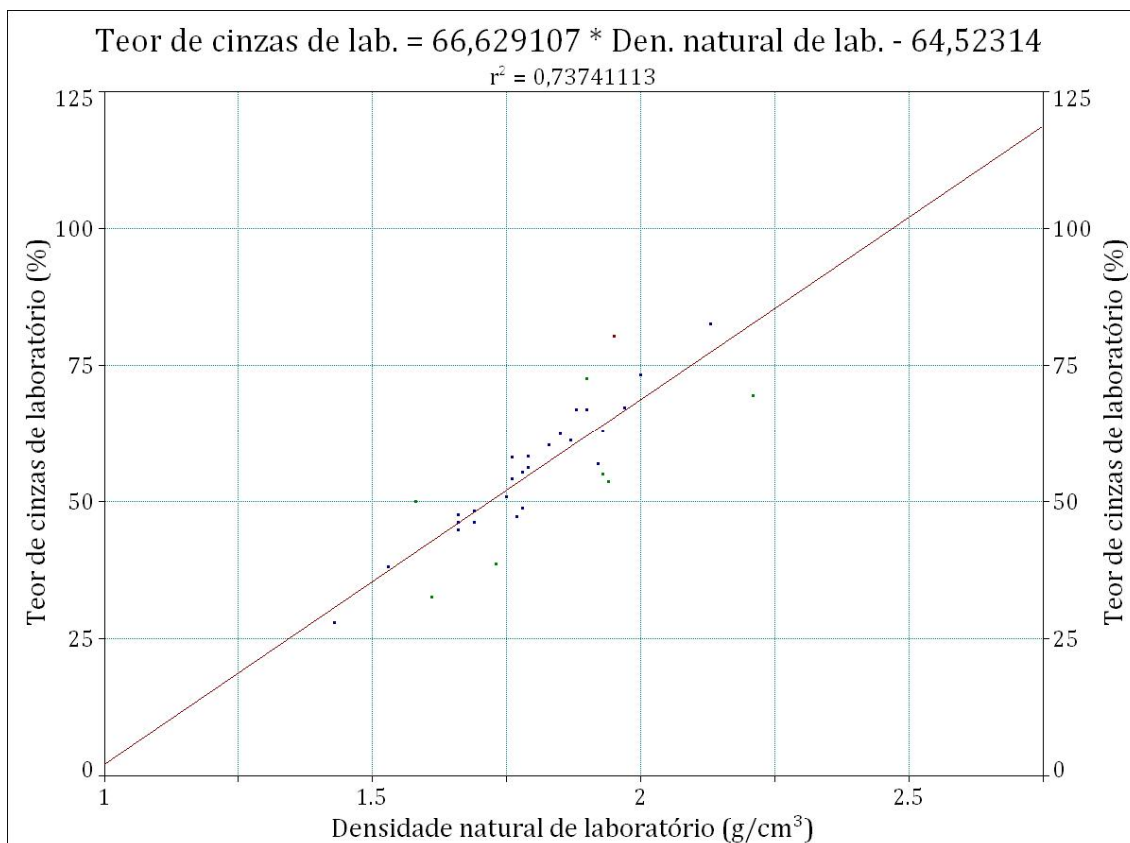


Figura 4.36: Gráfico de dispersão dos dados de densidade e teor de cinzas dos furos B3-03, B3-12, B3-13 e B3-18 com o ajuste da equação linear.

O ajuste mostrado na Figura 4.36 apresentou a seguinte equação:

$$Cz_{pg} = 66,629 \cdot \rho_{pg} - 64,523,$$

Equação 4.9

onde ρ_{pg} é a densidade de perfilagem geofísica e Cz_{pg} e teor de cinzas de perfilagem.

A principal deficiência do banco de dados real é a ausência de dados geofísicos nos furos B3-01, B3-02, B3-04, B3-05, B3-06, B3-07, B3-08, B3-09, B3-10, B3-11, B3-14, B3-15, B3-16, B3-17, B3-19, B3-20, B3-21, B3-22 e B3-23. Para se contornar esse problema e tornar o banco de dados prático, usou-se as densidades obtidas em laboratório desses 19 furos e a Equação 4.7 para estimar um valor de radiação retroespalhada. Esses valores de radiação calculados foram assumidos como que obtidos em campo durante a campanha de perfilagem geofísica, portando, foi criada uma situação hipotética onde se obteve dados geofísicos de todos os 23 furos sendo que quatro deles (B3-03, B3-12, B3-13 e B3-18) são reais e os 18 restantes (B3-01, B3-02, B3-04, B3-05, B3-06, B3-07, B3-08, B3-09, B3-10, B3-11, B3-14, B3-15, B3-16, B3-17, B3-19, B3-20, B3-21, B3-22 e B2-23) foram obtidos com a aplicação dos resultados de laboratório na Equação 4.7.

A Tabela 4.13 apresenta os valores de radiação retroespalhada usadas para construção do banco de dados secundário.

Tabela 4.13: Registro de radiação retroespalhada usado para construção do banco de dados secundário

Furo	Registro de radiação retroespalhada medido pelo cintilômetro LSD (CPS)			
	Camada S	Camada M1	Camada M2	Camada I1
B3-01	2270	2069	1190	-
B3-02	1740	2069	1240	1770
B3-03	-	-	-	-
B3-04	-	1456	1160	999
B3-05	1620	2121	2020	-
B3-06	1570	778	1050	-
B3-07	-	-	-	-
B3-08	1460	860	722	-
B3-09	818	-	3168	-

Tabela 4.13: Registro de radiação retroespalhada usado para construção do banco de dados secundário (continuação)

Furo	Registro de radiação retroespalhada medido pelo cintilômetro LSD (CPS)			
	Camada S	Camada M1	Camada M2	Camada I1
B3-10	1280	-	1651	-
B3-11	2400	-	-	789
B3-12	-	-	-	-
B3-13	-	-	-	-
B3-14	2120	2345	2866	1570
B3-15	2660	2345	2404	1820
B3-16	2170	860	1825	1570
B3-17	1970	2592	1610	1380
B3-18	-	-	-	-
B3-19	2230	2175	1610	1820
B3-20	2660	-	2795	1610
B3-21	2070	1967	2939	1650
B3-22	1820	1456	3013	1740

Os valores de densidade e teor de cinzas de perfilagem geofísica foram estimados de acordo com as Equações 4.7 e 4.9, porém, como essas equações foram ajustadas sobre uma dispersão de dados, elas carregam consigo uma incerteza de estimativa, por isso foi necessário levar em consideração os limites de confiança das estimativas.

O limite de confiança usado foi de 95 %. Um valor de 95 % significa que a chance do valor real se encontrar entre o limite inferior e superior do limite é de 95 %. Para determinarem-se os limites de confiança dos ajustes apresentados nas Figuras 4.37 e 4.38 foi utilizado o mesmo *software* usado para o cálculo dos ajustes. Observa-se na Figura 4.37 o ajuste para estimativa de densidade de perfilagem geofísica junto com seus limites inferior e superior e na Figura 4.38 o ajuste para estimativa de teor de cinzas de perfilagem geofísica junto com seus limites inferior e superior.

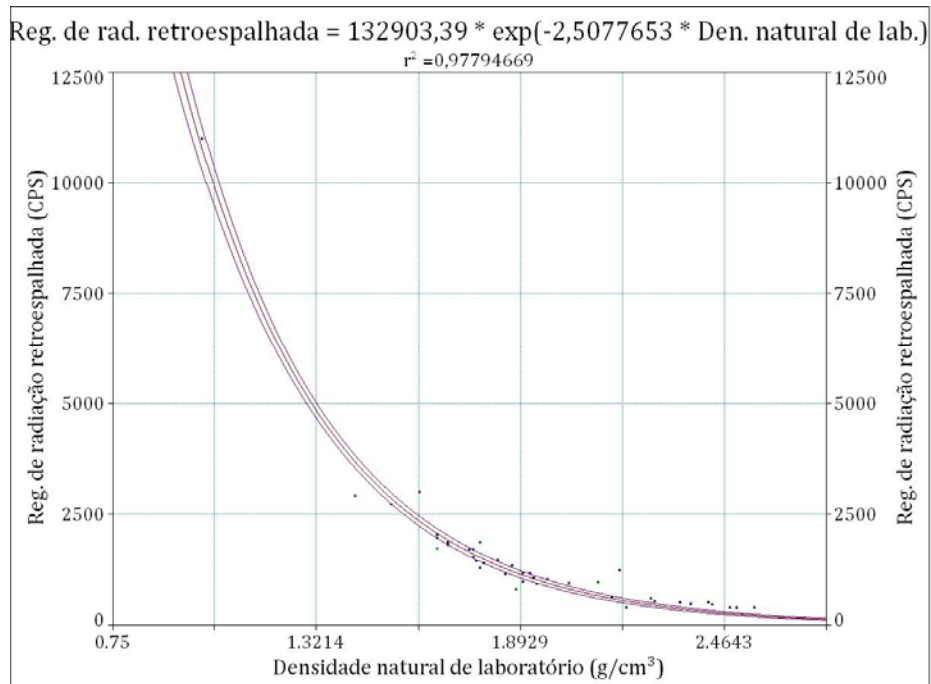


Figura 4.37: Equação ajustada para inferência de densidade de perfilagem geofísica e seus limites de confiança.

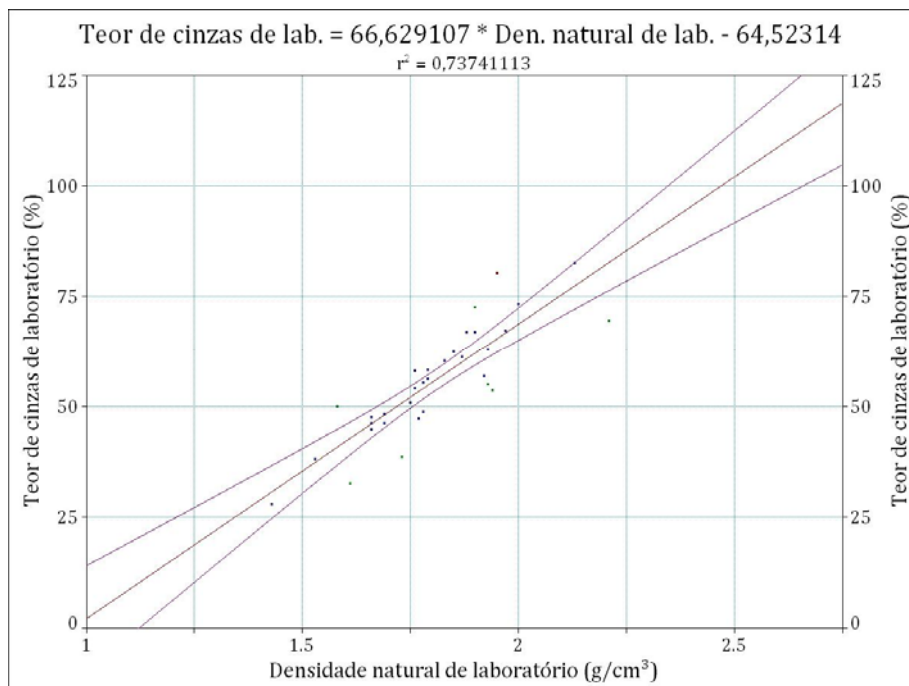


Figura 4.38: Equação ajustada para inferência de teor de cinzas de perfilagem geofísica e seus limites de confiança.

Finalmente, com os dados da Tabela 4.9 e as equações das Figuras 4.37 e 4.38 foram estimadas as densidades de perfilagem geofísica, teor de cinzas de perfilagem geofísica e seus respectivos limites de confiança de 95 %

O banco de dados secundário é constituído dos valores apresentados nas Tabelas 4.14, 4.15, 4.16 e 4,17.

Tabela 4.14: Dados secundários referentes à Camada S com seus limites de confiança

Furo	Limite inferior (g/cm ³)	ρ_{pg} (g/cm ³)	Limite superior (g/cm ³)	Limite inferior (%)	Cz_{pg} (%)	Limite superior (%)
B3-01	1,60	1,62	1,64	40,1	43,6	47,2
B3-02	1,71	1,73	1,75	48,1	50,7	53,3
B3-04	-	-	-	-	-	-
B3-05	1,74	1,76	1,78	50,1	52,6	55,1
B3-06	1,75	1,77	1,79	51	53,4	55,8
B3-08	1,78	1,8	1,83	53,1	55,4	57,8
B3-09	2,00	2,03	2,06	66,7	70,7	74,7
B3-10	1,82	1,85	1,88	56,3	58,7	61,2
B3-11	1,58	1,6	1,62	38,3	42,1	45,9
B3-14	1,63	1,65	1,67	42,1	45,4	48,7
B3-15	1,54	1,56	1,58	35,1	39,4	43,7
B3-16	1,62	1,64	1,66	41,4	44,7	48,1
B3-17	1,66	1,68	1,70	44,4	47,4	50,4
B3-19	1,61	1,63	1,65	40,6	44,1	47,6
B3-20	1,54	1,56	1,58	35,1	39,4	43,7
B3-21	1,64	1,66	1,68	42,9	46,1	49,3
B3-22	1,69	1,71	1,73	46,7	49,4	52,2

Tabela 4.15: Dados secundários referentes à Camada M1 com seus limites de confiança

Furo	Limite inferior (g/cm ³)	ρ_{pg} (g/cm ³)	Limite superior (g/cm ³)	Limite inferior (%)	Cz_{pg} (%)	Limite superior (%)
B3-01	1,64	1,66	1,68	42,7	45,9	49,1
B3-02	1,64	1,66	1,68	42,9	46,1	49,3
B3-04	1,78	1,80	1,83	53,1	55,4	57,8
B3-05	1,63	1,65	1,67	42,1	45,4	48,7
B3-06	2,02	2,05	2,09	67,8	72,1	76,3
B3-08	1,98	2,01	2,04	65,6	69,4	73,2
B3-09	-	-	-	-	-	-

Tabela 4.15: Dados secundários referentes à Camada M1 com seus limites de confiança (continuação)

Furo	Limite inferior (g/cm ³)	ρ_{pg} (g/cm ³)	Limite superior (g/cm ³)	Limite inferior (%)	Cz_{pg} (%)	Limite superior (%)
B3-10	-	-	-	-	-	-
B3-11	-	-	-	-	-	-
B3-14	1,59	1,61	1,63	39	42,7	46,5
B3-15	1,59	1,61	1,63	39	42,7	46,5
B3-16	1,98	2,01	2,04	65,6	69,4	73,2
B3-17	1,55	1,57	1,59	35,9	40,1	44,3
B3-19	1,62	1,64	1,66	41,4	44,7	48,1
B3-20	-	-	-	-	-	-
B3-21	1,66	1,68	1,70	44,6	47,6	50,5
B3-22	1,78	1,80	1,83	53,1	55,4	57,8

Tabela 4.16: Dados secundários referentes à Camada M2 com seus limites de confiança

Furo	Limite inferior (g/cm ³)	ρ_{pg} (g/cm ³)	Limite superior (g/cm ³)	Limite inferior (%)	Cz_{pg} (%)	Limite superior (%)
B3-01	1,85	1,88	1,91	58,2	60,7	63,3
B3-02	1,84	1,86	1,89	57,1	59,6	62,1
B3-04	1,86	1,89	1,92	58,8	61,4	64
B3-05	1,65	1,67	1,69	43,7	46,7	49,8
B3-06	1,90	1,93	1,96	61,1	64,1	67
B3-08	2,05	2,08	2,12	69,4	74,1	78,7
B3-09	1,47	1,49	1,51	29,6	34,8	39,9
B3-10	1,73	1,75	1,78	49,6	52,1	54,6
B3-11	-	-	-	-	-	-
B3-14	1,51	1,53	1,55	32,8	37,4	42,1
B3-15	1,58	1,60	1,62	38,3	42,1	45,9
B3-16	1,69	1,71	1,73	46,7	49,4	52,2
B3-17	1,74	1,76	1,79	50,3	52,7	55,2
B3-19	1,74	1,76	1,79	50,3	52,7	55,2
B3-20	1,52	1,54	1,56	33,6	38,2	42,7
B3-21	1,50	1,52	1,54	32	36,8	41,5
B3-22	1,49	1,51	1,53	31,2	36,1	41

Tabela 4.17: Dados secundários referentes à Camada I1 com seus limites de confiança

Furo	Limite inferior (g/cm ³)	ρ_{pg} (g/cm ³)	Limite superior (g/cm ³)	Limite inferior (%)	Cz_{pg} (%)	Limite superior (%)
B3-01	-	-	-	-	-	-
B3-02	1,70	1,72	1,75	47,5	50,1	52,8
B3-04	1,92	1,95	1,98	62,3	65,4	68,5
B3-05	-	-	-	-	-	-
B3-06	-	-	-	-	-	-
B3-08	-	-	-	-	-	-
B3-09	-	-	-	-	-	-
B3-10	-	-	-	-	-	-
B3-11	2,01	2,04	2,08	67,5	71,7	75,9
B3-14	1,75	1,77	1,79	51	53,4	55,8
B3-15	1,69	1,71	1,73	46,7	49,4	52,2
B3-16	1,75	1,77	1,79	51	53,4	55,8
B3-17	1,80	1,82	1,85	54,4	56,7	59,1
B3-19	1,69	1,71	1,73	46,7	49,4	52,2
B3-20	1,74	1,76	1,79	50,3	52,7	55,2
B3-21	1,73	1,75	1,78	49,6	52,1	54,6
B3-22	1,71	1,73	1,75	48,1	50,7	53,3

Vale notar que nenhuma das quatro tabelas acima apresenta os valores de ambos os atributos dos furos B3-03, B3-12, B3-13 e B3-18, isto porque são nestes furos que se localizam os dados primários, e, portanto, não foram estimados por geofísica.

O banco de dados hipotético que inclui dados primários e secundários com seus limites de confiança, desenvolvido para aplicação do método de krigagem dos indicadores com a mediana, é apresentado nas Tabelas 4.18, 4.19, 4.20 e 4.21. E a simbologia usada para representar a densidade e teor de cinzas deste banco de dados é ρ_h para o atributo densidade e Cz_h para o atributo teor de cinzas.

Tabela 4.18: Banco de dados hipotético da Camada S incluindo dados primários e secundários

Furo	Limite inferior (g/cm ³)	ρ_h (g/cm ³)	Limite superior (g/cm ³)	Limite inferior (%)	Cz_h (%)	Limite superior (%)
B3-01	1,60	1,62	1,64	40,1	43,6	47,2
B3-02	1,71	1,73	1,75	48,1	50,7	53,3

Tabela 4.18: Banco de dados hipotético da Camada S incluindo dados primários e secundários (continuação)

Furo	Limite inferior (g/cm ³)	ρ_h (g/cm ³)	Limite superior (g/cm ³)	Limite inferior (%)	C_{zh} (%)	Limite superior (%)
B3-03	-	1,77	-	-	47,39	-
B3-04	-	-	-	-	-	-
B3-05	1,74	1,76	1,78	50,1	52,6	55,1
B3-06	1,75	1,77	1,79	51	53,4	55,8
B3-08	1,78	1,8	1,83	53,1	55,4	57,8
B3-09	2,00	2,03	2,06	66,7	70,7	74,7
B3-10	1,82	1,85	1,88	56,3	58,7	61,2
B3-11	1,58	1,6	1,62	38,3	42,1	45,9
B3-12	-	1,78	-	-	48,88	-
B3-13	-	1,64	-	-	46,44	-
B3-14	1,63	1,65	1,67	42,1	45,4	48,7
B3-15	1,54	1,56	1,58	35,1	39,4	43,7
B3-16	1,62	1,64	1,66	41,4	44,7	48,1
B3-17	1,66	1,68	1,70	44,4	47,4	50,4
B3-18	-	1,87	-	-	61,33	-
B3-19	1,61	1,63	1,65	40,6	44,1	47,6
B3-20	1,54	1,56	1,58	35,1	39,4	43,7
B3-21	1,64	1,66	1,68	42,9	46,1	49,3
B3-22	1,69	1,71	1,73	46,7	49,4	52,2

Tabela 4.19: Banco de dados hipotético da Camada M1 incluindo dados primários e secundários

Furo	Limite inferior (g/cm ³)	ρ_h (g/cm ³)	Limite superior (g/cm ³)	Limite inferior (%)	C_{zh} (%)	Limite superior (%)
B3-01	1,64	1,66	1,68	42,7	45,9	49,1
B3-02	1,64	1,66	1,68	42,9	46,1	49,3
B3-03	-	1,73	-	-	38,69	-
B3-04	1,78	1,80	1,83	53,1	55,4	57,8
B3-05	1,63	1,65	1,67	42,1	45,4	48,7
B3-06	2,02	2,05	2,09	67,8	72,1	76,3
B3-08	1,98	2,01	2,04	65,6	69,4	73,2
B3-09	-	-	-	-	-	-
B3-10	-	-	-	-	-	-
B3-11	-	-	-	-	-	-
B3-12	-	1,79	-	-	53,92	-
B3-13	-	1,66	-	-	44,86	-
B3-14	1,59	1,61	1,63	39	42,7	46,5

Tabela 4.19: Banco de dados hipotético da Camada M1 incluindo dados primários e secundários (continuação)

Furo	Limite inferior (g/cm ³)	ρ_h (g/cm ³)	Limite superior (g/cm ³)	Limite inferior (%)	Cz_h (%)	Limite superior (%)
B3-15	1,59	1,61	1,63	39	42,7	46,5
B3-16	1,98	2,01	2,04	65,6	69,4	73,2
B3-17	1,55	1,57	1,59	35,9	40,1	44,3
B3-18	-	1,66	-	-	47,63	-
B3-19	1,62	1,64	1,66	41,4	44,7	48,1
B3-20	-	-	-	-	-	-
B3-21	1,66	1,68	1,70	44,6	47,6	50,5
B3-22	1,78	1,80	1,83	53,1	55,4	57,8

Tabela 4.20: Banco de dados hipotético da Camada M2 incluindo dados primários e secundários

Furo	Limite inferior (g/cm ³)	ρ_h (g/cm ³)	Limite superior (g/cm ³)	Limite inferior (%)	Cz_h (%)	Limite superior (%)
B3-01	1,85	1,88	1,91	58,2	60,7	63,3
B3-02	1,84	1,86	1,89	57,1	59,6	62,1
B3-03	-	1,92	-	-	56,98	-
B3-04	1,86	1,89	1,92	58,8	61,4	64
B3-05	1,65	1,67	1,69	43,7	46,7	49,8
B3-06	1,90	1,93	1,96	61,1	64,1	67
B3-08	2,05	2,08	2,12	69,4	74,1	78,7
B3-09	1,47	1,49	1,51	29,6	34,8	39,9
B3-10	1,73	1,75	1,78	49,6	52,1	54,6
B3-11	-	-	-	-	-	-
B3-12	-	1,76	-	-	58,12	-
B3-13	-	1,61	-	-	32,63	-
B3-14	1,51	1,53	1,55	32,8	37,4	42,1
B3-15	1,58	1,60	1,62	38,3	42,1	45,9
B3-16	1,69	1,71	1,73	46,7	49,4	52,2
B3-17	1,74	1,76	1,79	50,3	52,7	55,2
B3-18	-	1,43	-	-	28,08	-
B3-19	1,74	1,76	1,79	50,3	52,7	55,2
B3-20	1,52	1,54	1,56	33,6	38,2	42,7
B3-21	1,50	1,52	1,54	32	36,8	41,5
B3-22	1,49	1,51	1,53	31,2	36,1	41

Tabela 4.21: Banco de dados hipotético da Camada I1 incluindo dados primários e secundários

Furo	Limite inferior (g/cm ³)	ρ_h (g/cm ³)	Limite superior (g/cm ³)	Limite inferior (%)	Cz_h (%)	Limite superior (%)
B3-01	-	-	-	-	-	-
B3-02	1,70	1,72	1,75	47,5	50,1	52,8
B3-03	-	-	-	-	-	-
B3-04	1,92	1,95	1,98	62,3	65,4	68,5
B3-05	-	-	-	-	-	-
B3-06	-	-	-	-	-	-
B3-08	-	-	-	-	-	-
B3-09	-	-	-	-	-	-
B3-10	-	-	-	-	-	-
B3-11	2,01	2,04	2,08	67,5	71,7	75,9
B3-12	-	1,75	-	-	50,95	-
B3-13	-	1,83	-	-	57,09	-
B3-14	1,75	1,77	1,79	51	53,4	55,8
B3-15	1,69	1,71	1,73	46,7	49,4	52,2
B3-16	1,75	1,77	1,79	51	53,4	55,8
B3-17	1,80	1,82	1,85	54,4	56,7	59,1
B3-18	-	1,72	-	-	52,06	-
B3-19	1,69	1,71	1,73	46,7	49,4	52,2
B3-20	1,74	1,76	1,79	50,3	52,7	55,2
B3-21	1,73	1,75	1,78	49,6	52,1	54,6
B3-22	1,71	1,73	1,75	48,1	50,7	53,3

Vale notar que, nas quatro últimas tabelas, ambos atributos dos furos B3-03, B3-12, B3-13 e B3-18 não apresentam o valor dos limites máximo e mínimo, isso porque são dados primários e portanto não apresentam incerteza na estimativa do valor. Outra característica importante é que as colunas de densidade do banco de dados real das tabelas 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10 são iguais aos valores das colunas de densidade do banco de dados hipotético das tabelas 4.18, 4.19, 4.20 e 4.21, isso porque os dados de densidade do banco de dados secundário, devido à falta de informação geofísica, é constituído de limites máximos e mínimos centrados no valor real do atributo obtido em laboratório, pois tais limites foram calculados mediante a aplicação do valor real a uma equação matemática ajustada sobre um gráfico de dispersão constituído dos dados de laboratório e de perfilagem geofísica disponíveis para os mesmos furos.

Enfim, pode-se observar que foram utilizados dois bancos de dados, um real que é composto apenas por informação obtida por análise de testemunhos de sondagem e um banco de dados hipotético formado por dados primários e secundários. Os dados primários são valores de densidade e teor de cinzas obtidas pelas análises dos testemunhos dos furos B3-03, B3-12, B3-13 e B3-18 e, portanto são considerados exatos e não apresentam limites de incerteza. Os dados secundários referente à densidade foram obtidos com a ajuda dos dados reais de densidade, dessa maneira, os limites máximo e mínimo do atributo densidade que compõem os dados secundários está centrado no valor real obtido em laboratório, já os dados de teor de cinzas foram obtidos através da aplicação do valor de densidade dos dados secundários em uma função de ajuste que forneceu os limites máximo e mínimo de incerteza do valor do atributo.

Capítulo 5

Estudo de Caso

Este capítulo trata da aplicação da krigagem dos indicadores para estimativa dos valores dos atributos de interesse mediante a utilização de dados primários e dados secundários com limites de incerteza associado. Inicialmente, será apresentada uma análise estatística dos dados, seguida do estudo da continuidade espacial e das estimativas. Como foi explicado no capítulo anterior, não foi possível obter um banco de dados nos moldes requeridos pelo método, por isso foi criado um banco de dados hipotético baseado nos dados reais para um melhor desenvolvimento e apresentação do método da krigagem dos indicadores.

5.1 Análise Estatística

Devido à escassez de informação do banco de dados primário, 21 pontos amostrais no máximo, foi feito o cálculo dos parâmetros estatísticos e construção de histogramas mediante a união dos bancos de dados primário e secundário.

Para cada uma das quatro camadas, foram analisados três atributos de interesse, densidade, teor de cinzas do banco de dados real e teor de cinzas do banco de dados hipotético. A densidade do banco de dados hipotético não foi analisada, pois apresenta valores iguais ao banco de dados real

5.1.1 Agrupamento e Desagrupamento

Antes da aplicação dos métodos geoestatísticos de estimativa é necessária uma análise estatística dos dados, isto é, a construção de um histograma para análise da distribuição de freqüências e cálculo de estatísticas como média e desvio padrão. Porém, como os dados não se apresentam distribuídos por uma malha regular e possuem áreas preferencialmente amostradas, conforme pode ser visto na Figura 5.1, é aconselhável efetuar o desagrupamento das amostras para calcularem-se estatísticas não tendenciosas.

Existem diversos métodos de desagrupamento amostral sendo o escolhido para ser usado neste estudo de caso o Método dos Polígonos descrito por Isaak & Srivastava (1989). O Método dos Polígonos distribui pesos às amostras de acordo com a área de influência de cada amostra e que varia de acordo com a sua localização. No Método dos Polígonos, a média desagrupada é calculada de acordo com a seguinte equação:

$$m = \frac{1}{A} \cdot \sum_{\alpha=1}^N \omega_{\alpha} \cdot z(\mathbf{u}_{\alpha}), \quad \text{Equação 5.1}$$

onde m é a média desagrupada das amostras, ω_{α} é o peso atribuído a amostra z que se localiza em \mathbf{u}_{α} .

Como nem todas as camadas estão presentes em todos os pontos amostrais foi necessário efetuar o Método dos Polígonos para cada camada, pois diferentes configurações de polígonos implicam diferentes pesos atribuídos a cada amostra e conseqüentemente alterações nos valores das estatísticas não tendenciosas. Outro fator importante é a definição da área de influência de cada ponto amostral, neste estudo de caso, a definição da área de influência foi feita baseada na recomendação do *United States Geological Survey – Bureau of Mines* que sugere definir uma área de influência para cada ponto amostral baseado no seu espaçamento e nos conhecimentos referentes à continuidade geológica do depósito. Como os furos de sondagem estão distanciados de aproximadamente 300 m entre si e camadas de carvão costumam apresentar uma extensa continuidade geológica, foi definido um raio de influência de 500 m em torno de cada ponto de amostragem.

Na Figura 5.1, apresenta-se as quatro diferentes configurações de polígonos obtidas com a aplicação do programa 3DField 2.7.0.0®.

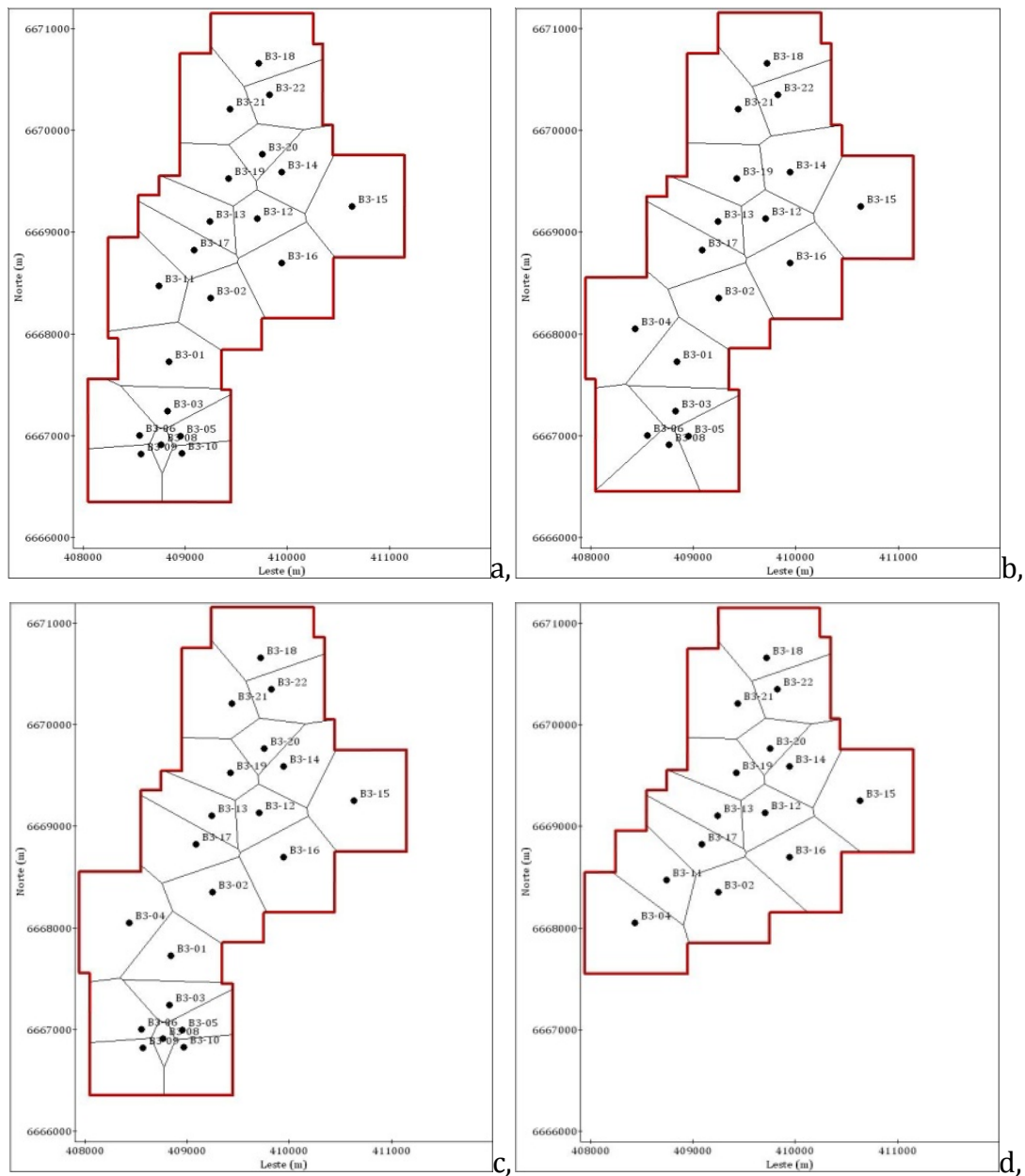


Figura 5.1: Polígonos de influência de cada ponto amostral dependendo da camada em análise: a, Camada S, b, Camada M1, c, Camada M2 e d, Camada I1.

A comparação das médias calculadas para amostras agrupadas e desagrupadas pode ser vista nas Tabelas 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4.

Tabela 5.1: Médias agrupadas e desagrupadas para os atributos da Camada S

Atributo	Média agrupada	Média desagrupada
$\rho_r = \rho_h$ (g/cm ³)	1,72	1,70
CZ_r (%)	45,84	45,43
CZ_h (%)	49,36	48,56

Tabela 5.2: Médias agrupadas e desagrupadas para os atributos da Camada M1

Atributo	Média agrupada	Média desagrupada
$\rho_r = \rho_h$ (g/cm ³)	1,74	1,73
CZ_r (%)	50,66	50,84
CZ_h (%)	50,71	50,78

Tabela 5.3: Médias agrupadas e desagrupadas para os atributos da Camada M2

Atributo	Média agrupada	Média desagrupada
$\rho_r = \rho_h$ (g/cm ³)	1,71	1,65
CZ_r (%)	47,55	48,37
CZ_h (%)	48,74	45,73

Tabela 5.4: Médias agrupadas e desagrupadas para os atributos da Camada I1

Atributo	Média agrupada	Média desagrupada
$\rho_r = \rho_h$ (g/cm ³)	1,79	1,77
CZ_r (%)	55,77	55,56
CZ_h (%)	54,65	53,46

Apesar das irregularidades da malha amostral, o efeito do agrupamento das amostras não afetou significativamente o cálculo dos parâmetros estatísticos e, portanto os efeitos de agrupamento foram desconsiderados nos estudos estatísticos e geoestatísticos a seguir.

5.1.2 Camada S

Na Figura 5.2, é possível observar os histogramas dos atributos ρ_r (à esquerda), Cz_r (histograma central) e Cz_h (à direita) juntamente com os resultados da estatística básica.

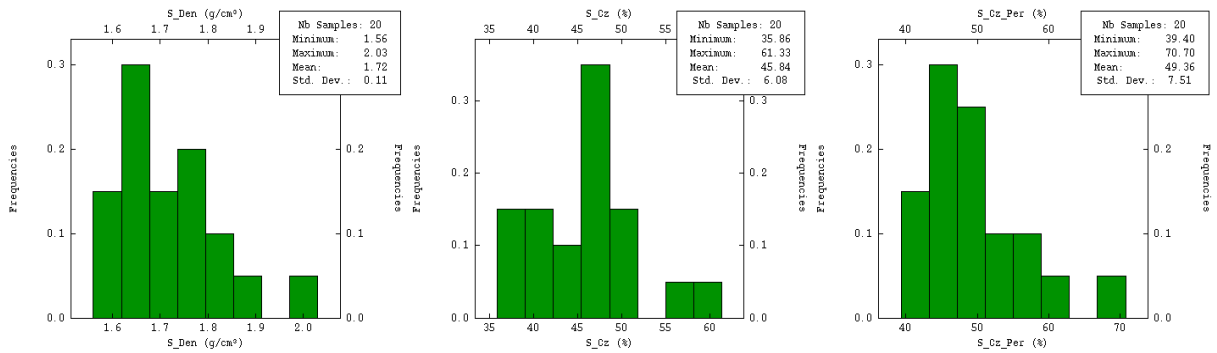


Figura 5.2: Histogramas e estatística básica dos atributos ρ_r , Cz_r e Cz_h da Camada S.

A Figura 5.2 mostra que, apesar do reduzido número de amostras, os histogramas dos atributos ρ_r e Cz_h tenderam a apresentar uma assimetria positiva enquanto os dados de Cz_r apresentaram um comportamento levemente simétrico. Como os dados de Cz_h foram obtidos a partir da ρ_r (usando a Equação 4.9) é de se esperar que os respectivos histogramas sejam semelhantes.

5.1.3 Camada M1

Na Figura 5.3, é possível observar os histogramas dos atributos ρ_r (à esquerda), Cz_r (histograma central) e Cz_h (à direita) juntamente com os resultados da estatística básica.

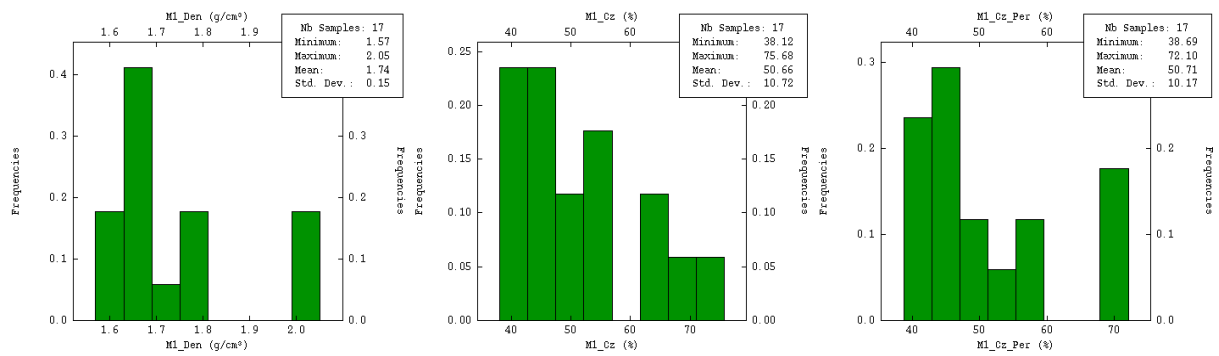


Figura 5.3: Histogramas e estatística básica dos atributos ρ_r , Cz_r e Cz_h da Camada M1.

No caso dos histogramas dos atributos da Camada M1, o comportamento geral foi de uma assimetria positiva mais acentuada nos atributos ρ_r , e Cz_r e mais branda no Cz_h .

5.1.4 Camada M2

Na Figura 5.4, é possível observar os histogramas dos atributos ρ_r (à esquerda), Cz_r (histograma central) e Cz_h (à direita) juntamente com os resultados da estatística básica.

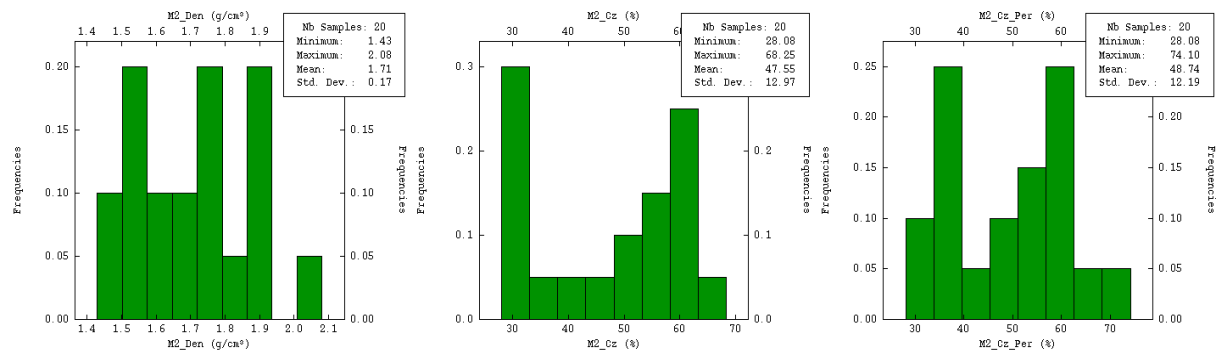


Figura 5.4: Histogramas e estatística básica dos atributos ρ_r , Cz_r e Cz_h da Camada M2.

Quanto a Camada M2, os histogramas se apresentaram bastante irregulares, em comparação com os histogramas das outras camadas, sem a definição de nenhum comportamento normal ou assimétrico. Neste caso, houve uma maior

semelhança entre os histogramas de teor de cinzas, pois os valores de cinza estimados pela Equação 4.9 resultaram em valores muito semelhantes aos verdadeiros.

5.1.5 Camada I1

Na Figura 5.5, é possível observar os histogramas dos atributos ρ_r (à esquerda), Cz_r (histograma central) e Cz_h (à direita) juntamente com os resultados da estatística básica.

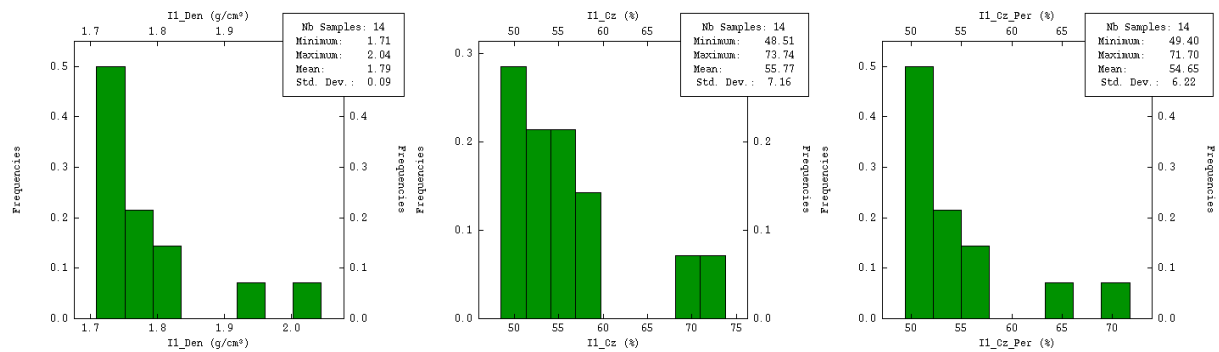


Figura 5.5: Histogramas e estatística básica dos atributos ρ_r , Cz_r e Cz_h da Camada I1.

