

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

Avaliação do uso da perfilagem geofísica para obtenção de
informações secundárias para utilização em co-estimativas de
variáveis geológico-mineiras

Leandro José de Oliveira

DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE
EM ENGENHARIA

Porto Alegre
2005

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

Leandro José de Oliveira
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 a obtenção do título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa e Tecnologia Mineral

Porto Alegre
2005

Esta 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. André Cezar Zíngano

Prof. Dr. Paulo Salvadoretti

Dr. Rubens Müller Kauzmann

Prof. Dr. Antônio Cezar Faria Vilela
Coordenador do PPGEM

Aos meus pais Guido e Lourdes
e irmãos Luiz e Leonardo
e a querida Simone Q.B.

AGRADECIMENTOS

A todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

Ao professor João Felipe Coimbra Leite Costa pelo estímulo, dedicação, mas principalmente pela amizade mantida por todos esses anos.

Aos colegas Luis Eduardo, Fernando Gambin, Fabrício, Sergio Klein e demais amigos do Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro, pela grande amizade e por colaborações prestadas.

Ao Professor Paulo Salvadorette pela parceria de campo e valiosíssimas contribuições.

Aos graduandos Tiago Webber, Diego, Igor, Diago pela ajuda prestada para o desenvolvimento do trabalho.

A empresa Copelmi Mineração pelo apoio na realização dos trabalhos.

Aos amigos Gustavo Bastiani, Adolfo Carvalho, Alexandre Grigorief, pelo apoio prestado.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) pelo auxílio financeiro.

Aos professores Volnei Borges, Vaanderlan e Zabadal do departamento de engenharia nuclear (DENU) pelas orientações disponibilizadas.

Ao Professor José Túlio Moro do serviço de radioproteção (SPR) dessa universidade pelo apoio e ajuda na realização dos trabalhos de campo que envolveram materiais radioativos.

Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas.....	xvi
Lista de Variáveis.....	xvii
Resumo.....	xviii
Abstract.....	xix

Capítulo 1

Introdução.....	1
1.1 O Estado da arte	2
1.1.1 Perfilagem geofísica no carvão.....	2
1.1.2 Geoestatística	3
1.2 - Objetivos dessa Dissertação.....	4
1.2.1 - Objetivos específicos.....	5
1.3 - Etapas.....	5
1.4 - Organização dessa dissertação.....	6

Capítulo 2

Fundamentos de Perfilagem Geofísica de Poço Aplicada a Depósitos de Carvão.....	7
2.1 - Conceitos Básicos	9
2.1.1 - Volume de investigação.....	9
2.1.2 - Profundidade de investigação	10
2.1.3 - Resolução vertical	10
2.1.4 - Efeito de poço.....	11
2.2 - Perfilagem elétrica	11
2.2.1 - Resistência e resistividade	12
2.2.2 - Influência da litologia	14
2.2.3 - Princípio de funcionamento das sondas de resistividade.....	15
2.2.3.1 - Sonda de resistividade pontual.....	16
2.2.3.2 - Sonda de Resistividade com focalizadores	17
2.3 - Perfilagem nuclear	19
2.3.1 - Aspectos fundamentais	20
2.3.1.1 - Radioatividade	20

2.3.1.2 - Radiação alfa ou partícula alfa.....	20
2.3.1.3 - Radiação beta ou partícula beta	20
2.3.1.4 - Radiação gama	21
2.3.2 - Radioatividade nas rochas.....	21
2.3.3 - Removendo os efeitos estatísticos	22
2.3.4 - Sonda para medição da emissão natural de raios gama	24
2.3.4.1 - Princípio de funcionamento	25
2.3.4.2 - Unidades de medida dos detectores.....	25
2.3.5 - Sondas para medição de radiação gama retro espalhada (Gama-Gama)	26
2.3.5.1 - Aspectos teóricos	26
2.3.5.2 - Função resposta das sondas de densidade.....	28
2.4 - Perfilagem com compasso calibrador (caliper)	31
2.4.1 - Funcionamento.....	32
2.5 - Perfilagem sônica	32
2.5.1 - Princípio teórico	32
2.5.2 - Princípio de funcionamento.....	34
2.6 - Respostas típicas dos parâmetros apresentados	34
2.7 - Uso das informações de perfilagem geofísica	35
2.8 - Procedimentos de calibragem, aferições e de campo	36
2.8.1 - Definição do ponto inicial (zero point)	36
2.8.2 - Aferição da sonda de resistividade	38
2.8.3 - Aferição da profundidade	39
2.8.4 - Calibração API para medições de gama natural	40
2.8.5 - Calibração do compasso de calibre (caliper) para medições do diâmetro de furo.....	41
2.8.6 - Calibração da sonda de gama retroespalhado para medição de densidade	42
2.8.7 - Arquivamento dos registros	45
2.8.7.1 - Arquivamento digital	45
2.8.7.2 - Arquivamento impresso	46
2.9 - Dados coletados	46
2.9.1 - Análise dos dados coletados	46

2.10 - Características de alguns parâmetros em carvão.....	47
2.10.1 - Perfil de resistividade	47
2.10.2 - Perfil de radiação gama natural	48
2.10.3 - Perfil de densidade	48
2.10.4 - Perfil sônico.....	48
2.11 - Considerações finais	49

Capítulo 3

Aplicação da perfilagem geofísica de poço a depósitos de carvão.....	50
3.1 - Aplicação de perfilagem geofísica de poço como ferramenta de auxílio ao planejamento de lavra.....	50
3.1.1 - Benefícios obtidos com a perfilagem	53
3.2. - Benefício do adensamento amostral com parfilagem geofísica de poço no planejamento de lavra a curto prazo em mineração de carvão ..	54
3.2.1 - Aplicação do estudo de caso	55
3.2.2 - Cálculo dos volumes	56
3.2.2.1 - Cálculo do volume para o banco de dados A.....	57
3.2.2.2 - Cálculo do volume para o banco de dados B.....	57
3.2.2.3 - Estimativa do bloco a partir do banco de dados B.....	58
3.2.3 - Obtenção do volume verdadeiro	61
3.2.4 - Discussão dos resultados	61
3.2.5 - Conclusões sobre o estudo	62
3.3 - Estimativa do poder calorífico com o uso de perfilagem gama retro-espalhado (gama-gama)	62
3.4 - Estimativa do teor de cinzas do carvão com o uso dos perfis de resistividade e de radiação gama natural.....	66
3.5 - Determinação da densidade a partir do perfil de gama retro-espalhado	69
3.6 - Considerações finais	70

Capítulo 4

Informação secundária, modelos de incorporação.....	72
-----------------------------------------------------	----

4.1 - Tipos de informação secundária.....	72
4.2 - Medidas de continuidade espacial para duas variáveis	73
4.2.1 - Coeficiente de correlação.....	73
4.2.2 - Covariância cruzada.....	74
4.2.3 - Variograma cruzado	75
4.3 - Krigagem simples variando médias locais (KSvml).....	76
4.4 - Estimativas por cokrigagem	80
4.5 - Estimativas por cokrigagem colocada	82
4.5.1 - Cokrigagem simples colocada (CKSC).....	83
4.5.2 - Cokrigagem ordinária colocada (CKOC)	85
4.5.3 - Modelo de Markov 1 (MM1)	87
4.5.4 - Modelo de Markov 2 (MM2)	88
4.6 - Considerações finais.....	90

Capítulo 5

Estudo de Caso	91
5.1 - Aspectos Geológicos	91
5.1.1 - Geologia Local.....	92
5.2 - Banco de dados.....	93
5.2.1 - Análise estatística dos parâmetros	94
5.2.1.1 - Cálculo dos índices de correlação	95
5.2.1.2 - Localização das amostras de teor de cinza e poder calorífico.....	97
5.2.1.3 - Estatística básica dos parâmetros teor de cinza e poder calorífico	98
5.2.2 - Medida da continuidade espacial das variáveis: teor de cinza e poder calorífico	101
5.2.2.1 - Determinação da continuidade espacial da variável teor de cinza	101
5.2.2.2 - Determinação da continuidade espacial da variável poder calorífico	104
5.2.2.3 - Determinação da continuidade espacial cruzada entre a variável poder calorífico e teor de cinza.	106
5.3 -Krigagem ordinária (KO) das variáveis teor de cinza e poder calorífico.....	110

5.3.1 - Krigagem ordinária do teor de cinza	111
5.3.2 - Krigagem ordinária do poder calorífico	114
5.4 - Estimativas contemplando informações secundárias.....	116
5.4.1 - Estimativa do poder calorífico incorporando informações secundárias a partir do Modelo de Markov 1 (MM1).	117
5.4.2 - Estimativa do poder calorífico incorporando informações secundárias a partir do Modelo de Markov 2 (MM2).	121
5.4.3 - Estimativa do poder calorífico incorporando informações secundárias a partir do método de krigagem simples variando as médias locais (KSVML).	124
5.4.4 - Estimativa do poder calorífico incorporando informações secundárias a partir do método de cokrigagem	126
5.5 - Comentários e discussão dos resultados	129
Capítulo 6	
Conclusões e recomendações	139
6.1 - Considerações finais.....	139
6.2 - Recomendações para os próximos trabalhos	141
Referências bibliográficas.....	142
Anexo A	
Especificações das sondas utilizadas para realização do trabalho - Fabricante Robertson Geologging Limited.	145
Anexo B	
Comparação entre a profundidade medida pelo equipamento de geofísica com a profundidade real levantada com a trena.	152
Anexo C	
Determinação das curvas de iso-dose para a fonte de Césio 137 de 100 mCi, utilizada pelo Laboratório de Pesquisa Mineral para perfilagens de poço.	157

Lista de Figuras

Figura 2.1 Execução da perfilagem de poço (desenho ilustrativo, sem escala).....	8
Figura 2.2 - Resolução vertical e profundidade de investigação para uma sonda com o volume de investigação esférico.	9
Figura 2.3 - Resolução vertical em uma sonda com volume de investigação esférico.....	10
Figura 2.4 - Efeito do poço (variação em suas dimensões) sobre o valor lido pela sonda	11
Figura 2.5 - Exemplo do volume (de investigação) para obtenção da resistência.	17
Figura 2.6 - Diagrama esquemático do equipamento de perfilagem resistência pontual.	15
Figura 2.7 - A esquerda é apresentada a distribuição dos eletrodos na sonda e a direita é mostrado o volume de investigação.	18
Figura 2.8 - Linhas equipotenciais e de corrente em sondas para medir resistividade com focalizadores.	19
Figura 2.9 - Séries radioativas naturais.....	22
Figura 2.10 - Aleatoriedade das contagens (decaimentos).	23
Figura 2.11 - Esboço conceitual de (a) espalhamento Compton, (b) efeito foto-elétrico e (c) formação de pares (EVANS, 1955).....	27
Figura 2.12 - Diagrama esquemático do retro espalhamento dos raios γ	29
Figura 2.13 - Curva função resposta em sondas para medição de densidade (HOFMANN et al., 1982).	29
Figura 2.14 - Densidades médias de rochas metamórficas e vulcânicas (OLHOEFT,1989).	30
Figura 2.15 - Densidades médias de rochas sedimentares (WOHLENBERG, 1982).....	30
Figura 2.16 - Densidade versus quartzo em granitos e dioritos (DORTMAN, 1976).....	31
Figura 2.17 - Tipos de ondas	33
Figura 2.18 - Caminhos percorrido pelas ondas em perfilagem sônica.	34

Figura 2.19 - Sumário de respostas de perfilagem geofísica em algumas litologias (FIRTH).	35
Figura 2.20 - Indicação do zero point.	37
Figura 2.21 - Nivelamento da posição do zero point com o solo (sonda resistividade).	37
Figura 2.22 - Caixa com valores de resistividade padrão para a calibração ..	38
Figura 2.23 - Caixa com valores de resistividade acoplada a sonda de resistividade.	39
Figura 2.24 - Escala de diâmetros conhecidos e régua acoplada na sonda para o processo de calibração, esquerda e direita respectivamente. ...	41
Figura 2.25 - Fotos dos pontos de calibração, cuba d'água e bloco de alumínio respectivamente.....	42
Figura 2.26 - Fotos da sonda com a fonte nos pontos de calibração.....	43
Figura 2.27 - Curva de calibração para a sonda gama retro espalhado para medição de densidade, com a função de ajuste.	44
Figura 2.28 - Sugestão de organização dos dados coletados para arquivamento digital.	45
Figura 3.1 - Vista geral da principal área que foram realizadas as perfilagens.	51
Figura 3.2 - Topografia da mina com indicação da área perfilada no bloco em operação. (planta de 11/2003).	51
Figura 3.3 - Exemplo de um registro geofísico com a identificação da camada de carvão onde o registro em azul é o parâmetro resistividade em escala de 0 a 150 ohm.m e o vermelho é a radiação gama natural e escala de 0 a 300 CPS.	52
Figura 3.4 - Exemplo de perfilagem no bloco NBR mostrando a camada M dividida em 03 bancos de lavra.	54
Figura 3.5 - Mapa de localização da amostras, em destaque o banco A gerado por perfilagem geofísica, a demais amostras pertencem ao banco B.	55
Figura 3.6 - Foto da área do estudo, com delimitação da área.	56
Figura 3.7 - Mapa de localização das amostras, rotacionado.	58
Figura 3.8 - Histograma de espessura referente ao banco de dados B	59