Finalizando a apresentação dos histogramas, os dados dos três atributos para a Camada I1 mostraram um forte comportamento assimétrico positivo.

5.2 Modelagem Geoestatística

Esta é uma etapa de extrema importância na avaliação de depósitos, pois é por meio dela que serão definidos os parâmetros que serão usados nas estimativas por krigagem.

A modelagem geoestatística de um banco de dados inicia com a medida da continuidade ou variabilidade espacial das amostras. Diversas ferramentas matemáticas foram desenvolvidas para facilitar o cálculo desses parâmetros

conforme mostrado por Goovaerts (1997). Dentre todas elas, a mais usada é a função semivariograma definida por:

$$\gamma(\mathbf{h}) = \frac{1}{2 \cdot N(\mathbf{h})} \cdot \sum_{\alpha=1}^{N(\mathbf{h})} [z(\mathbf{u}_{\alpha}) - z(\mathbf{u}_{\alpha} + \mathbf{h})]^2, \quad \text{Equação 5.2}$$

onde $\gamma(\mathbf{h})$ é o valor da variância devido a um par ou grupo de pares de um atributo z qualquer, $N(\mathbf{h})$ é o número de pares separados por uma distância \mathbf{h} , $z(\mathbf{u}_{\alpha})$ é o valor da amostra do atributo no local \mathbf{u}_{α} e $z(\mathbf{u}_{\alpha} + \mathbf{h})$ é o valor da amostra no local $\mathbf{u}_{\alpha} + \mathbf{h}$.

A função semivariograma mede a dissimilaridade entre amostras separadas por uma distância \mathbf{h} . Na Figura 5.6, temos o exemplo de um semivariograma.

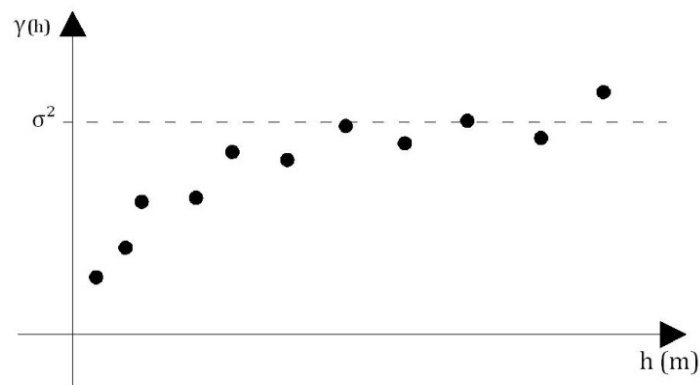


Figura 5.6: Exemplo gráfico de um semivariograma.

No semivariograma representado na Figura 5.6, cada ponto representa um par de dados ou a média de um grupo de pares de dados espaçados por uma distancia \mathbf{h} que é apresentada no eixo x, no eixo y temos o valor da variância de cada par ou grupo de pares. No exemplo, a variância entre os dados que formam os pares tende a se elevar conforme a distância entre eles aumenta, até atingir σ^2 que é a variância *a priori* dos dados amostrais.

Após definida a continuidade ou variabilidade espacial por meio de gráficos como mostrado na Figura 5.6, procede-se ao ajuste de um modelo usando uma das diversas equações desenvolvidas para representar continuamente a variabilidade ou correlação que existe entre os dados. Dentre os diversos modelos, os mais

comuns são: linear, gaussiano, exponencial e esférico (Isaaks & Srivastava, 1989). Na Figura 5.7, temos o semivariograma da Figura 5.6 modelado por uma função esférica.

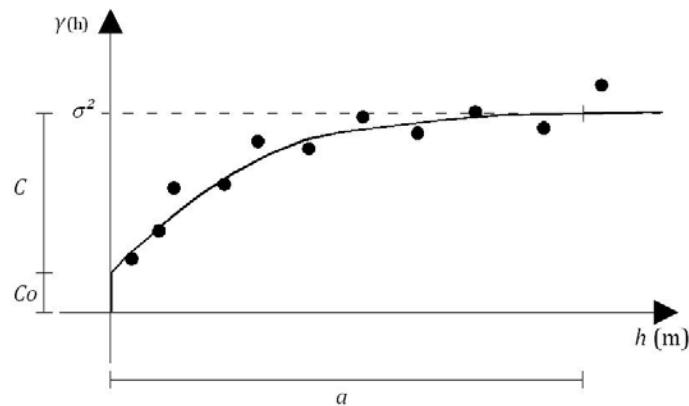


Figura 5.7: Semivariograma modelado por uma função esférica.

A função esférica é dada por:

$$\begin{cases} \gamma(\mathbf{h}) = C_0 + C \cdot \left[\frac{3}{2} \cdot \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & \text{para } h < a, \\ \gamma(\mathbf{h}) = C_0 + C & \text{para } h \geq a \end{cases} \quad \text{Equação 5.3}$$

onde C_0 é a variabilidade natural do depósito (efeito pepita) quando o espaçamento \mathbf{h} é igual a zero, C é o valor de variância associado a estrutura esférica e a é a distancia máxima na qual as amostras ainda mostram alguma dependência entre si, isto é, para distância de \mathbf{h} superiores a a as amostras são completamente independentes entre si. A definição dos valores dos parâmetros C_0 , C e a são essenciais para ajuste da função de continuidade espacial e posterior execução da estimativa por krigagem.

Os semivariogramas podem ser divididos em dois grupos, onidirecionais e direcionais. Os semivariogramas onidirecionais não fazem discriminação de orientação de pares, isto é, todo e qualquer par separado pela distância \mathbf{h} será considerado no cálculo independentemente da direção e sentido do vetor \mathbf{h} que separa as amostras que formam o par. Na Figura 5.8, temos um exemplo de pares

selecionados para o cálculo do semivariograma onidirecional para um espaçamento h igual a 60 m.

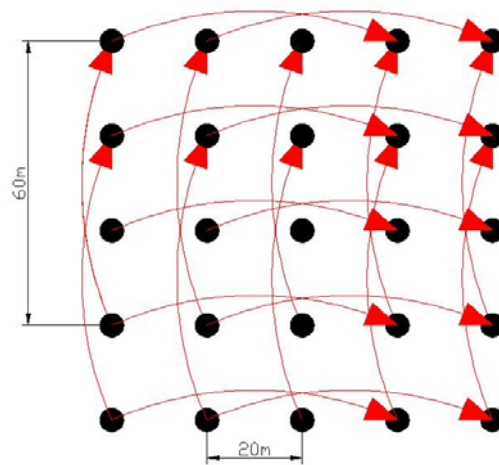


Figura 5.8: Pares selecionados para o cálculo de um semivariograma onidirecional hipotético.

Na Figura 5.8, temos 25 pontos amostrais distribuídos em uma malha regular de espaçamento 20 m e as setas vermelhas unem os pontos amostrais que formam pares separados por 60 m, portanto para um h igual a 60 m o valor do semivariograma será a metade da média das variâncias dos valores dos 20 pares disponíveis.

Os semivariogramas direcionais servem para identificar distribuições anisotrópicas dos valores dos atributos, isto é, encontrar as direções nas quais a distribuição dos teores tende a ser mais contínua ou errática. Para a construção dos semivariogramas direcionais, são feitas algumas restrições quanto à seleção dos pares, tais como, direção do vetor h e tolerância perpendicular ao vetor h . Na Figura 5.9, temos um exemplo de pares selecionados para a construção de um semivariograma direcional.

Na Figura 5.9, tem-se o mesmo grupo de dados apresentados na Figura 5.8, porém a seleção de pares sofre restrições, selecionando apenas os pares cujo vetor h tenha a direção 45° NE. Dessa maneira, o semivariograma calculado fornecerá o comportamento da distribuição espacial dos valores do atributo ao longo desta direção (45° NE).

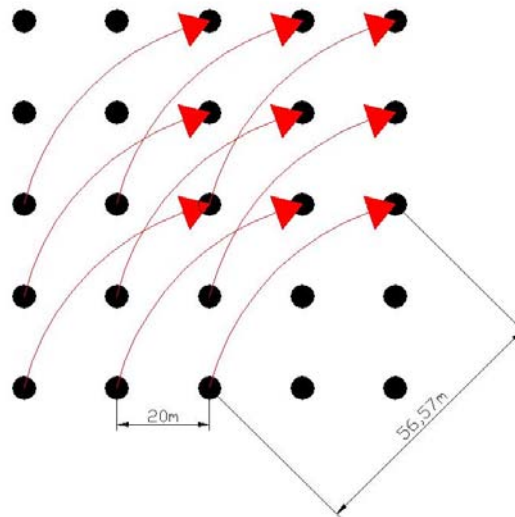


Figura 5.9: Pares selecionados para a construção de um semivariograma direcional.

Ao observar as Figuras 5.9 e 5.8, é possível concluir que as restrições necessárias para calcular um semivariograma direcional acarretam uma significativa redução no número de pares disponíveis em comparação com o onidirecional. Isto pode resultar em semivariogramas irregulares e conseqüentemente dificultando a modelagem do mesmo por uma função para representação da continuidade espacial.

Os dois exemplos mostrados anteriormente utilizaram dados amostrais distribuídos regularmente, entretanto, em malhas amostrais irregulares é muito difícil encontrar um par de dados a uma distância exata e fixa de h . Portanto, é necessário se trabalhar com tolerâncias espaciais para a seleção de pares. Ao contrário de buscar apenas pares separados por um valor h , as tolerâncias definem áreas (em análise de banco de dados 2D) ou volumes (em análise de banco de dados 3D) de busca situadas dentro de uma distância h , portanto não são apenas consideradas as duas amostras que se encontram nas extremidades de h e sim todas as amostras dentro da área de influencia de h definida pelas tolerâncias previamente estabelecidas.

O cálculo de semivariogramas direcionais é aconselhado e possível quando a distribuição dos dados é relativamente densa. Journel & Huijbregts (1978) aconselham o uso de no mínimo 30 a 50 pares de amostras para o cálculo da variância de cada vetor h , enquanto que Wellmer (1998) afirma que para bancos

de dados com menos de 30 amostras é aconselhável executar apenas o semivariograma onidirecional. Por esse motivo, no estudo de caso apresentado nessa dissertação serão apenas calculados e modelados os semivariogramas onidirecionais dos três atributos presentes em cada uma das quatro camadas de interesse.

Como este trabalho se trata da aplicação de indicadores, o cálculo dos semivariogramas deve ser feito para os dados com os valores originais dos atributos e após a codificação por indicadores.

5.2.1 Continuidade Espacial dos Valores Originais dos Atributos

Vale ressaltar, que o reduzido número de amostras que compõem o banco de dados, além de afetar a análise dos histogramas das amostras, afetou a construção dos semivariogramas experimentais. Como foram calculados apenas os semivariogramas onidirecionais, a única variável que pode sofrer alteração para a construção dos mesmos foi o tamanho da janela de busca (*lag*) que chegou a variar de 300 m a 1500 metros.

5.2.1.1 Camada S

Nas Figuras 5.10, 5.11 e 5.12, estão representados, respectivamente, os semivariogramas onidirecionais para os atributos ρ_r , Cz_r e Cz_h .

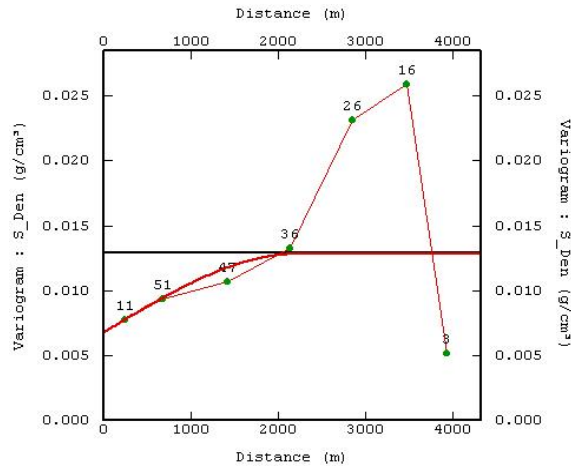


Figura 5.10: Semivariograma onidirecional do atributo ρ_r da Camada S com modelo ajustado.

O modelo ajustado foi do tipo esférico e a sua equação já com os parâmetros ajustados é:

$$\begin{cases} \gamma(\mathbf{h}) = 0,0067 + 0,0060 \cdot \left[\frac{3}{2} \cdot \left(\frac{h}{2230} \right) - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h}{2230} \right)^3 \right] & \text{para } h < 2230 \cdot \\ \gamma(\mathbf{h}) = 0,0127 & \text{para } h \geq 2230 \end{cases} \quad \text{Equação 5.4}$$

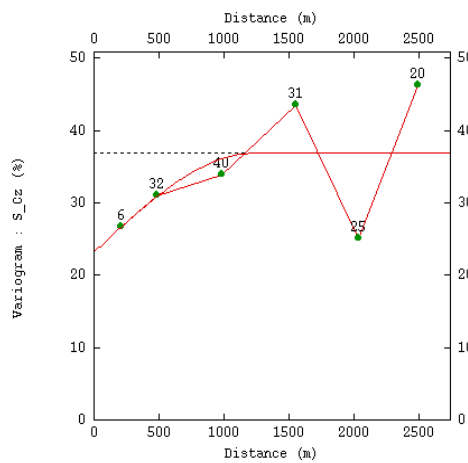


Figura 5.11: Semivariograma onidirecional do atributo Cz_r da Camada S com modelo ajustado.

O modelo ajustado foi do tipo esférico e a sua equação já com os parâmetros ajustados é:

$$\begin{cases} \gamma(\mathbf{h}) = 23,22 + 13,61 \cdot \left[\frac{3}{2} \cdot \left(\frac{h}{1221} \right) - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h}{1221} \right)^3 \right] & \text{para } h < 1221 \cdot \\ \gamma(\mathbf{h}) = 36,83 & \text{para } h \geq 1221 \end{cases} \quad \text{Equação 5.5}$$

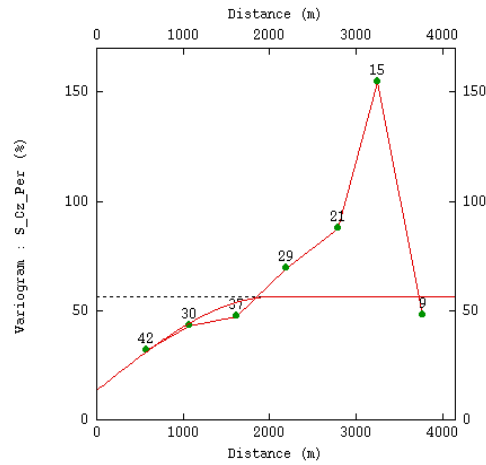


Figura 5.12: Semivariograma onidirecional do atributo Cz_h da Camada S com modelo ajustado.

O modelo ajustado foi do tipo esférico e a sua equação já com os parâmetros ajustados é:

$$\begin{cases} \gamma(\mathbf{h}) = 13,63 + 42,74 \cdot \left[\frac{3}{2} \cdot \left(\frac{h}{2033} \right) - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h}{2033} \right)^3 \right] & \text{para } h < 2033 \cdot \\ \gamma(\mathbf{h}) = 56,37 & \text{para } h \geq 2033 \end{cases} \quad \text{Equação 5.6}$$

5.3.1.2 Camada M1

Na Figuras 5.13, 5.14 e 5.15, estão representados, respectivamente, os semivariogramas onidirecionais para os atributos ρ_r , Cz_r e Cz_h .

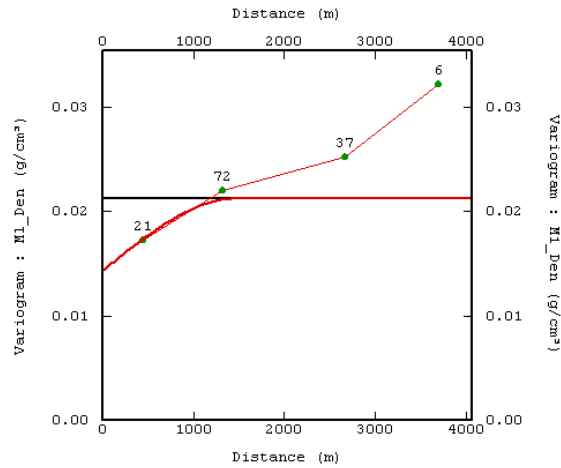


Figura 5.13: Semivariograma onidirecional do atributo ρ_r da Camada M1 com modelo ajustado.

O modelo ajustado foi do tipo esférico e a sua equação já com os parâmetros ajustados é:

$$\begin{cases} \gamma(\mathbf{h}) = 0,014 + 0,0068 \cdot \left[\frac{3}{2} \cdot \left(\frac{h}{1465} \right) - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h}{1465} \right)^3 \right] & \text{para } h < 1465 \cdot \\ \gamma(\mathbf{h}) = 0,0208 & \text{para } h \geq 1465 \end{cases} \quad \text{Equação 5.7}$$

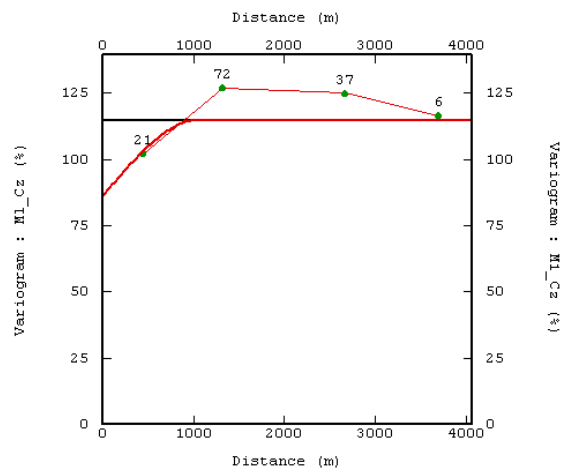


Figura 5.14: Semivariograma onidirecional do atributo Cz_r da Camada M1 com modelo ajustado.

O modelo ajustado foi do tipo esférico e a sua equação já com os parâmetros ajustados é:

$$\begin{cases} \gamma(\mathbf{h}) = 86,12 + 28,73 \cdot \left[\frac{3}{2} \cdot \left(\frac{h}{1054} \right) - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h}{1054} \right)^3 \right] & \text{para } h < 1054 \\ \gamma(\mathbf{h}) = 114,85 & \text{para } h \geq 1054 \end{cases} \quad \text{Equação 5.8}$$

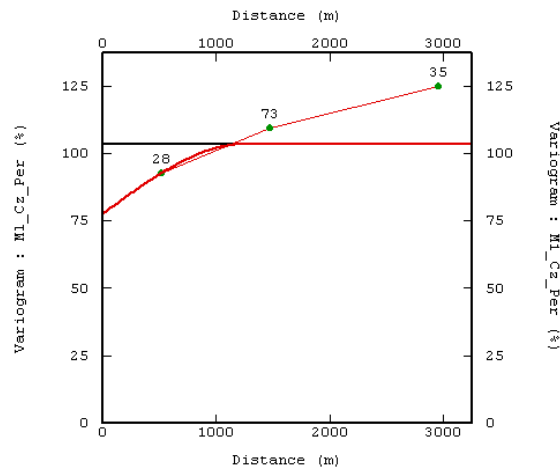


Figura 5.15: Semivariograma onidirecional do atributo Cz_h da Camada M1 com modelo ajustado.

O modelo ajustado foi do tipo esférico e a sua equação já com os parâmetros ajustados é:

$$\begin{cases} \gamma(\mathbf{h}) = 77,58 + 25,82 \cdot \left[\frac{3}{2} \cdot \left(\frac{h}{1247} \right) - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h}{1247} \right)^3 \right] & \text{para } h < 1247 \\ \gamma(\mathbf{h}) = 103,4 & \text{para } h \geq 1247 \end{cases} \quad \text{Equação 5.9}$$

5.2.1.3 Camada M2

Na Figuras 5.16, 5.17 e 5.18, estão representados, respectivamente, os semivariogramas onidirecionais para os atributos ρ_r , Cz_r e Cz_h .

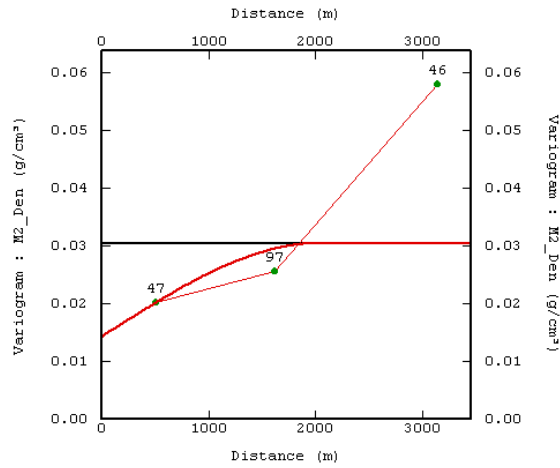


Figura 5.16: Semivariograma onidirecional do atributo ρ_r da Camada M2 com modelo ajustado.

O modelo ajustado foi do tipo esférico e a sua equação já com os parâmetros ajustados é:

$$\begin{cases} \gamma(\mathbf{h}) = 0,014 + 0,016 \cdot \left[\frac{3}{2} \cdot \left(\frac{h}{2044} \right) - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h}{2044} \right)^3 \right] & \text{para } h < 2044 \\ \gamma(\mathbf{h}) = 0,03 & \text{para } h \geq 2044 \end{cases} \quad \text{Equação 5.10}$$

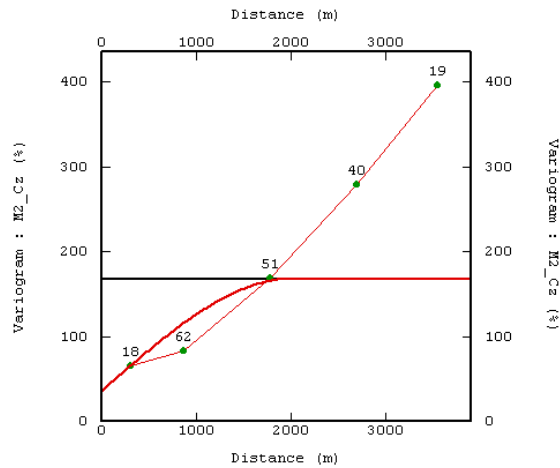


Figura 5.17: Semivariograma onidirecional do atributo Cz_r da Camada M2 com modelo ajustado.

O modelo ajustado foi do tipo esférico e a sua equação já com os parâmetros ajustados é:

$$\begin{cases} \gamma(\mathbf{h}) = 36,13 + 132,07 \cdot \left[\frac{3}{2} \cdot \left(\frac{h}{2020} \right) - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h}{2020} \right)^3 \right] & \text{para } h < 2020 \cdot \\ \gamma(\mathbf{h}) = 168,2 & \text{para } h \geq 2020 \end{cases} \quad \text{Equação 5.11}$$

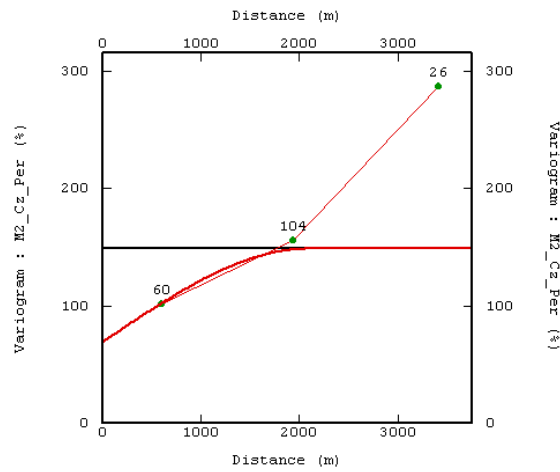


Figura 5.18: Semivariograma onidirecional do atributo Cz_h da Camada M2 com modelo ajustado.

O modelo ajustado foi do tipo esférico e a sua equação já com os parâmetros ajustados é:

$$\begin{cases} \gamma(\mathbf{h}) = 69,18 + 79,32 \cdot \left[\frac{3}{2} \cdot \left(\frac{h}{2094} \right) - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h}{2094} \right)^3 \right] & \text{para } h < 2094 \cdot \\ \gamma(\mathbf{h}) = 148,5 & \text{para } h \geq 2094 \end{cases} \quad \text{Equação 5.12}$$

5.2.1.4 Camada I1

Na Figuras 5.19, 5.20 e 5.21, estão representados, respectivamente, os semivariogramas onidirecionais para os atributos ρ_r , Cz_r e Cz_h .

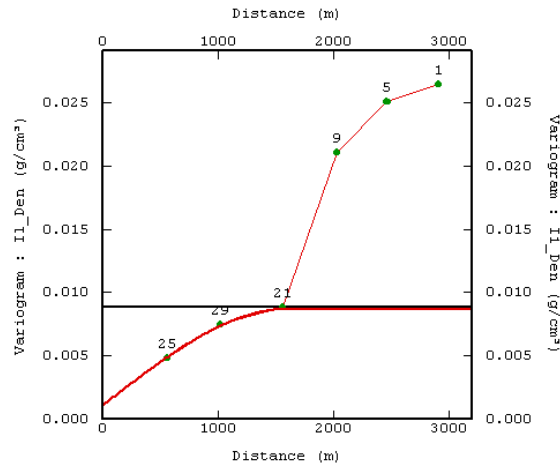


Figura 5.19: Semivariograma onidirecional do atributo ρ_r da Camada I1 com modelo ajustado.

O modelo ajustado foi do tipo esférico e a sua equação já com os parâmetros ajustados é:

$$\begin{cases} \gamma(\mathbf{h}) = 0,0011 + 0,0076 \cdot \left[\frac{3}{2} \cdot \left(\frac{h}{1605} \right) - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h}{1605} \right)^3 \right] & \text{para } h < 1605 \cdot \\ \gamma(\mathbf{h}) = 0,0087 & \text{para } h \geq 1605 \end{cases} \quad \text{Equação 5.13}$$

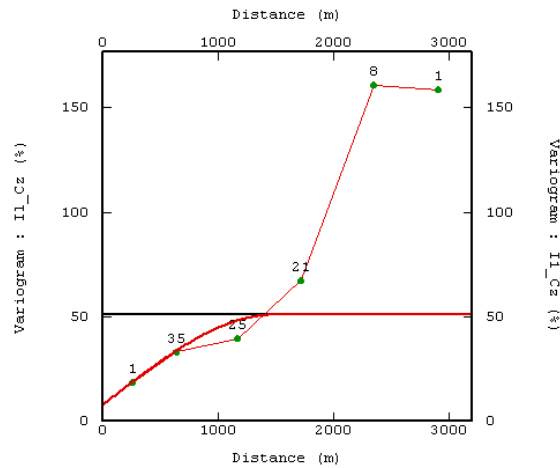


Figura 5.20: Semivariograma onidirecional do atributo Cz_r da Camada I1 com modelo ajustado.

O modelo ajustado foi do tipo esférico e a sua equação já com os parâmetros ajustados é:

$$\begin{cases} \gamma(\mathbf{h}) = 7,7 + 43,1 \cdot \left[\frac{3}{2} \cdot \left(\frac{h}{1489} \right) - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h}{1489} \right)^3 \right] & \text{para } h < 1489 \cdot \\ \gamma(\mathbf{h}) = 50,8 & \text{para } h \geq 1489 \end{cases} \quad \text{Equação 5.14}$$

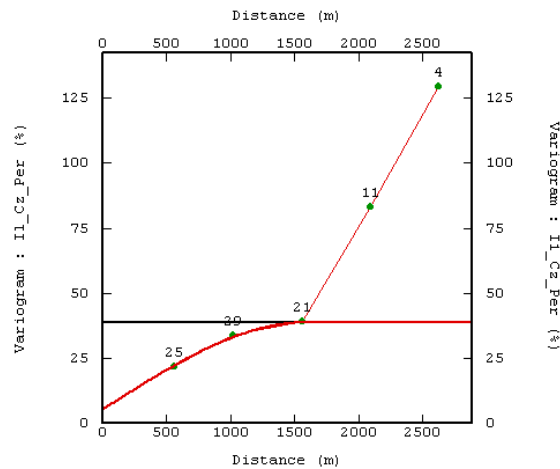


Figura 5.21: Semivariograma onidirecional do atributo Cz_h da Camada I1 com modelo ajustado.

O modelo ajustado foi do tipo esférico e a sua equação já com os parâmetros ajustados é:

$$\begin{cases} \gamma(\mathbf{h}) = 5,29 + 33,4 \cdot \left[\frac{3}{2} \cdot \left(\frac{h}{1589} \right) - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h}{1589} \right)^3 \right] & \text{para } h < 1589 \cdot \\ \gamma(\mathbf{h}) = 38,69 & \text{para } h \geq 1589 \end{cases} \quad \text{Equação 5.15}$$

5.2.2 Continuidade Espacial dos Atributos Codificados por Indicadores

A medida da continuidade espacial dos atributos codificados por indicadores, assim como, a medida da continuidade dos valores atributos originais, foi feita usando a função semivariograma. Porém, como os dados estão codificados, a função utilizada não foi aquela apresentada na Equação 5.2, e sim a função semivariograma apresentada na Equação 3.8, que foi preparada para a medida da variabilidade espacial de indicadores. Antes da medida da continuidade espacial propriamente dita, foram definidos os valores limites z_k e feita a distribuição dos indicadores.

5.2.2.1 Definição dos Limites z_k e Distribuição dos Indicadores

Como citado anteriormente, Goovaerts (1997) aconselha o uso de cinco a quinze limites z_k . Como não foi definido nenhum teor de corte ou limite máximo para os valores dos atributos na alimentação da planta de beneficiamento ou usina, foi decidido o uso dos nove quantis que se obtém na análise do histograma acumulado desagrupado dos valores dos atributos. Dessa maneira, será usado um número de quantis dentro do aconselhável e ainda os valores dos limites possuem importância estatística e não são, simplesmente, valores escolhidos aleatoriamente. Nas próximas quatro tabelas, serão apresentados os valores dos quantis obtidos para os três atributos em cada uma das quatro camadas.

Tabela 5.5: Valores dos quantis usados como limites z_k para a Camada S

Atributo	Quantil 1 (z_1)	Quantil 2 (z_2)	Quantil 3 (z_3)	Quantil 4 (z_4)	Quantil 5 (z_5)	Quantil 6 (z_6)	Quantil 7 (z_7)	Quantil 8 (z_8)	Quantil 9 (z_9)
$\rho_r = \rho_h$									
(g/cm ³)	1,58	1,63	1,64	1,65	1,69	1,74	1,77	1,79	1,86
Cz_r (%)	37,67	40,46	41,8	45,45	46,39	46,93	48	49,45	53,67
Cz_h (%)	40,75	43,85	45,05	46,27	47,4	49,14	51,65	54,4	60,02

Tabela 5.6: Valores dos quantis usados como limites z_k para a Camada M1

Atributo	Quantil 1 (z_1)	Quantil 2 (z_2)	Quantil 3 (z_3)	Quantil 4 (z_4)	Quantil 5 (z_5)	Quantil 6 (z_6)	Quantil 7 (z_7)	Quantil 8 (z_8)	Quantil 9 (z_9)
$\rho_r = \rho_h$									
(g/cm ³)	1,61	1,64	1,66	1,66	1,66	1,73	1,79	1,8	2,01
Cz_r (%)	38,37	41,42	43,91	44,86	47,63	53,54	53,92	63	66,88
Cz_h (%)	40,1	42,7	44,86	45,4	46,1	47,63	53,92	55,4	69,4

Tabela 5.7: Valores dos quantis usados como limites z_k para a Camada M2

Atributo	Quantil 1 (z_1)	Quantil 2 (z_2)	Quantil 3 (z_3)	Quantil 4 (z_4)	Quantil 5 (z_5)	Quantil 6 (z_6)	Quantil 7 (z_7)	Quantil 8 (z_8)	Quantil 9 (z_9)
$\rho_r = \rho_h$									
(g/cm ³)	1,5	1,52	1,57	1,64	1,73	1,76	1,81	1,89	1,92
Cz_r (%)	31,08	32,47	33,76	43,06	50,53	55,78	58,19	60,26	62,21
Cz_h (%)	33,72	36,45	37,8	44,4	50,75	52,7	57,55	60,15	62,75

Tabela 5.8: Valores dos quantis usados como limites z_k para a Camada I1

Atributo	Quantil 1 (z_1)	Quantil 2 (z_2)	Quantil 3 (z_3)	Quantil 4 (z_4)	Quantil 5 (z_5)	Quantil 6 (z_6)	Quantil 7 (z_7)	Quantil 8 (z_8)	Quantil 9 (z_9)
$\rho_r = \rho_h$									
(g/cm ³)	1,71	1,72	1,73	1,75	1,75	1,77	1,77	1,83	1,95
Cz_r (%)	48,87	50,24	51,77	52,06	54,23	54,96	56,57	57,74	69,85
Cz_h (%)	49,4	50,1	50,95	52,06	52,4	53,4	53,4	57,09	65,4

Como será considerada a incerteza do valor do atributo estimado por funções ajustadas sobre os gráficos de dispersão, a distribuição dos indicadores seguirá a regra apresentada na Equação 3.4.

Abaixo, são mostrados três exemplos de distribuição de indicadores considerando incertezas de valores, um caso com indicador 1, outro com indicador indefinido (não amostrado ou -999) e indicador 0.

- O valor do atributo teor de cinzas de perfilagem geofísica da Camada S para o furo B3-20 foi estimado pela função de ajuste da Figura 4.38 e apresentou um valor igual a 39,4 % e seus limites de flutuação foram de 35,1 % como limite inferior e 43,7 % como limite superior. O limite usado será o z_5 igual a 47,4 %. A regra de distribuição dos indicadores, para esse caso, será:

$$i(\mathbf{u}_a; z_5) = \begin{cases} 1 & \text{se } 43,7 \leq z_5 \\ -999 & \text{se } z_5 \in (35,1; 43,7] \\ 0 & \text{se } 35,1 > z_5 \end{cases} \quad \text{Equação 5.16}$$

De acordo com a Equação 5.16, o indicador dado para a amostra será 1.

- O valor do atributo teor de cinzas de perfilagem geofísica da Camada S para o furo B3-16 foi estimado pela função de ajuste da Figura 4.38 e apresentou um valor igual a 44,7 % e seus limites de flutuação foram de 41,4 % como limite inferior e 48,1 % como limite superior. O limite usado será o z_5 igual a 47,4 %. A regra de distribuição dos indicadores, para esse caso, será:

$$i(\mathbf{u}_\alpha; z_5) = \begin{cases} 1 & \text{se } 48,1 \leq z_5 \\ -999 & \text{se } z_5 \in (41,4; 48,1] \\ 0 & \text{se } 41,4 > z_5 \end{cases} \quad \text{Equação 5.17}$$

De acordo com a Equação 5.17, o indicador dado para a amostra será -999 e, portanto essa amostra ficará fora dos dados que serão utilizados nos cálculos da medida de variabilidade espacial desse atributo para o limite z_5 .

- O valor do atributo teor de cinzas de perfilagem geofísica da Camada S para o furo B3-12 foi estimado pela função de ajuste da Figura 4.38 e apresentou um valor igual a 54,1 % e seus limites de flutuação foram de 51,7 % como limite inferior e 56,5 % como limite superior. O limite usado será o z_5 igual a 47,4 %. A regra de distribuição dos indicadores, para esse caso, será:

$$i(\mathbf{u}_\alpha; z_5) = \begin{cases} 1 & \text{se } 56,5 \leq z_5 \\ -999 & \text{se } z_5 \in (51,7; 56,5] \\ 0 & \text{se } 51,7 > z_5 \end{cases} \quad \text{Equação 5.18}$$

De acordo com a Equação 5.18 o indicador dado para a amostra será 0.

Devido ao reduzido número de amostras disponíveis para a formação de pares, e ainda levando em conta que algumas amostras serão desconsideradas devido a codificação pelo indicador -999 será usada a krigagem de indicadores com mediana (descrita no item 3.6.3). Esta apenas exige a modelagem do semivariograma dos dados codificados de acordo com o valor do limite na mediana, isto é, para este estudo de caso, o limite z_5 . O valor de a obtido pelo ajuste do semivariograma do limite z_5 será aplicado aos semivariogramas dos outros oito limites z_k , enquanto que os valores de C_0 e C irão variar na mesma proporção que ocorreram no modelo do semivariograma do limite z_5 tendo como base o valor da variância *a priori* dos dados dada pela equação:

$$C + C_0 = k.(1 - k),$$

Equação 5.19

onde C é a variância da estrutura esférica ajustada, C_0 é a variabilidade natural do depósito e k é o índice do limite usado.

5.2.2.2 Camada S

A medida da variabilidade espacial dos atributos codificados por indicadores foi feita usando a função apresentada na Equação 3.8 que é a função semivariograma ajustada para indicadores. Como será utilizada a KIm, é apenas necessária a construção do semivariograma dos dados codificados de acordo com o limite z_5 e o modelo ajustado representará o semivariograma de todos os outros oito limites com devidas alterações nos parâmetros C_0 e C de acordo com suas proporções em relação a variância *a priori* calculada pela Equação 5.19 de acordo com os limites z_k . Na Figura 5.22, temos o semivariograma do atributo ρ_h codificado por indicadores de acordo com o limite z_5 , junto com o modelo ajustado.

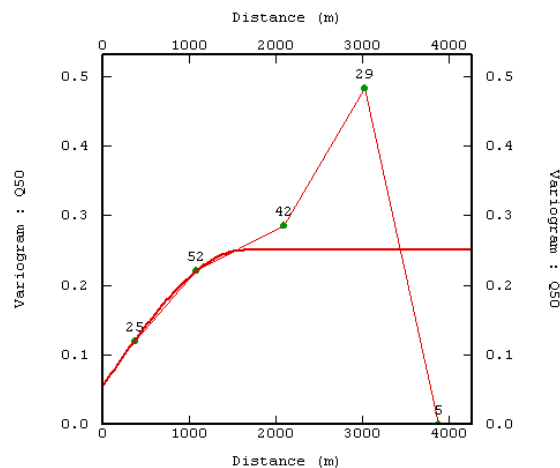


Figura 5.22: Semivariograma onidirecional (limite z_5) dos indicadores do atributo ρ_h da Camada S.

O modelo ajustado foi do tipo esférico e a sua equação já com os parâmetros ajustados é:

$$\begin{cases} \gamma(\mathbf{h}) = 0,055 + 0,195 \left[\frac{3}{2} \cdot \left(\frac{h}{1627} \right) - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h}{1627} \right)^3 \right] & \text{para } h < 1627 \\ \gamma(\mathbf{h}) = 0,25 & \text{para } h \geq 1627 \end{cases} \quad \text{Equação 5.20}$$

De acordo com os parâmetros mostrados na Equação 5.20, verifica-se que o parâmetro C_0 equivale a 22 % do total da variância de 0,25 e o parâmetro C representa 78 %. Portanto, para todos os outros modelos, os valores de C_0 e C irão obedecer a essa proporção em relação à variância *a priori* calculada pela Equação 5.19. Por exemplo, para o modelo do semivariograma que representara a distribuição espacial dos dados codificados pelo limite z_7 , primeiramente, temos que calcular qual a variância *a priori* com a Equação 5.19 colocando o valor 0,7 no lugar da variável k . O resultado obtido mostra que a soma dos parâmetros C_0 e C deverão ser igual a 0,21. Logo, para o modelo semivariográfico do limite z_7 , o valor de C_0 será igual a 22 % do valor da variância de 0,21, que é igual a 0,462 e o valor de C equivalerá a 78 % 0,21, ou 0,1638. O único atributo que permanece constante para todos os modelos é a distância a

Os parâmetros calculados para o atributo ρ_h da Camada S, de acordo com as proporções de 22 % para C_0 e 78 % para C , com base na variância *a priori* calculada pela Equação 5.19 são apresentados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9: Variância *a priori*, variabilidade natural do depósito e variância da estrutura esférica dos modelos dos semivariograma dos dados codificados (indicadores) de ρ_h da camada S respeitando as proporções calculadas pelo modelo que representa o semivariograma dos dados codificados pelo limite z_5

z_k - Limite distribuidor de indicadores	σ^2 - Variância <i>a priori</i> dos dados codificados ((g/cm ³) ²)	C_0 - Variabilidade natural dos dados codificados ((g/cm ³) ²)	C - Variância da estrutura esférica dos dados codificados ((g/cm ³) ²)
z_1	0,09	0,0198	0,0702
z_2	0,16	0,0353	0,1247
z_3	0,21	0,0463	0,1637
z_4	0,24	0,0529	0,1891
z_5	0,25	0,055	0,195
z_6	0,24	0,0529	0,1891
z_7	0,21	0,0463	0,1637

Tabela 5.9: Variância *a priori*, variabilidade natural do depósito e variância da estrutura esférica dos modelos dos semivariograma dos dados codificados (indicadores) de ρ_h da camada S respeitando as proporções calculadas pelo modelo que representa o semivariograma dos dados codificados pelo limite z_5

(continuação)

z_k - Limite distribuidor de indicadores	σ^2 - Variância <i>a priori</i> dos dados codificados $((g/cm^3)^2)$	C_0 - Variabilidade natural dos dados codificados $((g/cm^3)^2)$	C - Variância da estrutura esférica dos dados codificados $((g/cm^3)^2)$
z_8	0,16	0,0353	0,1247
z_9	0,09	0,0198	0,0702

Como o atributo Cz_h também foi codificado por indicadores e será usado na Klm, o semivariograma dos dados codificados de acordo com o valor do limite z_5 também foi construído e modelado para definição dos parâmetros de ajuste. O semivariograma e modelo obtidos podem ser vistos na Figura 5.23.

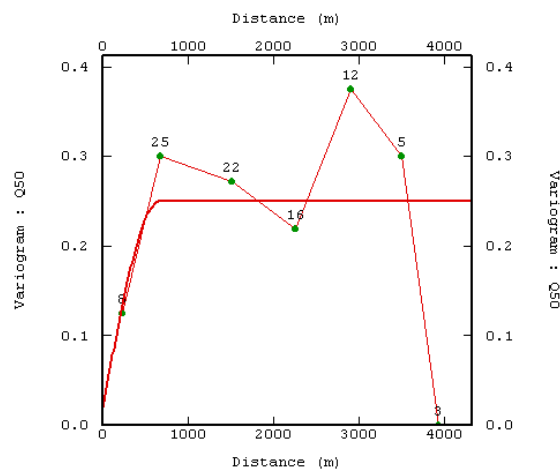


Figura 5.23: Semivariograma onidirecional (limite z_5) dos indicadores do atributo Cz_h da Camada S.

O modelo ajustado foi do tipo esférico e a sua equação já com os parâmetros ajustados é:

$$\begin{cases} \gamma(\mathbf{h}) = 0,019 + 0,231 \cdot \left[\frac{3}{2} \cdot \left(\frac{h}{666} \right) - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h}{666} \right)^3 \right] & \text{para } h < 666 \\ \gamma(\mathbf{h}) = 0,25 & \text{para } h \geq 666 \end{cases} \quad \text{Equação 5.21}$$

No caso da Cz_h da Camada S, as proporções obtidas foram de 7,6 % para o C_0 e 92,4 % para C . Com esses valores, foi possível calcular os parâmetros para os demais modelos desse atributo e a Tabela 5.10 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 5.10: Variância *a priori*, variabilidade natural do depósito e variância da estrutura esférica dos modelos dos semivariogramas dos dados codificados (indicadores) de Cz_h da camada S respeitando as proporções calculadas pelo modelo que representa o semivariograma dos dados codificados pelo limite z_5

z_k - Limite distribuidor de indicadores	σ^2 - Variância <i>a priori</i> dos dados codificados (% ²)	C_0 - Variabilidade natural dos dados codificados (% ²)	C - Variância da estrutura esférica dos dados codificados (% ²)
z_1	0,09	0,00684	0,08316
z_2	0,16	0,01216	0,14784
z_3	0,21	0,01596	0,19404
z_4	0,24	0,01824	0,22176
z_5	0,25	0,019	0,231
z_6	0,24	0,01824	0,22176
z_7	0,21	0,01596	0,19404
z_8	0,16	0,01216	0,14784
z_9	0,09	0,00684	0,08316

5.2.2.3 Camada M1

O semivariograma dos indicadores definidos para o limite igual a mediana para o atributo ρ_h da Camada M1 junto com o modelo ajustado pode ser visto na Figura 5.24.

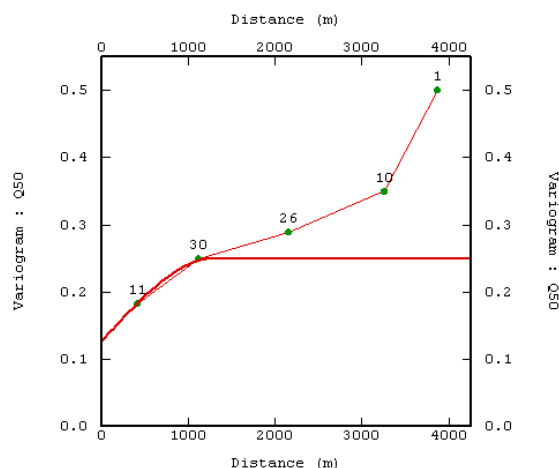


Figura 5.24: Semivariograma onidirecional (limite z_5) dos indicadores do atributo ρ_h da Camada M1.

O modelo ajustado foi do tipo esférico e a sua equação já com os parâmetros ajustados é:

$$\begin{cases} \gamma(\mathbf{h}) = 0,127 + 0,123 \cdot \left[\frac{3}{2} \cdot \left(\frac{h}{1302} \right) - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h}{1302} \right)^3 \right] & \text{para } h < 1302 \cdot \\ \gamma(\mathbf{h}) = 0,25 & \text{para } h \geq 1302 \end{cases} \quad \text{Equação 5.22}$$

As proporções obtidas foram de 50,8 % para o C_0 e 49,2 % para C . Com esses valores, foi possível calcular os parâmetros para os demais modelos desse atributo e a Tabela 5.11 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 5.11: Variância *a priori*, variabilidade natural do depósito e variância da estrutura esférica dos modelos dos semivariogramas dos dados codificados (indicadores) de ρ_h da camada M1 respeitando as proporções calculadas pelo modelo que representa o semivariograma dos dados codificados pelo limite z_5

z_k - Limite distribuidor de indicadores	σ^2 - Variância <i>a priori</i> dos dados codificados $((g/cm^3)^2)$	C_0 - Variabilidade natural dos dados codificados $((g/cm^3)^2)$	C - Variância da estrutura esférica dos dados codificados $((g/cm^3)^2)$
z_1	0,09	0,0457	0,0443
z_2	0,16	0,0812	0,0788
z_3	0,21	0,1066	0,1034
z_4	0,24	0,1219	0,1181
z_5	0,25	0,127	0,123
z_6	0,24	0,1219	0,1181

Tabela 5.11: Variância *a priori*, variabilidade natural do depósito e variância da estrutura esférica dos modelos dos semivariogramas dos dados codificados (indicadores) de ρ_h da camada M1 respeitando as proporções calculadas pelo modelo que representa o semivariograma dos dados codificados pelo limite z_5 (continuação)

z_k - Limite distribuidor de indicadores	σ^2 - Variância <i>a priori</i> dos dados codificados $((g/cm^3)^2)$	C_0 - Variabilidade natural dos dados codificados $((g/cm^3)^2)$	C - Variância da estrutura esférica dos dados codificados $((g/cm^3)^2)$
z_7	0,21	0,1066	0,1034
z_8	0,16	0,0812	0,0788
z_9	0,09	0,0457	0,0443

Na Figura 5.25, é apresentado o semivariograma do atributo Cz_h com o modelo ajustado.

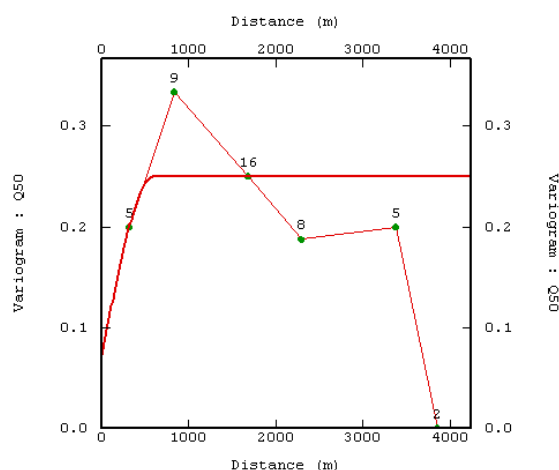


Figura 5.25: Semivariograma onidirecional (limite z_5) dos indicadores do atributo Cz_h da Camada M1.

O modelo ajustado foi do tipo esférico e a sua equação já com os parâmetros ajustados é:

$$\begin{cases} \gamma(\mathbf{h}) = 0,072 + 0,178 \cdot \left[\frac{3}{2} \cdot \left(\frac{h}{600} \right) - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h}{600} \right)^3 \right] & \text{para } h < 600 \\ \gamma(\mathbf{h}) = 0,25 & \text{para } h \geq 600 \end{cases} \quad \text{Equação 5.23}$$

Neste caso, o modelo ajustado mostrou que a proporção do C_0 é igual a 28,8 % e do C igual a 71,2 %. Com esses valores, foi possível calcular os parâmetros para os demais modelos desse atributo e a Tabela 5.12 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 5.12: Variância *a priori*, variabilidade natural do depósito e variância da estrutura esférica dos modelos dos semivariogramas dos dados codificados (indicadores) de Cz_h da camada M1 respeitando as proporções calculadas pelo modelo que representa o semivariograma dos dados codificados pelo limite z_5

z_k - Limite distribuidor de indicadores	σ^2 - Variância <i>a priori</i> dos dados codificados (% ²)	C_0 - Variabilidade natural dos dados codificados (% ²)	C - Variância da estrutura esférica dos dados codificados (% ²)
z_1	0,09	0,0259	0,0641
z_2	0,16	0,0460	0,114
z_3	0,21	0,0604	0,149
z_4	0,24	0,0691	0,171
z_5	0,25	0,072	0,178
z_6	0,24	0,0691	0,171
z_7	0,21	0,0604	0,149
z_8	0,16	0,0460	0,114
z_9	0,09	0,0259	0,0641

5.2.2.4 Camada M2

O semivariograma dos indicadores definidos para o limite igual a mediana para o atributo ρ_h da Camada M2 junto com o modelo ajustado pode ser visto na Figura 5.26.

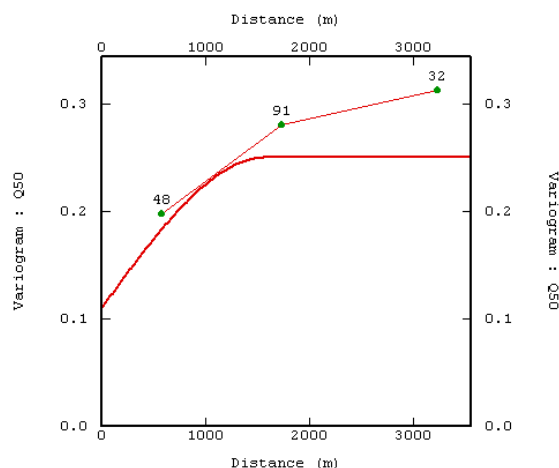


Figura 5.26: Semivariograma onidirecional (limite z_5) dos indicadores do atributo ρ_h da Camada M2.

O modelo ajustado foi do tipo esférico e a sua equação já com os parâmetros ajustados é:

$$\begin{cases} \gamma(\mathbf{h}) = 0,11 + 0,14 \cdot \left[\frac{3}{2} \cdot \left(\frac{h}{1577} \right) - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h}{1577} \right)^3 \right] & \text{para } h < 1577 \\ \gamma(\mathbf{h}) = 0,25 & \text{para } h \geq 1577 \end{cases} \quad \text{Equação 5.24}$$

Para o atributo ρ_h da Camada M2, as proporções que deverão ser respeitadas serão de 44 % para o C_0 e de 56 % para o C . Com esses valores, foi possível calcular os parâmetros para os demais modelos desse atributo e a Tabela 5.13 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 5.13: Variância *a priori*, variabilidade natural do depósito e variância da estrutura esférica dos modelos dos semivariogramas dos dados codificados (indicadores) de ρ_h da camada M2 respeitando as proporções calculadas pelo modelo que representa o semivariograma dos dados codificados pelo limite z_5

z_k - Limite distribuidor de indicadores	σ^2 - Variância <i>a priori</i> dos dados codificados ((g/cm ³) ²)	C_0 - Variabilidade natural dos dados codificados ((g/cm ³) ²)	C - Variância da estrutura esférica dos dados codificados ((g/cm ³) ²)
z_1	0,09	0,0396	0,0504
z_2	0,16	0,0704	0,0896
z_3	0,21	0,0924	0,1176
z_4	0,24	0,1056	0,1344

Tabela 5.13: Variância *a priori*, variabilidade natural do depósito e variância da estrutura esférica dos modelos dos semivariogramas dos dados codificados (indicadores) de ρ_h da camada M2 respeitando as proporções calculadas pelo modelo que representa o semivariograma dos dados codificados pelo limite z_5 (continuação)

z_k - Limite distribuidor de indicadores	σ^2 - Variância <i>a priori</i> dos dados codificados $((g/cm^3)^2)$	C_0 - Variabilidade natural dos dados codificados $((g/cm^3)^2)$	C - Variância da estrutura esférica dos dados codificados $((g/cm^3)^2)$
z_5	0,25	0,11	0,14
z_6	0,24	0,1056	0,1344
z_7	0,21	0,0924	0,1176
z_8	0,16	0,0704	0,0896
z_9	0,09	0,0396	0,0504

Na Figura 5.27, é apresentado o semivariograma do atributo Cz_h com o modelo ajustado.

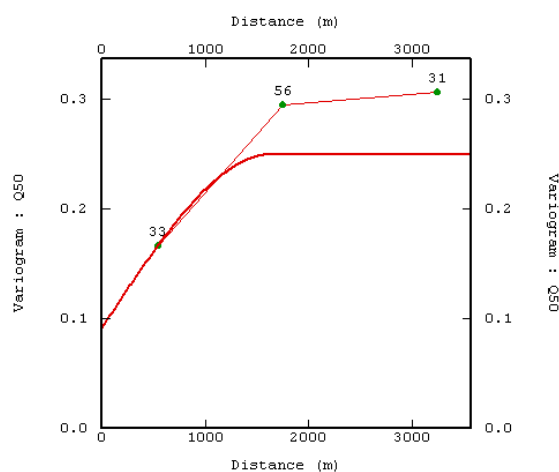


Figura 5.27: Semivariograma onidirecional (limite z_5) dos indicadores do atributo Cz_h da Camada M2.

O modelo ajustado foi do tipo esférico e a sua equação já com os parâmetros ajustados é:

$$\begin{cases} \gamma(\mathbf{h}) = 0,091 + 0,159 \cdot \left[\frac{3}{2} \cdot \left(\frac{h}{1650} \right) - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h}{1650} \right)^3 \right] & \text{para } h < 1650 \cdot \\ \gamma(\mathbf{h}) = 0,25 & \text{para } h \geq 1650 \end{cases} \quad \text{Equação 5.25}$$

A Equação 5.25 mostra que a proporção de C_0 é igual a 36,4 % e de C igual a 63,6 %. Com esses valores, foi possível calcular os parâmetros para os demais modelos desse atributo e a Tabela 5.14 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 5.14: Variância *a priori*, variabilidade natural do depósito e variância da estrutura esférica dos modelos dos semivariogramas dos dados codificados (indicadores) de Cz_h da camada M2 respeitando as proporções calculadas pelo modelo que representa o semivariograma dos dados codificados pelo limite z_5

z_k - Limite distribuidor de indicadores	σ^2 - Variância <i>a priori</i> dos dados codificados (% ²)	C_0 - Variabilidade natural dos dados codificados (% ²)	C - Variância da estrutura esférica dos dados codificados (% ²)
z_1	0,09	0,0327	0,0573
z_2	0,16	0,05824	0,10176
z_3	0,21	0,07644	0,13356
z_4	0,24	0,08736	0,15264
z_5	0,25	0,091	0,159
z_6	0,24	0,08736	0,15264
z_7	0,21	0,07644	0,13356
z_8	0,16	0,05824	0,10176
z_9	0,09	0,0327	0,0573

5.2.2.5 Camada I1

O semivariograma dos indicadores definidos para o limite igual a mediana para o atributo ρ_h da Camada I1 junto com o modelo ajustado pode ser visto na Figura 5.28.

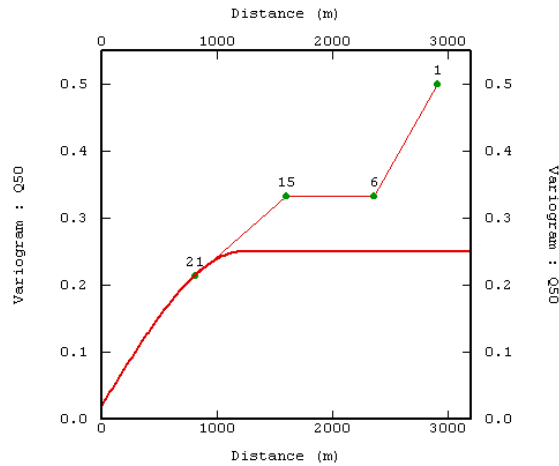


Figura 5.28: Semivariograma onidirecional (limite z_5) dos indicadores do atributo ρ_h da Camada I1.

O modelo ajustado foi do tipo esférico e a sua equação já com os parâmetros ajustados é:

$$\gamma(\mathbf{h}) = \begin{cases} 0,02 + 0,23 \cdot \left[\frac{3}{2} \cdot \left(\frac{h}{1220} \right) - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h}{1220} \right)^3 \right] & \text{para } h < 1220 \\ 0,25 & \text{para } h \geq 1220 \end{cases} \quad \text{Equação 5.26}$$

Para a Camada I1, as proporções dos parâmetros C_0 e C , para o atributo ρ_h , são respectivamente 8 % e 92 % respectivamente. Com esses valores, foi possível calcular os parâmetros para os demais modelos desse atributo e a Tabela 5.15 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 5.15: Variância *a priori*, variabilidade natural do depósito e variância da estrutura esférica dos modelos dos semivariogramas dos dados codificados (indicadores) de ρ_h da camada I1 respeitando as proporções calculadas pelo modelo que representa o semivariograma dos dados codificados pelo limite z_5

z_k - Limite distribuidor de indicadores	σ^2 - Variância <i>a priori</i> dos dados codificados $((g/cm^3)^2)$	C_0 - Variabilidade natural dos dados codificados $((g/cm^3)^2)$	C - Variância da estrutura esférica dos dados codificados $((g/cm^3)^2)$
z_1	0,09	0,0072	0,0828
z_2	0,16	0,0128	0,1472
z_3	0,21	0,0168	0,1932
z_4	0,24	0,0192	0,2208
z_5	0,25	0,02	0,23

Tabela 5.16: Variância *a priori*, variabilidade natural do depósito e variância da estrutura esférica dos modelos dos semivariogramas dos dados codificados (indicadores) de ρ_h da camada I1 respeitando as proporções calculadas pelo modelo que representa o semivariograma dos dados codificados pelo limite z_5 (continuação)

z_k - Limite distribuidor de indicadores	σ^2 - Variância <i>a priori</i> dos dados codificados $((g/cm^3)^2)$	C_0 - Variabilidade natural dos dados codificados $((g/cm^3)^2)$	C - Variância da estrutura esférica dos dados codificados $((g/cm^3)^2)$
z_6	0,24	0,0192	0,2208
z_7	0,21	0,0168	0,1932
z_8	0,16	0,0128	0,1472
z_9	0,09	0,0072	0,0828

Na Figura 5.29, é apresentado o semivariograma do atributo Cz_h com o modelo ajustado.

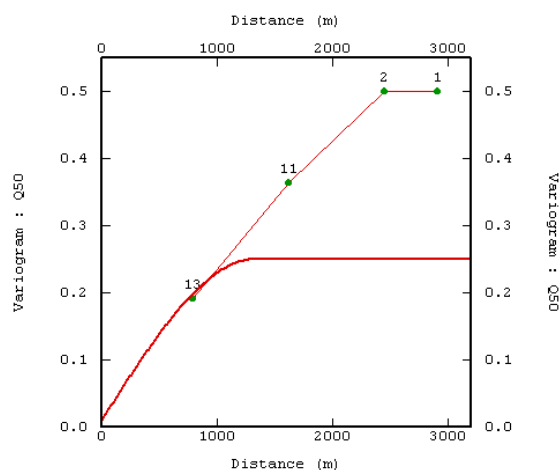


Figura 5.29: Semivariograma onidirecional (limite z_5) dos indicadores do atributo Cz_h da Camada I1.

O modelo ajustado foi do tipo esférico e a sua equação já com os parâmetros ajustados é:

$$\begin{cases} \gamma(\mathbf{h}) = 0,01 + 0,24 \cdot \left[\frac{3}{2} \cdot \left(\frac{h}{1326} \right) - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h}{1326} \right)^3 \right] & \text{para } h < 1326, \\ \gamma(\mathbf{h}) = 0,25 & \text{para } h \geq 1326 \end{cases} \quad \text{Equação 5.27}$$

Finalizando o cálculo das proporções, temos que para o atributo Cz_h da Camada I1, a proporção do parâmetro C_0 é igual a 4 % e do C igual a 96 %. Com esses valores, foi possível calcular os parâmetros para os demais modelos desse atributo e a Tabela 5.16 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 5.17: Variância *a priori*, variabilidade natural do depósito e variância da estrutura esférica dos modelos dos semivariogramas dos dados codificados (indicadores) de Cz_h da camada I1 respeitando as proporções calculadas pelo modelo que representa o semivariograma dos dados codificados pelo limite z_5

z_k - Limite distribuidor de indicadores	σ^2 - Variância <i>a priori</i> dos dados codificados (% ²)	C_0 - Variabilidade natural dos dados codificados (% ²)	C - Variância da estrutura esférica dos dados codificados (% ²)
z_1	0,09	0,0036	0,0864
z_2	0,16	0,0064	0,1536
z_3	0,21	0,0084	0,2016
z_4	0,24	0,0096	0,2304
z_5	0,25	0,01	0,24
z_6	0,24	0,0096	0,2304
z_7	0,21	0,0084	0,2016
z_8	0,16	0,0064	0,1536
z_9	0,09	0,0036	0,0864

5.3 Estimativas

Neste estudo de caso, a etapa das estimativas foi dividida em dois grupos, a realização da krigagem ordinária dos dados reais, isto é, somente com informações obtidas com a análise de testemunhos recuperados por sondagem e a realização da krigagem dos indicadores com o banco de dados construído com informações de análise de testemunhos e perfilagem geofísica.

O primeiro grupo constituído de krigagens ordinárias representa o caminho mais comum e rápido que se toma na avaliação de depósitos minerais, porém, como o banco de dados usado foi todo constituído por informações de sondagem com recuperação de testemunhos, esse é o caminho mais dispendioso financeiramente. Em contrapartida, o segundo grupo de krigagens, constituído de krigagens de indicadores, representa o caminho mais trabalhoso, porém de menor

custo, pois o banco de dados usado foi construído com informações de poucos furos com recuperação de testemunhos e vários outros onde foi executada a perfilagem geofísica.

Portanto, o objetivo de efetuar dois métodos diferentes de krigagem, cada um com um diferente grupo de dados, é poder comparar os resultados. Com essa comparação, será possível avaliar a precisão dos valores dos atributos estimados com os dados obtidos por perfilagem geofísica, incluindo a obtenção do erro porcentual em cada bloco estimado e do erro porcentual médio para toda a área de interesse.

A malha de blocos definida para as estimativas compreende 2132 blocos com dimensão 100 por 100 metros e como as camadas não estão presentes em todos os furos, foram construídos quatro diferentes polígonos de extrapolação, um para cada camada. Na Figura 5.30, são apresentados os polígonos juntamente com a malha de blocos.

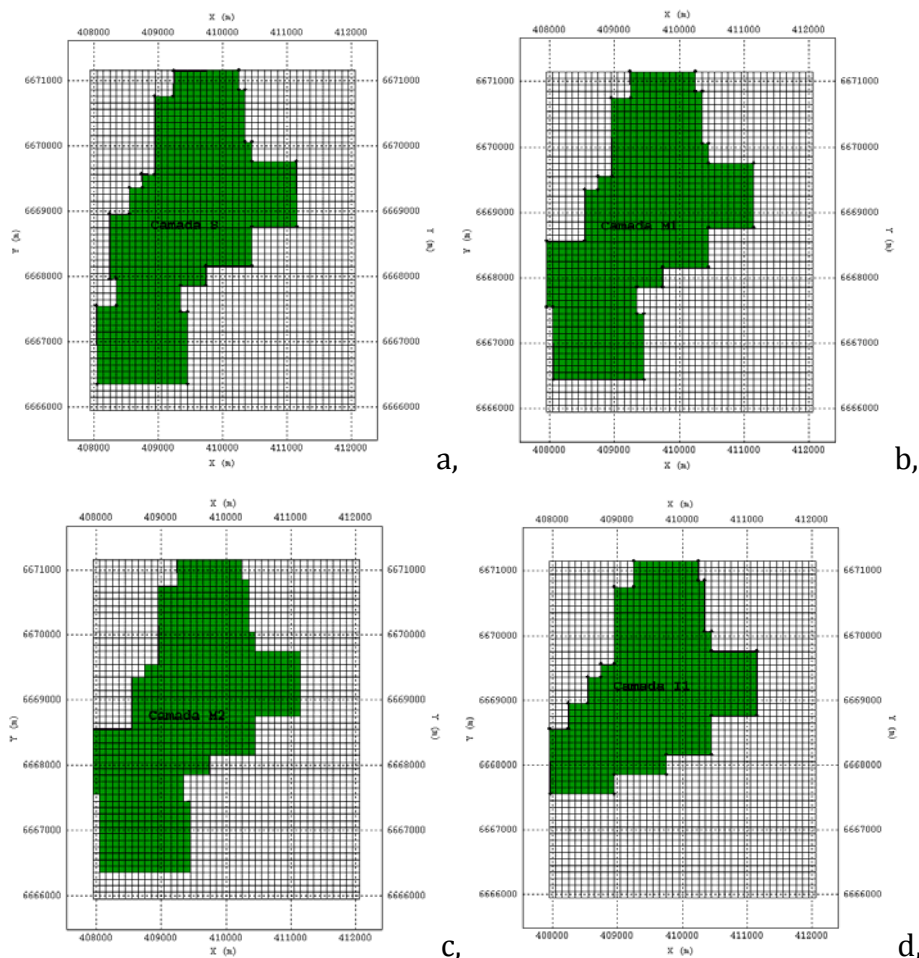


Figura 5.30: Polígonos de extrapolação das diferentes camadas e malha de blocos para estimativa. a, Camada S; b, Camada M1; c, Camada M2 e d, Camada I1.

O número de blocos compreendidos pelos polígonos de extrapolação das Camadas S, M1, M2 e S foram respectivamente 811, 819, 833 e 666 respectivamente.

5.3.1 Krigagem Ordinária

O principal motivo da realização da krigagem ordinária (KO), é que ela foi utilizada neste trabalho como base para a comparação com a estimativa da krigagem dos indicadores, pois, na grande maioria dos trabalhos de avaliação de depósitos minerais, a krigagem ordinária é um dos caminhos mais comuns seguidos para a obtenção de valores para os blocos estimados. A comparação dos resultados da krigagem ordinária com os resultados da krigagem dos indicadores utilizando os dados de perfilagem geofísica permitirá medir a eficácia do método de estimativa de krigagem dos indicadores como forma de incorporar os dados da perfilagem geofísica. Como a KO será a base da comparação, todas as estimativas por esse método, foram feitas com os dados reais, isto é, densidades (ρ_r) e teor de cinzas (Cz_r) obtidas por análise laboratorial da recuperação dos testemunhos de sondagem para todos os 21 furos executados na área B3.

Foi efetuada a KO dos atributos de interesse das quatro camadas e nas próximas oito figuras serão apresentados os resultados das KOs juntamente com o respectivo histograma das estimativas, se iniciando com as figuras 5.31 e 5.32 que mostram, respectivamente, os mapas dos blocos estimados e histogramas das estimativas dos atributos ρ_r e Cz_r da Camada S.

Pela observação de ambos os histogramas das figuras 5.31 e 5.32, notamos que eles possuem um comportamento de assimetria positiva, esse comportamento não é destacado nos histograma das amostras devido à escassez de dados, mas se mostra presente, conforme visto na Figura 5.2. Os resultados das estatísticas validam os modelos dos semivariogramas das amostras apresentados anteriormente, pois, se compararmos a média das estimativas com a dos dados amostrais desagrupados descobrimos que são valores muito semelhantes. A médias da amostras de ρ_r foi de $1,72 \text{ g/cm}^3$ e a média de sua estimativa por KO foi

de 1,71 g/cm³, no caso do teor de cinzas, a media das amostras foi de 45,84 % e da estimativa foi de 45,48 %.

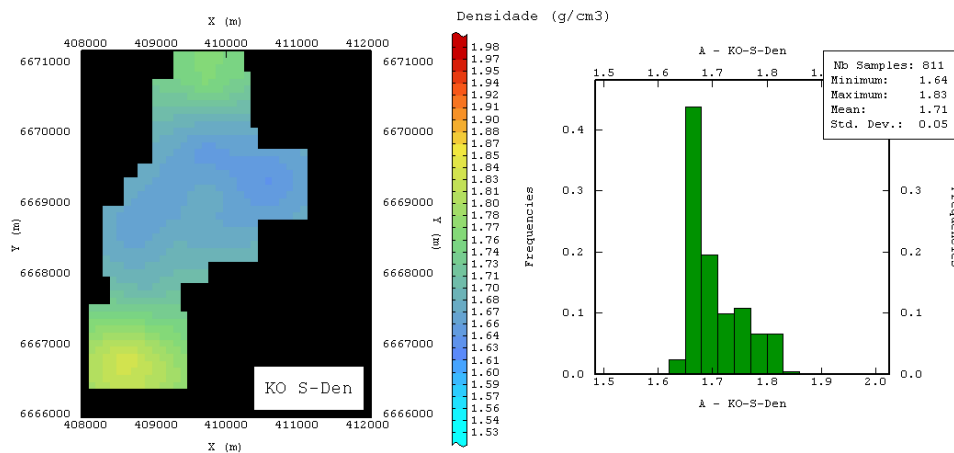


Figura 5.31: Histogramas e mapa das estimativas por KO para o atributo ρ_r da Camada S.

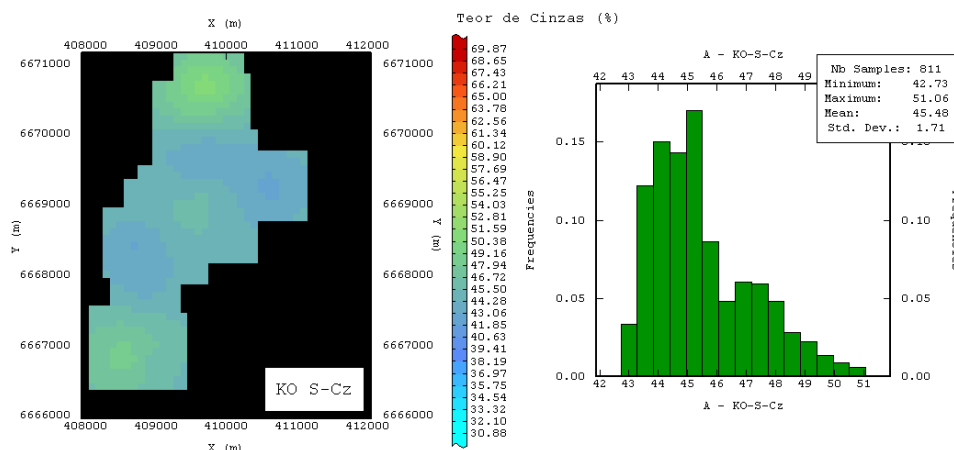


Figura 5.32: Histogramas e mapa das estimativas por KO para o atributo Cz_r da Camada S.

Em relação à distribuição espacial das estimativas podemos concluir que, para ambos os atributos, os valores mais baixos ocorreram no centro da área e apresentaram um leve crescimento para as bordas, principalmente nas regiões norte e sul. Essa semelhança de distribuição para densidade e teor de cinzas se deve a correlação linear que existe entre esses parâmetros. Já, em relação à magnitude dos valores das estimativas, concluímos que, para ambos os atributos,

as estimativas por KO apresentaram valores próximos da média e com baixo desvio padrão.

As próximas duas figuras (5.33 e 5.34) apresentam os resultados da KO dos atributos da Camada M1.

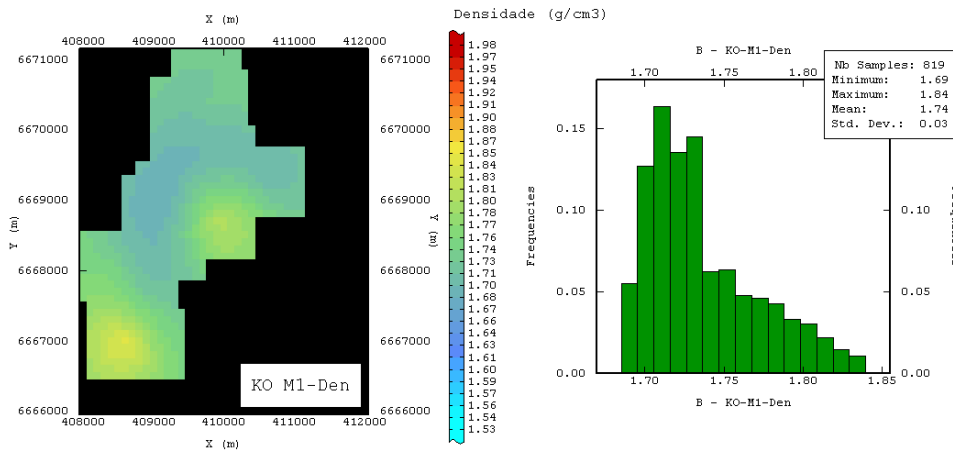


Figura 5.33: Histogramas e mapa das estimativas por KO para o atributo ρ_r da Camada M1.

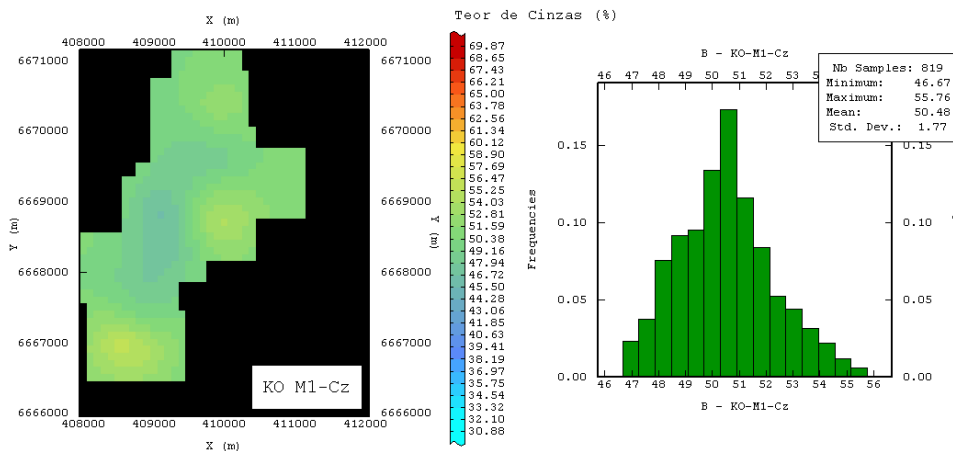


Figura 5.34: Histogramas e mapa das estimativas por KO para o atributo Cz_r da Camada M1.

No caso da Camada M1, os histogramas das estimativas apresentaram comportamentos diferentes, assimetricamente positivo no caso da densidade e normal para o teor de cinzas. O histograma das amostras de densidade da Camada M1 apresenta uma leve tendência de assimetria positiva correspondendo com o histograma da estimativa, porém, o histograma das amostras de teor de cinzas também tende ao comportamento assimétrico enquanto que as estimativas se apresentam em uma distribuição quase simétrica. Em relação à comparação das

médias, observamos que, em para ambos atributos a média das estimativas foi bastante semelhante à média das amostras.

A distribuição dos valores estimados para a Camada M1 apresentou poucas diferenças em comparação com as estimativas da Camada S. A mais significativa foi que, enquanto na Camada S, os valores estimados tendiam a crescer do centro para as bordas, na Camada M1 a tendência de aumento se direcionou para leste e sul da área e os valores das regiões centro, oeste e norte permaneceram com pouca variação. Assim como para a Camada S, a estimativa da Camada M1 apresentou valores próximos da média da estimativa, portanto, baixos desvios padrões.

As próximas duas figuras (5.35 e 5.36) apresentam os resultados da KO dos atributos da Camada M1.

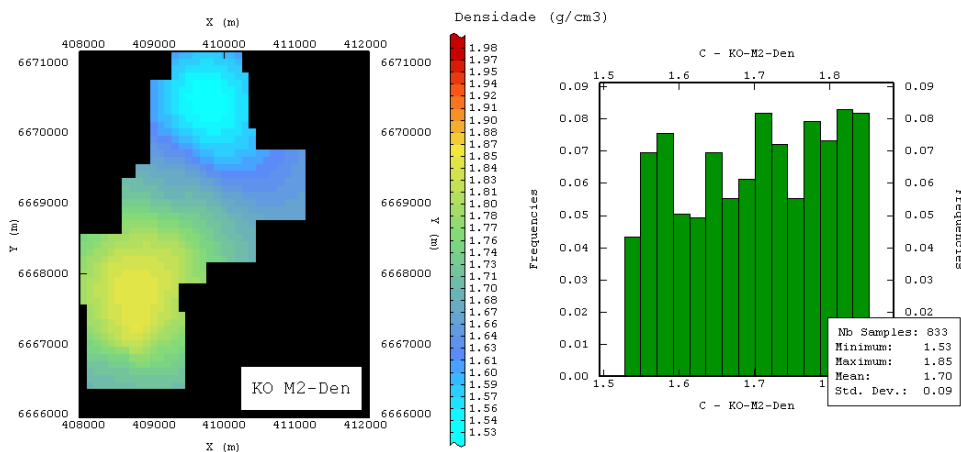


Figura 5.35: Histogramas e mapa das estimativas por KO para o atributo ρ_r da Camada M2.

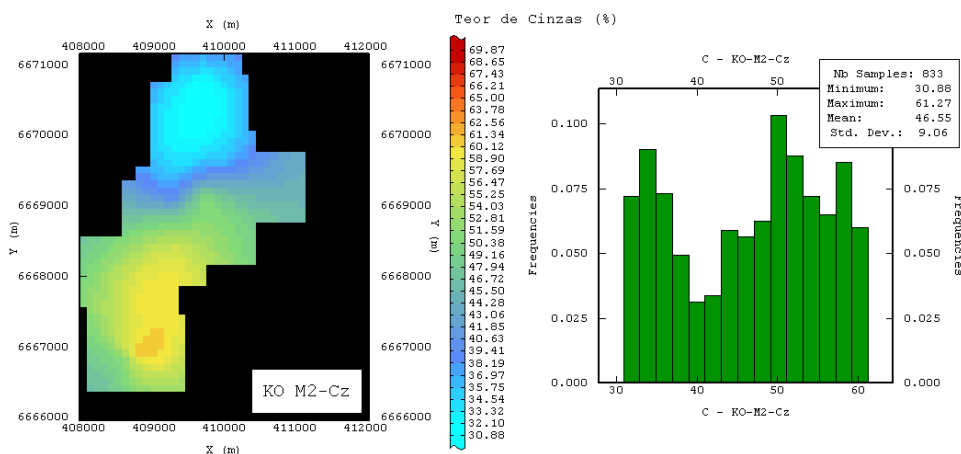


Figura 5.36: Histogramas e mapa das estimativas por KO para o atributo Cz_r da Camada M2.

O comportamento irregular dos histogramas da Figura 5.7 que se referem às amostras da Camada M2 se manteve presente nos histogramas das estimativas e não foi possível identificar nenhum comportamento aparente na distribuição dos histogramas.

Em relação aos valores estimados, os resultados para a Camada M2, para ambos os atributos, apresentaram os valores extremos, principalmente os extremos inferiores, isto é, valores baixos de densidade e teor de cinzas. Entre todas KOs realizadas em todas as camadas, os valores mais baixos foram encontrados nos resultados para a Camada M2. A distribuição dos valores mostrou uma forte tendência de crescimento no valor dos atributos partindo da região norte em direção a sul.

Devido a esse grande número de blocos com valores distantes da média, o desvio padrão de ambas estimativas foi bastante elevado, fato que pode ser observado visualmente na irregularidade dos histogramas presentes nas Figuras 5.35 e 5.36.

Apesar do alto desvio padrão, as médias das estimativas foram bastante semelhantes às médias das amostras, fato que contribuiu para a validação dos modelos de semivariograma e da estratégia de krigagem adotados.

Finalizando a apresentação das estimativas por KO, as Figuras 5.37 e 5.48 mostram, respectivamente as estimativas para o atributo ρ_r e Cz_r da Camada I1.

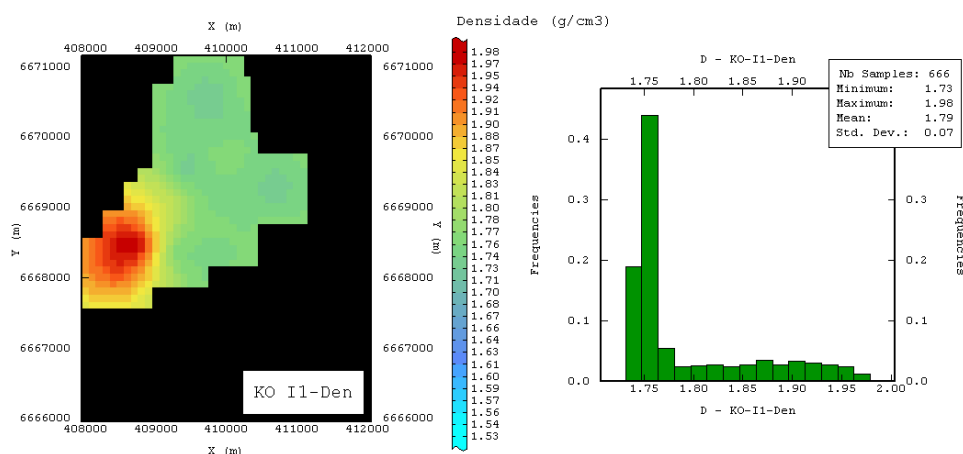


Figura 5.37: Histogramas e mapa das estimativas por KO para o atributo ρ_r da Camada I1.

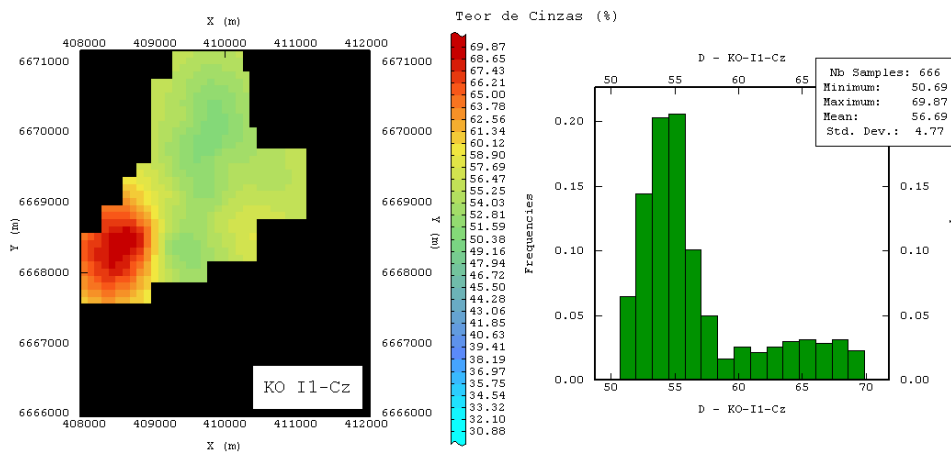


Figura 5.38: Histogramas e mapa das estimativas por KO para o atributo Cz_r da Camada I1.

Por fim, as estimativas para a Camada I1 apresentaram histogramas com uma aparente assimetria positiva, fato esperado pelos histogramas das amostras localizados na Figura 5.5. A KO dos atributos da Camada I1 foi aquela que apresentou os extremos mais altos, isto é, blocos com valores estimados bastante altos. Os maiores valores estimados de densidade e teor de cinzas tenderam a se localizar na porção oeste na área, enquanto que para todo o resto da região, tendeu a predominância de valores bastante semelhantes à média, por esse motivo, mesmo com a estimativa de extremos altos, a desvio padrão permaneceu baixo.

A comparação das médias das estimativas e das amostras valida os modelos utilizados, pois as médias das estimativas de densidade e teor de cinzas foram, respectivamente, $1,79 \text{ g/cm}^3$ e $56,68 \%$. Valores bastante semelhantes aos valores das médias das amostras que forma $1,79 \text{ g/cm}^3$ para densidade e $55,77 \%$ para teor de cinzas.

Uma observação geral das estimativas conclui que os modelos estimados não apresentaram viés global, uma vez que a média dos dados é reproduzida pelo modelo. Uma checagem visual, comparando dados às estimativas também corrobora a validação dos modelos.