Figura 3.9 - Variogramas obtidos a partir do banco de dados B..	60
Figura 3.10 - Correlação entre densidade e PC na camada CS (formação Rio Bonito, Mina do Seival RS).	63
Figura 3.11 - Relação entre contagem gama medida pela sonda com o poder calorífico do carvão.	64
Figura 3.12 - Registro impresso da perfilagem geofísica com a identificação dos parâmetros medidos. Convém comentar que esse registro é datado do ano de 1997 onde não se possui nenhuma informação técnica do equipamento utilizado.	64
Figura 3.13 - Curva de correlação entre contagens gama (CPS) e poder calorífico (PC).	65
Figura 3.14 - Gráfico de resistividade versus radiação gama natural para diversas faixas de teores de cinza (camadas perfiladas na Mina do Seival, RS).	67
Figura 3.15 - Ábaco de correlação para o teor de cinza estimado por resistividade e contagem gama natural para carvões da Mina do Seival no estado do Rio Grande do Sul.	68
Figura 3.16 - Registro geofísico do equipamento de perfilagem geofísica com a descrição litológica.	69
Figura 4.1 - Krigagem simples variando médias locais. A componente de tendência em u é estimado por regressão do teor Cd a partir do teor Ni em cada bloco contendo o ponto u (GOOVAERTS, 1997).	79
Figura 5.1 - Mapa de localização das amostras.	94
Figura 5.2a - Curvas de dispersão com os coeficientes de correlação.	95
Figura 5.2b - Curvas de dispersão com os coeficiente de correlação.	96
Figura 5.3 - Mapa de localização dos parâmetros CZ e PC, a esquerda e direita respectivamente.	98
Figura 5.4 - Histograma da variável CZ	99
Figura 5.5 - Histograma da variável PC	99
Figura 5.6 - Polígono de influência.	100
Figura 5.7 - Variograma de superfície da variável CZ.	102
Figura 5.8 - Variogramas omnidirecional, direção 135° e direção 45° da variável CZ.	103

Figura 5.9 - Variogramas omnidirecional, direção 135° e direção 45° da variável PC.....	105
Figura 5.10 - Variograma cruzado das direções 135° e 45°, maior e menor direção respectivamente.	107
Figura 5.11 - Comparativo do ajuste variográfico para direção 135° para CZ e PC, par superior e inferior respectivamente. A esquerda o ajuste singular e a direita é o ajuste para co-krigagem.	109
Figura 5.12 - Comparativo do ajuste variográfico para direção 45° para CZ e PC, par superior e inferior respectivamente. À esquerda o ajuste singular e a direita é o ajuste para co-krigagem.	109
Figura 5.13 - Histograma do erro das estimativas por krigagem ordinária referente a variável CZ obtido pelos procedimentos de validação cruzada.....	111
Figura 5.14 - Mapa da malha de krigagem da variável CZ.	112
Figura 5.15 - Mapa da malha da variância de krigagem da variável CZ.	113
Figura 5.16 - Histograma dos blocos estimados por krigagem ordinária da variável CZ.....	113
Figura 5.17 - Histograma do erro das estimativas por krigagem ordinária da variável PC, nos procedimentos de validação cruzada.	114
Figura 5.18 - Histograma das estimativas por krigagem ordinária referente a variável CZ.....	115
Figura 5.19 - Mapa da malha de krigagem ordinária da variável PC.	115
Figura 5.20 - Mapa da malha da variância de krigagem ordinária da variável PC.	116
Figura 5.21 - Apresentação do programa desenvolvido para o cálculo da validação cruzada para estimativas contemplando informações secundárias.	118
Figura 5.22 - Histograma dos erro da co-estimativas por MM1 da variável PC.....	119
Figura 5.23 - Histograma das co-estimativas por MM1 da variável PC.....	119
Figura 5.24 - Mapa da malha de co-estimativa por MM1 da variável.	120
Figura 5.25 - Mapa da variância de co-estimativa por MM1 da variável PC.	120

Figura 5.26 - Histograma do erro das co-estimativas por MM2 da variável PC.	122
Figura 5.27 - Histograma das co-estimativas por MM2 da variável PC.	122
Figura 5.28 - Mapa da malha de co-estimativa por MM2 da variável PC. ...	123
Figura 5.29 - Mapa da variância de co-estimativa por MM2 da variável PC.	123
Figura 5.30 - Ilustração do cálculo do resíduo no ponto do centro do grid onde existem as informações teor de cinza e PC medido (vermelho). Em azul temos os valores calculados para o PC pela regressão e para o resíduo.....	124
Figura 5.31 - Mapa da malha das estimativas do PC por KSVML.	125
Figura 5.32 - Histograma das estimativas por KSVML.....	125
Figura 5.33 - Histograma do erro das co-estimativas por cokrigagem, obtido pelo processo de validação cruzada.	127
Figura 5.34 - Histograma das co-estimativas por cokrigagem da variável PC.	127
Figura 5.35 - Mapa da malha de estimativa por cokrigagem da variável PC.	128
Figura 5.36 - Mapa da variância de estimativa por cokrigagem da variável PC.	129
Figura 5.37 - Comparativo das variâncias das estimativas dos métodos KO, MM1, MM2 e CKO da variável poder calorífico.	130
Figura 5.38 - Sobreposição entre as estimativas por krigagem ordinária com os dados originais.	131
Figura 5.39 - Sobreposição entre as estimativas por co-krigagem colocada (MM1) com os dados originais.	132
Figura 5.40 - Sobreposição entre as estimativas por co-krigagem colocada (MM2) com os dados originais.	133
Figura 5.41 - Sobreposição entre as estimativas por co-krigagem com os dados originais.	134
Figura 5.42 - Sobreposição entre as estimativas por krigagem simples variando médias locais com os dados originais.	135

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 Exemplos de valores de resistividade em alguns minerais ou rochas (TELFORD et al., 1990).....	13
Tabela 2.2 - Valores de resistividade médios obtidos por perfilagem geofísica na bacia carbonífera na região do município de Butiá/RS.	14
Tabela 2.3 - Velocidades típicas de perfilagem (HOFMANN et al., 1982).....	24
Tabela 2.4 - Contagem gama retroespalhada nas amostras medidas.....	43
Tabela 3.1 - Quadro comparativo entre os resultados obtidos	61
Tabela 3.2 - Uma parte do banco de dados, referente às análises químicas com a contagem gama retro espalhada da camada de carvão estudada.	65
Tabela 5.1 - Estratigrafia local da região de estudo (KREBS et al., 1994). ...	92
Tabela 5.2 - Variáveis contidas no banco de dados com os respectivos parâmetros estatísticos.....	93
Tabela 5.3 - Resumo das correlações entre as variáveis.....	96
Tabela 5.4 - Resumo entre a média original e desagrupada.	101
Tabela 5.5 - Resumos dos ajustes variográficos, sendo os ângulos 135° (índice 1) e 45° (índice 2), maior e menor continuidade respectivamente. Modelo esférico com duas estruturas índices a e b referentes a primeira e segunda estrutura.	108
Tabela 5.6 - Resumo dos parâmetros estatísticos (variável poder calorífico).	136

Lista de Variáveis

x	variável “x” ou primária.
y	variável “y” ou secundária.
m_x	média da variável “x”.
m_y	média da variável “y”.
σ_x	desvio padrão referente a variável “x”.
σ_y	desvio padrão referente a variável “y”.
h	vetor distância entre dois pontos.
ρ	coeficiente de correlação.
z_i	dados “z” locado no ponto “i”.
z_j	dados “z” locado no ponto “j”.
$N(h)$	número de pares presentes na distância “h”.
$\rho_1(h)$	correlograma referente à variável primária.
$\rho_2(h)$	correlograma referente à variável secundária.
$Z_i(u)$	dado da variável “ Z_i ” no ponto “u”.
$Z_i(u')$	dado da variável “ Z_i ” no ponto “u' ”.
u'	posição afastada de “u”.
$Z_i^*(u)$	variável “ Z_i ” a ser estimada no ponto “u” a partir de uma função.
$z_i^*(u)$	variável “ Z_i ” estimada no ponto “u”.

Resumo

Campanhas de amostragem são indispensáveis para o desenvolvimento da pesquisa e do planejamento de lavra. A perfilagem geofísica é um método de amostragem indireta, que vem se mostrando muito eficaz com o desenvolvimento de novas tecnologias para medições de grandezas físicas. Com baixo custo de operação e versatilidade de manuseio a perfilagem geofísica pode ser realizada concomitantemente com as operações de lavra, proporcionando reposta imediata do parâmetro medido. No entanto os métodos geofísicos de prospecção, por serem indiretos, não apresentam uma grande precisão e devido a isso os dados obtidos por perfilagem geofísica não podem ter a mesma importância que as informações obtidas por testemunhos de sondagem.

O conceito de informação primária e secundária vem sendo amplamente discutido e aplicado devido à necessidade de uma melhoria do conhecimento do atributo geológico principal, desde que o mesmo se correlacione com algum outro parâmetro secundário. A redução de custos via aproveitamento de informações secundárias e métodos alternativos de amostragem também são fatores que influenciam essa aplicação.

Por este motivo, essa dissertação levanta o tema da aplicação de perfilagem geofísica de poço em depósitos de carvão para obtenção de informações secundárias. Concomitantemente a isso foram aplicadas metodologias capazes de combinar informações adquiridas por perfilagem geofísica, ou por um outro método, a um banco de dados obtido por amostragem com recuperação de testemunho.

Concluiu-se que independente do método empregado para incorporação de informação secundária, as estimativas apresentam melhorias significativas quando comparadas com as estimativas sem a contemplação de informações secundárias. Conseqüentemente a aplicação de perfilagem pode ser uma ferramenta de extrema importância e confiável para obtenção de informação secundária e também para melhoria do planejamento de lavra para curto prazo.

Abstract

Core samples obtained by drilling surveys are a current practice in the mining industry for mineral characterization and mine planning. Geophysical logging is an indirect method of sampling, and it has become very effective with the new electronics technologies to the measurements of physical quantities. Geophysical logging can be used without disturbing mining operations, it also gives immediate results, with easy and fast data acquisition at substantially low costs. But geophysical methods, being indirect, are not very accurate. Due to that, geophysical data cannot have the same weight that core samples data.

Hard and soft information concepts are being widely studied and applied due to the requirement of knowledge of the main geologic attribute, since what exists a good correlation with another secondary parameter. Alternative methods of sampling and reduction of cost with background information also are factors that influence this application.

For this reason, this work treats the subject of the application of well logging for coal deposits to attain secondary information and its utilization with drilling samples for reduction of uncertainty associated in the estimates.

Independent of the method used for incorporation of secondary information, the estimates present comparative significant improvements when with the estimates without the contemplation of secondary information. With that, geophysical logging can be an important tool for attainment of secondary information and also to improve the short term planning.

Capítulo 1

1 Introdução

Campanhas de amostragem são indispensáveis para o desenvolvimento da pesquisa e do planejamento de lavra. O custo de uma campanha de amostragem pode ser elevado e depende do método utilizado.

A perfilagem geofísica é um método de amostragem indireta, que vem se mostrando muito eficaz com o desenvolvimento de novas tecnologias para medições de grandezas físicas.

Com baixo custo de operação e versatilidade de manuseio a perfilagem geofísica pode ser realizada concomitantemente com as operações de lavra, proporcionando reposta imediata do parâmetro medido. A interpretação pode ser realizada, em campo, desde que seja conhecida a relação entre o parâmetro medido e a litologia.

Como a perfilagem geofísica de poço não exige uma grande preparação específica de campo, podendo ser realizada nos furos destinados para o desmonte, torna-se, portanto, fácil a aquisição de um grande número de amostras.

No entanto os métodos geofísicos de prospecção, por serem indiretos, não apresentam exatidão quando comparado com amostragem por sondagem com testemunho, onde o parâmetro de interesse é analisado diretamente (análise química) em uma amostra, em contrapartida o custo da perfilagem geofísica é substancialmente menor e ainda a perfilagem geofísica não existe o problema de recuperação de testemunho, que em alguns caso pode ser baixa.

Por serem métodos distintos de amostragem e apresentarem suporte amostral e acuracidade diferentes, as informações obtidas por perfilagem geofísica não podem ter o mesmo peso que as informações oriundas de testemunhos de sondagem, para o cálculo de estimativas.

Em pesquisas e planejamentos de lavra, a incerteza associada às estimativas, pode ser reduzida com o incremento de informações. Informações obtidas a partir da perfilagem geofísica podem ser utilizadas desde que sejam consideradas como informação de apoio (informação secundária), isto é, não devem ser agregadas ao banco de dados principal (informação primária). A vantagem do uso dessas informações é que são mais numerosas, apresenta facilidade e baixo custo de aquisição onde a informação de interesse pode ser obtida simultaneamente com a execução da perfilagem.

1.1 O Estado da arte

Neste item serão abordados, sucintamente, o desenvolvimento da perfilagem geofísica no carvão e a utilização da geoestatística para redução da incerteza com o uso de informações secundárias.