5.3.2 Krigagem dos Indicadores com a Mediana

A KIm foi feita com base em um banco de dados hipotético, desenvolvido e descrito no Capítulo anterior no item 4.5.3, devido a escassez de informação de perfilagem geofísica em todos os locais de sondagem.

A estimativa por KIm foi feita para a densidade e teor de cinzas das quatro camadas de carvão sob análise e ela se iniciou com a execução da krigagem dos dados codificados de acordo com os limites z_k . Assim, como cada atributo possui nove limites (conforme mostrado no item 5.2.2.1) foram realizadas nove estimativas de probabilidades onde cada uma representa a probabilidade dos blocos serem inferiores ao valor do limite z_k que governou a distribuição dos indicadores. Com base nas nove probabilidades de cada atributo foi calculado um valor médio para o mesmo mediante a aplicação do conceito matemático apresentado no item 3.7.

A conversão das nove probabilidades em um valor médio único, cujo resultado é chamado de estimativa E-type, foi feito com auxílio do programa POSTIK da biblioteca de *softwares* GSLIB (Deutsch & Journel, 1998) que no momento do cálculo do E-type realiza as correções de ordem e de suporte necessárias. As correções de ordem ocorrem quando as probabilidades estimadas para um mesmo bloco não apresentam valores crescentes ou decrescentes na mesma ordem dos limites. Por exemplo, uma KI baseada em cinco limites z_k de valor crescente que apresentou como probabilidades de ser inferior ao valor do limite os valores 0,05 para o limite z_1 , 0,3 para o limite z_2 , 0,25 para o limite z_3 , 0,4 para o limite z_4 e 0,8 para o limite z_5 ; necessita de uma correção de ordem pois a probabilidade acumulada do limite z_3 é inferior a probabilidade do limite z_2 .

A correção de suporte (Isaak & Srivastava, 1989) é feita quando o suporte da estimativa (tamanho dos blocos estimados) é diferente da amostragem (tamanho e/ou volume). Neste estudo de caso, como a amostra original possuía dimensões na ordem das polegadas e a estimativa das probabilidades foi feita em blocos de 100 por 100 m, foi necessária a correção de suporte. O método de correção escolhido foi a correção *affine* descrito por Isaak & Srivastava (1989). Esse tipo de correção de suporte se baseia na relação existente entre a variância das amostras e variância dos blocos definidos para a estimativa, ela é feita no

momento do cálculo do E-type, pois ao executar o programa POSTIK deve-se informar a razão entre a variância dos blocos e a variância dos dados.

Os próximos quatro itens irão apresentar os resultados das estimativas dos dois atributos de interesse de todas as camadas. Será feita a comparação entre a estimativa E-type e os valores obtidos por KO, pois, dessa maneira, estaremos comparando a KO que é caminho mais comum usado na avaliação de depósitos (menos trabalhoso, porém com custo financeiro elevado devido à sondagem com recuperação de testemunhos) com um caminho novo que é a KI (mais trabalhosa, porém de custo inferior, pois usa dados secundários obtidos por perfilagem geofísica). A comparação será feita subtraindo-se o valor da estimativa por KO da estimativa por KIm e o resultado dessa subtração será considerado o erro da estimativa por KIm. Mapas das distribuições das estimativas e erros serão mostrados, bem como histograma dos erros. Por fim, um mapa mostrando os blocos cujos erros excederam um limite pré estabelecido será mostrado junto de um gráfico de dispersão comparando as estimativas E-type e KO.

5.3.2.1 Camada S

A aplicação da KIm nos dados codificados de acordo com os nove limites z_k , gerou nove diferentes mapas que representam a probabilidade que cada bloco possui de ter o valor de densidade inferior aos limites z_k . Os nove mapas de probabilidades obtidos para o atributo ρ_h da Camada S são apresentados na Figura 5.39.

Ao observar os mapas da Figura 5.39, notamos o aumento da probabilidade que um bloco tem de ser inferior ao limite z_k e, com o aumento do índice k do limite z_k , maior o seu valor, aumentando a chance de um bloco ser inferior ao valor do limite. Por exemplo, a imagem mais superior do canto esquerdo apresenta a probabilidade do bloco ser inferior ao quantil 10 %. Como o valor do quantil 10 % é o menor de todos ($1,58 \text{ g/cm}^3$ para o atributo ρ_h da Camada S), as probabilidade de um bloco ser inferior a ele é bastante baixa ou até mesmo nula. Em contrapartida, a imagem mais abaixo no canto direito representa as probabilidades dos blocos serem inferiores ao valor do quantil 90 % que é bastante alto ($1,86$

g/cm^3 para o atributo ρ_h da Camada S), desta maneira a probabilidade de um bloco ser inferior a ele é bastante alta.

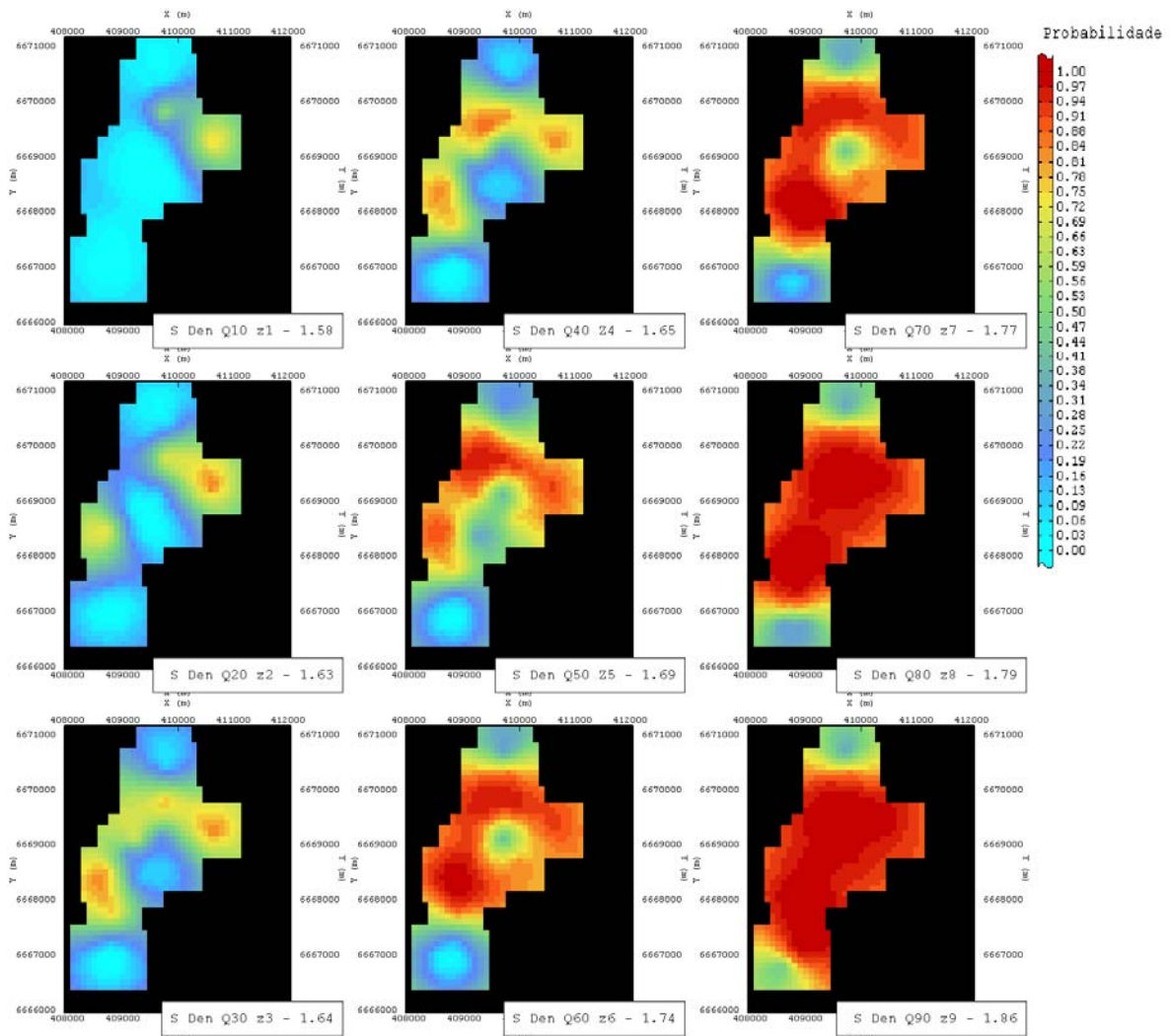


Figura 5.39: Nove probabilidades calculadas por KIm para o atributo ρ_h da Camada S, onde cada mapa representa a chance que o valor do atributo ρ_h de cada bloco possui de ser inferior ao limite z_k que foi base da distribuição dos indicadores 0 e 1.

Em relação às probabilidades mostradas na Figura 5.39, notamos que, de acordo com o resultado da KIm, as menores densidade da Camada S tenderão a se localizar na região central da área, enquanto que as regiões norte e sul irão compreender os carvões de menor qualidade, isto é, de maior densidade.

A aplicação do programa POSTIK converteu as nove probabilidades em uma estimativa única de densidade (E-type) esse resultado é mostrado na Figura 5.40, juntamente com a estimativa por KO para ρ_r para comparação visual.

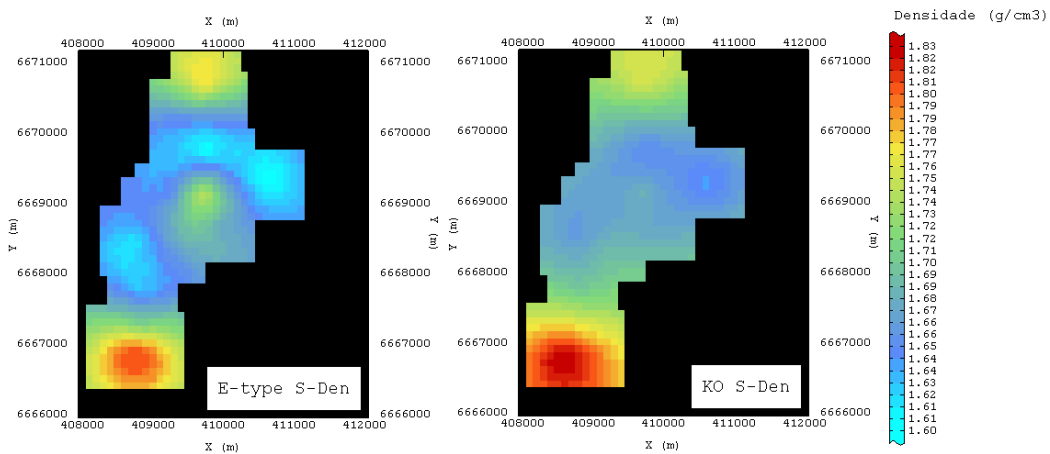


Figura 5.40: Estimativa E-type do atributo ρ_h (mapa a esquerda) e estimativa por KO para o atributo ρ_r (mapa a direita), ambos da Camada S.

A análise da Figura 5.40 mostra que existe uma grande semelhança entre a estimativa E-type do atributo ρ_h e a estimativa KO do atributo ρ_r , ambos da Camada S. As duas estimativas tenderam a localizar os altos valores de densidade nos extremos norte e sul enquanto que na região central permanecem as menores densidades. Uma observação mais cuidadosa mostrou que a estimativa por KIm foi mais otimista que a KO, apresentando valores mais inferiores de densidade, fato que é melhor observado nas regiões sul e central.

Através das duas estimativas mostradas na Figura 5.40, foram calculados dois tipos de erro: absoluto e porcentual. Erro absoluto que é proveniente da subtração do valor estimado por KO do valor estimado por Kim. O erro porcentual é o erro absoluto de cada bloco dividido pelo seu valor estimado por KO e multiplicado por 100.

Os mapas com a distribuição do erro são mostrados na Figura 5.41 e com base na inspeção visual do mesmo notamos que a maior concentração de erro se localizou nas regiões central e centro-sul.

Para melhor visualizar a quantidade de blocos de erro excessivo bem como a distribuição e outras características das estimativas e erros, a Figura 5.42 traz os histogramas de ambas estimativas e dos erros absoluto e porcentual. E por fim, a Figura 5.43 mostra o gráfico de dispersão que compara as estimativas por KIm e KO para o atributo densidade da Camada S.

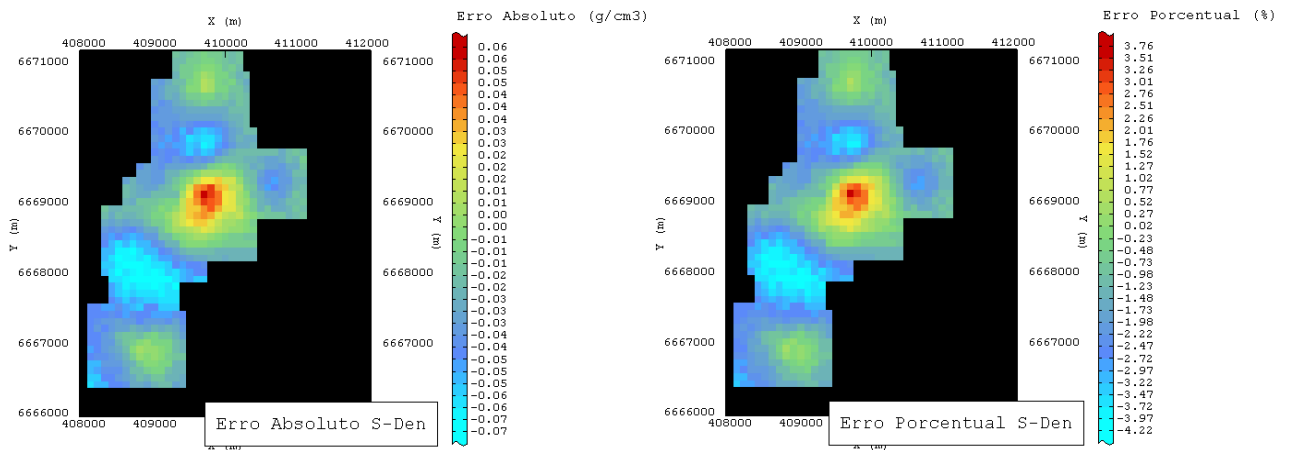


Figura 5.41: Erro absoluto (mapa da esquerda) e erro porcentual (mapa da direita) da estimativa do atributo ρ_h da Camada S por KIm em comparação com o resultado da KO para o atributo ρ_r .

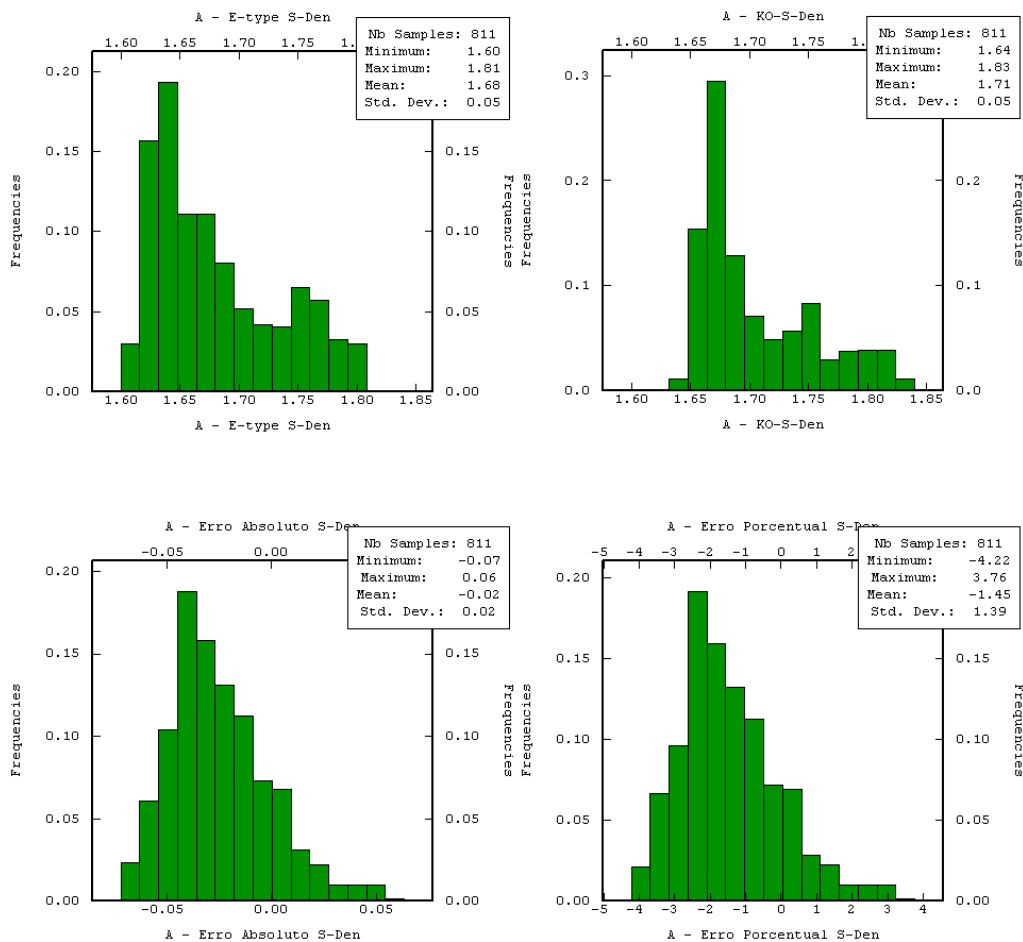


Figura 5.42: Histogramas das estimativas por E-type para ρ_h e KO para ρ_r (canto superior esquerdo e direito respectivamente) e histogramas dos erros absoluto e porcentual (cantos inferiores esquerdo e direito respectivamente) referentes a Camada S.

Os histogramas das estimativas mostrados na Figura 5.42 indicam que ambos os resultados possuem um comportamento assimétrico positivo, porém a estimativa por KIm apresentou uma tendência de estimar valores inferiores, fato observado pela comparação dos valores máximos e mínimos bem como a média das estimativas. Em relação aos erros, o cenário ótimo de um histograma de erros é apresentar um comportamento normal centrado em zero com baixo desvio padrão. Nesse caso, o erro foi de $-0,02 \text{ g/cm}^3$ para o erro absoluto e $-1,45 \%$ para o erro porcentual e o os histogramas apresentaram um comportamento levemente assimétrico positivo.

Uma maneira simples de se avaliarmos a eficiência da estimativa por KIm neste estudo de caso é fixando um valor máximo de erro na magnitude de -5% á 5% . Assim, pode-se excluir os blocos cujos erros foram superiores a esses limites e encontrar sua exata localização e investigar os motivos de elevado erro. Conforme visto no histograma do erro porcentual da Figura 5.42, os maiores erros foram de $-4,22 \%$ e $3,76 \%$, colocando todos os blocos estimados por KIm dentro do limite de estimativa.

Como não houve a ocorrência de blocos de desvio excessivo, a Figura 5.43 mostra apenas o gráfico de dispersão que compara as estimativas de densidade da Camada S.

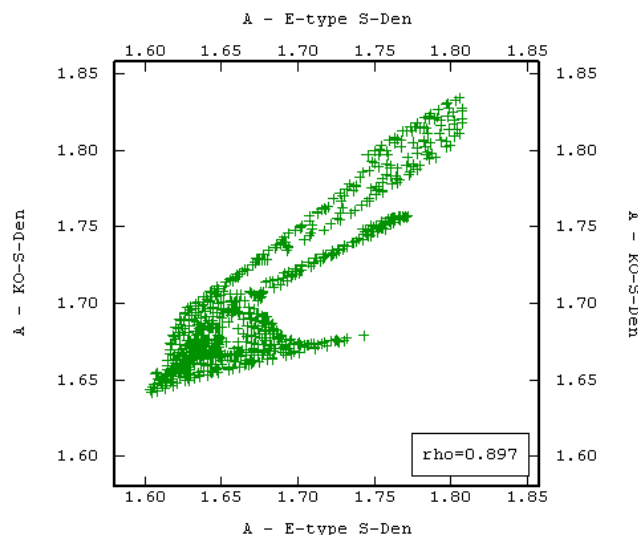


Figura 5.43: Gráfico de dispersão comparando as estimativas de ρ_h por KIm no eixo x e de ρ_r por KO no eixo y, do atributo densidade para a Camada S.

A distribuição mostrada no gráfico da Figura 5.43 comprova a eficiência da estimativa por KIm em comparação com a estimativa por KO.

Para o segundo atributo da Camada S, os trabalhos de estimativa e análise iniciaram com o cálculo das probabilidades que cada bloco possui de apresentar um valor de teor de cinzas inferior aos limites z_k . A Figura 5.44 apresenta as nove probabilidades obtidas por KIm para o atributo Cz_h da Camada S.

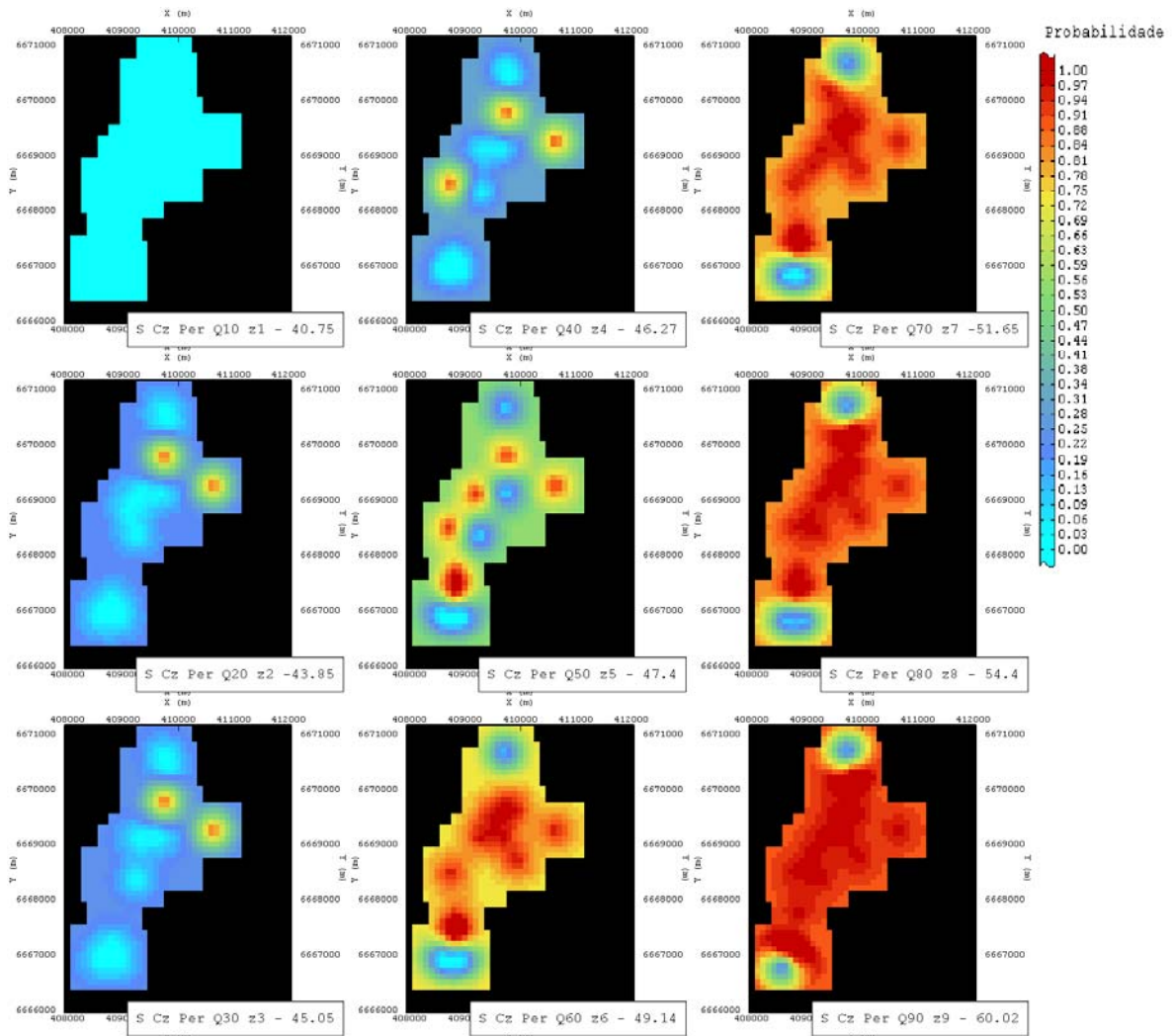


Figura 5.44: Mapas de probabilidades calculadas por KIm para o atributo Cz_h da Camada S, onde cada mapa representa a chance que o valor do atributo Cz_h de cada bloco possui de ser inferior ao limite z_k .

Como já foi discutido no capítulo anterior, existe uma relação diretamente proporcional entre as densidades e teores de cinzas de carvões e, portanto era de se esperar, para a Camada S, uma distribuição de probabilidades que acusa baixos

teores de cinzas no centro da área e altos nas extremidades norte e sul. Fato que é comprovado pela seqüência de mapas de probabilidade da Figura 5.44.

Ainda em relação aos mapas de probabilidade da Figura 5.44, vale observar o mapa de probabilidades estimadas para o limite mais inferior z_1 . Como pode ser observado, todos os blocos apresentaram uma probabilidade de 0 % de ser inferior ao limite z_1 igual a 40,75 %. Isso ocorreu devido ao fato que na distribuição de indicadores de acordo com o limite z_1 igual a 40,75 % nenhuma amostra recebeu o indicador 1, logo, o sistema de krigagens foi alimentado com um banco de dados composto de apenas zeros, e portanto, independente do peso atribuído a cada amostra, o resultado de todos os blocos estimados foi igual a zero.

Um dos motivos para a distribuição de apenas indicadores zeros são os altos limites de confiança que as amostras de valores extremos possuem. Como pode ser visto na Figura 4.38 do Capítulo 4, os valores de teor de cinza que possuem os maiores limite de confiança máximo e mínimo se localizam nos extremos do gráfico, isto é, quanto maior ou menor o teor de cinzas estimado pelo ajuste da Figura 4.38, mais ampla será incerteza em relação ao valor estimado, pois seus limites de confiança serão maiores. Portanto, no momento da distribuição dos indicadores levando em consideração limites de restrição, é comum os valores mais altos e mais baixos do atributo de interesse apresentarem limites tão amplos e serem descartados recebendo - 999 ao invés de 0 ou 1. A melhor maneira para diminuição dos limites de confiança é aumento o número de amostras do banco de dados primário e como conseqüência, os ajustes de calibração serão mais confiáveis.

A principal conseqüência de se ter uma distribuição de probabilidades totalmente nula, como mostrada na Figura 5.44, é que no momento do cálculo da estimativa E-type, nenhum bloco irá receber um valor do atributo inferior ao limite z_k . No caso da estimativa de teor de cinzas da Camada S por KIm, a estimativa E-type não apresentará nenhum bloco com teor de cinzas inferior ao valor de 40,75% (valor do limite z_1).

Por meio das nove probabilidades associadas a cada bloco obtidas por KIm, foi possível efetuar a estimativa E-type do atributo Cz_h da Camada S. Na Figura 5.45, é mostrado o resultado dessa estimativa juntamente com os valores resultantes da KO do atributo Cz_r da Camada S.

A observação da Figura 5.45 mostra uma distribuição de valores altos e baixos de teor de cinza bastante semelhantes, contudo, a KO mostrou uma suavização dos valores enquanto que a KIm tendeu a destacar mais os focos de valores de baixo teor de cinzas. Em relação à magnitude dos valores, a estimativa por KIm apresentou, em geral, valores mais elevados em comparação com a KO, principalmente na região sul da área.

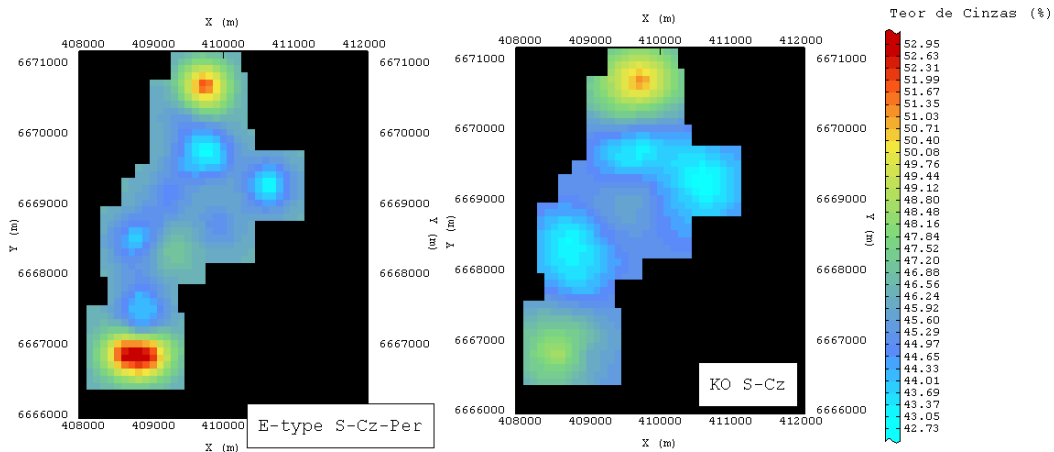


Figura 5.45: Estimativa E-type do atributo Cz_h (mapa a esquerda) e estimativa por KO para o atributo Cz_r (mapa a direita), ambos da Camada S.

Os mapas com a distribuição dos dois tipos de erro para as estimativas de teor de cinzas da Camada S se localizam na Figura 5.46.

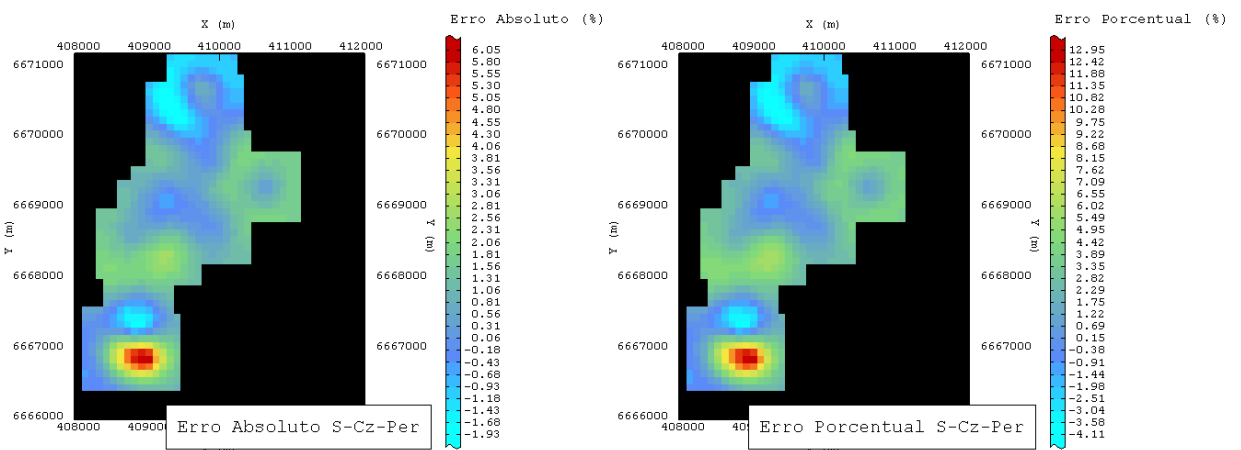


Figura 5.46: Erro absoluto (mapa da esquerda) e erro porcentual (mapa da direita) da estimativa do atributo Cz_h da Camada S por KIm em comparação com o resultado da KO para o atributo Cz_r .

A Figura 5.46 mostra que a estimativa por Klm gerou valores cujo erro excederam os limites impostos de -5 % e 5 %, e os blocos contendo tais erros se localizam principalmente na região mais ao sul da área.

A distribuição dos valores das estimativas e dos erros em histogramas é apresentada na Figura 5.47.

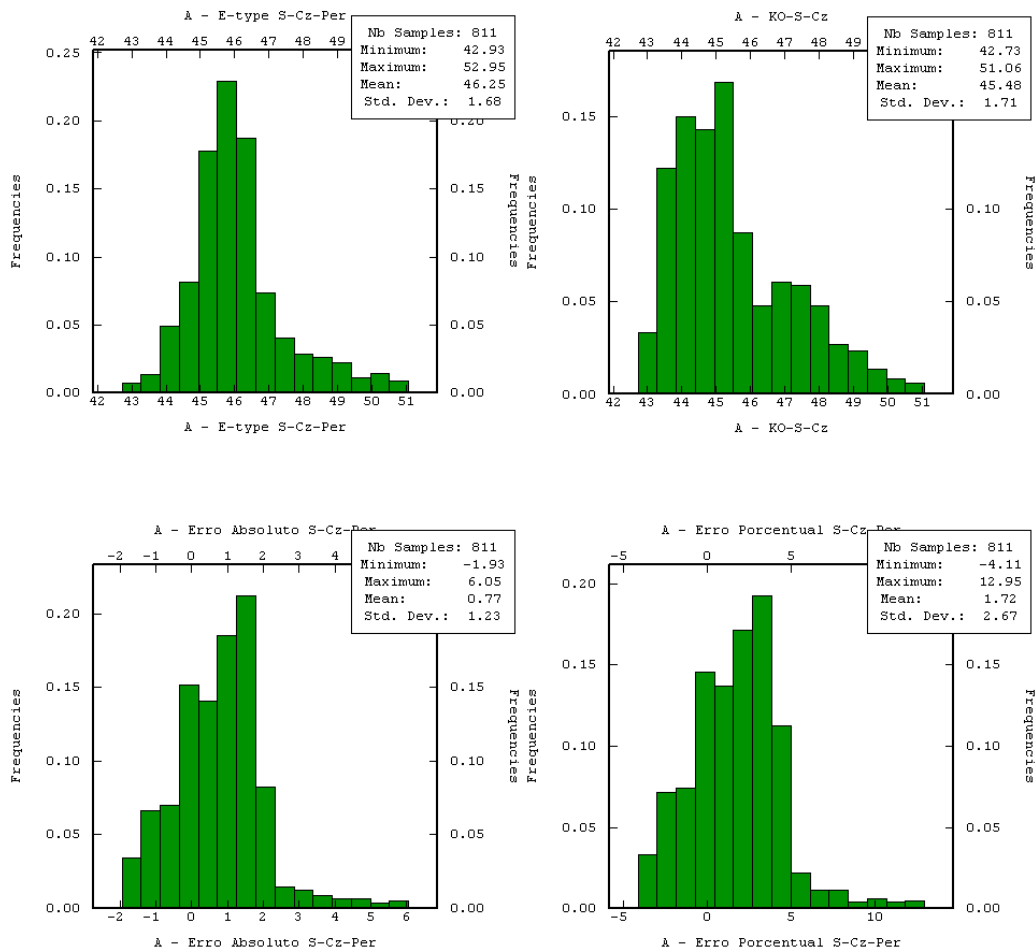


Figura 5.47: Histogramas das estimativas por E-type para Cz_h e KO para Cz_r (canto superior esquerdo e direito respectivamente) e histogramas dos erros absoluto e percentual (cantos inferiores esquerdo e direito respectivamente) referentes a Camada S.

Ambas as estimativas de teor de cinzas mostraram comportamentos assimétricos positivos com médias semelhantes, sendo que a média da Klm foi superior devido a estimativa de valores pouco mais elevados que a KO. Em relação

aos histogramas dos erros, encontramos comportamentos assimétricos positivo com médias diferente de zero, mas ainda assim aceitáveis.

As estatísticas do erro porcentual mostraram que ocorreram blocos cujo desvio ficou fora dos limites de -5 % e 5 % e a localização desses blocos pode ser observada na Figura 5.48 juntamente com o gráfico de dispersão que compara as estimativas por KO e KIm

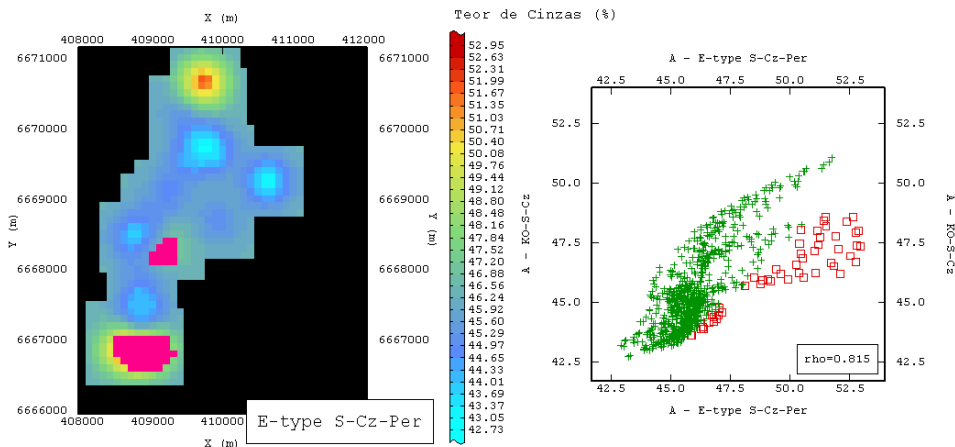


Figura 5.48: Mapa da estimativa do atributo Cz_h por KIm para a Camada S cujos blocos com erro fora dos limites estabelecidos se apresentam destacados pela cor magenta e gráfico de dispersão apresentando as estimativas por KIm no eixo x e por KO no eixo y, comparando os valores e destacando em vermelho os blocos estimados por KIm com erro excessivo.

Diferentemente dos resultados obtidos para a densidade da Camada S que apresentaram 100 % de aproveitamento das estimativas por KIm, a estimativa de teor de cinzas tendeu a apresentar uma concentração de blocos com erro excessivo na região sul e centro sul da área, tornando aceitáveis cerca de 94 % dos blocos estimados.

Alguns dos motivos que pode-se citar como prováveis causadores dos desvios elevados é a baixa densidade amostral na região centro sul e na área B3 em geral. Essa baixa densidade amostral dificulta a construção de semivariogramas experimentais que representem a distribuição espacial dos dados com confiança, acarretando o ajuste de modelos incertos. E como, na distribuição de indicadores considerando limites de restrição, o banco de dados que já é reduzido, pode se tornar menor ainda (principalmente no caso dos teores de cinza) com o descarte

de diversas amostras. Isto dificulta a construção de um semivariograma representativo dos dados codificados de acordo com o limite médio z_k , cujo modelo irá ditar as proporções para os parâmetros dos outros semivariogramas, e pode proporcionar aumento no erro de estimativa.

A região sul da área se destaca por apresentar carvões de qualidade irregular e bastante estratificados, fazendo com que as amostras coletadas por sondagem sejam de difícil análise química e que o registro da perfilagem geofísica seja afetado pelas baixas espessuras das camadas. Ambos os problemas colaboram para aumento no erro do método Klm que faz uso destas informações.

5.3.2.2 Camada M1

A segunda camada que teve seus parâmetros estimados foi aquela denominada M1. A Figura 5.49 mostra as probabilidades, calculadas por KIm, representando a chance de cada bloco ser inferior aos valores dos limites z_k .

A distribuição das probabilidades mostra que devemos esperar os menores valores de densidade nas regiões centro e norte da área, enquanto que, os carvões de menor qualidade que apresentam alta densidade deverão se encontrar na região sul.

A estimativa E-type foi calculada baseada nos nove mapas de probabilidades mostrados anteriormente. A Figura 5.50, além mostrar a estimativa E-type do atributo ρ_h , apresenta o mapa com os valores obtidos pela aplicação da KO ao atributo ρ_r da Camada M1.

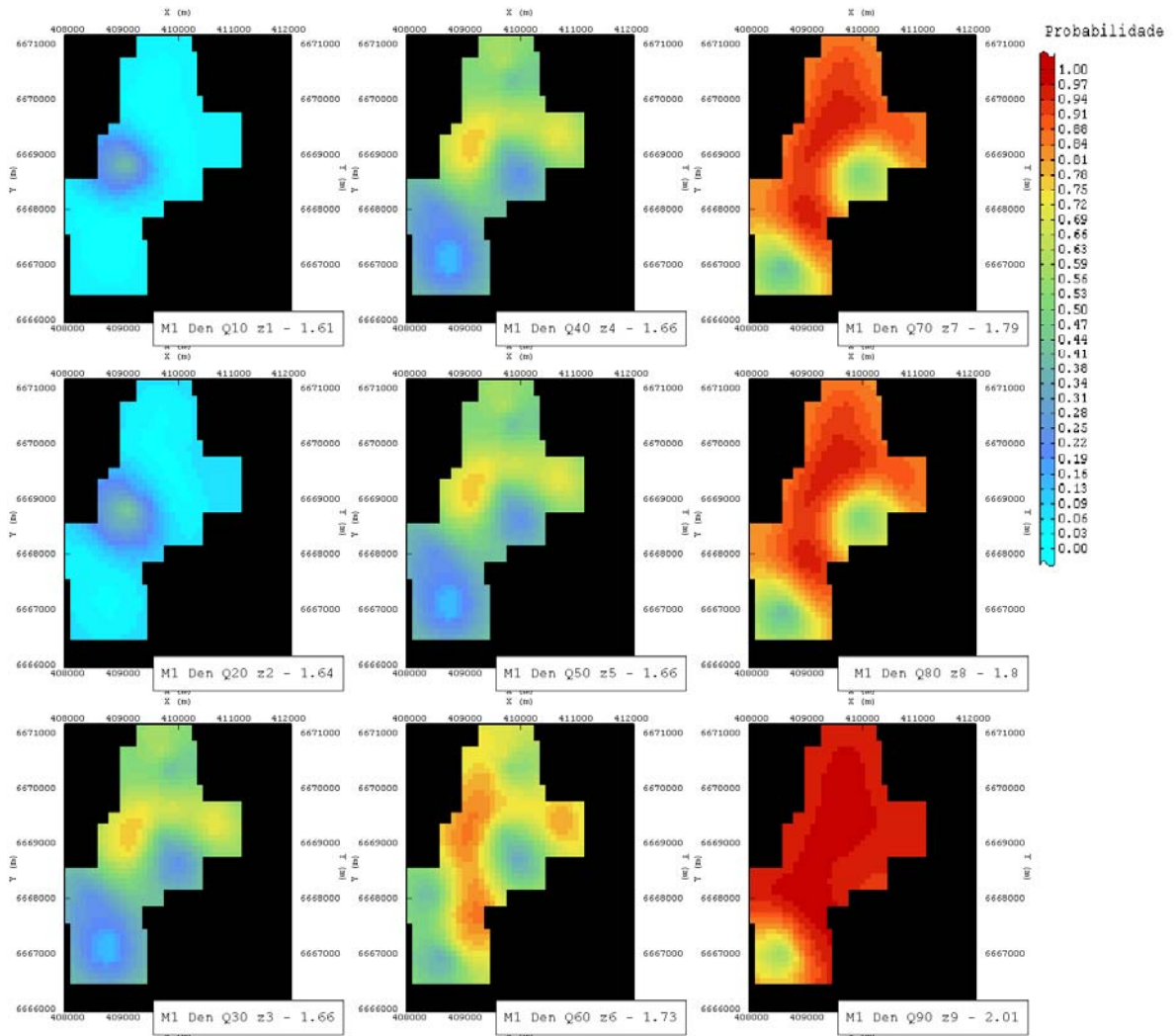


Figura 5.49: Mapas de probabilidades calculadas por KIm para o atributo ρ_h da Camada M1, onde cada mapa representa a chance que o valor do atributo ρ_h de cada bloco possui de ser inferior ao limite z_k .