1.1.1 Perfilagem geofísica no carvão

Os primeiros trabalhos de perfilagem geofísica em carvão foram realizados por Conrad Schlumberger na França em agosto de 1928. O parâmetro medido era a resistividade, que é similar aos registros de resistividade realizados com os equipamentos de hoje (HOFFMAN et al., 1982).

Por volta do ano de 1965 houve o crescimento do uso de equipamentos de perfilagem geofísica aplicado ao carvão, sendo que os geofísicos da época utilizavam somente o parâmetro de resistividade, que era normalmente usado para investigação de água subterrânea. Na mesma época foi descoberto que, para algumas áreas, as camadas de carvão podiam ser identificadas devido sua alta

resistividade. No entanto, em outras áreas, o arenito ou rochas sedimentares com cimento carbonático também apresentam alta resistividade dificultando a identificação do carvão. Essa semelhança da resistividade entre o carvão e o arenito e outras rochas sedimentares também pode ser identificada nos carvões brasileiros, principalmente nos carvões do Rio Grande do Sul.

A sonda para medição de emissão natural de raios gama ajuda na identificação da camada de carvão, mas também apresenta essa mesma limitação para a diferenciação entre rochas sedimentares do carvão.

Sondas de densidade foram utilizadas para exploração de carvão no final dos anos 60. Pelo fato da densidade do carvão ser menor, quando comparado com as litologias no seu entorno, torna-se fácil a sua identificação. Porém a utilização desse tipo de sonda exige o uso de uma fonte radioativa (HOFFMAN et al., 1982).

Kayal (1981) desenvolveu trabalhos com aplicação de perfilagem geofísica em carvão, onde é possível estimar o teor de cinza a partir dos parâmetros de resistividade e radiação gama natural.

Atualmente, no Brasil, não existem grandes estudos de perfilagem geofísica aplicada ao carvão. Algumas aplicações de perfilagem geofísica para determinação de parâmetros físico-químicos do carvão que serão discutidas mais detalhadamente no capítulo 2 dessa dissertação.

1.1.2 Geoestatística

Uma análise estatística clássica de um conjunto de dados não prevê a interdependência espacial entre as informações. Conseqüentemente os métodos clássicos de estimativas como o do polígono e do triângulo não consideram a continuidade espacial do fenômeno nas estimativas (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989).

Em meados dos anos 60 foram desenvolvidos os primeiros trabalhos que consideram a continuidade espacial dos dados na teoria das variáveis regionalizadas. Posteriormente foi justificado porque as variáveis regionalizadas são dependentes de suas posições espaciais relativas e também como pode ser medida a variações espaciais (YAMAMOTO 2001 Apud ROYLE 1979).

Matheron (1962,1963) popularizou a krigagem, o qual é um estimador baseado em regressão linear.

Outros autores como Journel e Huijbregts (1978) e Isaaks e Srivastava (1989) desenvolveram trabalhos importantes nessa área.

O conceito de informação primária e secundária vem sendo amplamente discutido e aplicado devido à necessidade de um maior conhecimento do atributo geológico explorado. A redução de custos via aproveitamento de informações e métodos alternativos de amostragem também são fatores que influenciam essa aplicação.

Freqüentemente, a amostragem da variável secundária é muito mais extensiva que a variável primária. O caso limite é quando a variável secundária é tão exaustivamente amostrada que, além do dado secundário colocado, possui informação em cada nó da malha onde a variável primária vai ser estimada. Nesses casos Rivoirard (1999) e Goovaerts (1997) sugeriram alguns métodos para utilização somente dos valores dos dados secundários colocados com o nó a ser estimado.

Técnicas clássicas para estimativas por cokrigagem de variáveis primárias $Z_1(u)$ por meio de combinação linear tanto de dados primários como secundários pode ser vista em Goovaerts (1997).

1.2 Objetivos dessa Dissertação

Essa dissertação apresenta dois objetivos gerais:

i - Avaliar a perfilagem geofísica como método alternativo para obtenção de parâmetros (informações) importantes na avaliação de um jazimento de carvão possibilitando seu uso como informação secundária;

ii - Avaliar a utilização de modelos de correionalização para incorporação de informações secundárias.

1.2.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos dessa dissertação que concerne a perfilagem geofísica:

- i - Propor procedimentos e parâmetros de campo adequados para obtenção de informações geofísicas confiáveis.
- ii - Adequar os parâmetros obtidos por perfilagem geofísica para obter parâmetros físico-químicos do carvão.

Os objetivos específicos dessa dissertação que se refere a geoestatística:

- i - Definidas as informações primária e secundária, avaliar a influência na incorporação de informações secundárias pelos diferentes métodos de estimativas por cokrigagem,
- ii - Realizar um comparativo entre as estimativas e coestimativas.

1.3 Etapas

A metodologia empregada para alcançar os objetivos são:

- i - Estudar a perfilagem geofísica e suas aplicações.
- ii - Realizar da perfilagem geofísica em campo, determinando espessura da camada de carvão, e verificando as particularidades e os cuidados que envolvem essa prática.
- iii - Verificar um método para determinação de algum parâmetro físico-químico do carvão com dados levantados por perfilagem geofísica.
- iv - Estudar a interação de radiação gama com a matéria e dos procedimentos para o uso de fonte radioativa
- v - Revisar os métodos geoestatísticos empregados para redução da incerteza via incorporação de informações secundárias.

vi - Determinar variáveis correlacionáveis para emprego dos métodos de co-estimativas e criação de modelos de teores de poder calorífico com estimativas e co-estimativas.

1.4 Organização dessa Dissertação

Os capítulos seguintes estão organizados da seguinte forma:

- Capítulo 2, apresenta o tema perfilagem geofísica,. Apresenta também conceitos de alguns tipos de sondas e os respectivos princípios de funcionamento.
- Capítulo 3, trata das rotinas de campo bem como dos procedimentos de calibração e algumas suas aplicações em carvão. Alguns resultados referentes a este tema também são mostrados e discutidos.
- Capítulo 4, apresenta uma revisão de alguns métodos existentes na incorporação de informações secundária.
- Capítulo 5, aplica a metodologia em um estudo de caso. Analise dos resultados obtidos também são discutidos.
- Capítulo 6, inclui conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentos de Perfilagem Geofísica de Poço e Aplicações a Depósitos de Carvão

O perfil de um poço é a imagem, ao longo da profundidade, de uma ou mais características ou propriedades de uma estratigrafia atravessada pelo poço.

Perfilagem de poço é a realização de um perfil em um poço, vertical ou inclinado, com medições de determinados parâmetros. O perfil é traçado a partir de uma sonda que é içada ao longo do poço onde o perfil do parâmetro medido é registrado simultaneamente. Em uma mesma sonda, mais de um parâmetro pode ser medido. A Figura 2.1, mostra a seqüência de uma perfilagem de poço, inicialmente (em a) a sonda é colocada no fundo do poço onde é obtido sua profundidade, após o acionamento do guincho a sonda é içada até a superfície (b,c) medindo os parâmetros referente ao tipo de sonda.

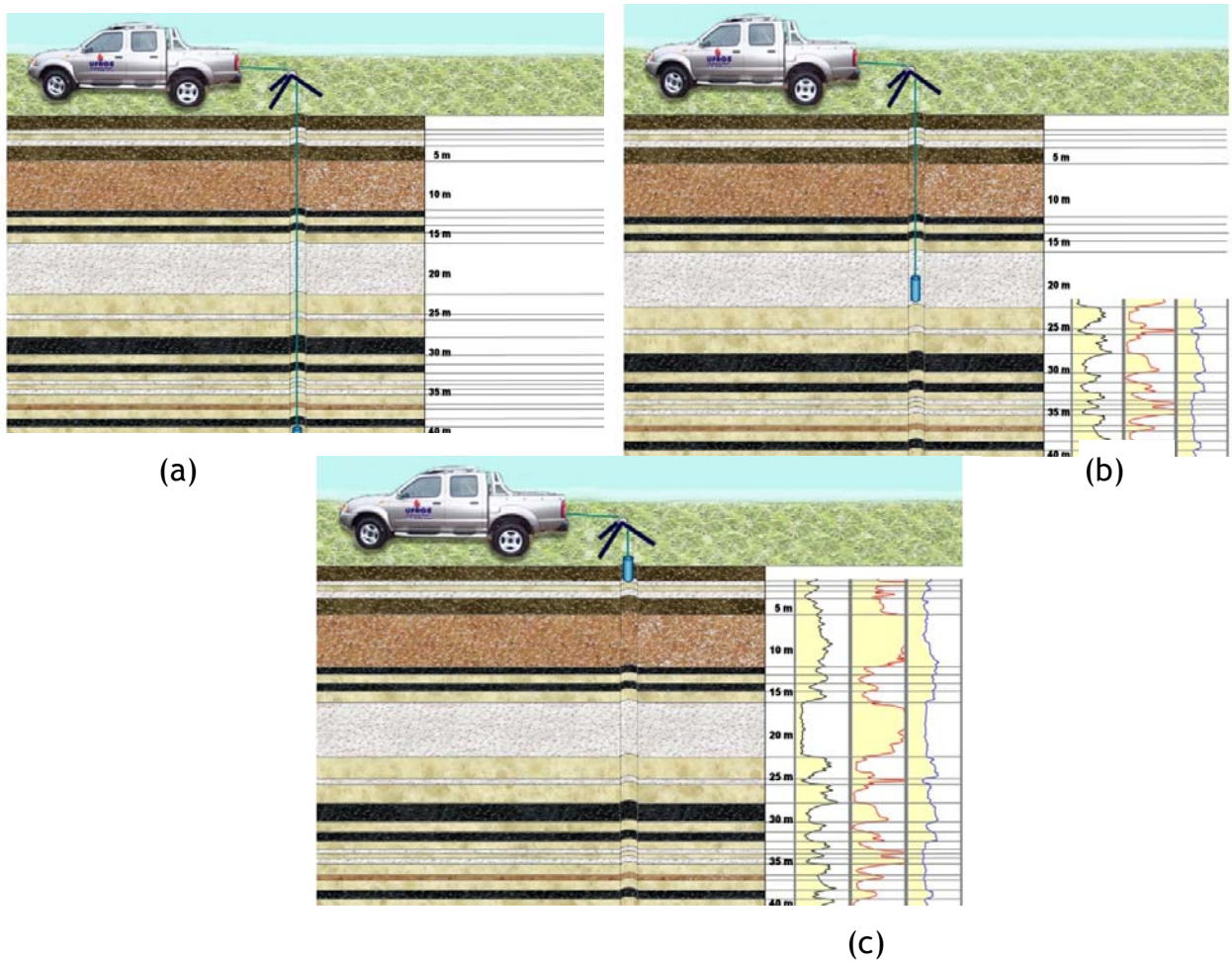


Figura 2.1 Execução da perfilagem de poço (desenho ilustrativo, sem escala).

A perfilagem de poço é uma prática audaciosa e que envolve grandes tecnologias. Usam-se complexos módulos eletrônicos e transdutores ligados nas sondas que são conduzidas para o interior do furo em grandes profundidades, podendo chegar até a alguns quilômetros. Nessas profundidades, choques mecânicos são freqüentes. Temperaturas e pressões começam a se tornar elevadas e suficientes para reduzir a performance dos cabos, conectores e das sondas. Todas esses fatores são considerados nas medidas de propriedades físicas das rochas e fluídos.

Devido a essas condições de trabalho, os equipamentos de perfilagem geofísica de poço devem ser de alta qualidade, resistente e tecnologicamente capaz de medir as grandezas físicas com precisão.

2.1 Conceitos Básicos

Para a melhor compreensão, serão discutidos alguns conceitos e definições referentes a perfilagem geofísica.

2.1.1 Volume de investigação

O volume de investigação é o campo no qual o detector do equipamento de perfilagem coleta as informações para as medições dos parâmetros. O volume de investigação é relacionado com três outros conceitos básicos: profundidade de investigação, resolução vertical e efeito do poço. A Figura 2.2 ilustra graficamente esses conceitos.

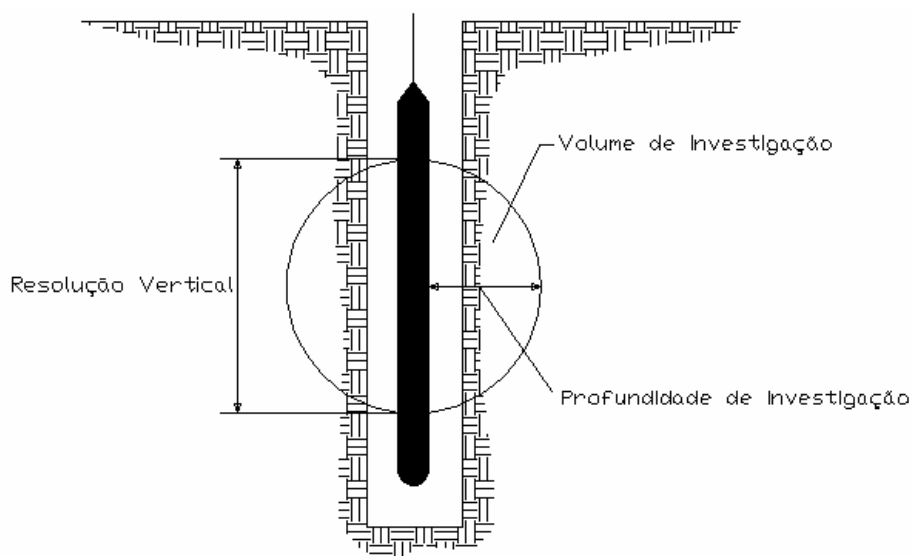


Figura 2.2 - Resolução vertical e profundidade de investigação para uma sonda com o volume de investigação esférico.

Existem diversas formas de volume de investigação: esférico, elipse, disco, cônico. A forma do volume de investigação é determinada pela maneira como foi construída a sonda. O espaçamento entre os eletrodos, em sondas elétricas, e a

distância entre a fonte e receptores, nas sondas radioativas, são fatores fundamentais para definir o volume de investigação.

2.1.2 Profundidade de investigação

A profundidade ou raio de investigação é a extensão do volume de investigação em direção perpendicular a sonda. Os mesmos fatores que influenciam o volume de investigação, também influenciam a profundidade de investigação.

2.1.3 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 conforme é mostrado na Figura 2.3. Sondagens capazes de medir camadas poucas espessas são chamadas de sondas de alta resolução.

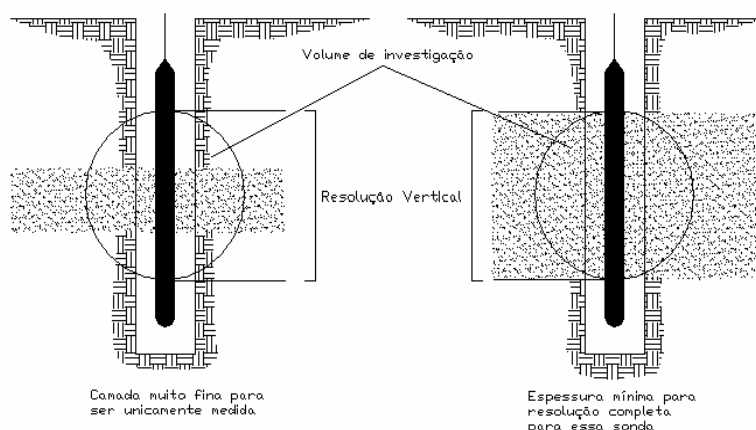


Figura 2.3 - Resolução vertical em uma sonda com volume de investigação esférico.

Existem, também, problemas de resolução vertical em camadas não perpendiculares a sonda. Nesses casos, o parâmetro medido tende a ser a média

das leituras feitas nas várias camadas que compõem a estratigrafia no entorno do ponto medido.

2.1.4 Efeito de poço

O objetivo da perfilagem geofísica é a medida de um parâmetro relacionado somente a uma litologia. Como foi visto anteriormente, o volume de investigação e a resolução vertical podem afetar a medida. Porém, as condições do poço como mudanças de diâmetro, revestimentos e o fluido de perfuração, também, podem afetar no valor do parâmetro medido (Figura 2.4).

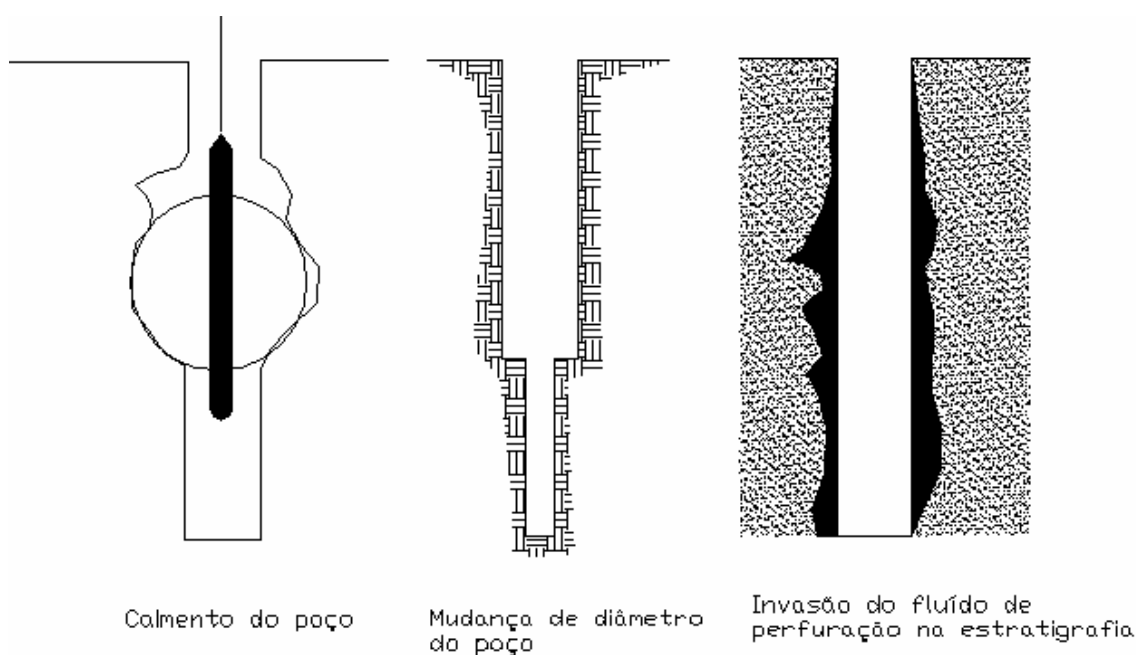


Figura 2.4 - Efeito do poço (variação em suas dimensões) sobre o valor lido pela sonda .

2.2 Perfilagem elétrica

A perfilagem elétrica responde ao fluxo de corrente elétrica entre a sonda e a estratigrafia.

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 2.5 e equação 1). Assim, quando uma corrente passa através de um fio, a resistência depende somente do comprimento total do fio. A resistência é uma medida absoluta em ohms em quaisquer condições de volume, temperatura e pressão existente no momento da medida.

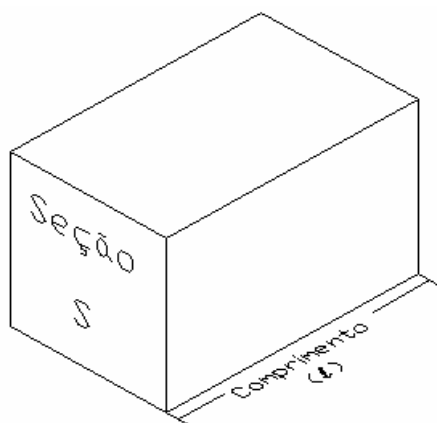


Figura 2.5 - Exemplo do volume (de investigação) para obtenção da resistência.

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

$$R = \frac{\rho \times l}{S}, \quad (2.1)$$

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

A resistividade de um material homogêneo medido em dadas condições de temperatura, saturação, é constante e independe do volume. Resistividade é normalmente medida em ohms x metro e é definido como a resistência elétrica 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 ou rochas (TELFORD et al., 1990).

Mineral / Rocha	Resistividade (variação ou valor médio em ohm.m)
Bauxita	200 - 6000
Água superficial (doce)	10 - 100
Água do mar	0,2
Grafita	$10^4 - 5 \times 10^3$
Granito porfirítico (saturado)	$4,5 \times 10^3$
Diabasio	$20 - 5 \times 10^7$
Basalto	$10 - 1,3 \times 10^7$
Xisto	20×10^4
Gnaise	3×10^6
Quartzito	$10 - 2 \times 10^8$
Argilas consolidadas	$20 - 2 \times 10^3$
Argilas inconsolidadas (úmidas)	20
Conglomerados	$2 \times 10^3 - 10^4$
Arenito	$1 - 6,4 \times 10^8$
Calcário	50×10^7

Na Tabela 2.2, apresentam-se valores de resistividade medidos pelo equipamento de geofísica detalhado no anexo A.

Tabela 2.2 - Valores de resistividade médios obtidos por perfilagem geofísica na bacia carbonífera na região do município de Butiá/RS.

Mineral / Rocha	Resistividade (variação ou valor médio em ohm.m)
Siltito intemperizado	10
Carvão (camada S)	40
Carvão (camada I ₁)	70

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

$$\rho = F \times \rho_w, \quad (2.2)$$

onde p é a resistividade, p_w é a resistividade da água salgada e F é o fator de formação.

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

$$F = \phi^{-m}, \quad (2.3)$$

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 e NELSON, 1985)

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:

$$F = a \times \phi^{-m}, \quad (2.4)$$

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 fluidos 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.

$$R = \frac{E}{I}, \quad (2.5)$$

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

Existem dois problemas 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 2.6, 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).

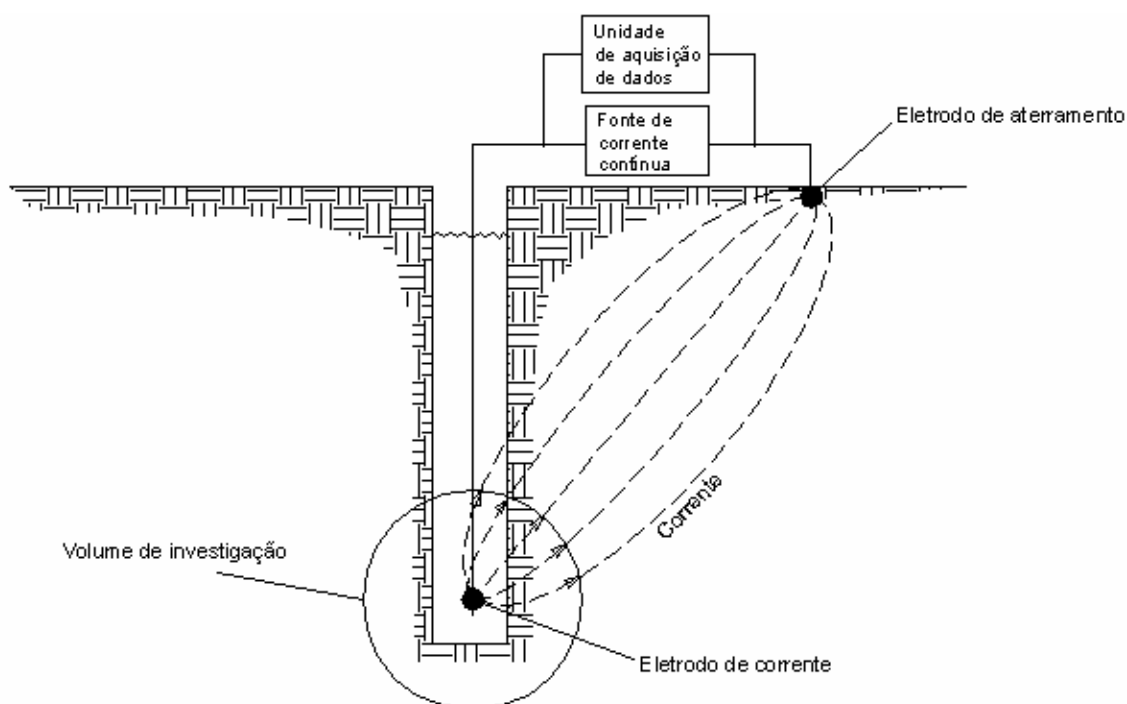


Figura 2.6 - Diagrama esquemático do equipamento de perfilagem resistência pontual.

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.

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 perfilagem de resistividade com focalizadores é discutido em Guyod (1951). Esses equipamentos são providos de eletrodos auxiliares (eletrodos focalizadores) colocados acima e abaixo do eletrodo de corrente.

Esses equipamentos são providos por 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 2.7). 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 2.2.3).

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

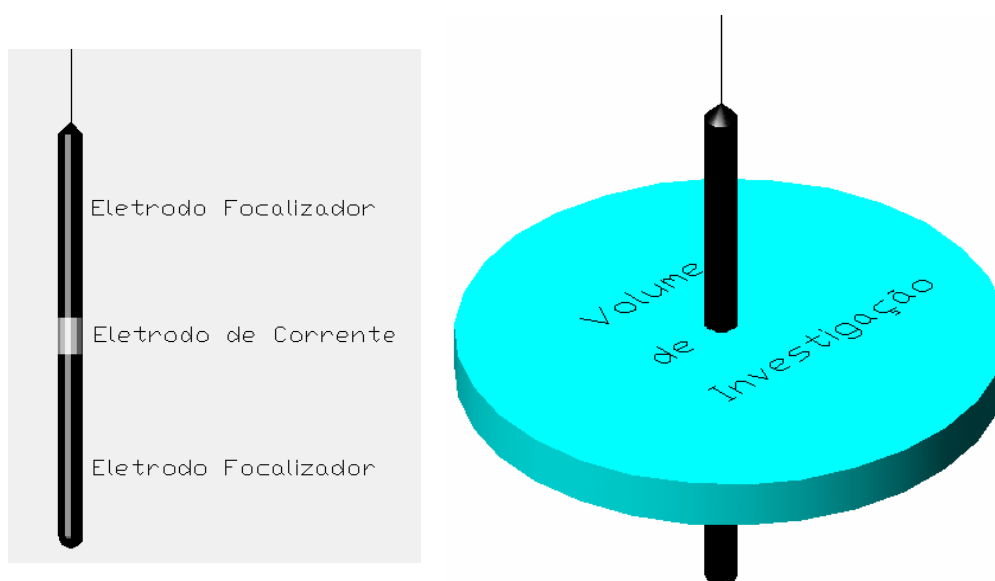


Figura 2.7 - A esquerda é apresentada a distribuição dos eletrodos na sonda e a direita é mostrado o volume de investigação.