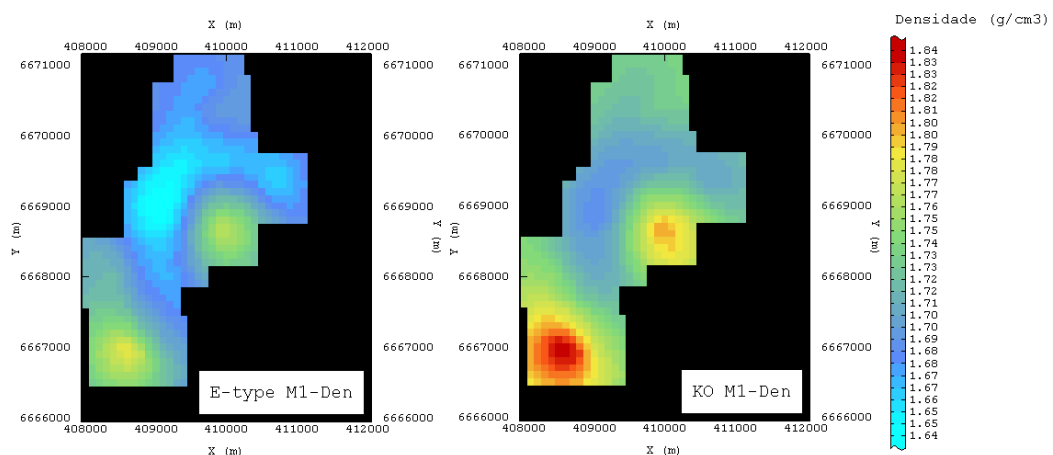


Figura 5.50: Estimativa E-type do atributo ρ_h (mapa a esquerda) e estimativa por KO para o atributo ρ_r (mapa a direita), ambos da Camada M1.

Através dos mapas da Figura 5.50, nota-se que, em geral, a estimativa por KIm tendeu a subestimar, resultando em valores de densidade inferiores.

Para melhor visualização da magnitude do desvio das estimativas e localização dos blocos, a Figura 5.51 apresenta os mapas dos erros absoluto e porcentual que comparam as estimativas por KIm e KO.

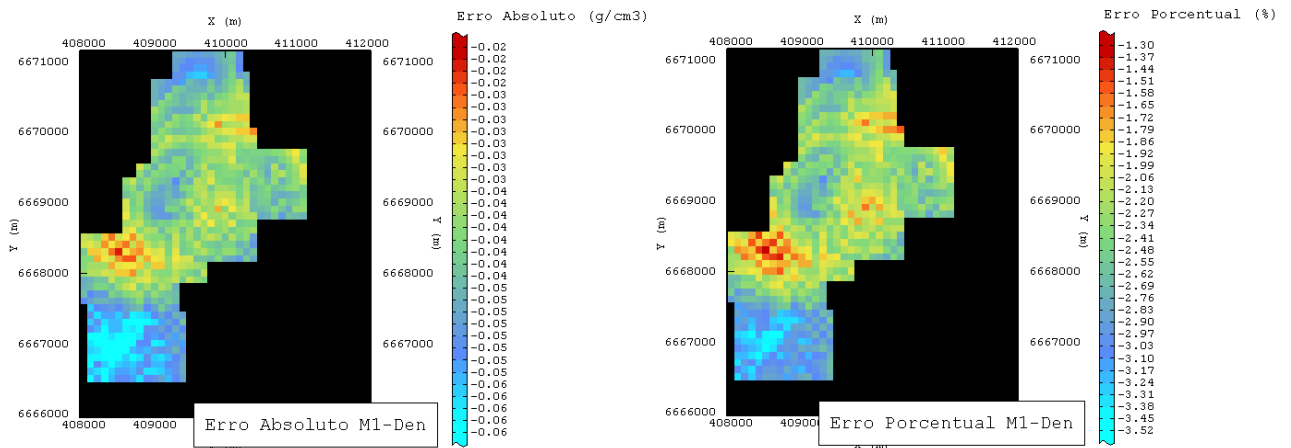


Figura 5.51: Erro absoluto (mapa da esquerda) e erro porcentual (mapa da direita) da estimativa do atributo ρ_h da Camada M1 por KIm em comparação com o resultado da KO para o atributo ρ_r .

As escalas dos mapas de erros da Figura 5.51 mostram que ambos os erros foram negativos, isso implica que todas as estimativas por KIm foram inferiores as efetuadas por KO. Apesar dessa tendência, os erros foram de valores bem reduzidos e de acordo com o mapa do erro porcentual, nenhum bloco estimado por KIm apresentou um erro desvio que excedeu os limites de -5 % e 5 %. Para facilitar a análise dos trabalhos efetuados com a densidade da Camada M1, a Figura 5.52 mostra os histogramas das estimativas e desvios calculados.

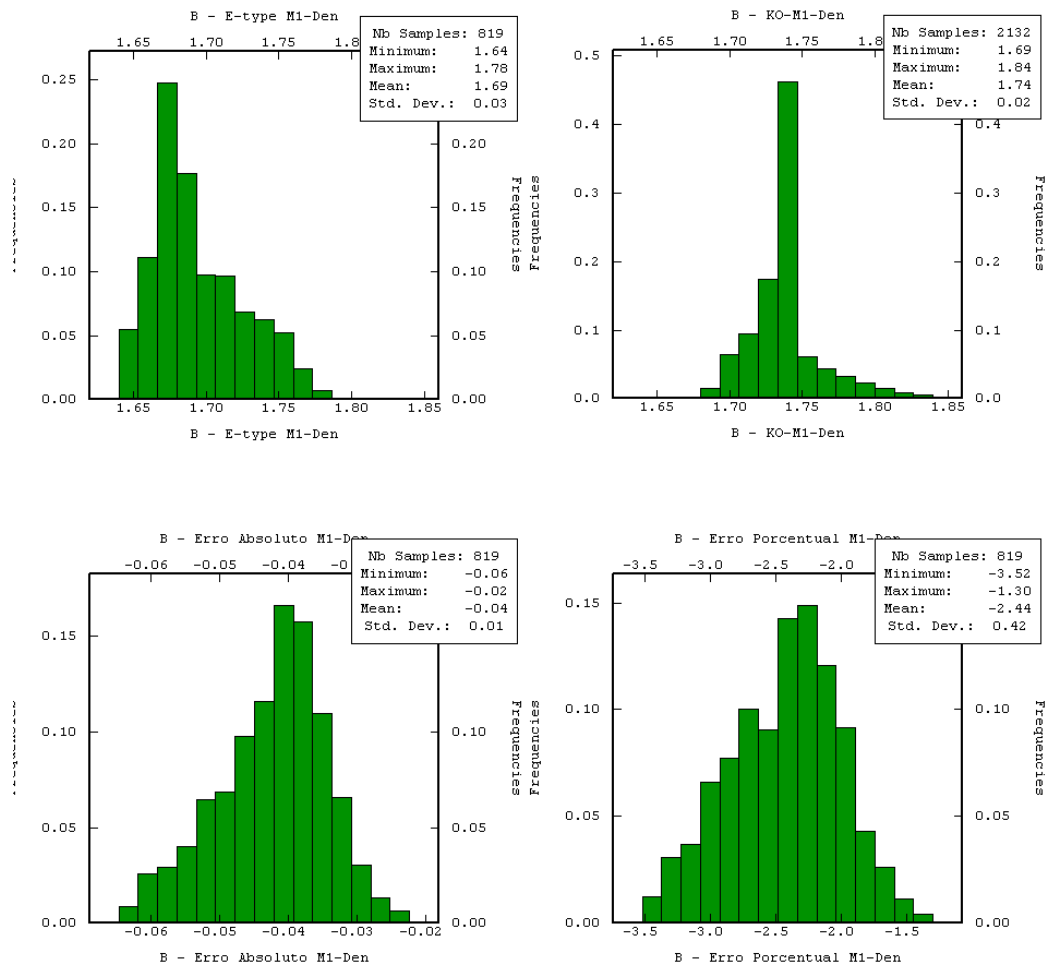


Figura 5.52: Histogramas das estimativas por E-type para ρ_h e KO para ρ_r (canto superior esquerdo e direito respectivamente) e histogramas dos erros absoluto e percentual (cantos inferiores esquerdo e direito respectivamente) referentes a Camada M1.

Os histogramas das estimativas mostram comportamentos contrastantes. Enquanto a estimativa por KIm é assimetricamente positiva, o resultado da KO tende a simetria e pela comparação dos valores máximos e mínimos estimados bem como as médias das estimativas, pode-se ter uma idéia aproximada de quanto a estimativa por KIm foi inferior a KO.

Em relação aos histogramas dos erros, observa-se que o erro absoluto mostrou uma assimetria negativa com média tendendo a zero e com baixo desvio padrão. Conseqüentemente, o erro percentual foi reduzido sem apresentar blocos com estimativas que excederam os limites de erro.

Como nenhum bloco apresentou erros fora dos limites, a Figura 5.53 mostra apenas o gráfico de dispersão que compara as estimativas por KIm e KO.

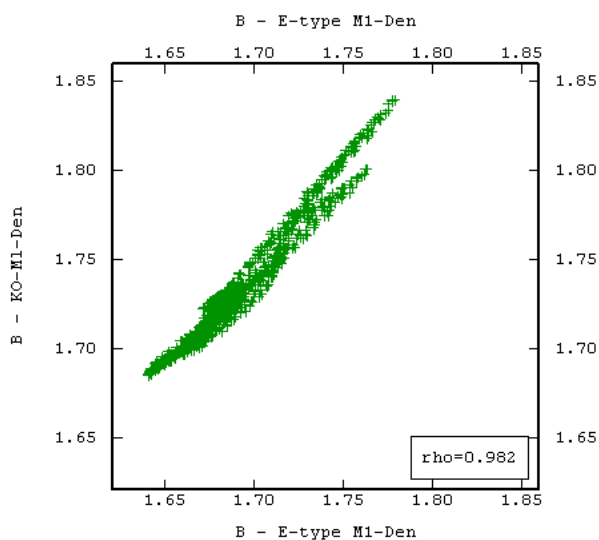


Figura 5.53: Gráfico de dispersão comparando as estimativas de ρ_h por KIm no eixo x e de ρ_r por KO no eixo y, do atributo densidade para a Camada M1.

O gráfico de dispersão da Figura 5.53 comprova que os valores estimados por KIm e KO, para um mesmo bloco, foram bastante semelhantes não apresentando nenhum desvio que excedeu os limites de -5 % e 5 %.

Finalizando os trabalhos de estimativas para a Camada M1, a Figura 5.54 mostra as probabilidades que cada bloco possui de ter o valor do atributo Cz_h inferior aos limites z_k .

Em relação à distribuição das probabilidades, devemos esperar os maiores teores de cinzas nas regiões sul e centro leste.

Ao observar as probabilidades estimadas para os indicadores codificados pelo limite z_9 notamos que todos os blocos possuem 100 % de chance de serem inferiores ao limite de 69,4 % de teor de cinzas. Esse resultado é o oposto do ocorrido na estimativa de probabilidades do teor de cinzas da Camada S. No caso anterior, o sistema de krigagens foi alimentado com apenas amostras de indicador 0 devido à grande incerteza em relação às amostras de teor de cinzas de baixo valor. No caso da Camada M1, a elevada incerteza pertencente as amostras de alto teor de cinza fizeram com que apenas o indicador 1 fosse distribuído entre as amostras, e novamente, independente do peso calculado para cada amostra, o

valor resultante da KIm será sempre 1. Assim, para o atributo Cz_h da Camada M1, todos os blocos possuem 100 % de probabilidade de serem inferiores ao valor do limite z_9 igual a 69,4 %. Dessa maneira, no momento do cálculo do valor do atributo teor de cinzas baseado nas probabilidades calculadas por KIm, nenhum bloco irá apresentar um valor superior a 69,4 % de cinzas.

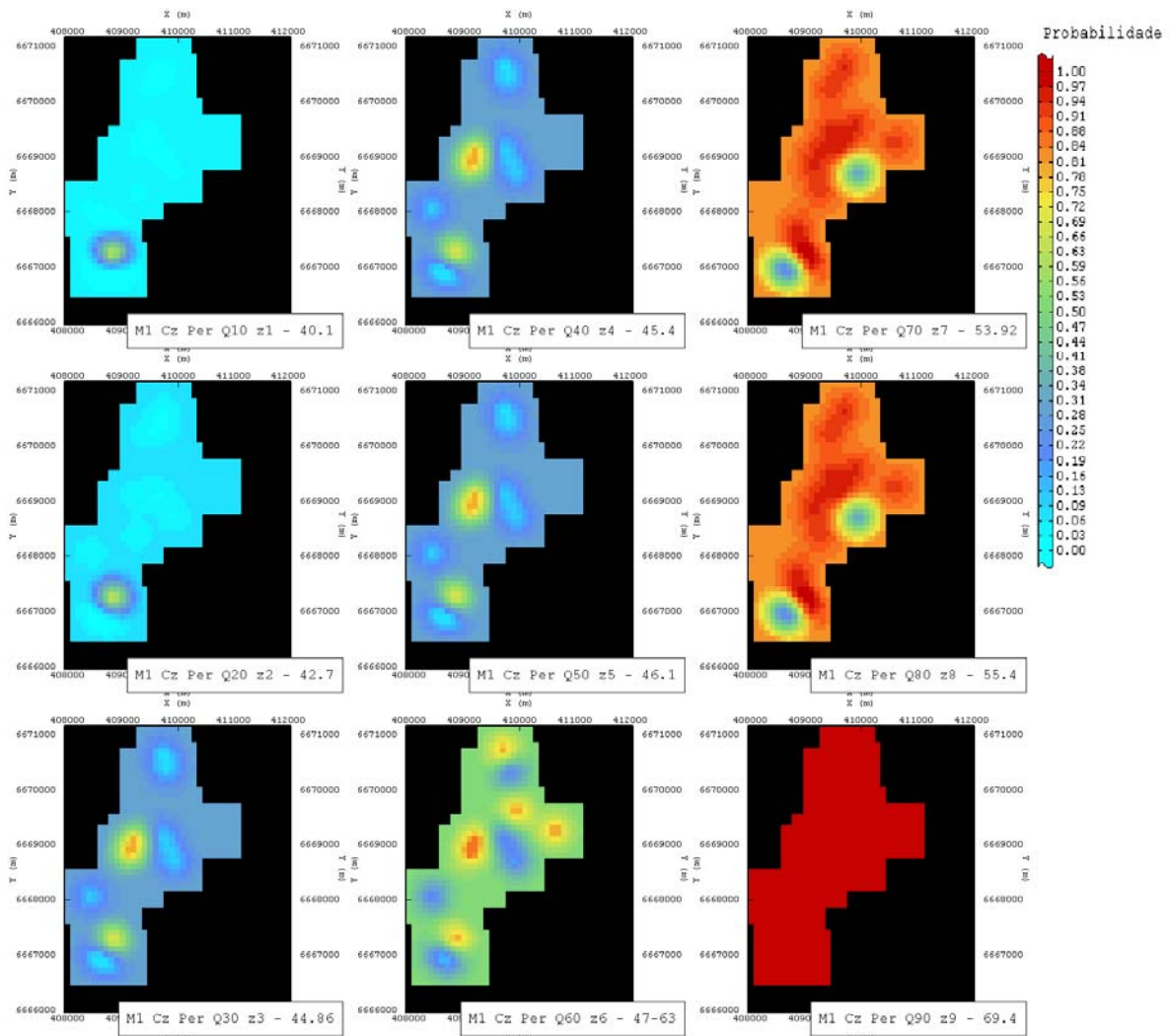


Figura 5.54: Mapas de probabilidades calculadas por KIm para o atributo Cz_h da Camada M1, onde cada mapa representa a chance que o valor do atributo Cz_h de cada bloco possui de ser inferior ao limite z_k .

Dando continuidade ao trabalho e convertendo os nove mapas de probabilidades do atributo Cz_h em um valor médio, foi obtida a estimativa E-type (Figura 5.55). Apresenta-se junto a estimativa por KO para o atributo Cz_r .

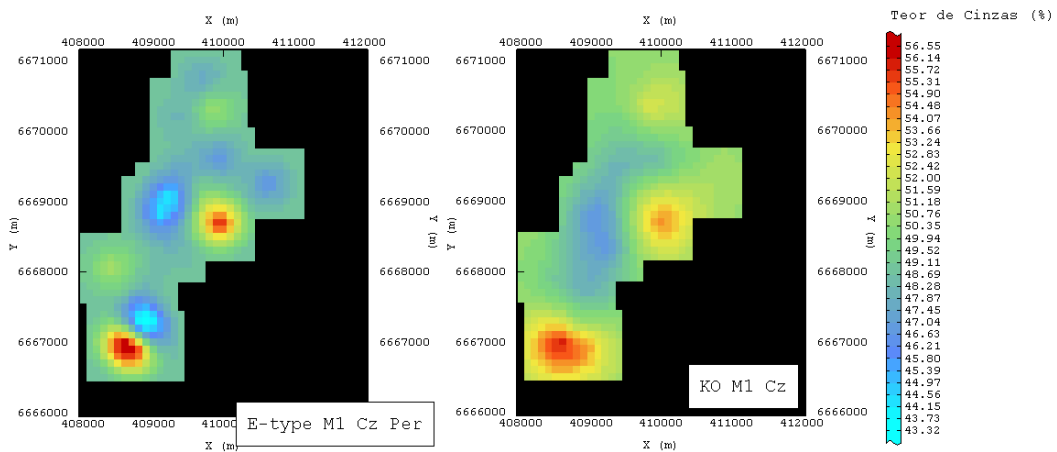


Figura 5.55: Estimativa E-type do atributo Cz_h (mapa a esquerda) e estimativa por KO para o atributo Cz_r (mapa a direita), ambos da Camada M1.

A comparação visual de ambas as estimativas mostra um comportamento semelhante ao encontrado nas estimativas do mesmo atributo para a Camada S, isto é, enquanto que o resultado da KO apresenta uma distribuição espacial mais suave, a KIm tendeu a destacar os locais de valores extremos (altos e baixos).

Se observarmos a localização dos valores máximos e mínimos vemos que as regiões de máximos valores de teor de cinzas tenderam a permanecer nos mesmo locais para ambas as estimativas. No entanto, a estimativa por KIm, gerou dois setores de baixo valor de teor de cinzas localizados em regiões de valor intermediário de acordo com o resultado da KO.

A Figura 5.56 mostra os mapas dos erros absoluto e porcentual obtidos pela comparação entre as estimativas.

De acordo com a escala de cores, as maiores ocorrências de blocos com alto desvio de estimativa foram nas regiões com tons de azul e verde azulado, que são exatamente os locais onde a KIm estimou os menores valores de cinzas.

Outras conclusões em relação às estimativas e erros calculados podem ser tiradas mediante a observação dos histogramas apresentados na Figura 5.57.

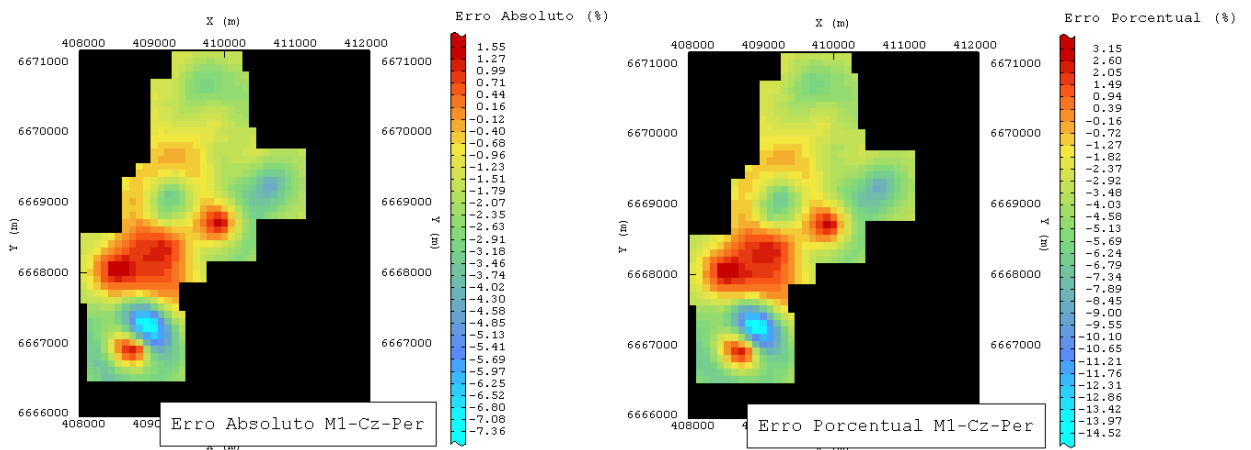


Figura 5.56: Erro absoluto (mapa da esquerda) e erro porcentual (mapa da direita) da estimativa do atributo Cz_h da Camada M1 por KIm em comparação com o resultado da KO para o atributo Cz_r .

Ambos os histogramas das estimativas mostram um comportamento simétrico e médias bastante próximas; porém, a KIm apresentou, mesmo em pequena quantidade, valores extremos que não chegaram a afetar significativamente o desvio padrão da estimativa, tornando os desvios padrões bastante semelhantes.

Quanto aos erros calculados, foi observado que houve uma maior incidência de erros negativos chegando a alcançar valores de -14 % e, portanto houve a geração de blocos cujo desvio da estimativa excedeu os limites impostos. A ocorrência de um maior número de blocos com erros negativos foi devido a estimativa, por parte da KIm, de teores de cinzas com valor inferior ao estimado por KO. A maior ocorrência de blocos de alto desvio irão se localizar nas áreas onde a KIm estimou baixos teores de cinza.

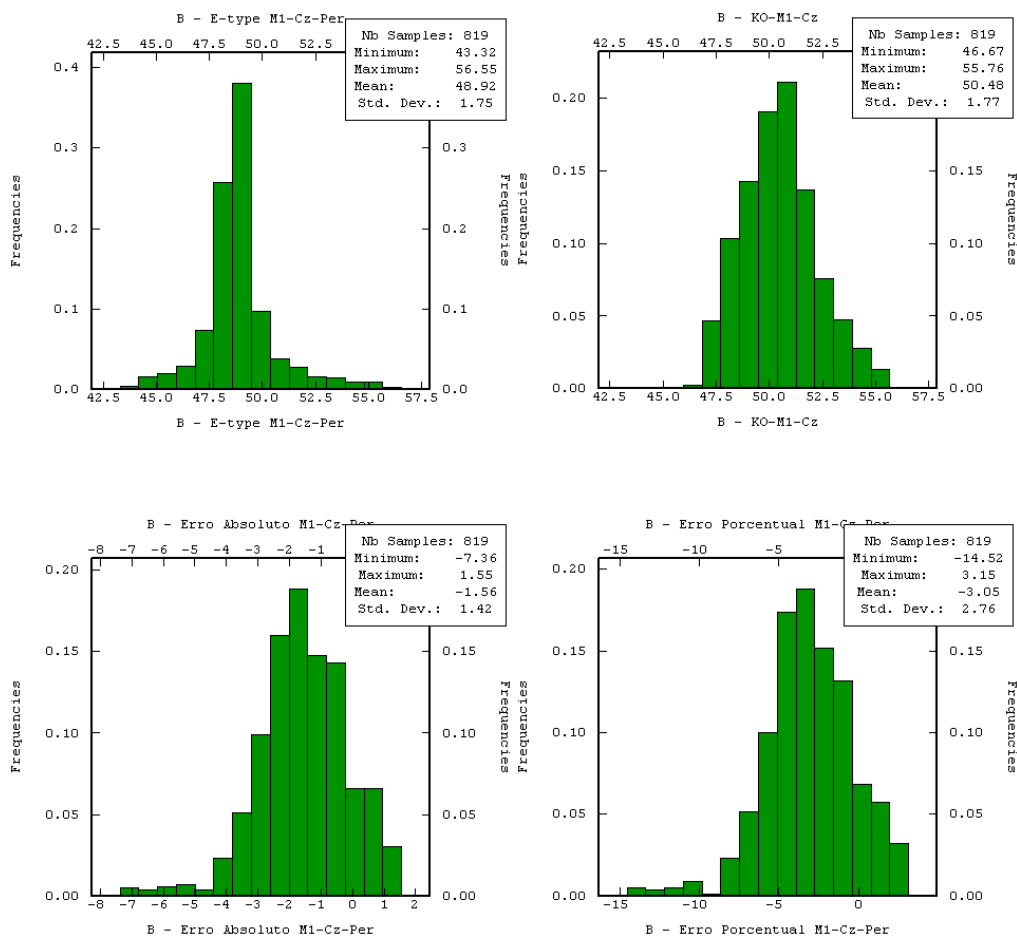


Figura 5.57: Histogramas das estimativas por E-type para Cz_h e KO para Cz_r (canto superior esquerdo e direito respectivamente) e histogramas dos erros absoluto e percentual (cantos inferiores esquerdo e direito respectivamente) referentes a Camada M1.

A localização dos blocos de desvio excessivo e o gráfico de dispersão das estimativas são mostrados na Figura 5.58.

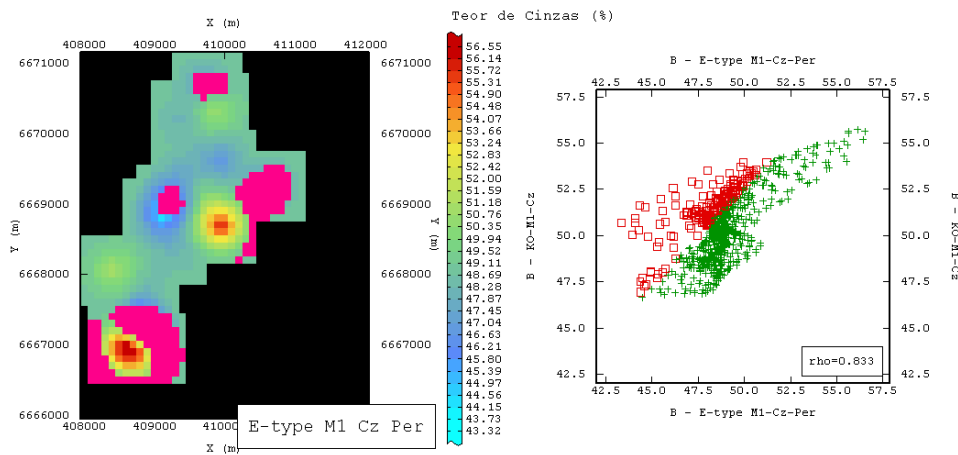


Figura 5.58: Mapa da estimativa do atributo Cz_h por KIm para a Camada M1 cujos blocos com erro fora dos limites estabelecidos se apresentam destacados pela cor magenta e gráfico de dispersão apresentando as estimativas por KIm no eixo x e por KO no eixo y, comparando os valores e destacando em vermelho os blocos estimados por KIm com erro excessivo.

O mapa da Figura 5.58 mostra que os blocos cujo desvio excedeu os limites de -5 % e 5 % se apresentaram distribuídos em diferentes locais em toda a área sob análise. Esses locais de alto erro, são exatamente aqueles que a KIm estimou valores de teor de cinzas inferiores aqueles estimados pela KO.

Mesmo com a estimativa de blocos com desvio fora dos limites, o resultado da KIm foi positivo, pois 79 % dos blocos estimados ainda se encontram dentro do limite estabelecido.

5.3.2.3 Camada M2

A terceira camada em análise é aquela denominada M2 e, assim como para as duas camadas precedentes, foi feita a estimativa por KIm para os atributos ρ_h e Cz_h . A Figura 5.59 apresentam os mapas de probabilidades, calculadas por KIm, de cada bloco ser inferior aos limites z_k usados para a distribuição dos indicadores.

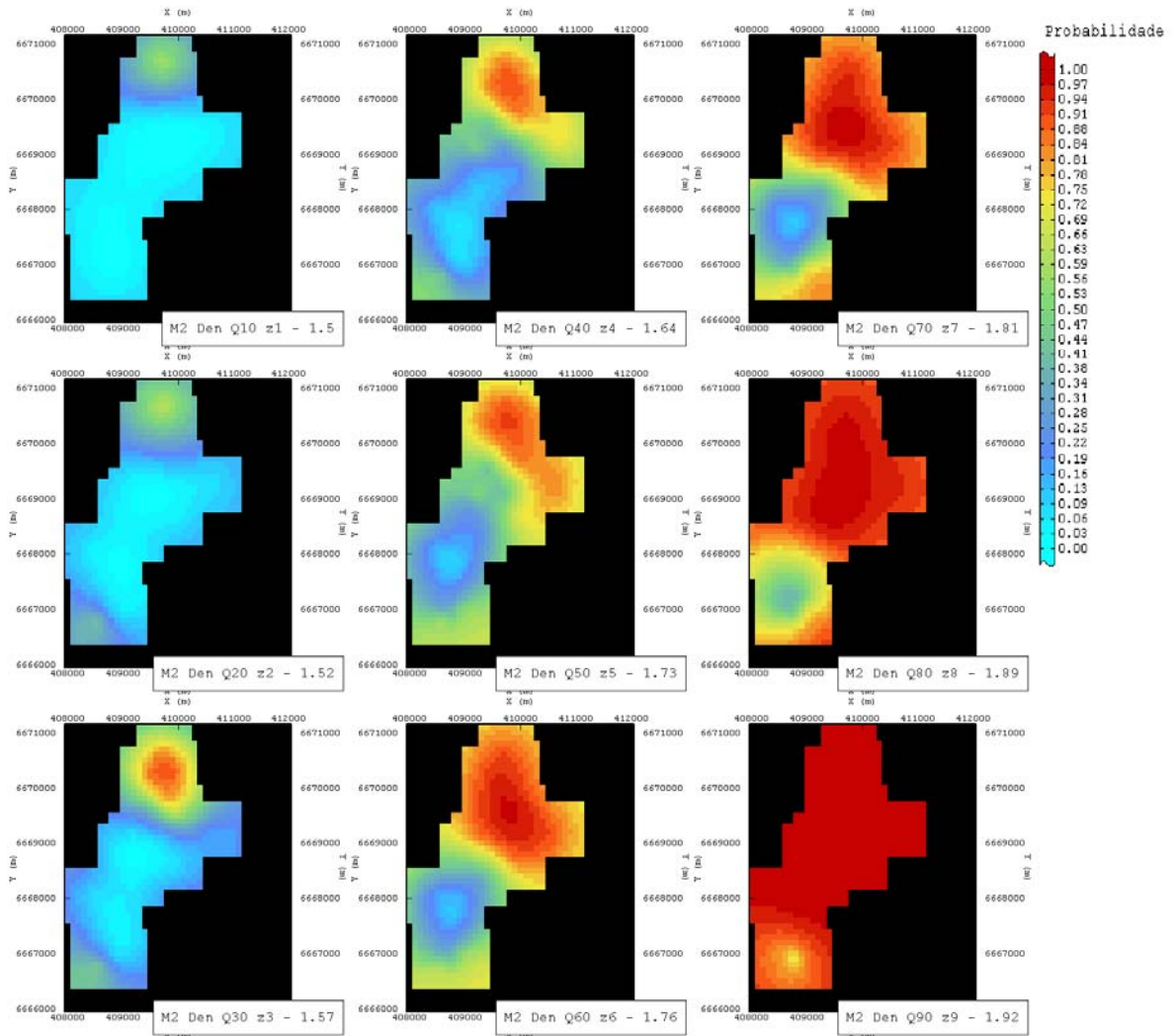


Figura 5.59: Mapas de probabilidades calculadas por KIm para o atributo ρ_h da Camada M2, onde cada mapa representa a chance que o valor do atributo ρ_h de cada bloco possui de ser inferior ao limite z_k .

Por meio das nove probabilidades mostradas na Figura 5.59, podemos notar que a distribuição das densidades deve se comportar da seguinte maneira, os carvões de melhor qualidade (baixa densidade) irão se localizar nas regiões norte e centro da Área B3 enquanto que os carvões de densidade mais alta e, portanto, de menor qualidade se concentrarão na região sul.

A estimativa E-type do atributo ρ_h da Camada M2, baseado nas nove probabilidades apresentadas na figura anterior é apresentada na Figura 5.60 ao lado do resultado da estimativa KO do atributo ρ_r .

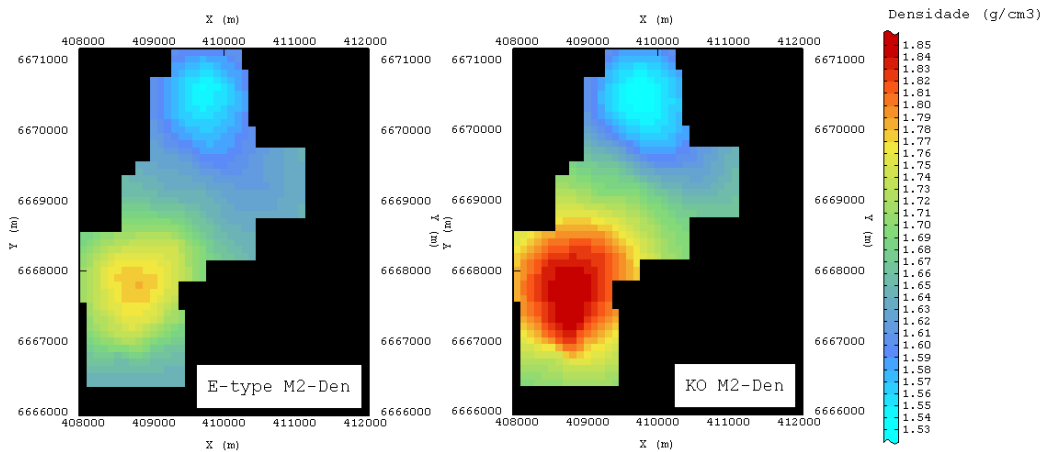


Figura 5.60: Estimativa E-type do atributo ρ_h (mapa a esquerda) e estimativa por KO para o atributo ρ_r (mapa a direita), ambos da Camada M2.

Os mapas da Figura 5.60 mostram que ambos apresentaram a mesma feição global, isto é, blocos de baixa densidade foram estimados na região norte e blocos de alta densidade próximos à região sul. É de se notar, visualmente, que as estimativas apresentaram uma mesma magnitude de valores de baixa densidade, enquanto que no outro extremo, a KO alcançou valores mais altos de densidade em comparação com o resultado da KIm.

Dando continuidade a avaliação da densidade da Camada M2, a Figura 5.61 mostra os mapas com a distribuição dos erros absoluto e porcentual resultante da comparação entre estimativas.

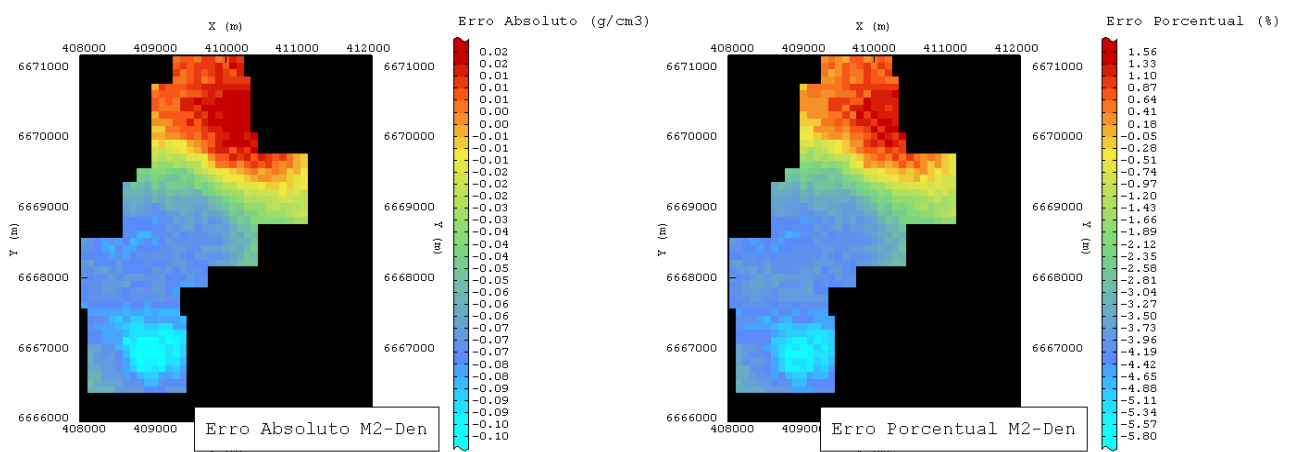


Figura 5.61: Erro absoluto (mapa da esquerda) e erro porcentual (mapa da direita) da estimativa do atributo ρ_h da Camada M2 por KIm em comparação com o resultado da KO para o atributo ρ_r .

Os mapas da Figura 5.61 mostram que os blocos de maior desvio se concentraram nas regiões norte e sul, principalmente na região sul aonde alguns blocos chegaram a alcançar um desvio que excedeu o limite de -5 % e 5 %.

A Figura 5.62 trás os histogramas das estimativas por KO e KIm e dos erros absolto e porcentual.

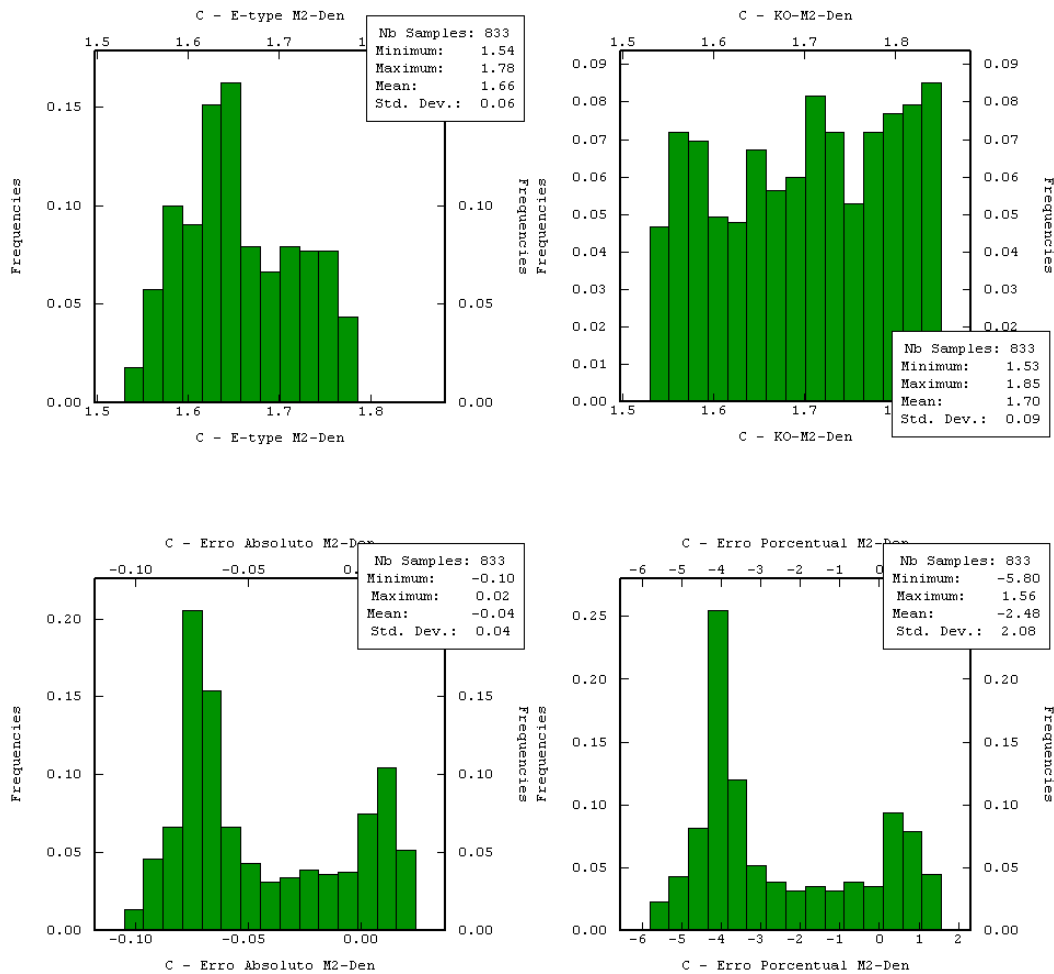


Figura 5.62: Histogramas das estimativas por E-type para ρ_h e KO para ρ_r (canto superior esquerdo e direito respectivamente) e histogramas dos erros absolto e porcentual (cantos inferiores esquerdo e direito respectivamente) referentes a Camada M2.

Os histogramas das estimativas apresentaram comportamentos diferentes, enquanto que a estimativa por KIm gerou um histograma que tem seu comportamento entre simétrico e assimétrico positivo centrado no valor médio de 1,66 g/cm³, o histograma dos resultados da KO não mostra nenhum

comportamento definido e sim uma igual quantidade de blocos para todos os valores (distribuição uniforme). Por essa razão, o desvio padrão das estimativas por KO são mais elevados em comparação com a KIm.

As observações feitas com a inspeção visual dos mapas da Figura 5.60 são corroboradas pelos dois histogramas das estimativas da Figura 5.62. Tais observações afirmam que o resultado da KIm chegou a gerar valores extremos como a KO mas em menor quantidade, principalmente em relação aos valores de alta densidade.

Quanto aos histogramas dos erros, observa-se que a maioria deles se concentrou nos valores negativos. A KIm tendeu a gerar valores inferiores aos calculados pela KO para um mesmo bloco e considerando os valores máximos e mínimos das estimativas, nota-se que os valores mínimos são próximos, enquanto que o máximo da estimativa por KIm é inferior ao valor resultante da KO.

O histograma do erro porcentual da estimativa mostra que houve uma pequena incidência de blocos com desvio excedente que alcançou valores de até -5,8 %. Tais blocos são apresentados em destaque na Figura 5.63.

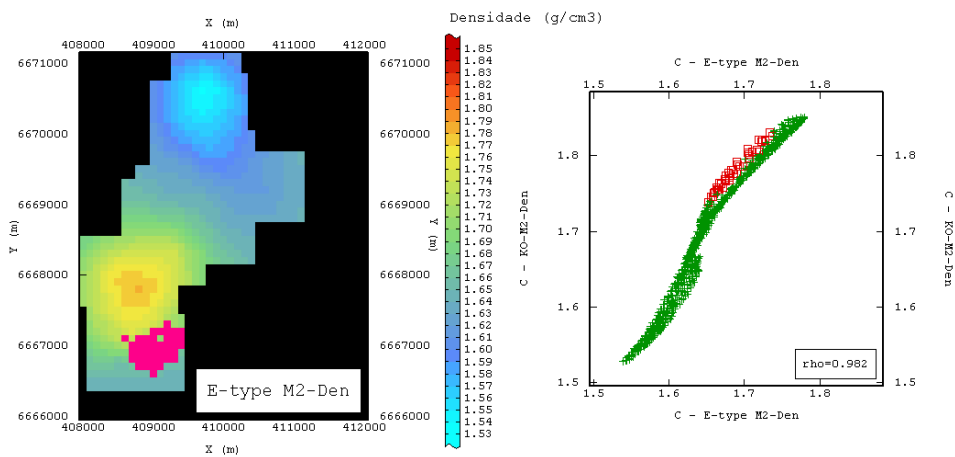


Figura 5.63: Mapa da estimativa do atributo ρ_h por KIm para a Camada M2 cujos blocos com erro fora dos limites estabelecidos se apresentam destacados pela cor magenta e gráfico de dispersão apresentando as estimativas por KIm no eixo x e por KO no eixo y, comparando os valores e destacando em vermelho os blocos estimados por KIm com erro excessivo.

Apesar da ocorrência de desvio excessivo em alguns blocos, a comparação das estimativas comprovou a eficácia da estimativa de densidade com dados secundários para a Camada M2, pois 95 % dos blocos apresentaram valores estimados dentro dos limites estabelecidos.

O seguinte passo foi a análise do atributo teor de cinzas cujas probabilidades de serem inferiores aos limites z_k calculadas por KIm se encontram na Figura 5.64.

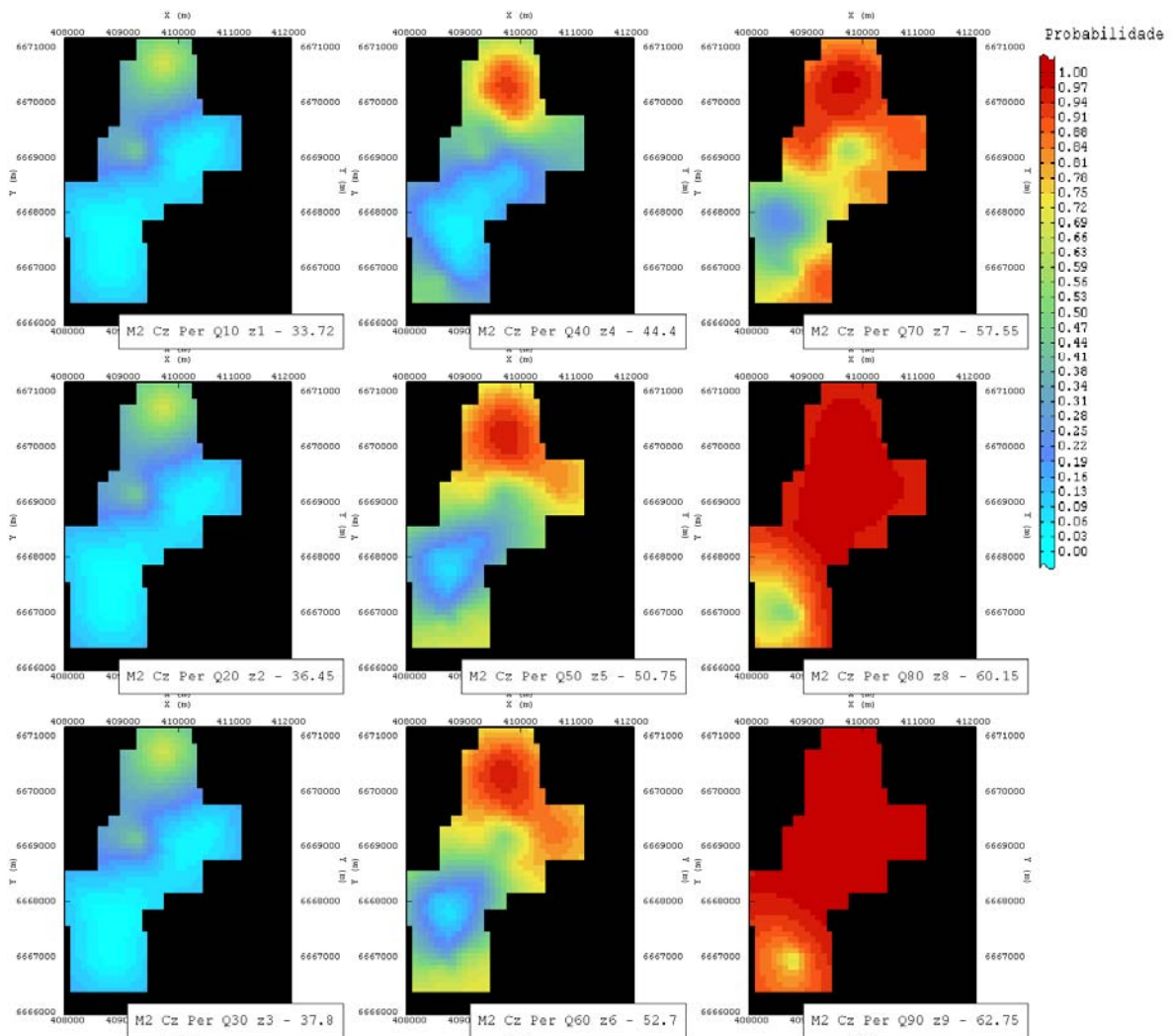


Figura 5.64: Mapas de probabilidades calculadas por KIm para o atributo Cz_h da Camada M2, onde cada mapa representa a chance que o valor do atributo Cz_h de cada bloco possui de ser inferior ao limite z_k .

Como era de se esperar, devido ao comportamento proporcional entre densidade e teor de cinzas em carvões, as probabilidades mostradas na Figura 5.64

mostram que a qualidade dos carvões tende a aumentar partindo da região sul indo em direção a região norte, isto é, os maiores teores de cinzas se concentrarão na parte sul e os menores na parte norte da Área B3.

A conversão das probabilidades mostradas na Figura 5.64 pelo programa POSTIK resultaram na estimativa E-type, que é mostrada na Figura 5.65 ao lado do resultado da KO.

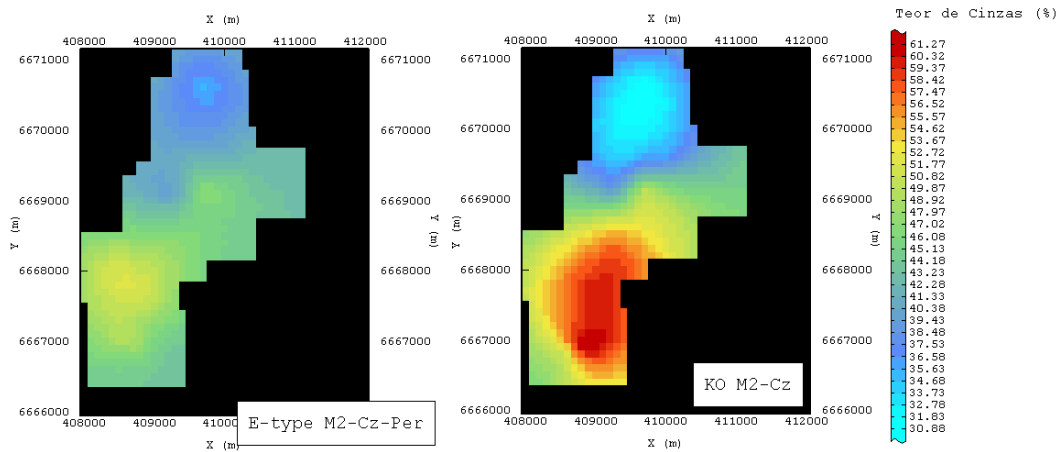


Figura 5.65: Estimativa E-type do atributo Cz_h (mapa a esquerda) e estimativa por KO para o atributo Cz_r (mapa a direita), ambos da Camada M2.

O fenômeno ocorrido na estimativa de densidade da Camada M2 se mostrou mais destacada na avaliação dos teores de cinzas. Ambas as estimativas previram o mesmo comportamento global, porém, os resultados da KO geram valores mais extremos (menor suavização) que a KIm. A magnitude dessa diferença pode ser mais bem vista nos mapas dos erros absoluto e percentual apresentados na Figura 5.66.

Os mapas da Figura 5.66 mostram uma grande incidência de blocos com elevado desvio nas regiões norte e sul da área, principalmente na região sul onde alguns blocos alcançaram erros de até 25 %. Os histogramas da Figura 5.67 comparam as estimativas e mostram o quão errôneos foram os blocos de alto desvio.

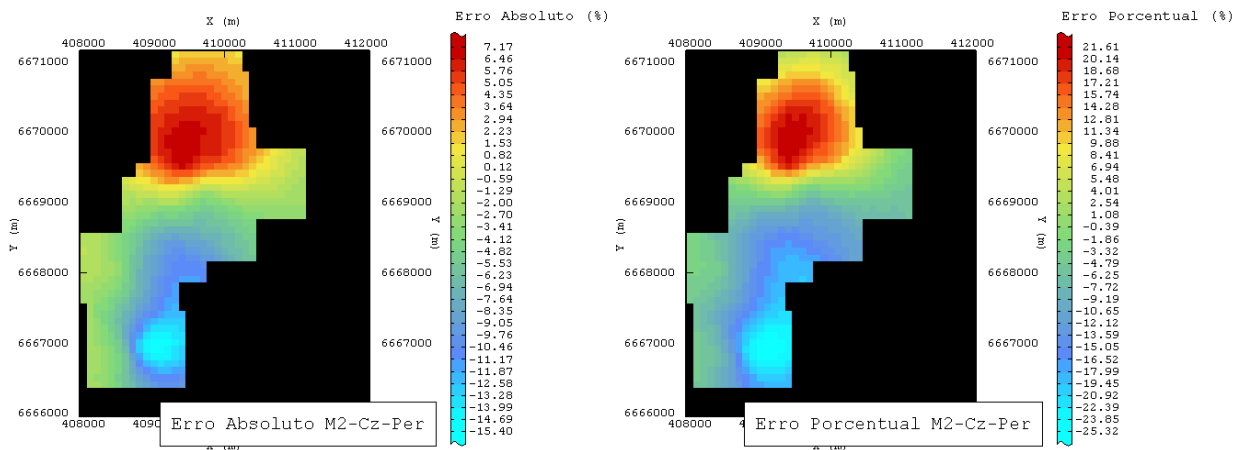


Figura 5.66: Erro absoluto (mapa da esquerda) e erro percentual (mapa da direita) da estimativa do atributo Cz_h da Camada M2 por KIm em comparação com o resultado da KO para o atributo Cz_r .

Assim como foi observado na estimativa de densidade da Camada M2, as distribuições dos valores dos blocos calculados pela KO se mostraram bastante irregulares e sem nenhuma forma de distribuição notável. Essa irregularidade nas estimativas provocou o aparecimento de um desvio padrão duas vezes superior aquele obtido pela KIm. Em relação aos resultados da KIm, obtivemos um histograma de comportamento simétrico centrado no valor médio de 44,07 % (inferior a média obtida pela KO igual a 46,55 %).

A comparação dos histogramas resulta nas mesmas conclusões tiradas para a análise de densidade da Camada M2. A estimativa por KIm foi mais contida (suavizada) que a KO, apresentado valores máximos e mínimos dentro de uma faixa mais restrita que aquela apresentada pela KO.

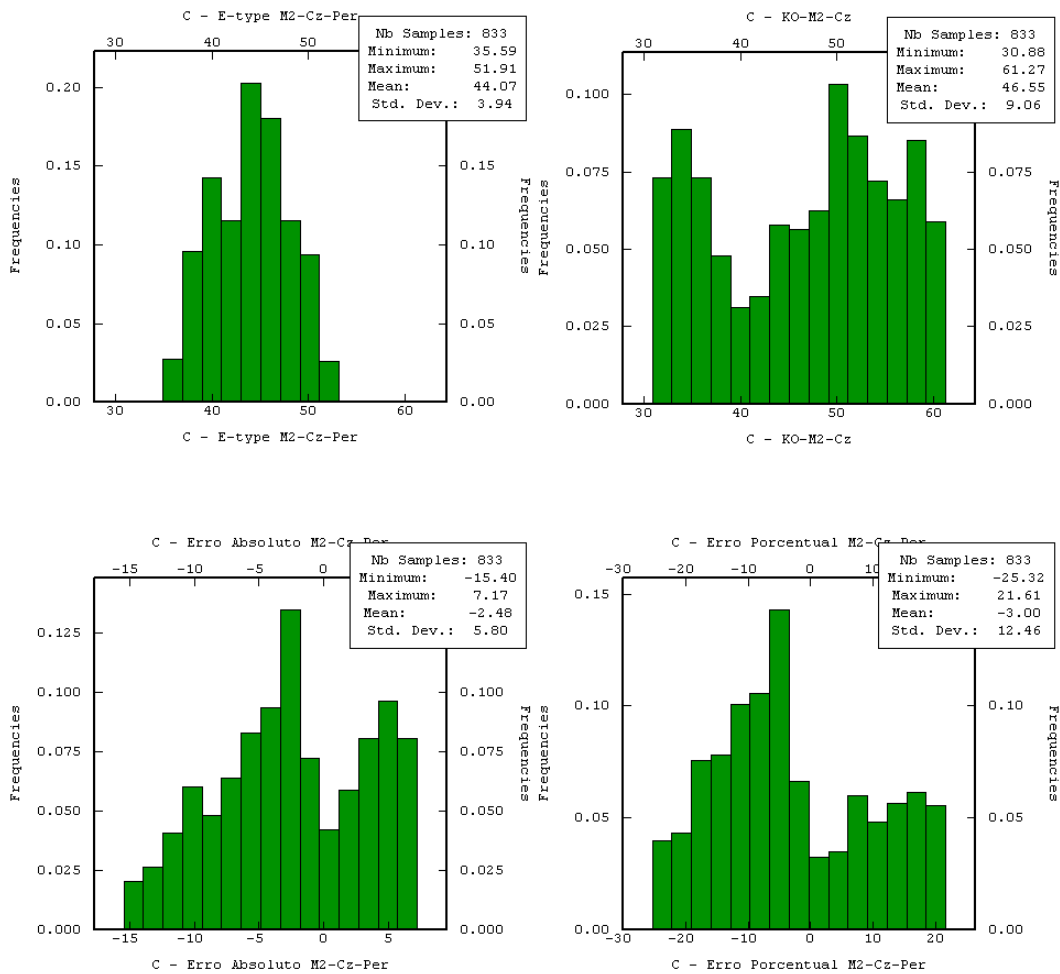


Figura 0.67: Histogramas das estimativas por E-type para Cz_h e KO para Cz_r (canto superior esquerdo e direito respectivamente) e histogramas dos erros absoluto e porcentual (cantos inferiores esquerdo e direito respectivamente) referentes a Camada M2.

A estatística do erro porcentual, que mesmo com o elevado número de blocos com desvio excedente, mostra uma média que ficou dentro dos limites estabelecidos. A localização dos blocos de elevado desvio se apresenta em destaque na Figura 5.68.

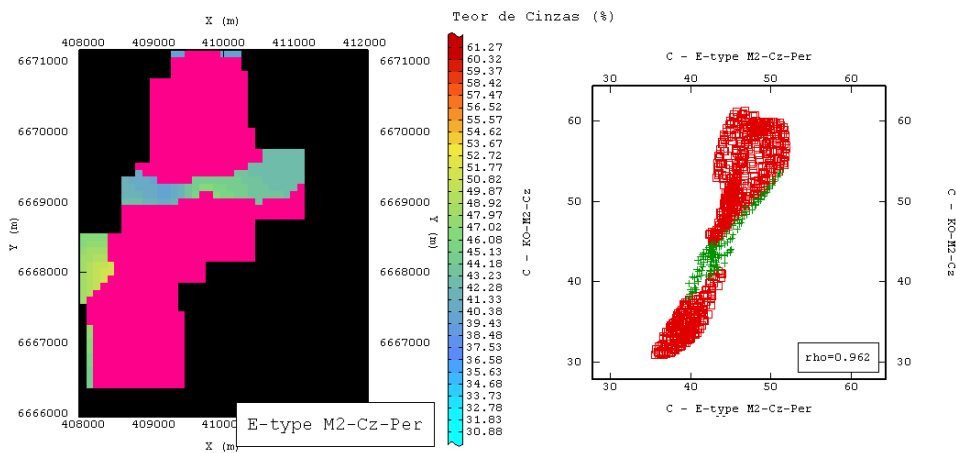


Figura 5.68: Mapa da estimativa do atributo Cz_h por KIm para a Camada M2 cujos blocos com erro fora dos limites estabelecidos se apresentam destacados pela cor magenta e gráfico de dispersão apresentando as estimativas por KIm no eixo x e por KO no eixo y, comparando os valores e destacando em vermelho os blocos estimados por KIm com erro excessivo.

Dos 833 blocos estimados, apenas 19 % deles apresentaram valores de teor de cinzas dentro do limite de -5% e 5% e a grande maioria de tais blocos de pouco desvio apresenta valores intermediários de cinzas para a Camada M2, isto é, entre 44% e 47% .

Um dos principais motivos para a ocorrência de elevado número de blocos com erro excessivo foi a falta de amostras suficientes para construir semivariogramas experimentais que reproduzissem com fidelidade uma camada com tamanha variação de valores. O reduzido número de amostras, que ficou menor ainda com a distribuição de indicadores considerando os limites de restrição, aumentou a dificuldade de construir um semivariograma médio (aquele cujos dados foram codificados de acordo com o limite z_5) representativo para os indicadores e conseqüentemente as proporções obtidas para os parâmetros C_0 e C podem não condizer com a realidade e realmente, os modelos que menos se aderiram aos semivariogramas dos limites z_k foram os do atributo teor de cinzas da Camada M2.

Vale lembrar, que no momento da estimativa por KO, são considerados todos os dados disponíveis e, portanto se geram estimativas restringindo-se apenas aos valores máximos e mínimos das amostras. Na aplicação da KIm, só é obtido um valor de atributo após se calcular uma média (E-type) que envolve as

probabilidades estimadas pela krigagem dos indicadores. Como a distribuição de indicadores com limites de restrição tende a descartar amostras com altos limites restritivos (torná-las -999), que no nosso caso, são aqueles de valores de teor de cinzas máximo e mínimo, as probabilidades calculadas tendem a se concentrar nos valores intermediários do atributo, isto é, a KIm mostra que grande parte dos blocos possui uma maior probabilidade de ter seu valor em torno da média das amostras.

Uma observação importante é a comparação entre as amostras obtidas para as camadas S, M1 e M2. A Camada M2 foi aquela que apresentou as amostras de valores mais extremos, principalmente em relação aos valores mínimos de densidade e teor de cinzas. As outras duas camadas tiveram valores amostrais mais restritos, próximos da média. O resultado da KIm para as Camadas S e M1 também foram afetados pela exclusão de valores com altos limites de restrição, porém, como a estimativa por KO não usou valores muito diferentes da média, a incidência de blocos de desvio excessivo não foi elevado. Já, em relação às estimativas da Camada M2, que possui uma alta variabilidade amostral, o resultado da KO manteve essa variabilidade, pois considerou todos os dados na estimativa. A aplicação da KIm desconsiderou alguns dados (considerados -999 dada a incerteza a respeito de seu real valor), e assim diminuiu a variabilidade dos dados usados na krigagem dos indicadores, resultando em blocos estimados com uma variância inferior e portanto valores menos extremos que a KO.

5.3.2.4 Camada I1

Finalizando a etapa de avaliação das camadas de carvão da Área B3, esse item mostra as estimativas e discussões sobre a aplicação da KIm com dados secundário para estimar os atributos densidade e teor de cinza da Camada I1.

Assim como foi feito para as três camadas precedentes, o trabalho de estimativa iniciou com o uso da KIm para estimar as probabilidades que cada bloco possui de ser inferior aos limites z_k . Como foram utilizados nove limites z_k , foram calculadas nove probabilidades, cujos mapas mostrando a distribuição das mesmas se encontram na Figura 5.69.

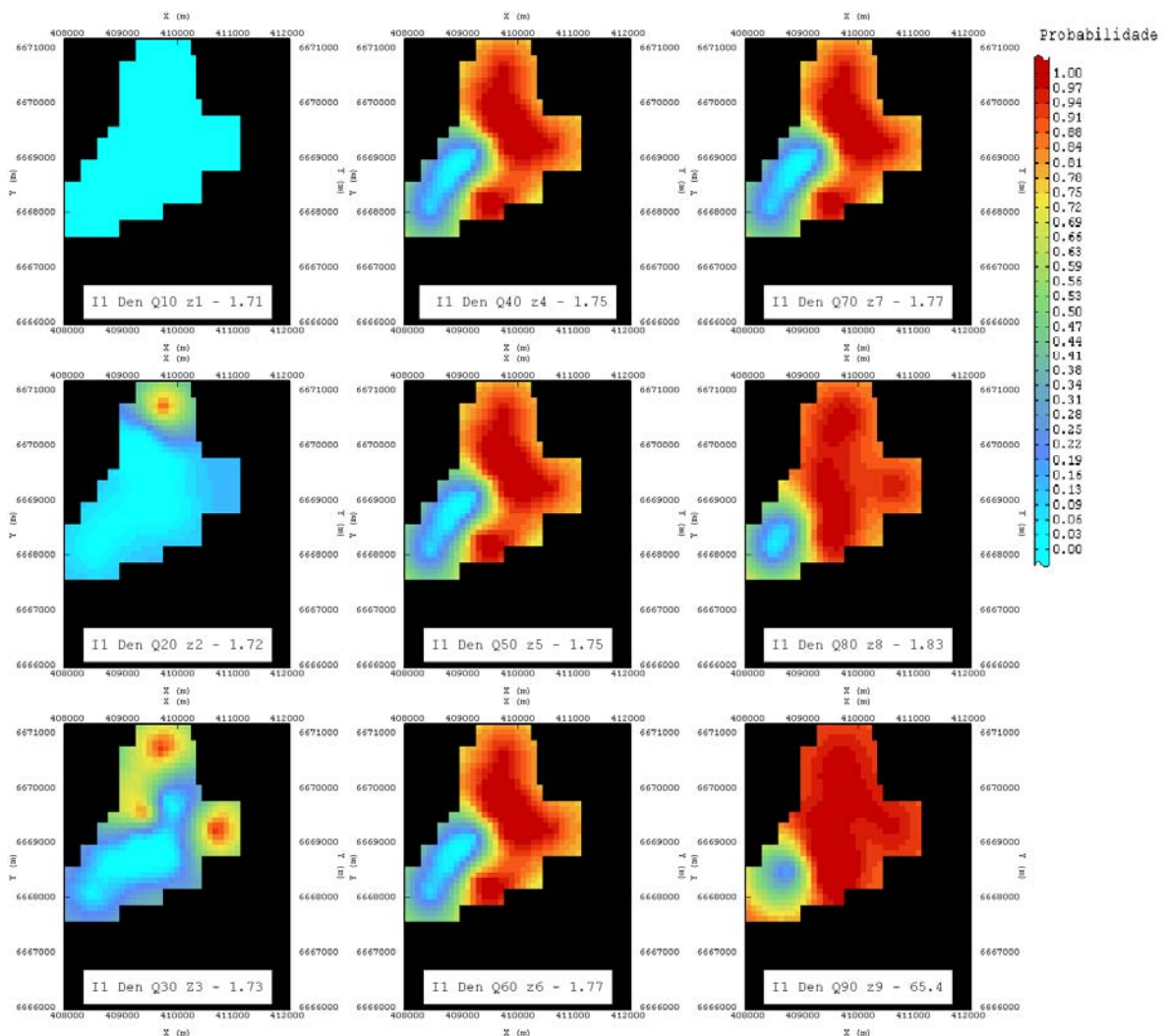


Figura 5.69: Mapas de probabilidades calculadas por KIm para o atributo ρ_h da Camada I1, onde cada mapa representa a chance que o valor do atributo ρ_h de cada bloco possui de ser inferior ao limite z_k .

Os mapas com as distribuições de probabilidade mostrados na Figura 5.69 indicam que os carvões de menor qualidade e, portanto densidade elevada, irão se localizar na região sudoeste da área, pois esta área apresenta poucas chances de apresentar carvões com densidades inferiores de até mesmo o mais alto dos limites z_k igual a 1,95 g/cm³. Todo o resto da área possui grandes chances de apresentar carvões de em média 1,77 g/cm³.

A observação das probabilidades calculadas para os indicadores distribuídos de acordo com o limite z_1 mostra que os dados que alimentaram o sistema de krigagens foi composto apenas do indicador zero, fato que irá limitar a

estimativa do valor médio do atributo usando somente valores superiores a 1,71 g/cm³.

A conversão das nove estimativas de probabilidade de cada bloco em um valor médio foi feito através da execução do programa POSTIK. O resultado é apresentado na Figura 5.70, juntamente com a estimativa por KO para o atributo ρ_r da Camada I1 com o objetivo de uma comparação visual.

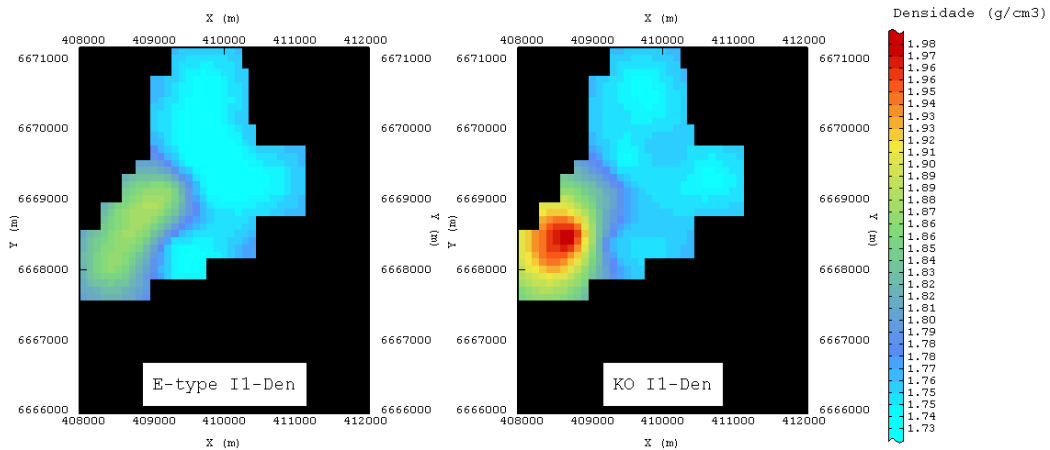


Figura 5.70: Estimativa E-type do atributo ρ_h (mapa a esquerda) e estimativa por KO para o atributo ρ_r (mapa a direita), ambos da Camada I1.

A distribuição das estimativas na Figura 5.70 mostra que ambas apresentam a mesma tendência de crescimento das densidades na área e um comportamento global semelhante, isto é, visualmente, a continuidade espacial dos valores estimados pela KIm é muito semelhante àquela apresentada pelo resultado da KO.

Em relação aos valores, na região sudoeste, os valores estimados pela KO alcançaram valores de densidade mais elevados que a KIm, enquanto que para o resto da área os valores obtidos pelas duas estimativas foram muito semelhantes. Logo, se espera uma maior concentração de blocos com elevado desvio na região sudoeste da área.

Os mapas com as distribuições dos erros absoluto e porcentual das comparações das estimativas mostradas acima se encontram na Figura 5.71.

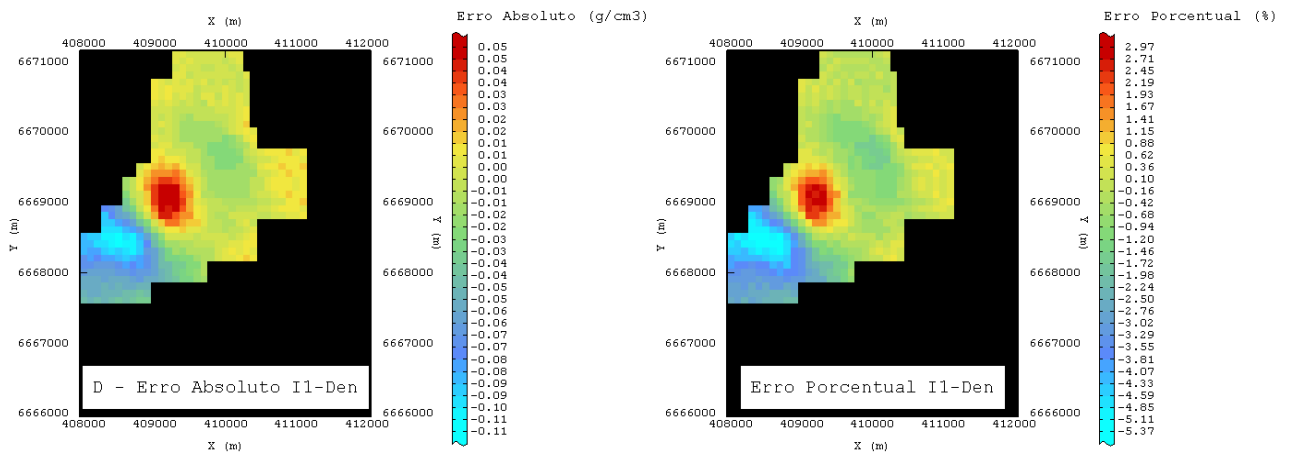


Figura 5.71: Erro absoluto (mapa da esquerda) e erro percentual (mapa da direita) da estimativa do atributo ρ_h da Camada I1 por KIm em comparação com o resultado da KO para o atributo ρ_r .

A escala de erros percentuais da Figura 5.71 mostra que a maior concentração de erros se localiza na região sudoeste como foi previsto anteriormente e o caráter negativo dos desvios mais distantes de zero indicam que a KIm não estimou valores tão extremos para essa área como a KO.

A observação dos histogramas presentes na Figura 5.72 mostra que, apesar da presença de blocos cujos erros excederam os limites, a sua ocorrência foi de pequena quantidade.

Os histogramas de ambas as estimativas mostram uma forte assimetria positiva, pois ambos os métodos geraram muitos valores em torno de 1,75 e 1,79 g/cm³ que ocuparam quase que a totalidade da área fazendo com que ambas as médias ficassem torno do valor 1,78 g/cm³. Os valores estimados de alta densidade ocorreram em menor quantidade e não chegaram a afetar a média.

Os histogramas dos erros mostram que ambos tenderam a zero, principalmente o erro absoluto, porém houveram alguns poucos blocos com desvio excessivo e estes estão localizados no mapa da Figura 5.73.

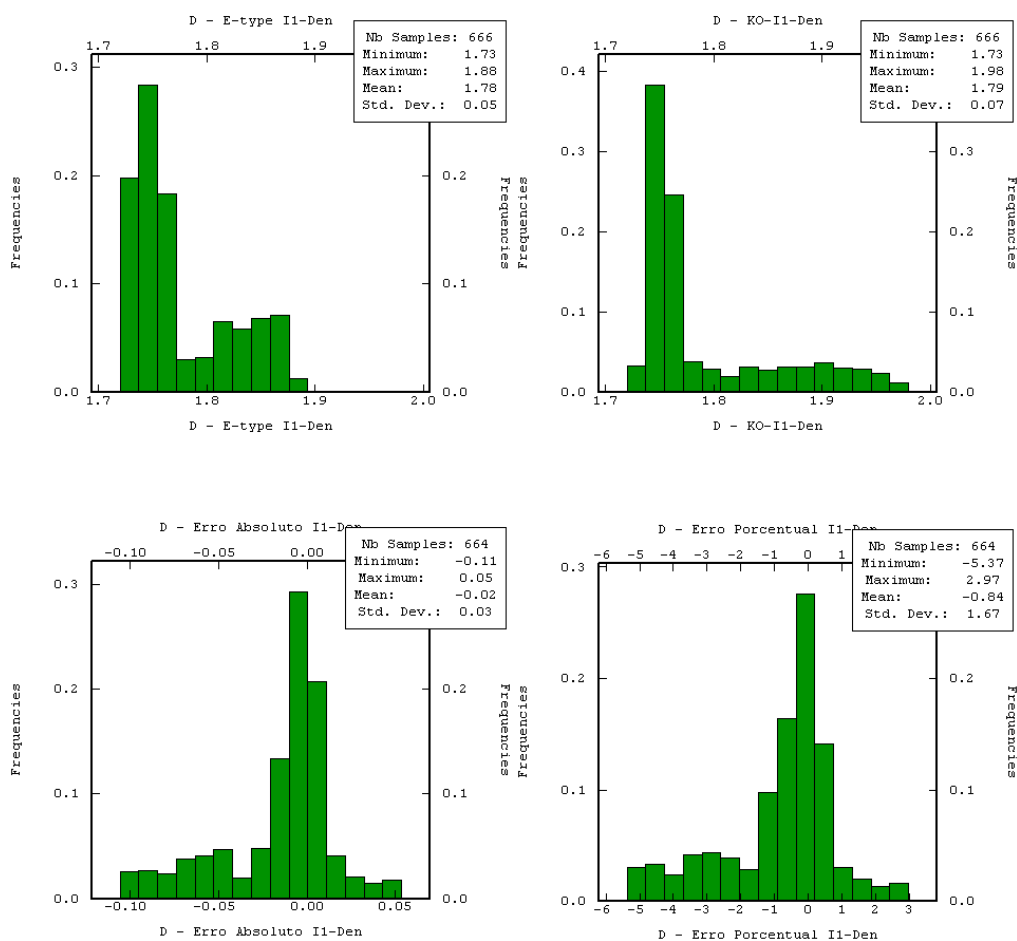


Figura 5.72: Histogramas das estimativas por E-type para ρ_h e KO para ρ_r (canto superior esquerdo e direito respectivamente) e histogramas dos erros absoluto e percentual (cantos inferiores esquerdo e direito respectivamente) referentes a Camada I1.

Conforme visto na Figura 5.73, os blocos de desvio excessivo se localizam na área em que ambas as estimativas por KO e KIm apresentaram altos valores de densidade, porém, a KO resultou em blocos de valor mais elevado que a KIm. Mesmo com a ocorrência de erros fora dos limites, 97 % dos blocos estimados pela KIm estão dentro do limite estabelecido.

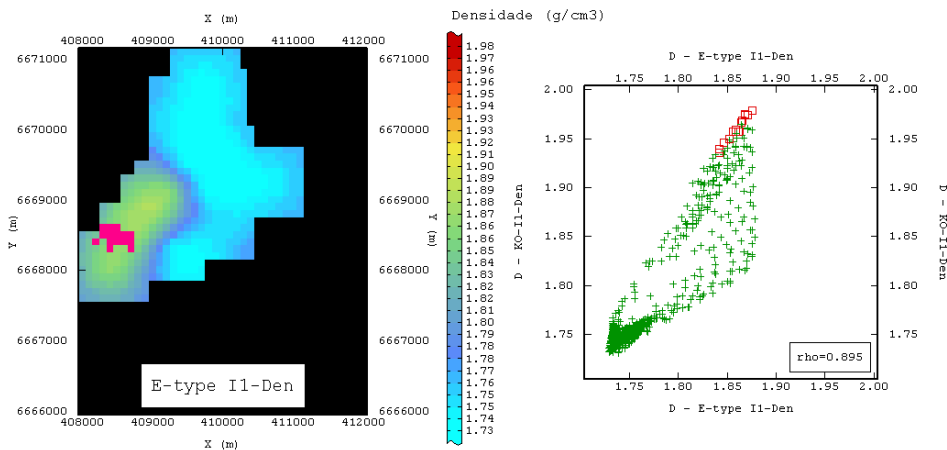


Figura 5.73: Mapa da estimativa do atributo ρ_h por KIm para a Camada I1 cujos blocos com erro fora dos limites estabelecidos se apresentam destacados pela cor magenta e gráfico de dispersão apresentando as estimativas por KIm no eixo x e por KO no eixo y, comparando os valores e destacando em vermelho os blocos estimados por KIm com erro excessivo.

E finalizando as estimativas da Camada I1, a Figura 5.74 mostra os mapas com as distribuições de probabilidades calculadas por KIm para o atributo Cz_h da Camada I1. Como já foi enfatizado antes, as probabilidades representam a chance que cada bloco possui de ter o valor do atributo sob análise inferior ao limite z_k que foi base da distribuição dos indicadores.

Novamente, o comportamento proporcional que densidades e teor de cinza exibem é visível, fazendo com que se possa esperar os mais altos teores de cinza, e conseqüentemente, um carvão de menor qualidade na região sudoeste e todo o resto da área teores de cinzas em torno de 52 % a 54 %.

Assim como ocorrido nas estimativas de probabilidade de densidade, a distribuição dos indicadores foi afetada pelo reduzido número de dados disponíveis. Essa deficiência no número de informações fizeram com que a distribuição dos indicadores z_1 e z_2 incluísse apenas o indicador 0. Portanto, no momento da conversão das probabilidades da Figura 5.74 em um valor médio para o atributo teor de cinza, a chance de termos blocos com valor inferior a 50,1 % de cinzas é nula, pois as probabilidades calculadas por KIm afirmam isso.

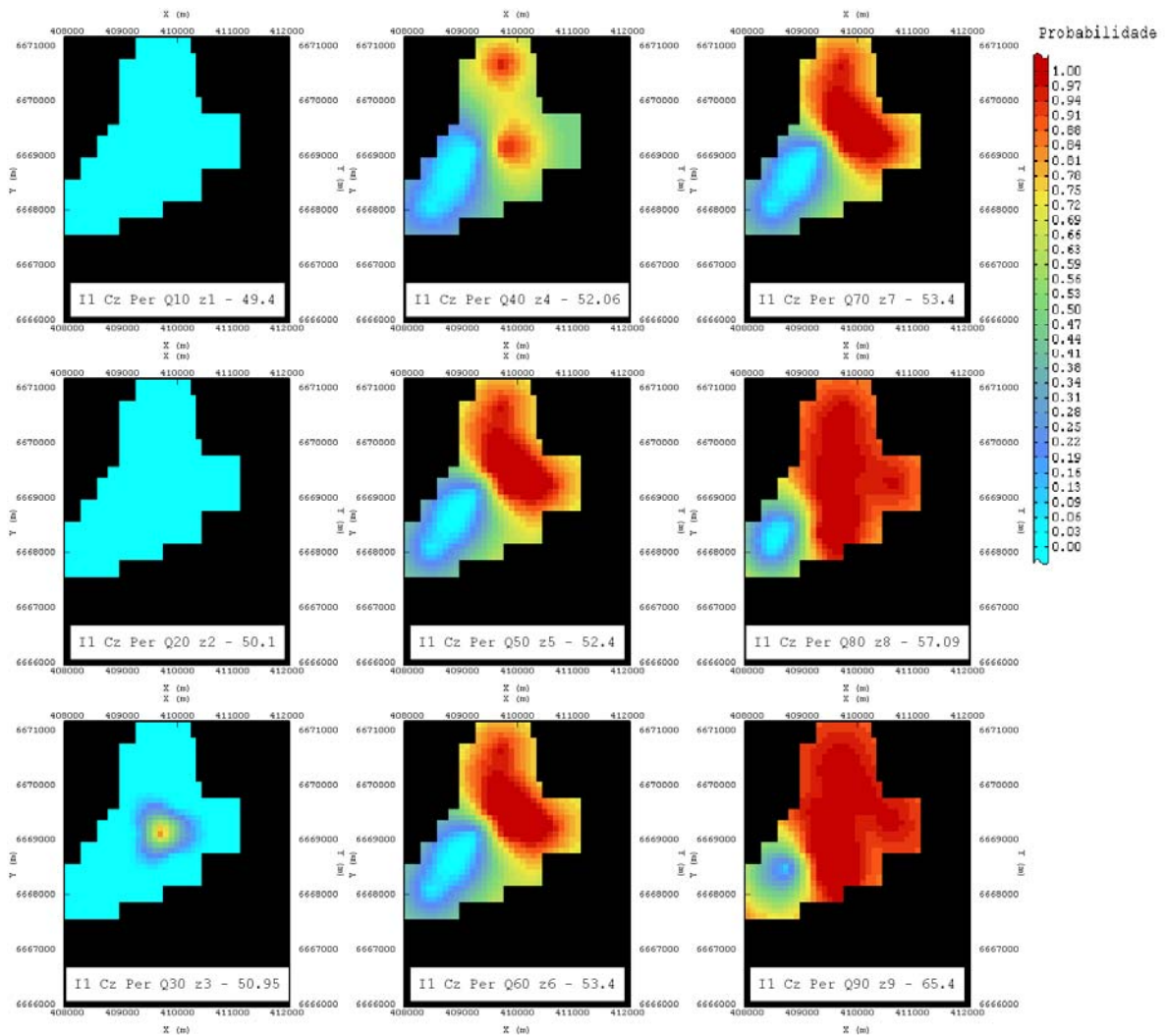


Figura 5.74: Mapa de probabilidades calculadas por KIm para o atributo Cz_h da Camada I1, onde cada mapa representa a chance que o valor do atributo Cz_h de cada bloco possui de ser inferior ao limite z_k .

O resultado da estimativa E-type, feita pelo programa POSTIK, se encontra na Figura 5.75 ao lado do resultado da estimativa do atributo teor de cinzas do banco de dados real por KO.

A comparação das estimativas apresenta as mesmas características encontradas nas comparações das estimativas de densidade da Camada I1: a mesma distribuição de qualidade do carvão (ruim na região sudoeste e em todo o resto da área uma qualidade média), igual continuidade espacial para as duas estimativas e novamente os valores obtidos pela KO foram além daqueles calculados pela KIm, isto é, a KO estimou teores de cinzas superiores aos calculados pela KIm na região sudoeste.

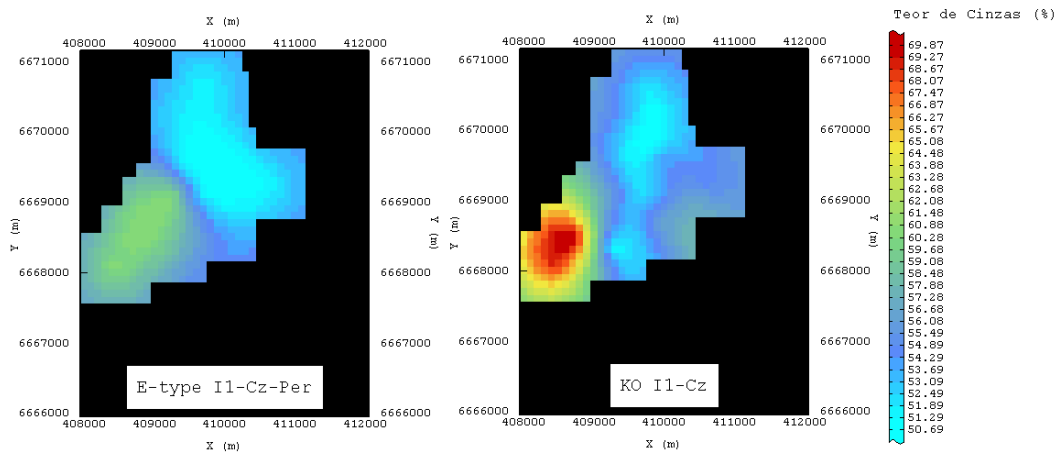


Figura 5.75: Estimativa E-type do atributo Cz_h (mapa a esquerda) e estimativa por KO para o atributo Cz_r (mapa a direita), ambos da Camada I1.