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 2.8.

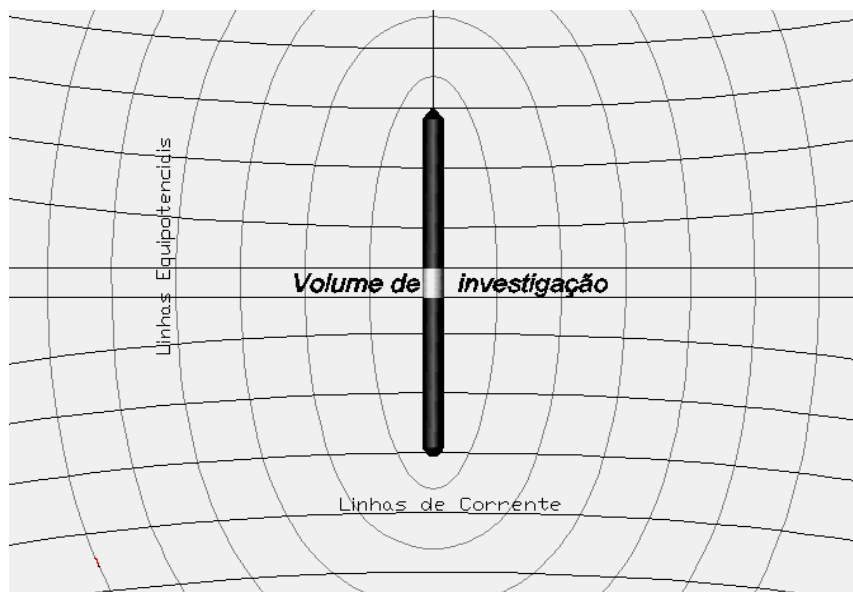


Figura 2.8 - Linhas equipotenciais e de corrente em sondas para medir resistividade com focalizadores.

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 Perfilagem nuclear

Sondas nucleares empregam processos nucleares para investigação da estratigrafia. Algumas medem o decaimento nuclear natural e outras utilizam uma fonte de radiação de baixa atividade, e avaliam a interação entre a radiação e os átomos presentes na rocha.

2.3.1 Aspectos fundamentais

2.3.1.1 Radioatividade

A radioatividade foi descoberta pelo francês Antoine Henri Becquerel em 1896 devido ao esquecimento de uma rocha de urânio sobre um filme fotográfico. Esse fato levou a uma descoberta interessante, o filme foi velado por “algo” emanado pela rocha. Comprovou-se que um núcleo muito energético, por ter excesso de partículas ou de carga, tende a estabilizar-se, emitindo algumas partículas.

2.3.1.2 Radiação alfa ou partícula alfa

Um dos processos de estabilização de um núcleo com excesso de energia é o da emissão de um grupo de partículas positivas, constituídas por dois prótons e dois nêutrons (núcleos de hélio - He), e da energia a elas associada. A emissão dessas partículas é chamada de radiação alfa α .

2.3.1.3 Radiação beta ou partícula beta

Outra forma de estabilização, quando existe no núcleo um excesso de nêutrons em relação a prótons, é através da emissão de uma partícula negativa, um elétron, resultante da conversão de um nêutron em um próton. É a partícula beta negativa ou, simplesmente, partícula beta β .

No caso de existir excesso de cargas positivas no núcleo (prótons), é emitida uma partícula beta positiva, chamada pósitron, resultante da conversão de um próton em um nêutron. Portanto, a radiação beta é constituída de partículas

emitidas por um núcleo, quando da transformação de nêutrons em prótons (partículas beta) ou de prótons em nêutrons (pósitrons).

2.3.1.4 Radiação gama

Geralmente, após a emissão de uma partícula α ou β , o núcleo resultante desse processo, ainda com excesso de energia, procura estabilizar-se, emitindo esse excesso em forma de onda eletromagnética, da mesma natureza da luz, denominada radiação gama γ .

2.3.2 Radioatividade nas rochas

Na natureza, existem elementos radioativos que estão em desintegração desde a formação do planeta terra. Esses elementos estão presentes no solo e nas rochas e, alguns deles, ainda em desintegração. O quadro da Figura 2.9 apresenta o decaimento das séries radioativas naturais, e respectivas meias vidas.

SÉRIES RADIOATIVAS NATURAIS

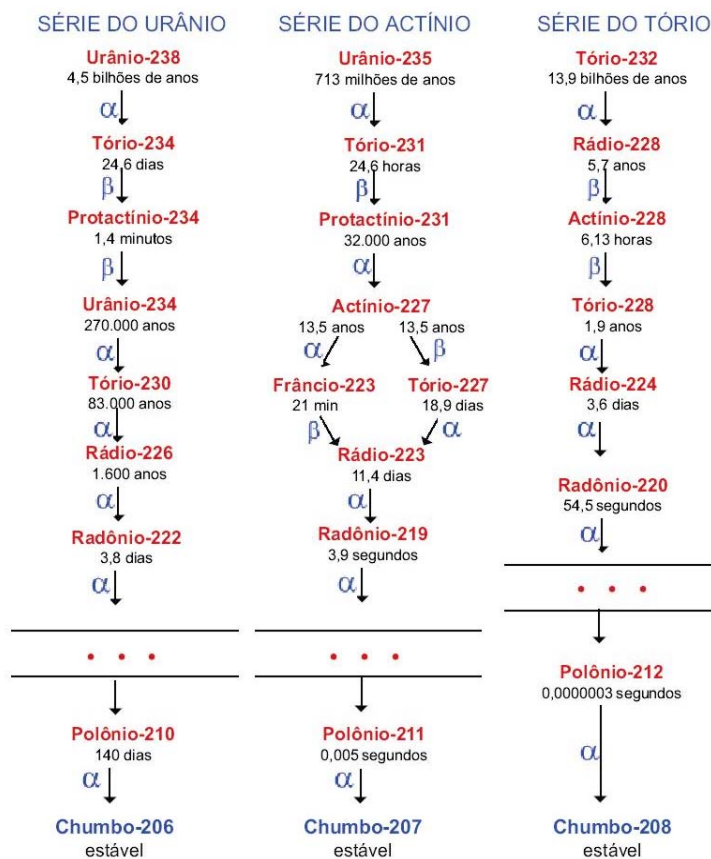


Figura 2.9 - Séries radioativas naturais.

Em perfilagem geofísica, pode ser conveniente pensar em cada raio gama como um fóton ou partícula que pode ser contada por um detector. Esse tipo de sonda mede o decaimento nuclear natural da rocha perfilada.

Somente alguns elementos instáveis estão significativamente presentes em uma camada de carvão: potássio 40 (K^{40}), urânio 238 (U^{238}), urânio 235 (U^{235}) e tório 232 (Th^{232}) (HOFFMAN et al., 1982).

2.3.3 Removendo os efeitos estatísticos

A produção de raios gama, nêutrons e de outras partículas por decaimento de um núcleo atômico instável não é uma grandeza constante mensurável. O

decaimento de um núcleo é um evento randômico, o que significa que um decaimento em um dado instante pode ser diferente em um outro instante. A Figura 2.10 mostra um registro geofísico onde é possível observar a aleatoriedade das contagens (decaimentos) de uma fonte de raios gama de atividade conhecida.

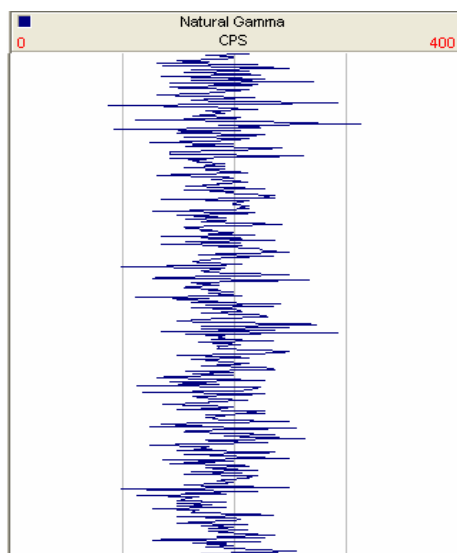


Figura 2.10 - Aleatoriedade das contagens (decaimentos).

A natureza randômica dos decaimentos nucleares afeta os valores dos dados medidos pela sonda e os efeitos da variação estatística devem ser separados dos efeitos ocasionados referente às mudanças de litologia.

A contagem média se torna mais representativa quanto mais longo for o período amostrado, o número de contagens aumenta e os efeitos da variação estatística diminuem. Uma boa aproximação do erro estatístico de uma contagem para bases de tempos diferentes é obtida pela seguinte equação (HOFMANN et al., 1982):

$$erro = \sqrt{\frac{tempo \times contagem\ média}{tempo}}, \quad (2.6)$$

A determinação do tempo de coleta e a velocidade da perfilagem é um parâmetro a ser definido pelo geofísico. O dado litológico deve ser maximizado,

enquanto a variação estatística deve ser mantida em limites aceitáveis. É possível reduzir a variação estatística usando uma grande base de tempo e com baixa velocidade de perfilagem, mas nem sempre isto é muito prático. A Tabela 2.3 apresenta velocidades apropriadas para diferentes sondas.

Tabela 2.3 - Velocidades típicas de perfilagem (HOFMANN et al., 1982).

Tipo de sonda	Velocidade geral (m/min)	Velocidade para detalhamento (m/min)
Elétrica	6 - 10	6 - 10
Radiação	3 - 10	2 - 5
Compasso de calibre	6 - 10	6 - 10
Sônico	6 - 10	6 - 10

As velocidades citadas na Tabela 2.3 são velocidades indicadas para não comprometer a informação medida. No entanto a qualidade do poço pode influenciar na determinação da velocidade, pois, pode ocorrer o risco de trancamento da sonda no furo ou no revestimento.

2.3.4 Sonda para medição da emissão natural de raios gama

O perfil de radiação gama natural é amplamente empregada em exploração de carvão e sua principal aplicação é para identificação de litologias. Após a determinação da correlação entre o perfil e testemunhos, o perfil de radiação gama natural é uma boa ferramenta para identificação das camadas em um depósito de carvão, principalmente quando combinado com o perfil de resistividade.

A perfilagem de radiação gama natural pode ser executada tanto em poços preenchidos com líquido ou vazios e é pouco afetado por irregularidades, fluídos de perfuração ou revestimento do poço.

2.3.4.1 Princípio de funcionamento

As sondas de perfilagem de emissão natural de raios γ são as mais simples das sondas nucleares, pois incluem somente um detector e não utilizam fonte radioativa. Elas detectam a radiação γ emitida naturalmente pela rocha. Diversos tipos de detectores podem ser utilizados nesse tipo de sonda incluindo câmara de ionização, contadores Geiger-Müller e cintilômetros. Os cintilômetros, por serem eficientes, são os mais empregados, porém, são muito frágeis (item 2.3.4.2). A profundidade de investigação, em sondas de medição de radiação gama natural, varia dependendo da densidade do material que está sendo perfilado. Em materiais densos a profundidade de investigação diminui.

2.3.4.2 Unidades de medida dos detectores

O sistema de detecção de radiação γ é composto por cintilômetros o qual determina o número de decaimentos por unidade de tempo (CPS - Contagens Por Segundo). Os cintilômetros são cristais de lodo de sódio ativado com uma pequena porção de tálio, que, quando ionizados, por partículas, emitem luz visível. A intensidade dessa luz é proporcional à energia de ionização da partícula.

A luz é detectada por um tubo foto-multiplicador onde, este produz um pulso com amplitude proporcional a energia da partícula detectada. Nas sondas empregadas, o tubo foto-multiplicador conta os pulsos sem distinção da faixa de energia, onde realizam a contagem total dos decaimentos.

2.3.5 Sondas para medição de radiação gama retro espalhada (Gama-Gama)

Os perfis obtidos por esse tipo de sonda são, normalmente, referenciados como perfis de densidade ou perfil gama-gama. Esses equipamentos utilizam uma fonte de raios gama o qual é medida a interação entre a radiação gama e os átomos das rochas que compõem os estratos.

2.3.5.1 Aspectos teóricos

Os raios- γ e o material, no qual a radiação atravessa, interagem de três diferentes maneiras: por espalhamento Compton, por absorção fotoelétrica e por formação de pares.

Espalhamento Compton. Em energias intermediárias o espalhamento Compton é o efeito dominante. A radiação gama é espalhada a partir de um elétron com energia de ligação desprezível quando comparada com a energia dos raios- γ . Somente uma parte da energia dos raios- γ é dada ao elétron e a energia γ resultante (é espalhada) e pode ser calculada através da lei de conservação de energia e momento (Figura 2.11, item a).

Absorção fotoelétrica. Em baixas energias, o efeito fotoelétrico é a interação dominante. Os elétrons da órbita de um átomo apresentam níveis de energias (energia de ligação). Se a energia do raio γ exceder a energia de ligação, essa energia poder ser toda transmitida ao elétron. O elétron deixará sua órbita (o átomo será ionizado) com energia cinética igual à diferença entre a energia de ligação e a energia do raio γ (Figura 2.11 item b).