Pelos mapas de erros absoluto e porcentual mostrados na Figura 5.76, pode-se concluir que os maiores desvios de estimativa se localizaram nas regiões centro sul e sudoeste.

Para melhor se observar a magnitude do desvio das estimativas por KIm, a Figura 5.77 mostra os histogramas dos valores calculados por KIm e KO para o atributo teor de cinzas da Camada I1 e dos erros absoluto e porcentual obtidos pela comparação entre as estimativas.

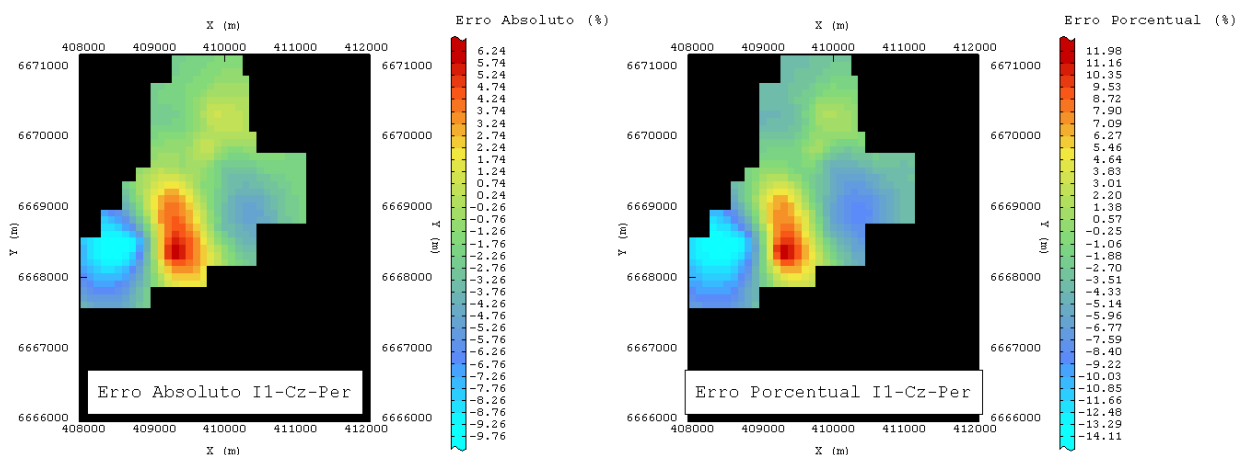


Figura 5.76: Erro absoluto (mapa da esquerda) e erro porcentual (mapa da direita) da estimativa do atributo Cz_h da Camada I1 por KIm em comparação com o resultado da KO para o atributo Cz_r .

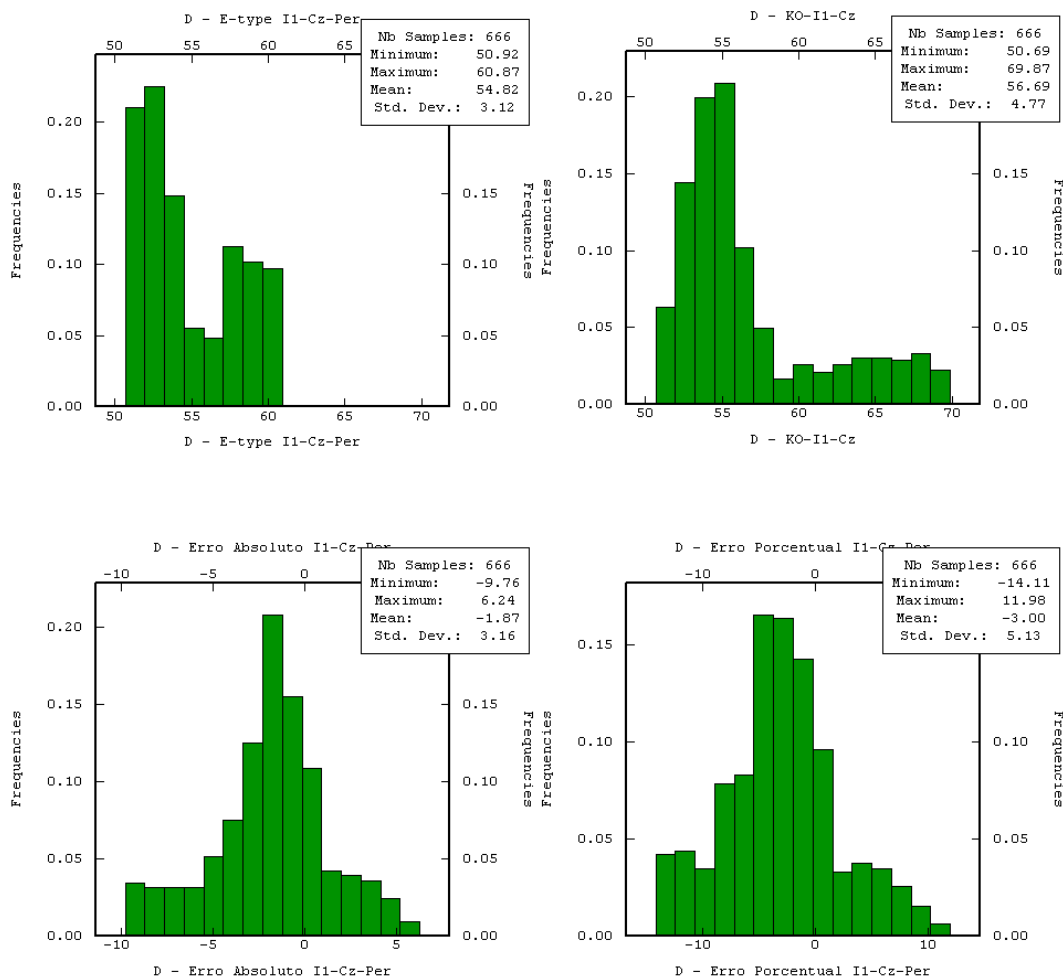


Figura 5.77: Histogramas das estimativas por E-type para Cz_h e KO para Cz_r (canto superior esquerdo e direito respectivamente) e histogramas dos erros absoluto e percentual (cantos inferiores esquerdo e direito respectivamente) referentes a Camada I1.

Como pode ser visto na Figura 5.77, ambas as estimativas apresentam um comportamento assimétrico positivo. A diferença entre as estimativas se concentra nos valores mais altos de teor de cinza. Enquanto que a KO resultou em valores que alcançam 69 % de cinzas, a KIm obteve valores de no máximo 60,8 %, essa diferença já acarreta um desvio de 11 % na estimativa por KIm. As estatísticas do erro percentual, também, mostram que houve grandes desvios positivos, isto é, blocos estimados pela KIm com valores superiores aqueles calculados pela KO, porém, sua ocorrência não foi tão acentuada como a os desvios negativos. A localização dos erros é exibida na Figura 5.78.

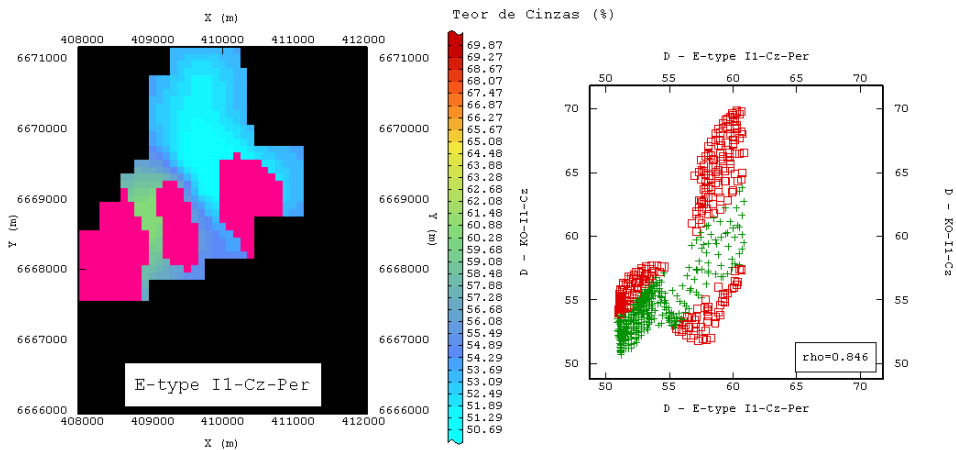


Figura 5.78: Mapa da estimativa do atributo Cz_h por KIm para a Camada I1 cujos blocos com erro fora dos limites estabelecidos se apresentam destacados pela cor magenta e gráfico de dispersão apresentando as estimativas por KIm no eixo x e por KO no eixo y, comparando os valores e destacando em vermelho os blocos estimados por KIm com erro excessivo.

Como mostrado na Figura 5.78, ocorreram três zonas com desvio de estimativa excessivo. Os dois maiores focos foram compostos de erros negativos e o menor, localizado entre os outros dois, é composto de desvios positivos.

O principal motivo da incidência de erros na estimativa por KIm é o reduzido número de amostras que compõem o banco de dados da Camada I1. Esse número reduzido se torna menor ainda com a distribuição dos indicadores, por exemplo, do total de 15 amostras usadas na KO, apenas 8 delas receberam o indicador 0 ou 1 de acordo com o limite z_5 , portanto, o modelo do semivariograma que serviu com base para todos os outros foi modelado sobre um semivariograma construído com apenas 8 amostras, logo, existe uma grande chance dos modelos obtidos não representarem com precisão o comportamento estrutural do atributo em questão

A pouca quantidade de dados indicadores, também, é responsável pela suavização exagerada na estimativa. A incerteza dos valores previstos pela perfilogem geofísica reduziu de 15 para 8 os locais amostrados que são usados na construção do modelo de blocos (quase 50% de redução na base de informações utilizadas) e isto certamente provocou as maiores disparidades entre a KIm e KO. O fator informação (ou falta de) mostrou-se o mais significativo sobre os resultados.

Apesar dos focos de desvio que excederam os limites, dos 666 blocos estimados pela KIm para o atributo teor de cinzas da Camada I1, 60 % foram considerados aceitáveis.

5.4 Considerações Finais

Este capítulo iniciou mostrando a distribuição espacial das amostras que formaram o banco de dados primário e secundário. Após um teste para verificar o efeito do agrupamento amostral conclui-se que a irregularidade da malha amostral não afeta significativamente o cálculo das estatísticas básicas descartando o uso de pesos de desagrupamento.

Efetou-se a análise do comportamento espacial das amostras mediante a construção de semivariogramas e posterior modelamento de funções de ajuste que foram utilizadas para a execução da krigagens ordinárias dos atributos. Essas krigagens ordinárias foram realizadas para servirem de comparação com a estimativa por krigagem dos indicadores com a mediana, pois, se considerou a estimativa de blocos por krigagem ordinária, baseada em um banco de dados obtido em sua totalidade por métodos de amostragem diretos, como o caminho mais comum seguido na avaliação de depósitos minerais.

Um dos objetivos deste trabalho, que é utilizar um método geoestatístico que considere a incerteza do valor da amostra no momento da estimativa, foi atingido neste capítulo no momento em que se efetuou a distribuição dos indicadores considerando os limites de restrição calculados no Capítulo 4. Após a distribuição dos indicadores de acordo com cada limite z_k , foi feita a construção dos semivariogramas experimentais dos dados codificados pelo limite z_5 . O modelo ajustado sobre esse semivariograma serviu de base para o ajuste nos outros oito semivariogramas do mesmo atributo de uma mesma camada. Esse passo foi afetado pelo reduzido número de amostras que compuseram o banco de dados utilizado. A falta de amostras dificultou a obtenção de semivariogramas representativos e de comportamento estável, fazendo com que os modelos ajustados fossem passíveis de erro.

Obtidos os modelos de todos os semivariogramas de cada limite z_k , de ambos atributos das quatro camadas sob análise foram efetuadas as estimativas de probabilidade pelo método KIm. Essas probabilidades representam a chance que cada bloco possui de ser inferior ao limite z_k que governou a distribuição dos indicadores 0 e 1. Após a obtenção de um valor médio para o atributo em cada bloco através das probabilidades calculadas, foi feita a comparação entre as estimativas.

A comparação das estimativas por KIm e KO provou a eficácia do método pois em média, cerca de 98 % dos blocos estimados por KIm para o atributo densidade apresentaram valores dentro do limite de -5 % e 5 % e quanto as estimativas de teor de cinzas, foram aproveitados em média 63 % dos blocos. Caso fosse usado um limite de desvio superior, -10 % e 10 % por exemplo, os valores resultantes das comparações seriam os seguintes:

- Camada S: O aumento da tolerância de desvio não afetou a comparação das estimativas em relação à densidade, pois, mesmo com um limite de -5 % e 5 %, todos os blocos foram aproveitáveis. Para o teor de cinza, o aumento do limite de erro permite um aproveitamento de 98 % dos blocos sendo que o maior desvio encontrado foi de aproximadamente 4 % de teor de cinzas, valor igualmente baixo.
- Camada M1: Assim como para a Camada S, todos os blocos foram aproveitados, pois mostraram desvios dentro do limite de -10 % e 10 %. Para o teor de cinzas, o número de blocos com desvio foi de 98 % do total de 819 blocos estimados. O maior desvio encontrado foi de aproximadamente -5 %, isto é, a KIm estimou um bloco com teor de cinzas com -5 % de cinzas a menos que a KO estimou para o mesmo bloco.
- Camada M2: O aumento da tolerância de erro fez com que o elevado desvio encontrado na comparação das estimativas não fosse tão significativo, pois, ele fez com que 100 % dos blocos estimados para o atributo de densidade por KIm fossem aproveitados e aumentou a porcentagem de blocos aceitáveis do atributo teor de cinzas de 19 %

para 46 % onde o maior erro encontrado foi de - 5,6 % de teor de cinzas.

- Camada I1: O aumento do limite tornou 100 % dos blocos estimados para a densidade aproveitáveis e para o atributo teor de cinzas, aproximadamente 90 % dos blocos mostraram um erro porcentual dentro do limite de -10 % e 10 %.

Por fim, a estimativa por KIm que usa dados secundários provenientes de perfilagem geofísica, baseada em um banco de dado limitado, isto é, com um reduzido número de amostras, apresenta valores bastante aceitáveis pois mesmo com um limite de erro porcentual de -10 % a 10 %, 100 % dos blocos estimados, para o atributo de densidade, se encontraram dentro do limite estabelecido. Para o teor de cinzas, o aumento do limite de desvio fez com que o número de blocos aproveitáveis passasse de 63 % para 83 %, sendo que, para o limite de erro porcentual de -10 % a 10 %, o erro absoluto máximo ficou em torno dos valores de -5 % e 5 % de teor de cinzas. Portanto, mesmo com a elevação da tolerância de desvio, alguns blocos obtiveram valores fora dos limites, porém, essa diferença não é significativa, pois não afetou a caracterização espacial das amostras, isto é, o comportamento estrutural apresentado pelos valores estimados pela KO, também, foi encontrado na distribuição dos blocos estimados pela KIm, logo, apesar do desvio presente nas estimativas, a KIm forneceu informações que foram igualmente encontradas nos resultados da KO.

Capítulo 6

Conclusões e Recomendações

Neste Capítulo, são apresentadas conclusões e considerações finais sobre os trabalhos apresentados nesta dissertação. E por fim, serão feitas algumas considerações finais e recomendações para trabalhos futuros.

6.1 Conclusões

As etapas de amostragem e avaliação possuem uma série de empecilhos que vão desde caráter financeiro à confiança depositada na informação obtida. Em relação aos problemas presentes na etapa de coleta de dados, a perfilagem geofísica se mostrou uma ferramenta de grande mobilidade e praticidade para obtenção de uma abundante quantidade de informações a um reduzido custo e tempo. Porém, devido ao caráter indireto da perfilagem geofísica, o peso dado às informações obtidas por esse método deve ser distinto daquele dado às informações obtidas por métodos amostrais diretos, como sondagem com recuperação de testemunhos.

Em relação à dificuldade de se ter uma aproximação da flutuabilidade que o valor do atributo de interesse pode assumir, os métodos convencionais como a análise laboratorial de amostras, por exemplo, dificultam a obtenção de limites de confiança, pois exigem a análise de um grande número de amostras para obtenção de tais valores e muitas vezes o material recuperado pela sondagem não é suficiente para a preparação de um grande número de amostras representativas. A aplicação da perfilagem geofísica associada com métodos matemáticos de estudo de dispersão de dados e ajuste de funções permite o cálculo de limites de

confiança. A aplicação de métodos matemáticos representa uma maneira prática e ágil de obtenção de tais limites e ainda tomam proveito de dados de perfilagem geofísica.

Não basta ter os limites de confiabilidade do valor de um atributo se o método de estimativa não permite a incorporação dos mesmos. Como destacado no Capítulo 1, a grande maioria dos métodos de krigagem univariada não permite a consideração da incerteza dos valores dos atributos no momento distribuição dos pesos de estimativa. A cokrigagem, que é uma extensão natural da krigagem e permite o uso de informações secundárias, desconsidera os limites de confiabilidade das mesmas. O desenvolvimento da krigagem dos indicadores, método de estimativa que faz parte dos métodos de krigagem não lineares, tornou a incorporação das incertezas possível e de fácil aplicação.

Devido ao reduzido número de informações que compunham o banco de dados utilizados, foi aplicado o método da krigagem dos indicadores com a mediana, que se baseia no ajuste de um semivariograma médio, cujas proporções obtidas para os parâmetros do modelo serão a base dos parâmetros dos outros modelos.

A comprovação da eficácia do método de estimativa escolhido para incorporação de informação secundária com seus limites de restrição foi feita mediante a comparação dos seus resultados com os valores obtidos pela krigagem ordinária do banco de dados real. A comparação foi feita com os resultados da krigagem ordinária, pois foi considerado que esse é o caminho mais comum usado na avaliação de depósitos e quanto maior a similaridade entre os resultados maior é a confiança a ser depositada na metodologia apresentada por este trabalho.

Dos dois atributos analisados, a comparação de estimativas de densidades mostrou uma grande eficácia da krigagem dos indicadores usando dados de perfilagem, pois, em média, cerca de 98 % dos blocos estimados ficaram dentro do limite estabelecido de -5 % e 5 % de erro porcentual, considerando o resultado da krigagem ordinária como o valor real. Em relação ao segundo atributo, teor de cinzas, o número de blocos com desvio excessivo foi superior, e, em média, cerca de 63 % dos blocos estimados apresentaram valores dentro dos limites estabelecidos e portanto confiáveis.

Acredita-se que o principal motivo do elevado erro nas estimativas de teor de cinzas é devido ao banco de dados com reduzido número de amostras. Essa baixa quantidade de amostras afetou as estimativas por krigagem dos indicadores de três maneiras. A primeira seria no momento do ajuste da função sobre o gráfico de dispersão entre dados de densidade e cinzas mostrados no Capítulo 5. Como o número de dados é reduzido, os limites de confiabilidade tendem a ser maiores, isto é, o valor do atributo pode assumir uma gama maior de valores e, portanto a sua incerteza é maior. O aumento dos limites de confiabilidade leva a segunda fonte erro que ocorre no momento da distribuição dos indicadores. Como os limites são maiores, é maior a chance de uma amostra não receber o indicador 1 ou 0 e sim ser descartada do banco de dados (recebendo -999), tornando o que já era deficiente de informações mais deficiente ainda. O descarte de pontos amostrais no espaço provoca a terceira e última fonte de erro: a dificuldade de obter semivariogramas experimentais que representem de uma forma confiável o comportamento espacial dos dados. Como foi utilizado um método de ajuste de semivariogramas que se baseia em um modelo médio, parâmetros errôneos determinados devido ao ajuste de um semivariograma não representativo, são utilizados em todos os semivariogramas, resultando em uma estimativa de pouca confiabilidade. Portanto, a raiz dos principais problemas de estimativa é a escassez de informações que constituem o banco de dados.

Finalizando, este trabalho recomenda como metodologia para pesquisa de jazidas de carvão utilizando métodos de perfilagem geofísica e sondagem com recuperação de testemunhos os seguintes passos:

- Definir quais serão os parâmetros medidos pela perfilagem geofísica e de que maneira essa informação ira contribuir para a avaliação do depósito
- Definir qual o método de estimativa que será usado na avaliação do depósito. A escolha deve levar em conta o caráter indireto que a amostragem por perfilagem geofísica possui.
- Proceder com a locação dos furos de calibração (aqueles executados com recuperação de testemunhos) de uma maneira que consigam

abranger toda a área de pesquisa em uma malha regular, mesmo sendo em pequena quantidade.

- Localizar os furos destinados somente à execução da perfilagem geofísica, que serão feitos sem recuperação. A quantidade desses furos deve ser significativamente superior ao número de furos de calibração e deve ser distribuída de acordo com uma malha regular que cubra toda a área de pesquisa.
- Conciliação entre a informação obtida pelo método direto e indireto de amostragem.
- Tratamento e criação do banco de dados a ser usado na estimativa.
- Execução da estimativa.

6.2 Recomendações para os Próximos Trabalhos

Em relação a aplicação da perfilagem geofísica se aconselha um estudo aprofundado do efeito do comportamento das paredes dos furos na qualidade da informação coletada. No desenvolver deste trabalho, foi observado que caimentos nas paredes do furo provocam um aumento da rugosidade das mesmas bem como variações no diâmetro do furo, os quais afetaram significativamente a qualidade do dado geofísico. Ainda no campo da perfilagem geofísica, seria de grande valia aproveitar os dados obtidos pela sonda de medida de resistividade para efetuar uma avaliação qualitativa das formações geológicas e não apenas quantitativa.

Aconselha-se a aplicação de outras ferramentas de perfilagem geofísica como sônica e resistividade para outros atributos qualitativos e quantitativos, com a devida utilização na geração de mapas de qualidade.

Quanto à avaliação geostatística, aconselha-se a aplicação do método de krigagem dos indicadores considerando dados secundários com limites de restrição (seja ela com ajuste apenas do semivariograma médio ou de todos os semivariogramas) a um banco de dados com um número significativo de amostras para evitar o descarte excessivo de informações e conseqüente irregularidade nas estimativas.

Referências Bibliográficas

- ABNT. 1983. **Carvão Mineral - Determinação do Teor de Cinzas**. NBR 8289, Origem: ABNT 1:13.01-001/83, CB-1 - Comitê Brasileiro de Mineração e Metalurgia, CE-1:13.01 - Comissão de Estudo de Ensaios de Carvão Mineral, 4 p.
- ALMASOUMI, A., BORSARU, M. & CHARBUCINSKI, J. **Determination of the Lead Concentration of Pb - Zn Ores in Laboratory Boreholes Using Gamma - Gamma Techniques with Very Low Activity Sources**. CSIRO, Division of Exploration and Mining. To be published in Int. J. Appl. Rad. and Isot. <http://www.cat.csiro.au/dem/msg/scirev/pbabs.pdf>. 4 p.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API) 1974. **Recommended Practice for Standart Calibration and Format for Nuclear Logs**. API rept. No. 33, API, Dallas (US).
- ANON. 1993. **Guide to the Technical Evaluation of Higher Rank Coal Deposits**. Australian Standard: Committee MN/1 Coal and Coke 1993, Australian Standard AS 2519/1993.
- ARCHIE, G.E. 1942. **The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics**. Trans, AIME, Vol. 146, p. 54 - 62.
- ARMSTRONG, M. 1998. **Basic Linear Geostatistics**. Berlim (GER), Springer-Verlag, 153 p.
- BLACKWELL, G.H. & SINCLAIR, A.J. 2002. **Applied Mineral Inventory Estimation**. Cambridge (UK), Cambridge University Press, 381 p.
- BOEZIO, M.N.M. 2004. **Métodos Geoestatísticos para a Incorporação da Topografia como Informação Secundária no Mapeamento do Nível de**

Água Subterrânea. Dissertação de Mestrado. PPGEM – EE – UFRGS, Porto Alegre (RS), 292 p.

BORSARU, M. & CHARBUCINSKI, J. **Nuclear Borehole Logging Techniques Developed by CSIRO Exploration and Mining for the Metalliferous Mining Industry.** CSIRO, Division of Exploration and Mining. To be published, Int. J. Appl. Rad. and Isot. <http://www.cat.csiro.au/dem/msg/scirev/sydnabs2.pdf>. 4 p.

CHILÈS, J.P. & DELFINER, P. 1999. **Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty.** New York (US), John Wiley & Sons, Inc., 695 p.

DAS, L.K. & KAYAL, J.R. 1981. **A Method of Estimating Ash Content of Coal from Combined Resistivity and Gamma – Ray Logs.** *Geoexploration*, 19(1981), p. 193 – 200.

DEUTSCH, C.V. & JOURNEL, A.G. 1998. **GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide.** 2^a ed., New York (US), Oxford University Press, 369 p.

ELLIS, D.V. & SINGER, J.M. 2007. **Earth Logging for Earth Scientist.** 2^a ed., New York (US), Springer Verlag, 692 p.

ELLIS, D.V. 1988. **Gamma Ray Scattering Measurements for Density and Lithology Determination.** *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 35, No. 1, February 1988, p. 806 – 811.

EVANS, R.D. 1967. **The Atomic Nucleus.** New York (US), McGraw – Hill.

GELDART, L.P., SHERIFF, R.E. & TELFORD, W.M. 1990. **Applied Geophysics.** 2^a ed., Cambridge University Press, 770 p.

GERÊNCIA DE GEOLOGIA E PESQUISA – COPELMI MINERAÇÃO LTDA. 2007. **Relatório de Pesquisa.** DNPM 810.584/79 de 23/07/79, p 2 – 3.

- GOOVAERTS, P. 1997. **Geostatistics for Natural Resources Evaluation**. New York (US), Oxford University Press, 483 p.
- GUYOD, H. 1951. **The Shielded – Electrode Methode**. World Oil.
- GUYOD, H. 1944b. **The Single – Point Resistance Methode**. Oil Weekly, Vol. 114, No. 12.
- HATHERLY, P. & MEDHURST, T. 2004. **Geotechnical Strata Characterization Using Geophysical Borehole Logs**. 24th International Conference on Ground Control in Mining, p. 179 – 186.
- HEARST, J.R. & NELSON, P.H. & PAILLETT, F.L. 2000. **Well Logging for Physical Properties**. 2^a ed., John Wiley and Sons, Ltd., 483 p.
- HOFFMAN, G.L., JORDAN, G.R. & WALLIS, G.R. 1982. **Geophysical Borehole Logging Handbook for Coal Exploration**. Alberta (CAN), The Coal Mining Research Centre, 270 p.
- HUIJBREGTS C.H. & JOURNEL, A.G. 1978. **Mining Geostatistics**. London (RU), Academic Press, 600 p.
- ISAAKS, E.H. & SRIVASTAVA, R.M. 1989. **An Introduction to Applied Geostatistics**. New York (EUA), Oxford University Press, 561 p.
- ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARIZATION. 1985. **Coal Cleaning Tests – General Directions for the Determination and Presentation of Float and Sink Characteristics**. ISO/DIS 7936, ISO/TC 27, UDC 662.66:620.168.33, 31 p.

- MARECHAL, A. 1970. **Cokrigage et Regression en Correlation Intrinsique**. Centre de Geostatistique, Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau (FRA), Publication N – 205.
- JOURNEL, A.G. 1983. **Nonparametric Estimation of Spatial Distributions**. Journal of the International Association for Mathematical Geology, Vol. 15, No. 3, p 445 - 468
- KRIGE, D.G. 1951. **A Statistical Approach to Some Basic Mine Valuation Problems on Witwatersrand**. Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa, Dezembro, p. 119 – 139.
- MARQUARDT, D.W. 1963. **An Algorithm for Least – Squares Estimation of Nonlinear Parameters**. J. Soc. Indust. Appi. Math, Vol. 11, No. 2, Junho 1963, p. 431 – 441.
- MATHERON, G. 1963. **Principles of Geostatistics**. Economic Geology, No. 58.
- MATHIS, G.L. & MICKAEL, M.W. 1997. **Formation Density Sensor Having Detector Array and Method of Calculating Bulk Density and Correction**. Patent number: 5.659.169, Western Atlas International, Inc., Houston (US), 14 p.
- OLIVEIRA, L.J. de. 2005. **Avaliação do Uso da Perfilagem Geofísica para Obtenção de Informações Secundárias para Utilização em Co - Estimativas de Variáveis Geológico – Mineiras**. Dissertação de Mestrado, PPGEM – EE – UFRGS, Porto Alegre (RS), 164 p.
- SILVA, W.P. da & SILVA, C.M.D.P.S. e. 1998. **Tratamento de Dados Experimentais**. 2ª ed., João Pessoa (PB), UFPB/Editora Universitária, 199 p.

- SILVA, W. P. da, SILVA, C.M.D.P.S. e, CAVALCANTI, C.G.B., SILVA, D.D.P.S. e, SOARES, I.B., OLIVEIRA, J.A.S. & SILVA, C.D.P.S. e. 2004. **“LAB Fit Ajuste de Curvas” Um software em Português para Tratamento de Dados Experimentais.** Revista Brasileira de Ensino de Física, Vol. 25, No. 4, p. 419 – 427.
- SOUZA, L.E. de 2002. **Estimativa de Incertezas e suas Aplicações na Classificação de Recursos Minerais.** Dissertação de Mestrado, PPGEM – EE – UFRGS, Porto Alegre (RS), 170 p.
- SOUZA, L.E. de 2007. **Preposição Geoestatística para Quantificação do Erro em Estimativas de Tonelagens e Teores.** Tese de Doutorado, PPGEM – EE – UFRGS, Porto Alegre (RS), 193 p.
- SULLIVAN, J. 1984. **Conditional Recovery Estimation Through Probability Kriging – Theory and Practice.** Em: Geostatistic for Natural Resources Characterization, Part 1, Verly, G. et al. (Editores), Reidel (Dordrecht)
- WELLMER, F.-W. 1998. **Statistical Evaluation in Exploration for Mineral Deposits.** Berlim (ALE), Springer-Verlag, 379 p. 365 – 384.
- WINSAUER, W.O., SHEARIN, H., MASON Jr., P.H. & WILLIAMS, M. 1952. **Resistivity of Brine – Saturated Sand in Relation to Pore Geometry.** Bull. AAPG, Vol. 36, No. 2, p. 253 – 277.
- YAMAMOTO, J.K. 2001. **Avaliação e Classificação de Reservas Minerais.** São Paulo (SP), Edusp – Editora da Universidade de São Paulo, 232 p.

ANEXO A

Perfis geofísicos e descrições litológicas

Perfis geofísicos e descrições litológicas resumidas dos furos B3-03, B3-12, B3-13 e B3-18, usados como base de informação para desenvolvimento do estudo de caso, são apresentados nas próximas quatro figuras denominadas Figura A.1, Figura A.2, Figura A.3 e Figura A.4.

Área B3 - Butiá/RS - Copelmi Mineração LTDA

Furo Id: B3-03

E: 408832,40 m

N: 6667235,96 m

Cota: 51,23 m

Data: 17 de Março, 2006

Profundidade Perfurada: 29,00 m

Profundidade Perfilada: 28,52 m

Perfis obtidos com as seguintes ferramentas:

Sonda GLOG (resistividade e gama natural)

Sonda SWDS (gama retroespalhado, gama natural e caliper)

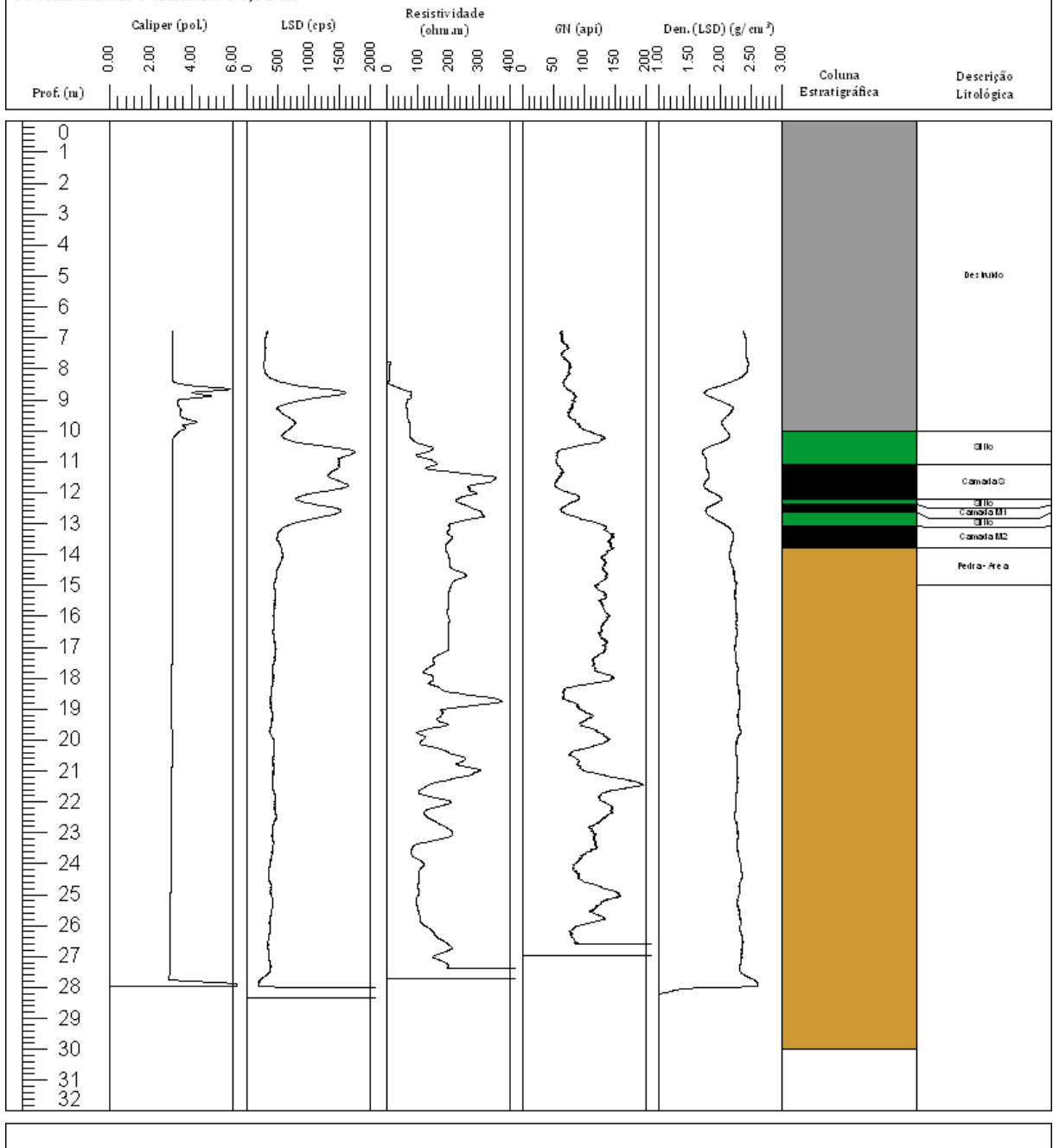


Figura A.1: Perfis geofísicos e descrição geológica resumida do furo de sondagem B3-03.

Área B3 - Butiá/RS - Copelmi Mineração LTDA

Furo Id: B3-12

E: 4097 12,13 m

N: 6669126,50 m

Cota: 41,74 m

Data: 9 de Maio, 2006

Profundidade Perfurada: 57,90 m

Profundidade Perfilada: 57,45 m

Perfis obtidos com as seguintes ferramentas:

Sonda GLOG (resistividade e gama natural)

Sonda SWDS (gama retroespalhado, gama natural e caliper)

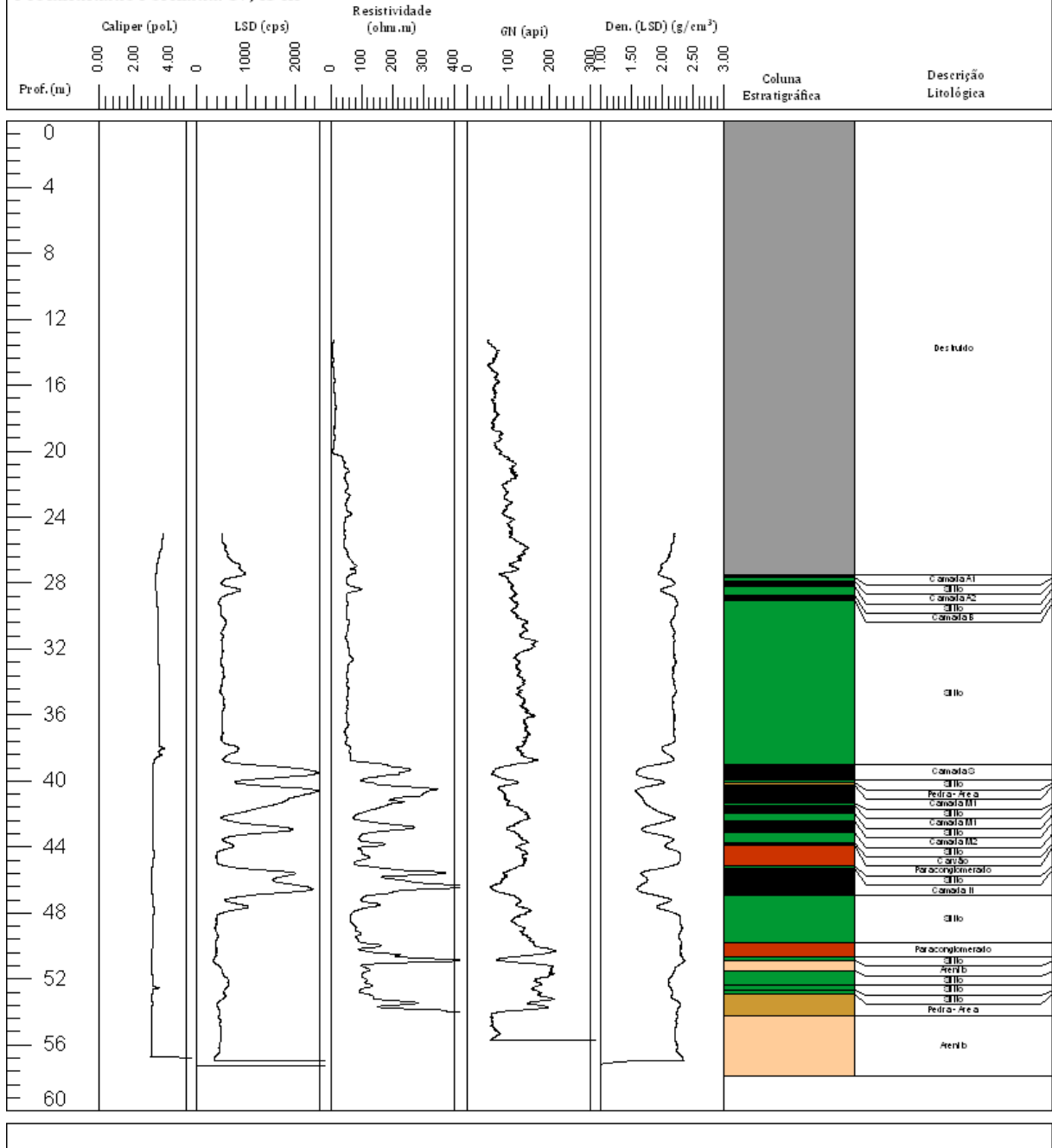


Figura A.2: Perfis geofísicos e descrição geológica resumida do furo de sondagem B3-12.

Área B3 - Butiá/RS - Copelmi Mineração LTDA

Furo Id: B3-13
 E: 409248,56 m
 N: 6669099,04 m
 Cota: 37,63 m

Data: 16 de Maio, 2006
 Profundidade Perfurada: 59,00 m
 Profundidade Perfilada: 58,59 m

Perfis obtidos com as seguintes ferramentas:
 Sonda GLOG (resistividade e gama natural)
 Sonda SWDS (gama retroespalhado, gama natural e caliper)

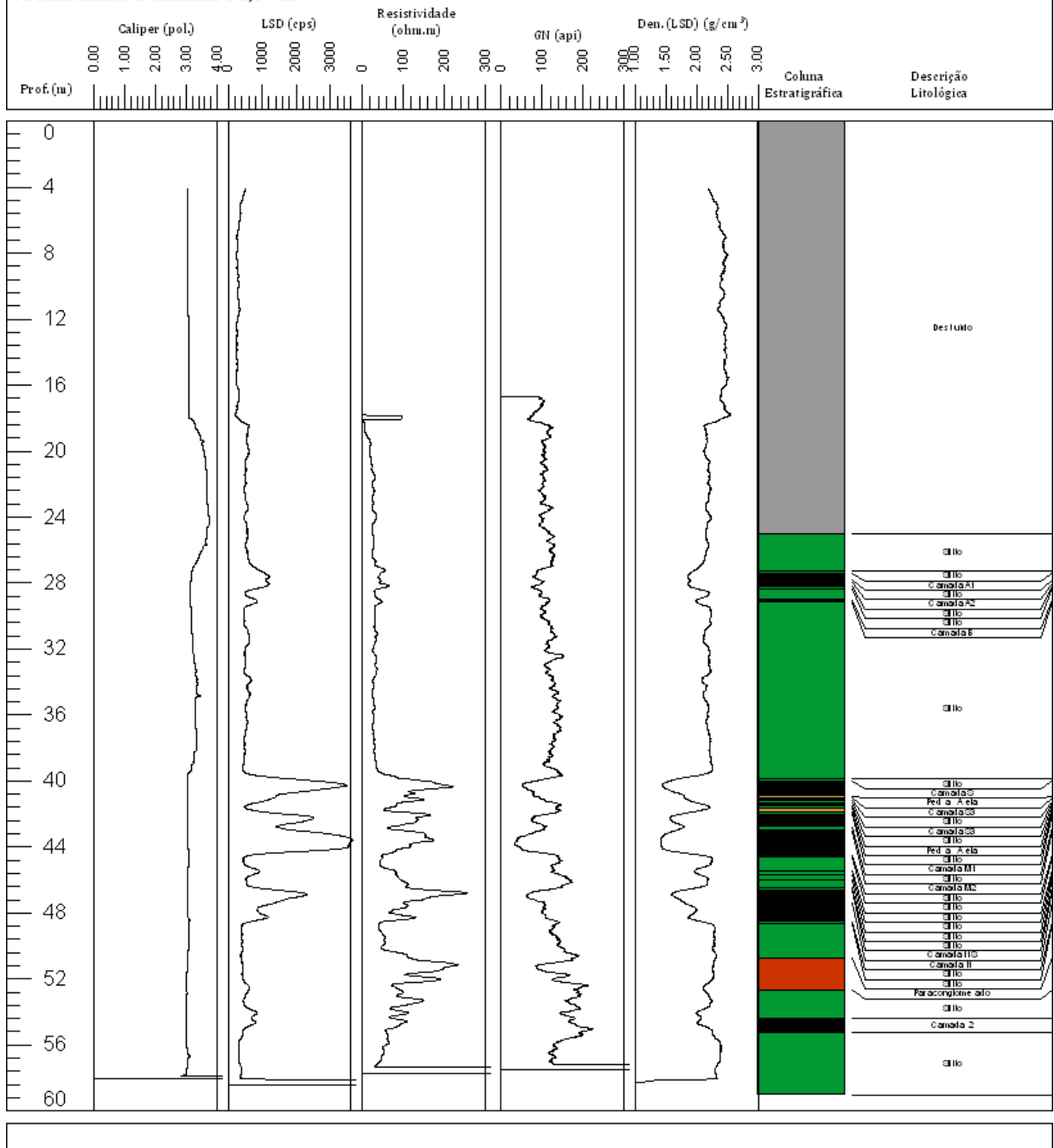


Figura A.3: Perfis geofísicos e descrição geológica resumida do furo de sondagem B3-13.

Área B3 - Butiá/RS - Copelmi Mineração LTDA

Furo Id: B3-18

E: 409724,83 m

N: 6670656,33 m

Cota: 30,07 m

Data: 27 de junho, 2006

Profundidade Perfurada: 81,50 m

Profundidade Perfilada: 78,87 m

Perfis obtidos com as seguintes ferramentas:

Sonda GLOG (resistividade e gama natural)

Sonda SWDS (gama retroespalhado, gama natural e caliper)

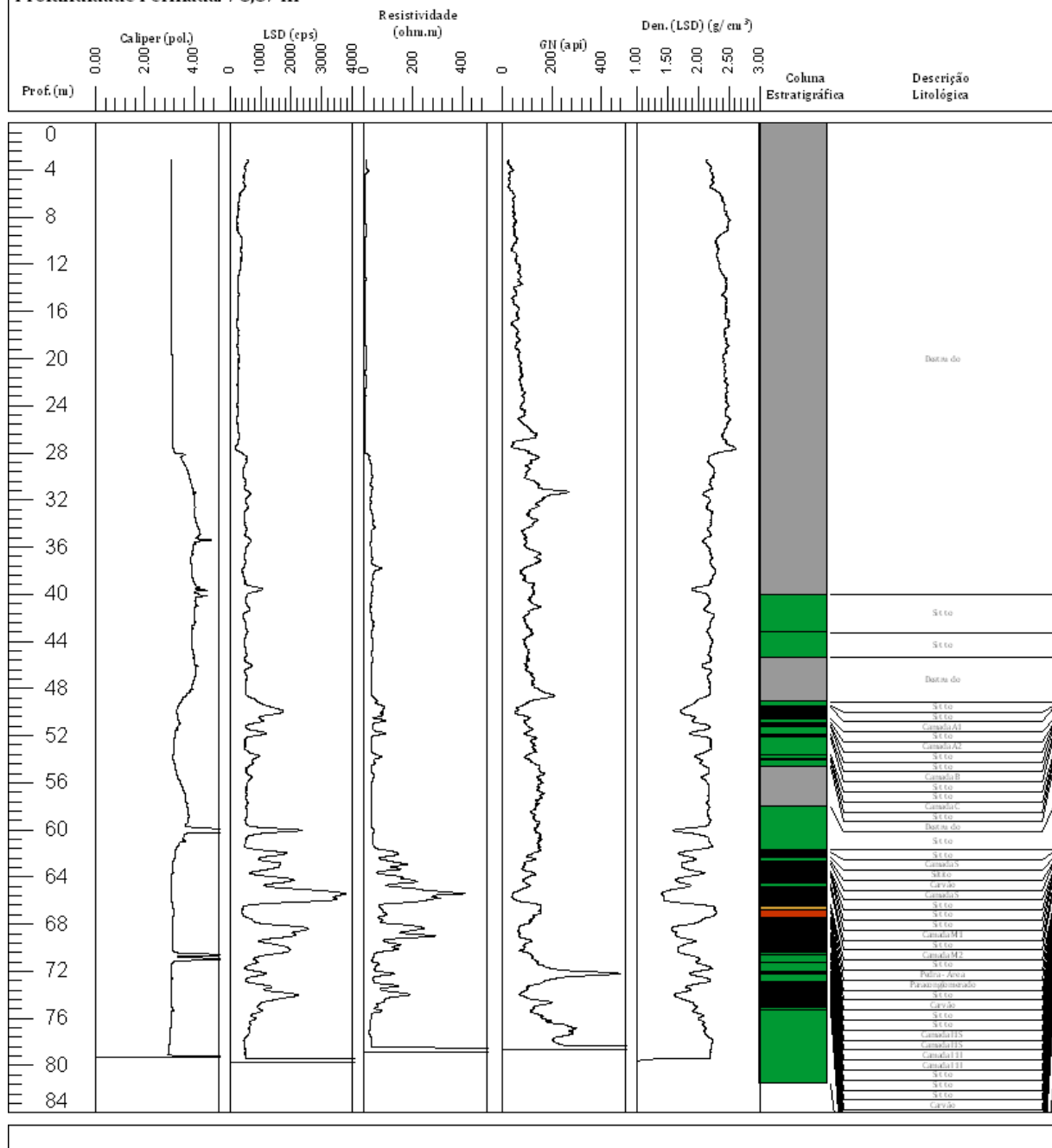


Figura A.4: Perfis geofísicos e descrição geológica resumida do furo de sondagem B3-18.

ANEXO B

Modelos dos semivariogramas usados nas estimativas por KIm, obtidos a partir das proporções dos parâmetros do modelo do semivariograma médio ou mediano

Como foi utilizada a técnica de krigagem dos indicadores com a mediana, bastou ajustar o modelo sobre o semivariograma experimental médio, isto é, aquele que foi construído com dados codificados com indicadores de acordo com o valor do limite z_5 . E como foram utilizados nove limites z_k , cada estimativa de um atributo foi alimentada com informações estruturais de nove diferentes semivariogramas.

Este anexo trás, para os dois atributos de todas as quatro camadas, todos os modelos ajustados de acordo com as proporções dos parâmetros obtidos pelo ajuste sobre o semivariograma construído com dados codificados com o limite z_5 .

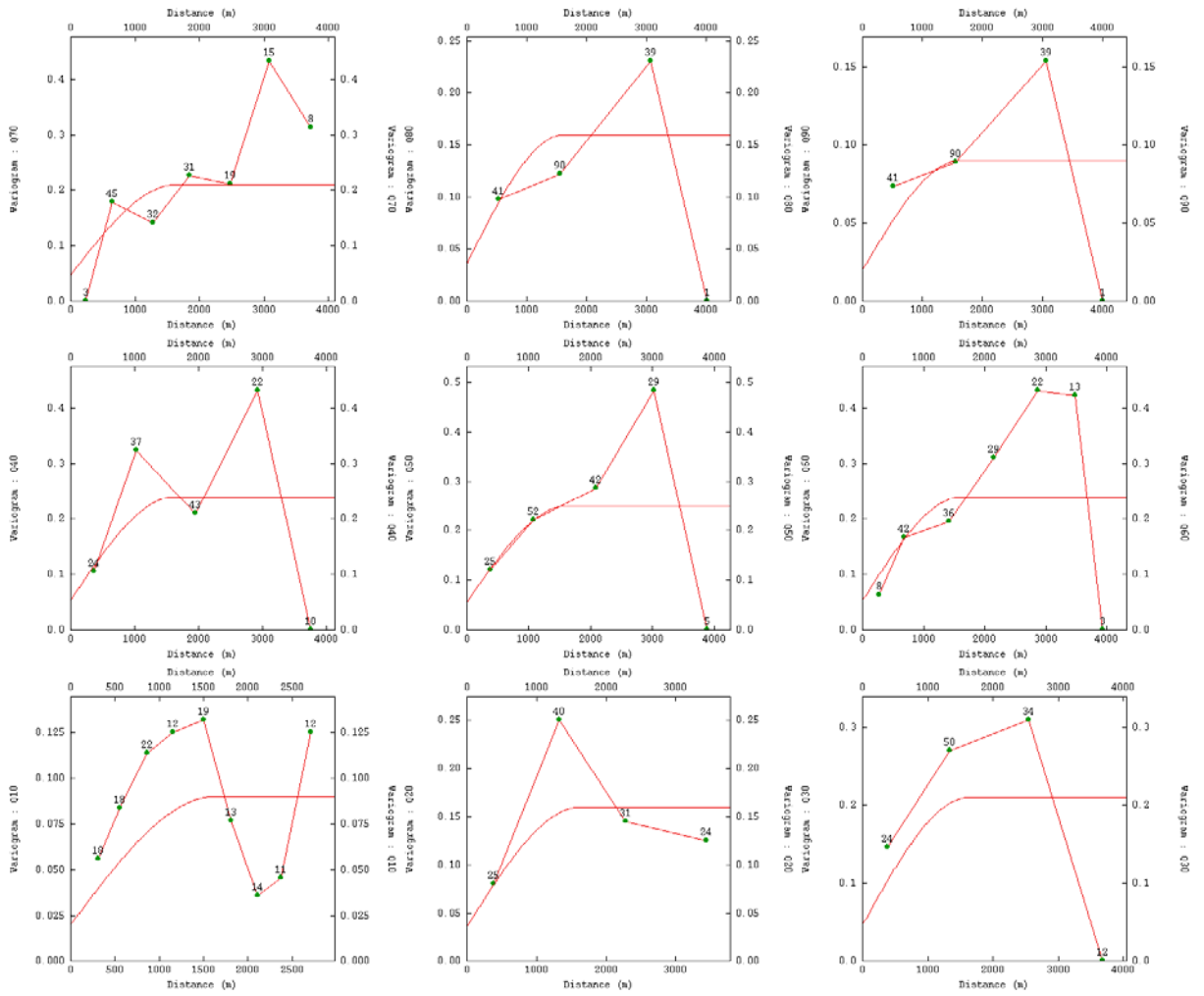


Figura B.1: Nove modelos de semivariograma que representam a distribuição espacial do atributo ρ_h da Camada S.

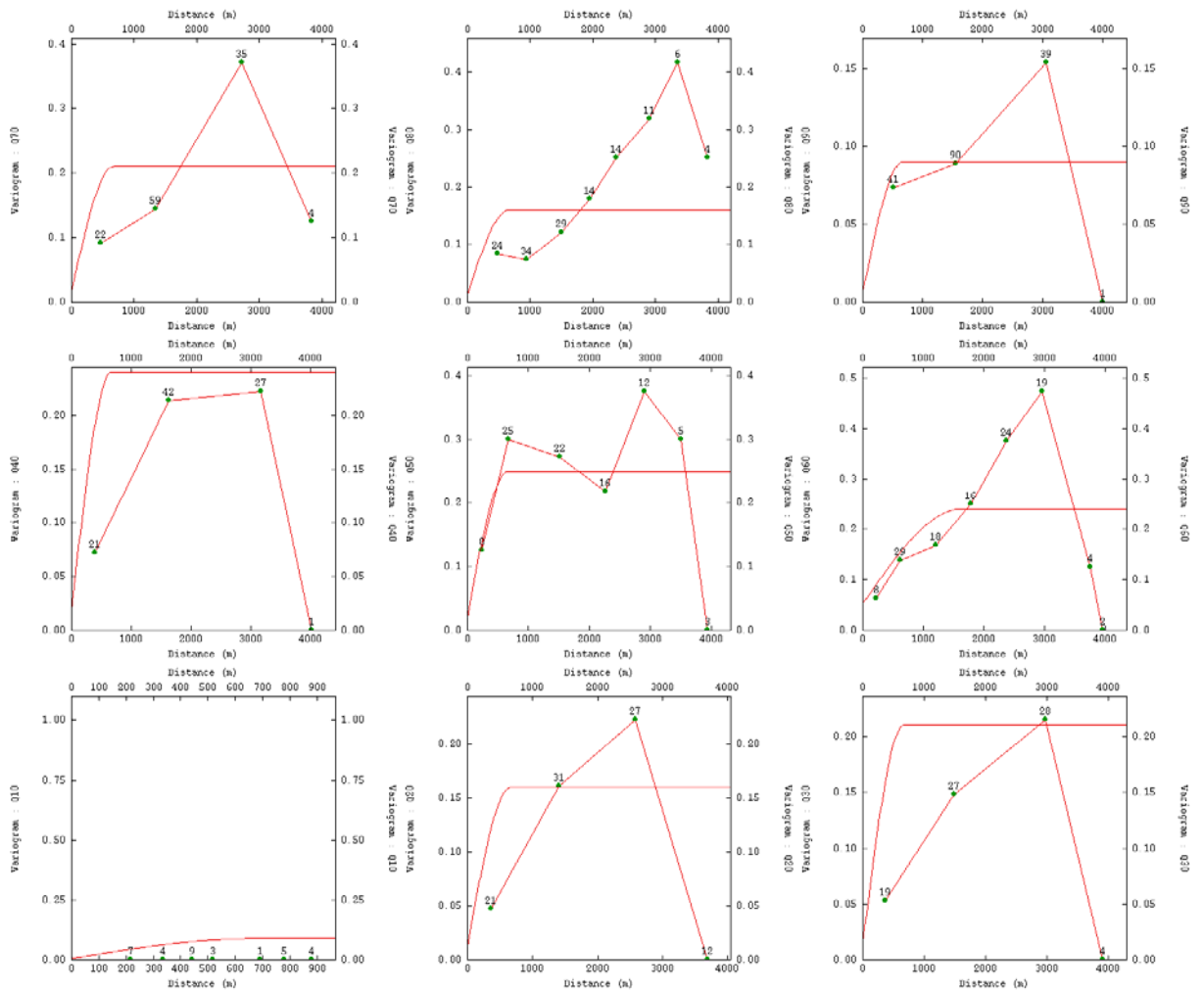


Figura B.2: Nove modelos de semivariograma que representam a distribuição espacial do atributo C_{zh} da Camada S.

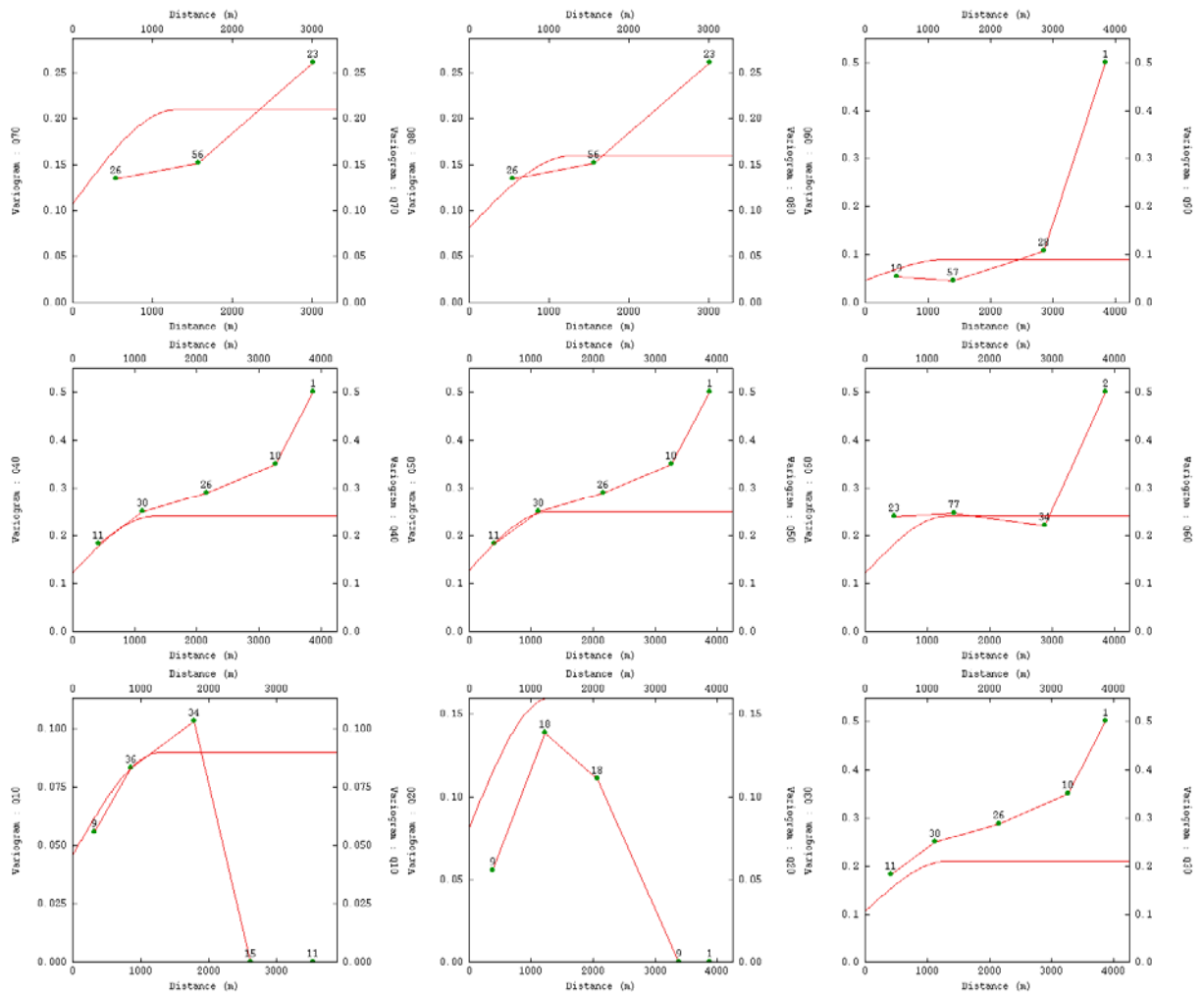


Figura B.3: Nove modelos de semivariograma que representam a distribuição espacial do atributo ρ_h da Camada M1.

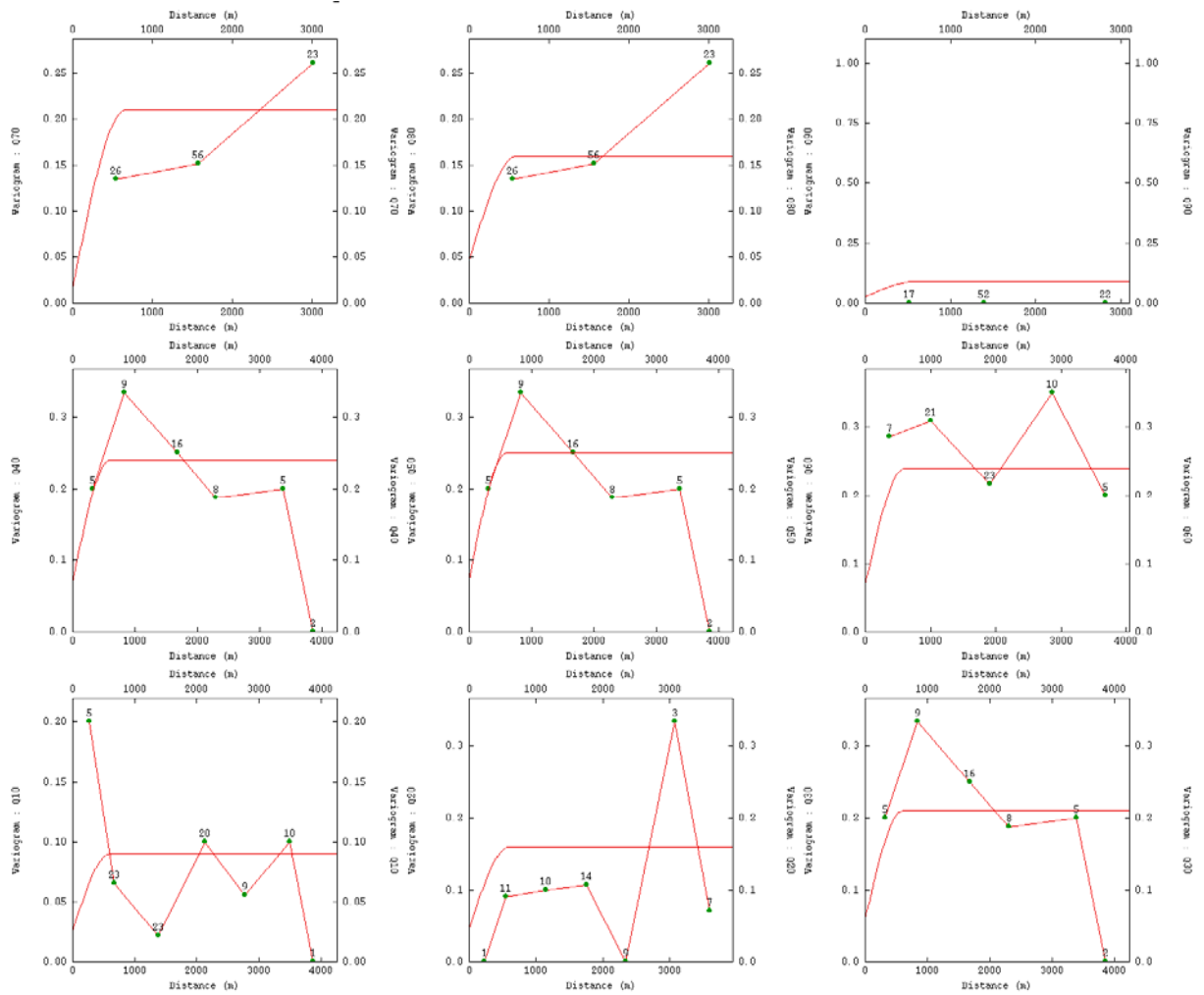


Figura B.4: Nove modelos de semivariograma que representam a distribuição espacial do atributo Cz_h da Camada M1.

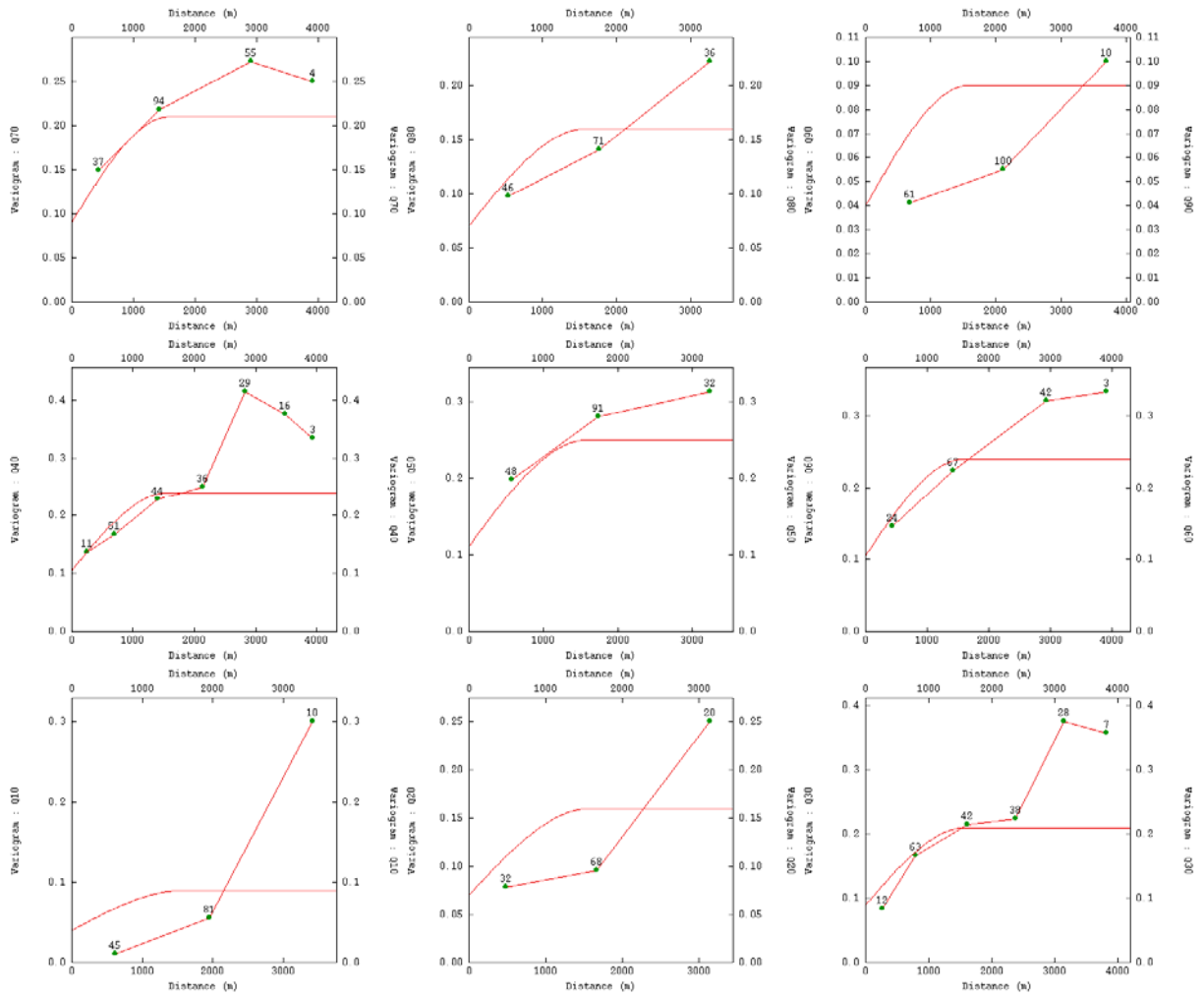


Figura B.5: Nove modelos de semivariograma que representam a distribuição espacial do atributo ρ_h da Camada M2.

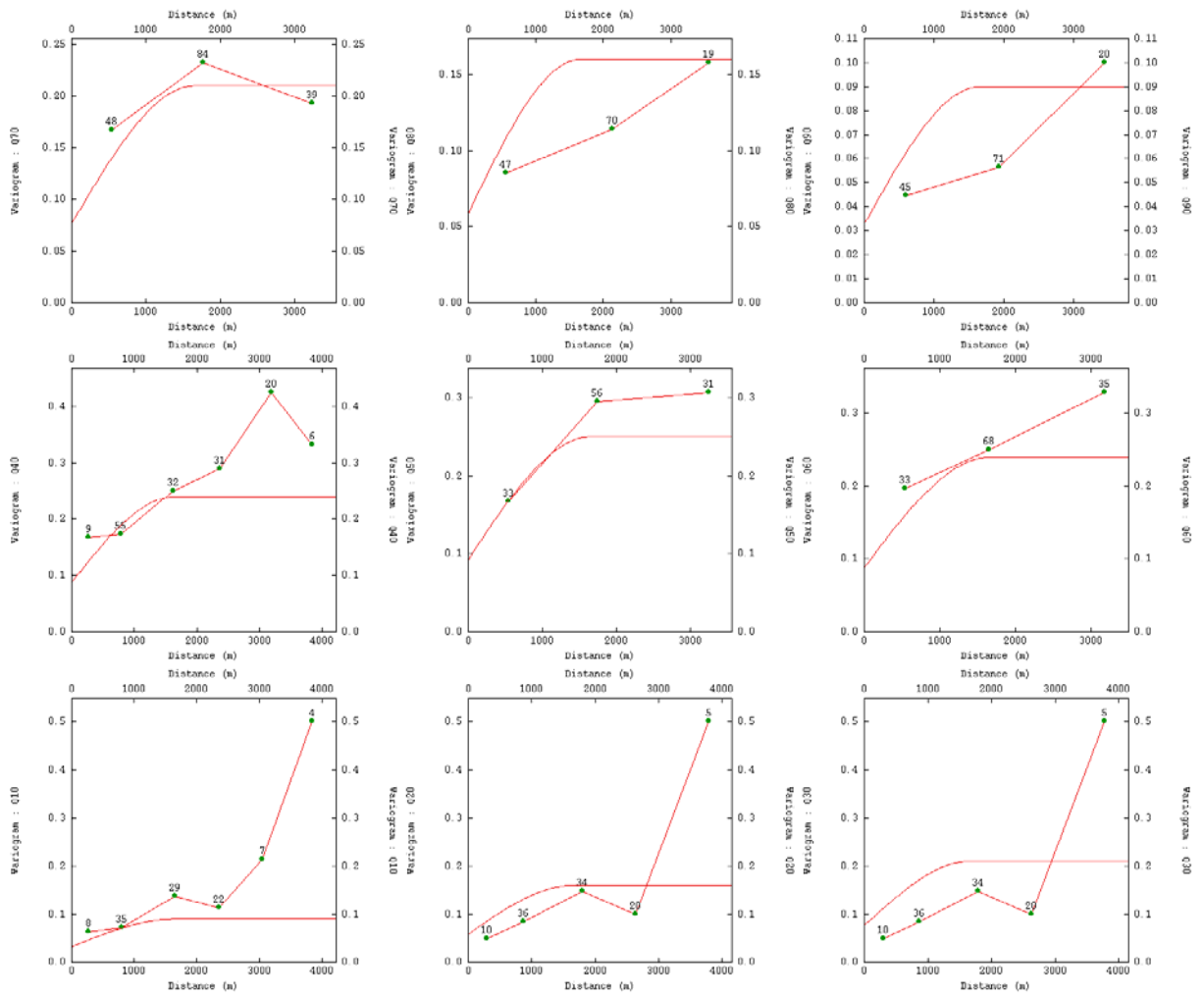


Figura B.6: Nove modelos de semivariograma que representam a distribuição espacial do atributo Cz_h da Camada M2.

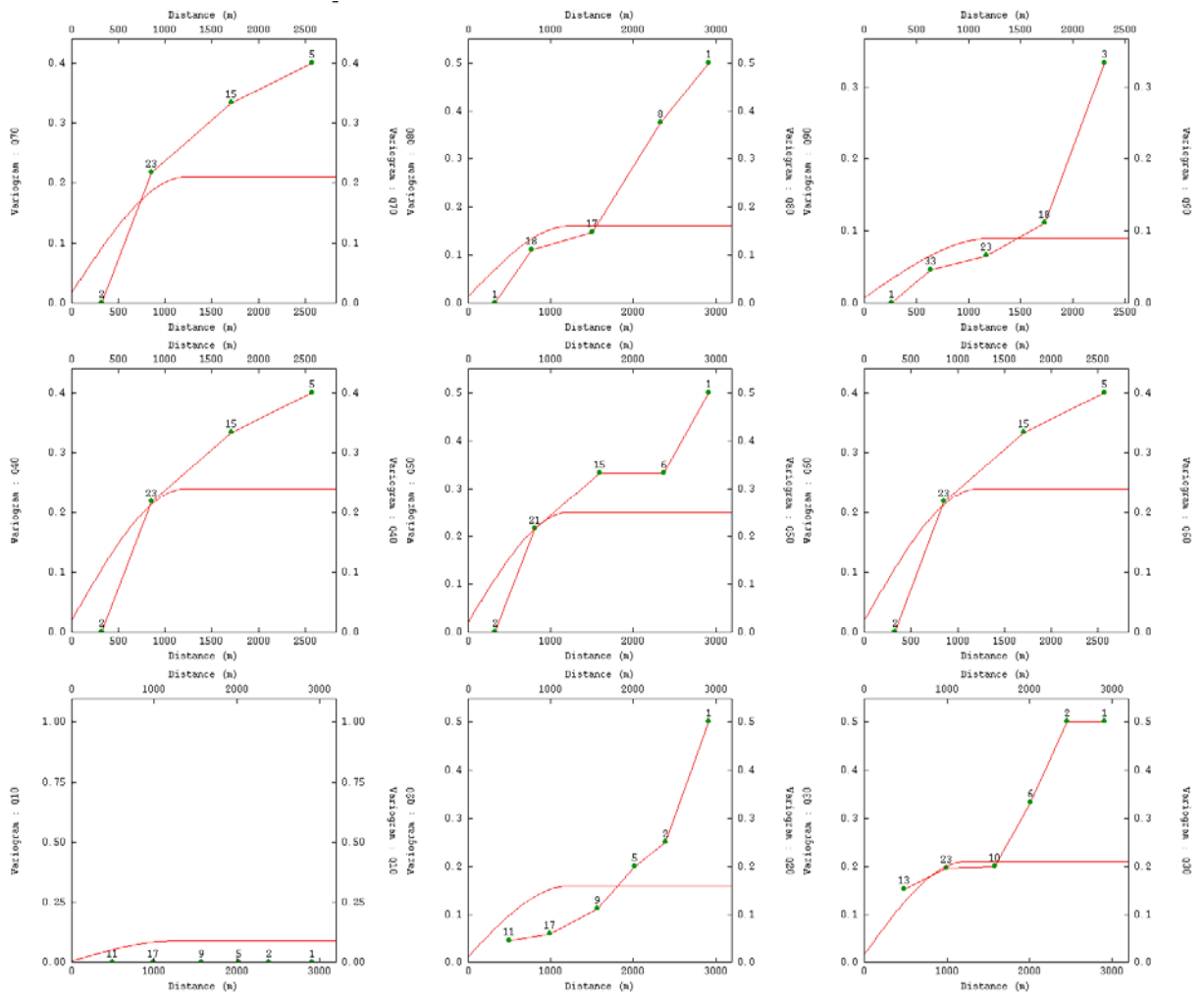


Figura B.7: Nove modelos de semivariograma que representam a distribuição espacial do atributo ρ_h da Camada I1.

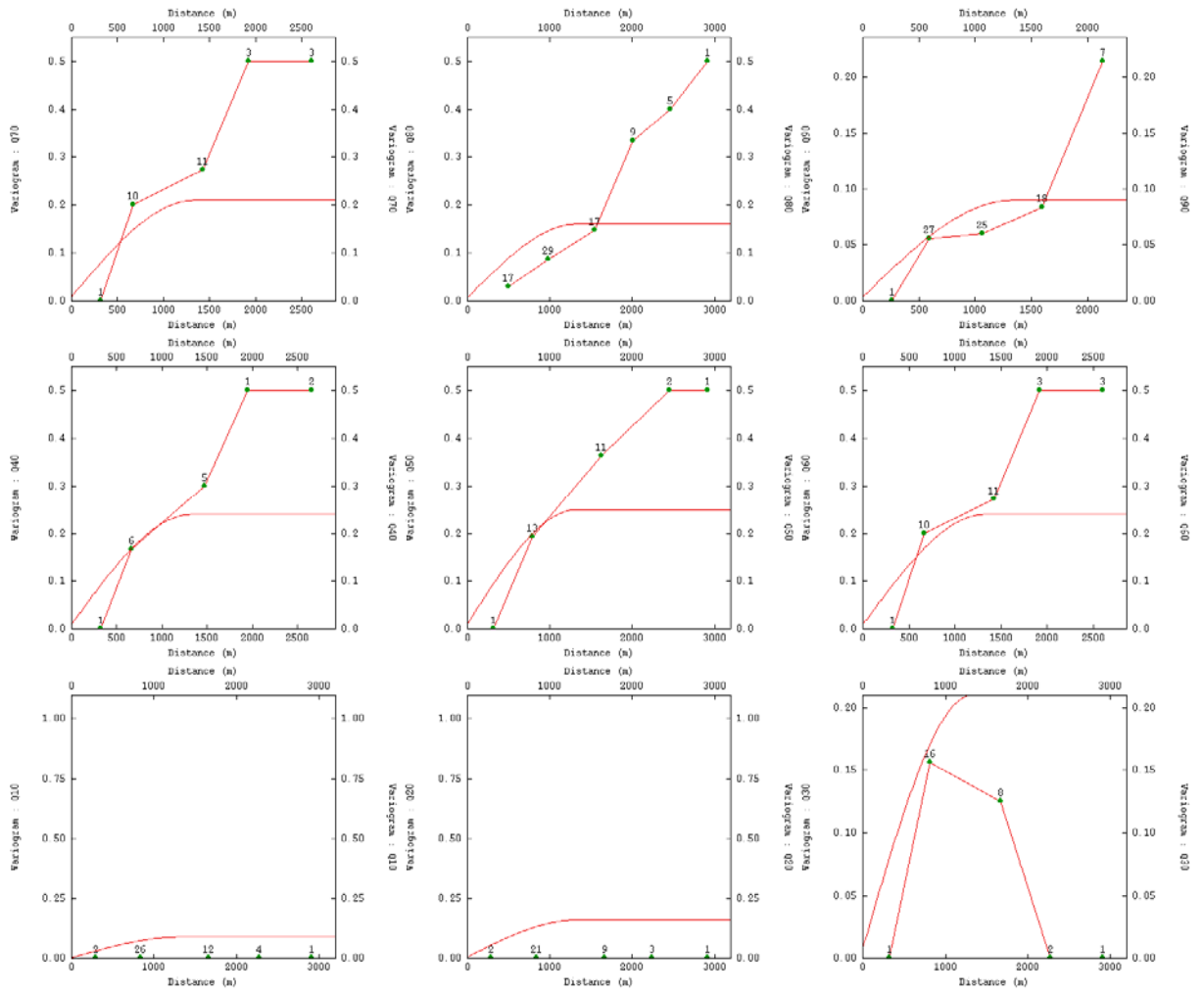


Figura B.8: Nove modelos de semivariograma que representam a distribuição espacial do atributo Cz_h da Camada I1.

ANEXO C

Especificações do equipamento utilizado para realização do trabalho – Fabricante *Robertson Geologging Limited*.

Sonda GLOG® - Focussed Electric (Guard) Log Sonde

Sonda para medição de resistividade focalizada e medição de emissão de radiação gama natural. Abaixo é apresentado o diagrama da sonda com as respectivas especificações (Figura C.1 e Tabela C.1).

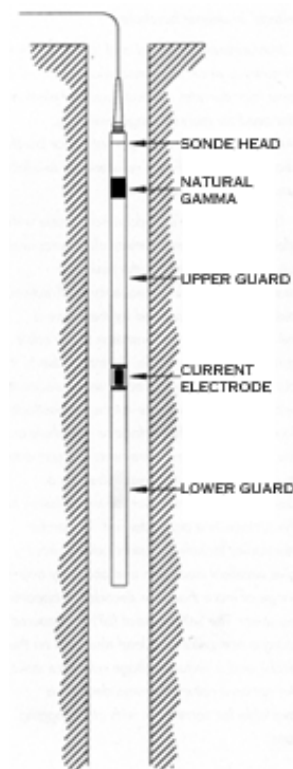


Figura C.1: Diagrama da sonda GLOG®.

Tabela C.1: Especificações da sonda GLOG®

Diâmetro	38 mm
Comprimento	2,76 m
Peso	8 kg
Temperatura máxima suportada	70 °C
Pressão máxima suportada	20 MPa
Eletrodo de corrente	10 cms
Eletrodos focalizadores	2 x 1 cm
Tensão de referência	Fio terra em superfície
Escala de medida	1 a $10 \cdot 10^3$ ohm.m
Detector de radiação gama natural	50 mm x 25 mm (Cintilômetro de NaI(Tl))

Acessório: Unidade de calibração para o parâmetro resistividade.

Sonda SWDS® - *Sidewall Density Sonde*

Sonda para medição de radiação retroespalhada, emissão de radiação gama natural e diâmetro de furo Abaixo é apresentado o diagrama da sonda com as especificações (Figura C.2 e Tabela C2).

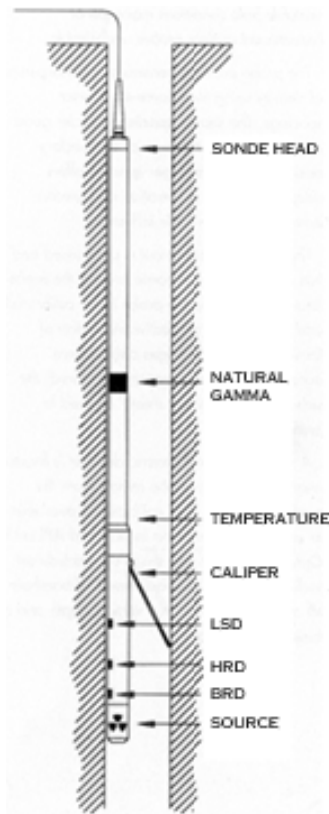


Figura C.2: Diagrama da sonda SWDS®

Tabela C.2: Especificações da sonda SWDS®

Diâmetro	50 mm
Comprimento	2,88 m
Peso	20 kg
Temperatura máxima suportada	70 °C
Pressão máxima suportada	20 MPa
Densidade	3 cintilômetros de NaI(Tl) espaçados da fonte emissora de radiação á 14 cm (BRD), 2 cm (HRD) e 30 cm (LSD)
Gama Natural	50 mm x 25 mm (Cintilômetro de NaI(Tl))
Caliper	Raio de 50 mm a 300 mm

OBS.: A sonda SWDS® adquirida pelo laboratório não apresenta o dispositivo para medição de temperatura.

Acessórios:

- Fonte de Césio 137 (^{137}Cs) de 3,7 mCi de atividade, utilizada para medição.
- Fonte de Césio 137 (^{137}Cs) de 3,7 μCi de atividade, utilizada para calibração do equipamento.
- Haste para calibração API.
- Bloco de alumínio para calibração.

Guincho (*Smart Winch*)

Equipamento utilizado para o içamento das sondas para medições dos parâmetros. O guincho é provido por uma polia que registra a profundidade. A Figura C.3 abaixo mostra o guincho com a unidade de aquisição encaixada.



Figura C.3: Guincho com unidade de aquisição acoplada.

A partir da foto da Figura C.3 e das especificações contidas na Tabela C.3, conclui-se que guincho é portátil e com isso apresenta versatilidade para o deslocamento em campo.

Tabela C.3: Especificações referentes ao guincho

Comprimento do cabo	180 m de cabo com 4 almas
Velocidade	0,5 – 15 m/min (1,6 – 49 ft/min)
Motor	120 W – 12 V DC (bateria de automóvel)
Tamanho	265 (w) x 465 (l) x 370 mm (h)
Peso	22 kg (excluindo o cabo)
Capacidade	Guincho apropriado para içamento de todo cabo liberado com sonda SWDS®

Unidade de aquisição (RG USB Micrologger 2)

Equipamento de aquisição dos dados. Esse dispositivo deve ser acoplado a um computador portátil via porta USB e ao guincho com um cabo específico. A Figura C.4 e a Tabela C.4 apresentam a foto e as especificações respectivamente.



Figura C.4: Unidade de aquisição

Tabela C.4: Especificações referentes à unidade de aquisição

Dimensões	284 mm x 240 mm x 56 mm
Peso	2,8 kg
Alimentação	12 V DC (bateria de automóvel)