Formação de pares. Ocorre se a radiação γ possuir energia superior a 1,02 MeV. Essa energia pode ser convertida em um par elétron-pósitron quando se aproxima do núcleo. Este fenômeno é chamado de produção de pares (Figura 2.11 item c).

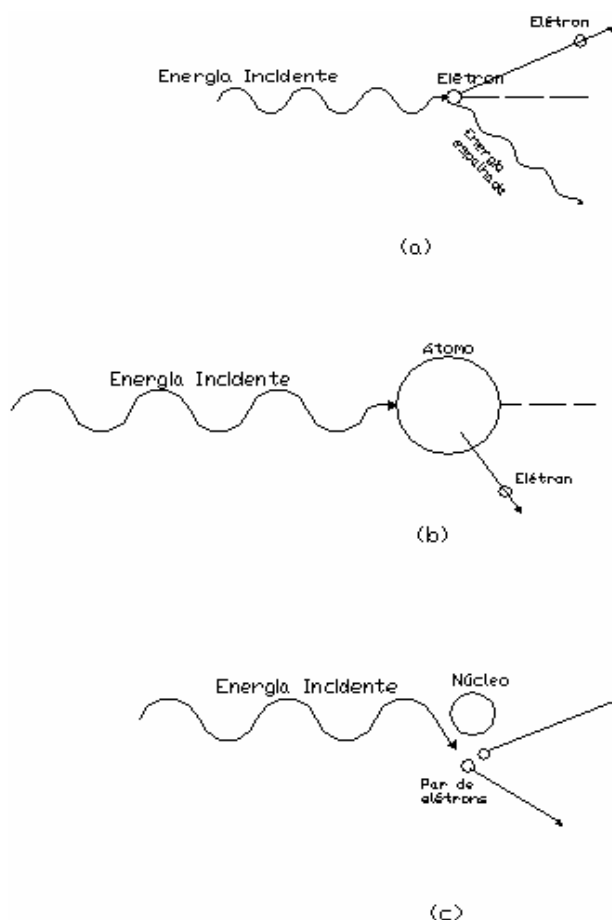


Figura 2.11 - Esboço conceitual de (a) espalhamento Compton, (b) efeito fotoelétrico e (c) formação de pares (EVANS, 1955).

Em perfilagem geofísica, o espalhamento Compton é o mais importante desses processos, pois o espalhamento Compton depende da densidade de elétrons no material. Portanto, o espalhamento dos raios γ pode ser usado para medir a densidade de elétrons e conseqüentemente é possível determinar a densidade real do material.

A densidade de elétrons de um átomo é dada pelo número atômico Z que é igual ao número de prótons. A densidade real de um átomo é relacionada com o número de massa A que é igual ao número de prótons e o de nêutrons presentes no núcleo. Conhecendo a relação Z/A é possível determinar a densidade real de um composto. Sendo o número de prótons igual ao número de nêutrons, então A é

aproximadamente igual a $2Z$ e conseqüentemente Z/A é aproximadamente 0,5. Abaixo é demonstrado o cálculo de Z/A da água.

$$\text{Água (H}_2\text{O), densidade verdadeira} = 1 \text{ g/cm}^3$$

$$Z_{\text{hidrogênio}} = 1 \quad Z_{\text{oxigênio}} = 8$$

$$A_{\text{hidrogênio}} = 1 \quad A_{\text{oxigênio}} = 16$$

$$\frac{Z}{A} = \frac{(2+1)+8}{(2+1)+16} = 0,5551$$

$$\text{Densidade de elétrons} = \frac{0,5551}{0,5} = 1,11 \times 1 \text{ g/cm}^3 = 1,11 \text{ g/cm}^3$$

2.3.5.2 Função resposta das sondas de densidade

Em perfilagem $\gamma - \gamma$, os raios γ emitidos pela fonte radioativa, acoplada na sonda, colidem com os elétrons da estratigrafia e são retro-espalhados até o detector (Figura 2.12). Quando os raios γ passam por materiais de baixa densidade, como o ar, pouco deles serão retro-espalhados até o detector e a contagem registrada será baixa. Em vácuo ideal, a contagem registrada dever ser zero, por não haver nenhuma colisão com partículas.

Quando a densidade do material aumenta, a contagem registrada também aumenta, porém, se a densidade do material for muito grande os raios γ não alcançam o detector e a contagem tende a zero (Figura 2.13). Após a calibragem do equipamento, com materiais de densidade real conhecidas e determinação da equação de ajuste, é possível obter o perfil de densidade real diretamente do equipamento de perfilagem.

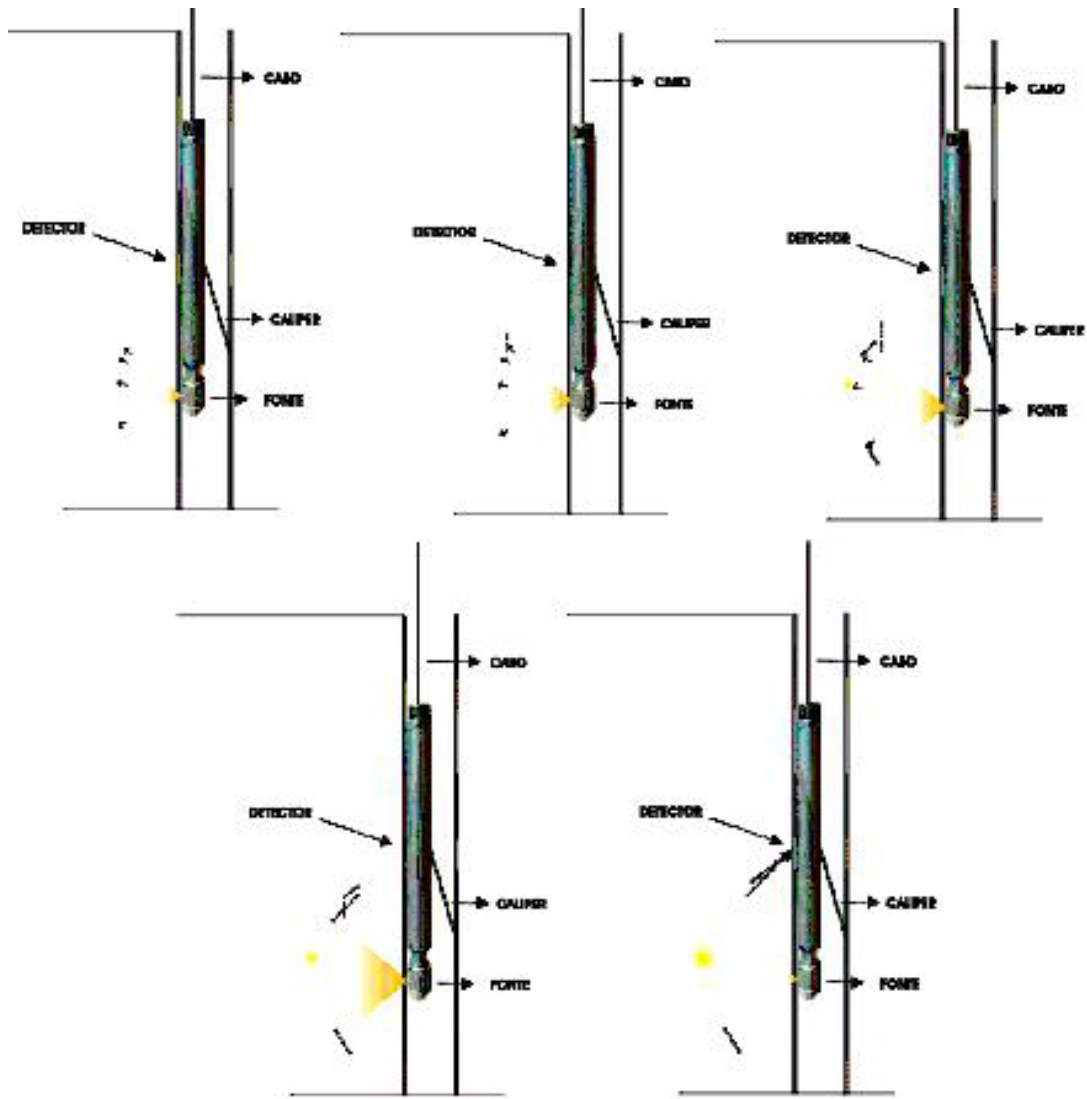


Figura 2.12 - Diagrama esquemático do retro espalhamento dos raios γ .

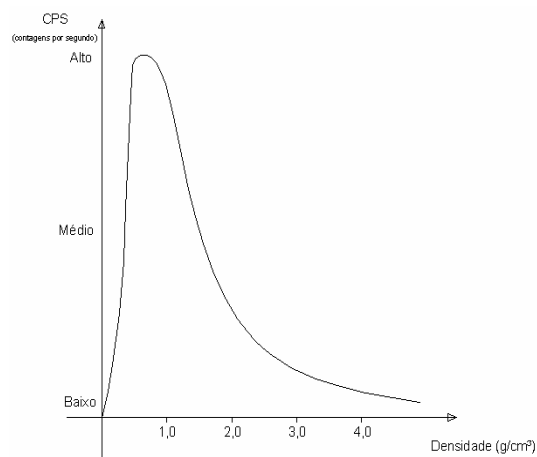


Figura 2.13 - Curva função resposta em sondas para medição de densidade (HOFMANN et al., 1982).

A curva função resposta é inerente ao tipo de sonda. O espaçamento entre a fonte e o detector influencia na forma da curva.

O perfil de densidade é bastante importante para identificação de litologias. Esse parâmetro é característico de cada litologia, principalmente do carvão por apresentar densidade substancialmente inferior nas litologias normalmente presentes no seu entorno. A seguir são apresentados gráficos com densidades médias das rochas.

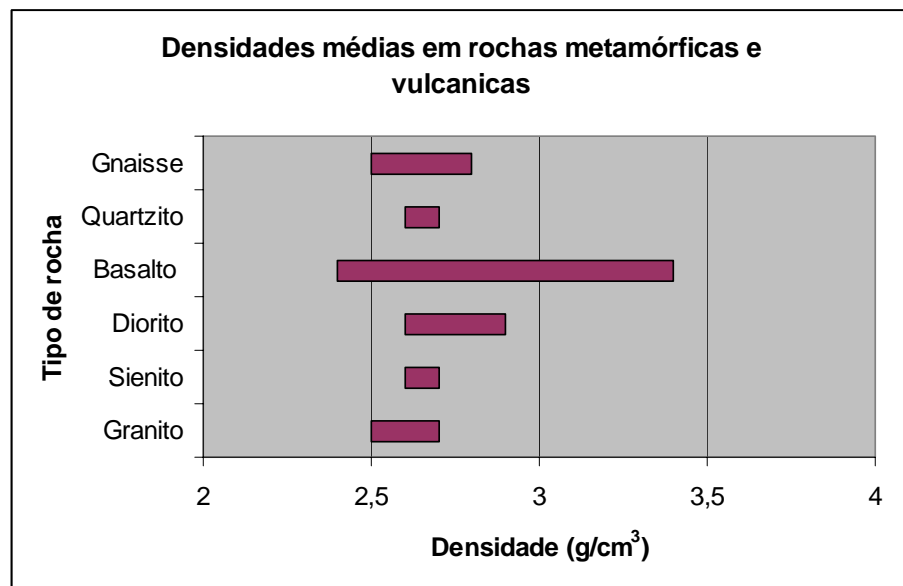


Figura 2.14 - Densidades médias de rochas metamórficas e vulcânicas (OLHOEFT, 1989).

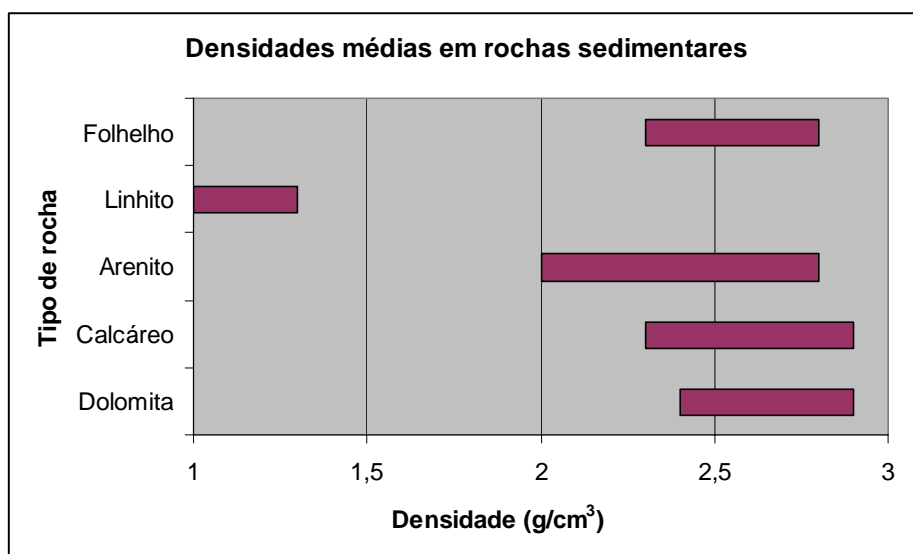


Figura 2.15 - Densidades médias de rochas sedimentares (WOHLENBERG, 1982).

A densidade, em granitos e dioritos, varia conforme o quartzo contido (Figura 2.16). Essa característica pode ser importante para determinação do teor de quartzo através da perfilagem geofísica com o perfil de densidade. Porém, nenhum trabalho abordando esse tema foi encontrado.

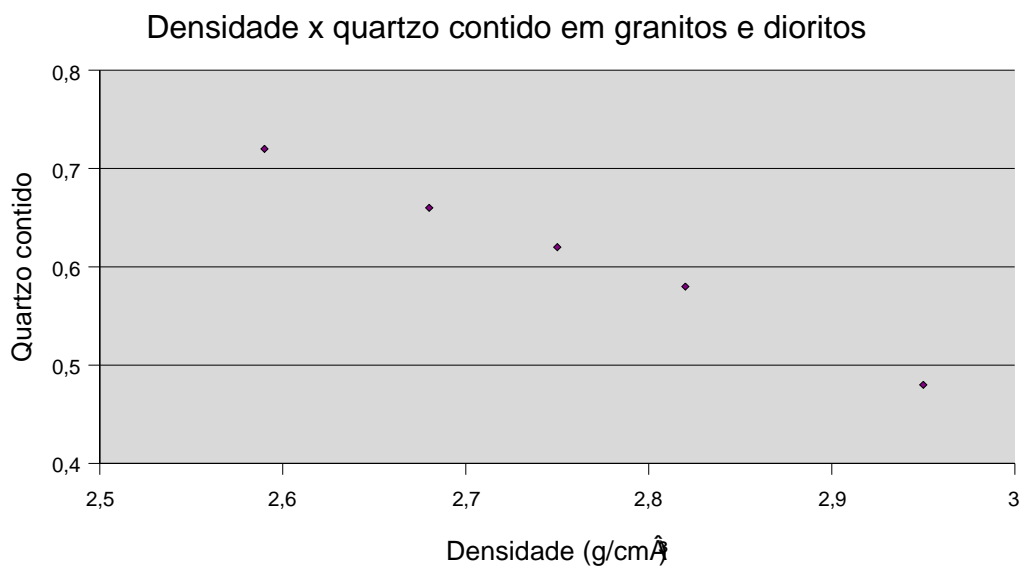


Figura 2.16 - Densidade versus quartzo em granitos e dioritos (DORTMAN, 1976).

2.4 Perfilagem com compasso calibrador (caliper)

É o tipo de perfil que foi elaborado para informar o diâmetro do poço (sem revestimento) e sua variação em toda a sua extensão. Além de mostrar a integridade do poço, esse perfil pode ser relacionado com características mecânicas da rocha. Em rochas friáveis ou fraturadas, o diâmetro do poço tende a aumentar. Normalmente, o compasso calibrador não é o único dispositivo em uma sonda, podendo estar acoplado em uma mesma sonda de medição de raios gama natural, gama retro espalhado, entre outros.

A combinação do compasso calibrador com outros parâmetros pode ser, às vezes, fundamental para a identificação adequada da estratigrafia. O compasso

calibrador também contribui para manter a sonda reta e encostada na parede ou no centro do poço. Esse equipamento também deve ser calibrado com uma escala com diâmetros conhecidos. É importante o uso do compasso de calibre para medição de gama retroespalhado, pois a irregularidades no poço pode inferir contagens não condizentes com a litologia medida.

2.4.1 Funcionamento

O calibrador consiste em um ou mais braços que pressionam constantemente a parede do poço durante toda a perfilagem. Qualquer mudança de diâmetro do poço provocará uma variação na abertura do braço que é registrada e informada conforme a unidade definida no processo de calibração.

2.5 Perfilagem sônica

A velocidade e atenuação de ondas sonoras nas rochas dependem de diversas propriedades da rocha, como: densidade, porosidade, saturação e o grau de fraturamento. Portanto, um registro geofísico sônico pode informar diversos parâmetros referentes à rocha perfilada.

Os registros obtidos desse parâmetro são normalmente referenciados como perfil sônico, perfil acústico ou perfil de velocidade.

2.5.1 Princípio teórico

Perfis sônicos medem a velocidade de ondas sonoras que atravessam um dado estrato. O som é transmitido com o movimento das partículas da litologia. Existem três tipos de movimentação: onda compressional, onda de cisalhamento e

onda de superfície. Em ondas compressoriais ou ondas P, as partículas se movimentam paralelamente com a direção de propagação da onda. Nas ondas de cisalhamento ou ondas S, as partículas se movimentam em direção perpendicular a direção de propagação da onda. A figura 2.17 ilustra os tipos de ondas e as respectivas direções de propagação.

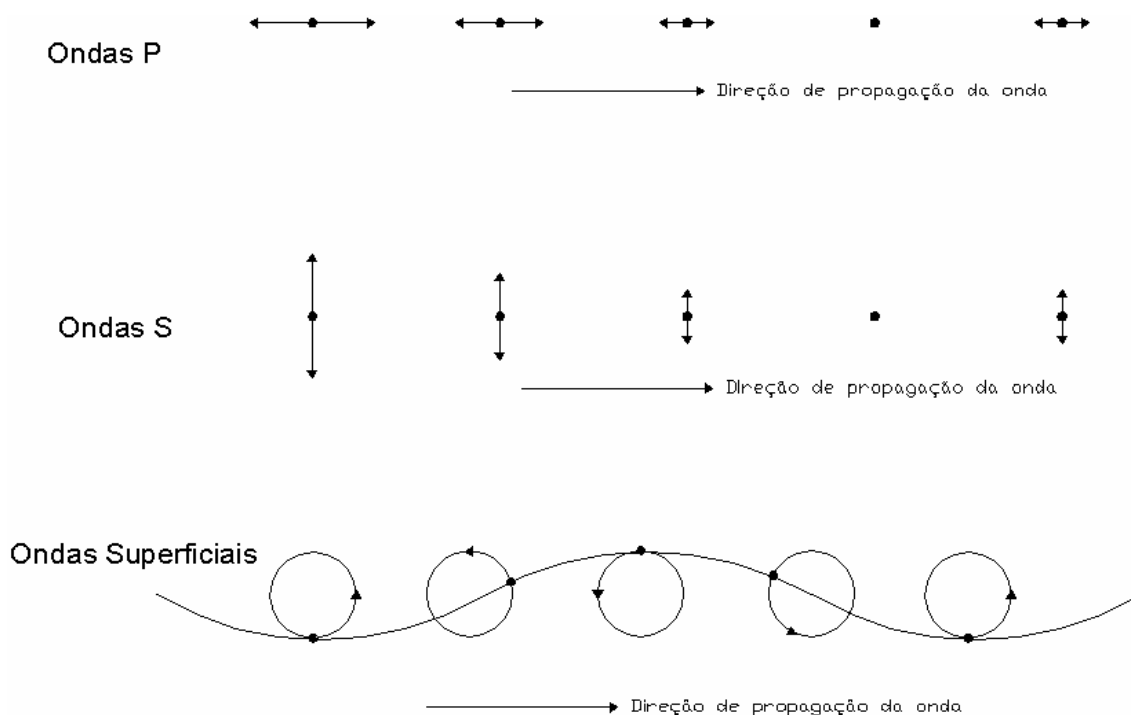


Figura 2.17 - Tipos de ondas

As ondas P são transmitidas através de sólidos e líquidos. Ondas S são transmitidas somente através de sólidos, pois, não há tensões cisalhantes em fluídos. No entanto, em um contato entre um sólido e um líquido, parte de energia da onda S é convertida em onda P onde esta atravessa o líquido e é convertida em de volta em uma onda S atenuada em sólidos adjacentes.

2.5.2 Princípio de funcionamento

Em perfilagem sônica, normalmente, são detectados os pulsos das ondas P. As sondas, normalmente, são equipadas com dois receptores com o intuito de eliminar a influência da velocidade da onda no fluido (Figura 2.18).

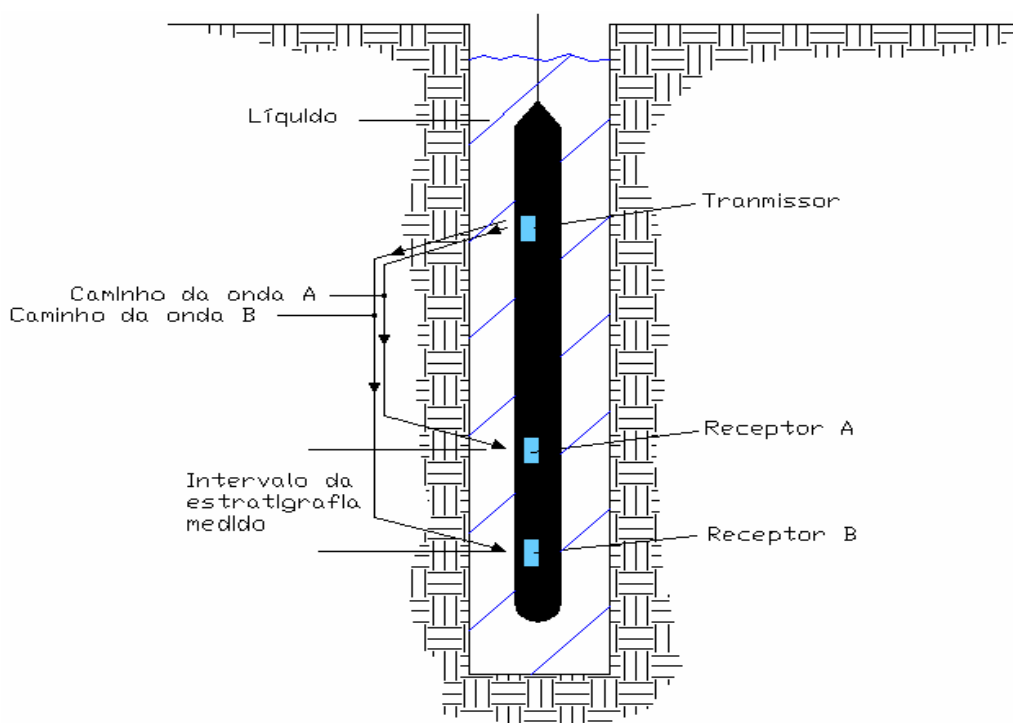


Figura 2.18 - Caminhos percorrido pelas ondas em perfilagem sônica.

Este tipo de sonda deve ser utilizada com centralizadores para manter a sonda a uma distância constante da parede do poço.

2.6 Respostas típicas dos parâmetros apresentados

A Figura 2.19 apresenta um sumário de respostas médias dos parâmetros obtidos por perfilagem em algumas formações. Os valores devem ser empregados somente como referência, pois cada sítio geológico apresenta características próprias.

Tipo de rocha		Parâmetro	Raios gama			Densidade		Sônico		Resistividade ohm.m				
			0	API	150	1	g/cm ³	3	140	μs/ft	40	0	10	100
Folhelho	Marinho													
	Não marinho													
Carvão	Betuminoso													
	Inferior													
	Linhito													
	Antracito													
Arenito	Poroso													
	Compacto													
Siltito														
Calcáreo	Poroso													
	Compacto													

Figura 2.19 - Sumário de respostas de perfilagem geofísica em algumas litologias.

2.7 Uso das informações de perfilagem geofísica

A perfilagem geofísica de poço vem sendo cada vez mais empregada por empresas de mineração, devido ao baixo custo de aquisição de dados e confiabilidade nos parâmetros medidos. Pesquisas são realizadas para obter-se o máximo aproveitamento possível das informações oriundas de perfilagem geofísica. Dados qualitativos e quantitativos do minério perfilado são buscados a partir dos parâmetros ou combinação dos parâmetros medidos.

Os dados qualitativos obtidos através dos parâmetros medidos por perfilagem geofísica podem ser empregados para avaliação de depósitos minerais. Apesar de confiáveis, os dados de perfilagem geofísica não apresentam a mesma precisão quando comparados com dados obtidos por sondagem testemunhada ou outros métodos de amostragem direta. Por isso, as informações obtidas por geofísica, normalmente, são utilizadas como informações de apoio quando há carência de dados mais precisos (primários) utilizando técnicas geoestatísticas de estimativas com dados secundários.

Existem algumas análises e interpretações dos dados que podem ser realizadas para correlacionar os parâmetros medidos por perfilagem geofísica com propriedades físico-química da rocha medida como por exemplo: teor de cinza, densidade, espessura de camada, entre outros. Para que as propriedades estimadas

com os dados de perfilagem geofísica sejam mais confiáveis, alguns procedimentos devem ser empregados, como: ajustes, aferições e calibrações.

O item seguinte trata dos procedimentos que devem ser aplicados aos dados coletados. No que segue, serão abordadas algumas aplicações de perfilagem geofísica em carvão.

2.8 Procedimentos de calibragem, aferições e de campo

Nesse item, são descritos os procedimentos de campo empregado em campanhas de perfilagem geofísica com as tecnologias atuais.

2.8.1 Definição do ponto inicial (zero point).

O zero point é o ponto definido como o ponto onde inicia a coleta de dados e a medida da profundidade do poço. O zero point é informado pelo fabricante do equipamento, tanto o valor, que normalmente é o comprimento da sonda, como a posição na sonda. É importante que o valor do zero point seja corretamente locado, pois a profundidade e o respectivo valor do parâmetro coletado dependem da correta informação do zero point.

É importante comentar que o zero point é sempre no encaixe do cabo do guincho com a sonda, esse ponto independe do tipo de sonda.

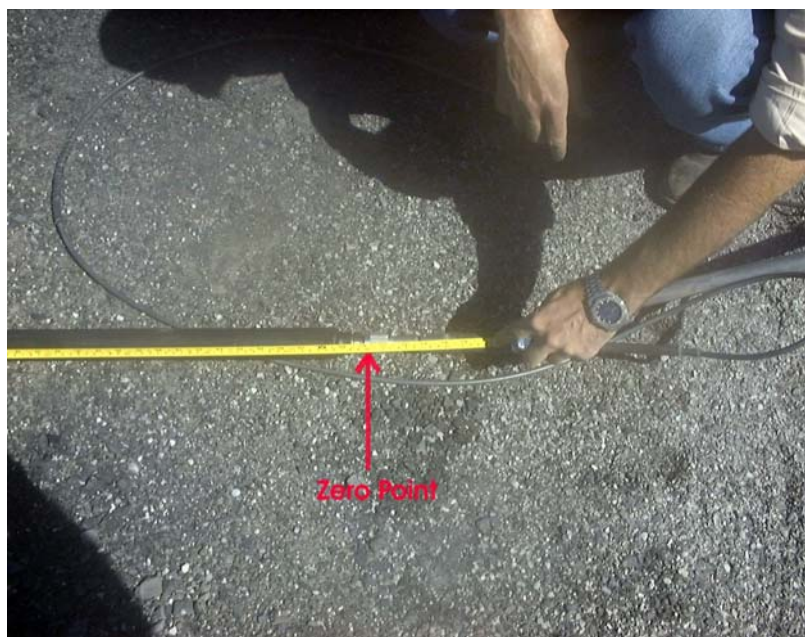


Figura 2.20 - Indicação do zero point.

É importante o conhecimento da posição física do zero point na sonda, pois esse ponto deve estar sempre nivelado com ao solo para iniciar a perfilagem (Figura 2.21).

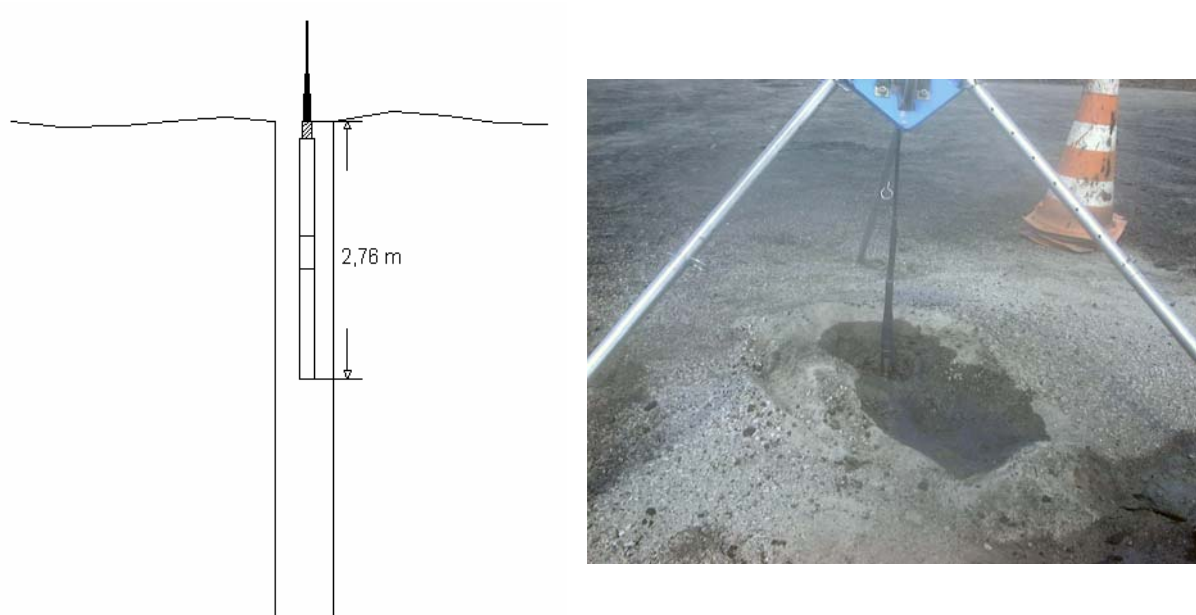


Figura 2.21 - Nivelamento da posição do zero point com o solo (sonda resistividade).

Cada sonda tem o respectivo zero point definido em posição diferente, depende do comprimento e tipo de sonda. As sondas utilizadas apresentam a seguinte medida que define o zero point:

- Sonda resistividade = 2,76 metros;
- Sonda gama retroespalhado = 2,97 metros;
- Sonda sônica = 3,62 metros.

Os valores citados acima devem ser informados ao equipamento conforme o tipo de sonda empregada, sempre observando a posição inicial da perfilagem (Figura 3.2).

2.8.2 Aferição da sonda de resistividade

A aferição deve ser aplicada conforme cada fabricante. A aferição normalmente é realizada com um padrão de valores conhecidos do parâmetro a ser medido (Figura 2.22). Para o caso da resistividade, existe um pequeno circuito eletrônico, composto basicamente por resistências, o qual aplica valores de resistividades conhecidos. Os valores medidos pelo equipamento devem ser os mesmos aplicados pelo padrão. É aconselhado que o procedimento de aferição seja realizado para cada dia de perfilagem.



Figura 2.22 - Caixa com valores de resistividade padrão para a calibração

Para o procedimento de calibração, os conectores devem ser acoplados nos respectivos pontos, conforme mostra a Figura a 2.23.

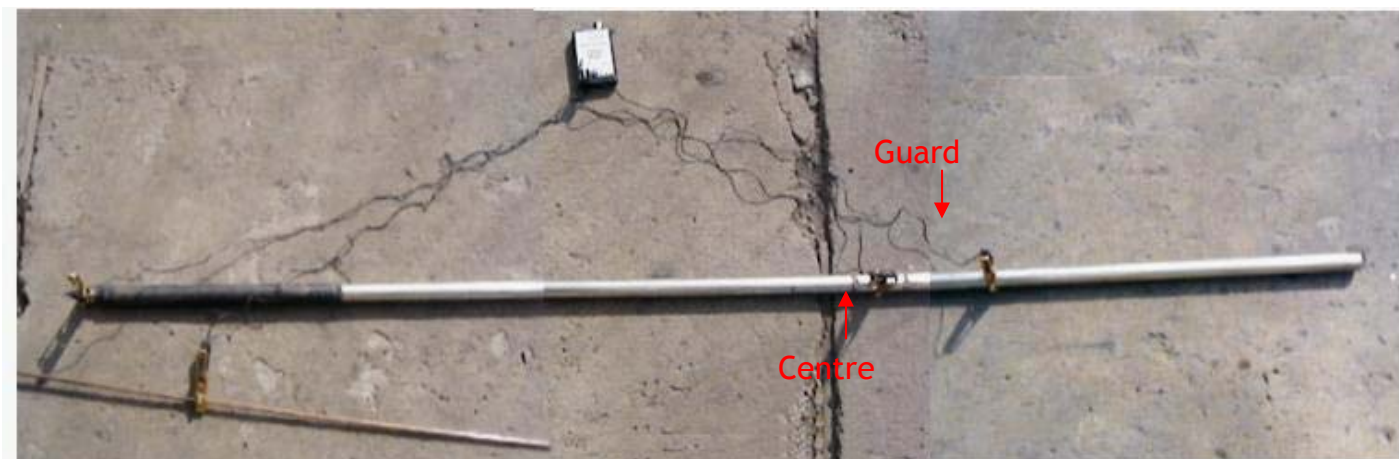


Figura 2.23 - Caixa com valores de resistividade acoplada a sonda de resistividade.

O importante no procedimento de calibração é os conectores Guard e Centre sejam posicionados nos pontos exatos, os dois restantes devem ser acoplados no fio terra e na extremidade da sonda onde é fixado o cabo do guincho, não havendo preferência.

2.8.3 Verificação da profundidade

É importante a verificação da profundidade que está sendo medida pelo equipamento de perfilagem. Se existir alguma diferença entre a medida do equipamento com uma medida real, feita com uma trena, acarretará em uma discrepância entre a profundidade real e a profundidade informada. Isso impossibilitaria uma definição precisa da profundidade da estratigrafia perfilada.

O anexo B apresenta a aferição da profundidade para o equipamento de perfilagem geofísica pertencente ao Laboratório de Pesquisa mineral e Planejamento Mineiro.

2.8.4 Calibração API para medições de gama natural

As contagens realizadas pelo detector de radiação gama natural pode estar sendo influenciada pela radiação 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 Radio Proteção. São necessários cuidados com a distância e tempo de exposição e 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 possa ter sido danoso ao 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.

2.8.5 Calibração do compasso de calibre (caliper) para medições do diâmetro do furo

O processo de calibração do compasso de calibre é feito com uma escala com diâmetros conhecidos. A haste do compasso de calibre deve ser encaixada na régua onde o diâmetro correspondente ao encaixe deve ser informado ao equipamento. A Figura 2.24 ilustra a escala e o encaixe da haste na mesma.

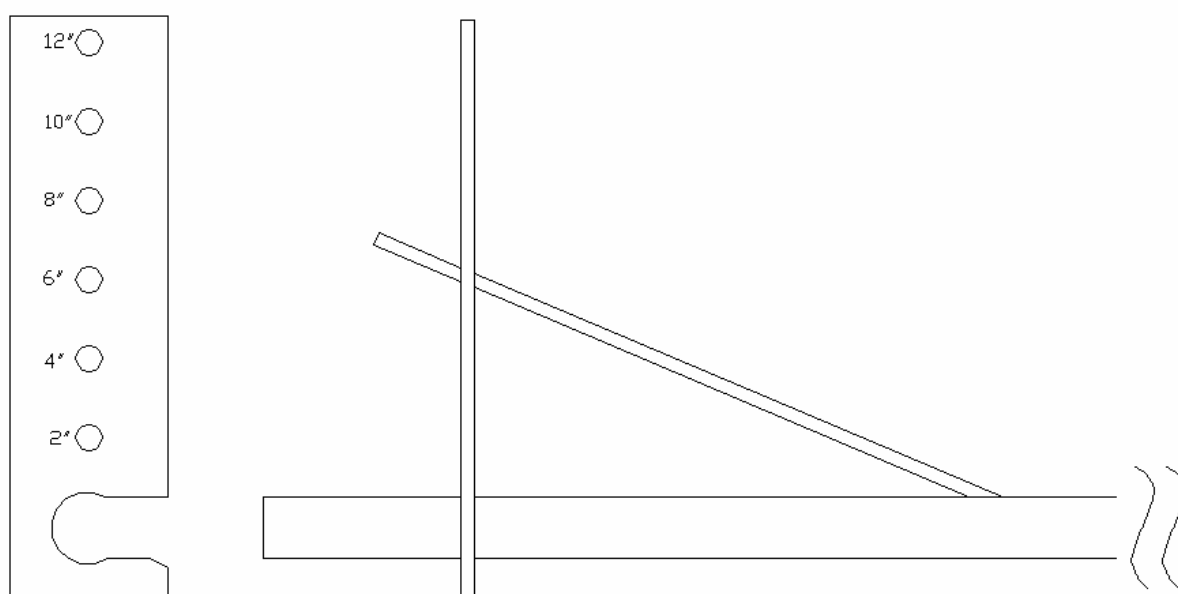


Figura 2.24 - Escala de diâmetros conhecidos e régua acoplada na sonda para o processo de calibração, esquerda e direita respectivamente.

Os diâmetros são inferidos em polegadas, e deve ser tomado o cuidado na posição da escala na sonda e, conseqüentemente, na haste do compasso. Pois se a régua estiver muito próxima ou muito afastada da base da haste, o diâmetro inferido pode não estar condizente com o diâmetro real.

2.8.6 Calibração da sonda gama retro espalhado para medição de densidade

A calibração dessa sonda tem duas finalidades, uma é a verificação das contagens realizadas pelos cintilômetros devido a desgastes ou danos e a outra é a calibração para medição de densidade para construção da curva de ajuste visto no item 2.3.5.2.

A calibração deve ser realizada medindo a contagem gama retro espalhada em amostras com densidades conhecidas. Foram utilizados, inicialmente, dois pontos para o ajuste da curva:

- Reservatório com água para densidade 1 g/m^3 (Figura 2.25, à esquerda),
- Bloco de alumínio para densidade 3 g/m^3 (Figura 2.25, à direita).



Figura 2.25 - Fotos dos pontos de calibração, cuba d'água e bloco de alumínio respectivamente.

A Figura 2.26, apresenta a sonda, já com a fonte radioativa, acoplada no bloco de alumínio e imersa na água, para realização do processo de calibração.



Figura 2.26 - Fotos da sonda com a fonte nos pontos de calibração.

Em termos de contagem retroespalhada, os valores medidos são apresentados na Tabela 2.4 abaixo.

Tabela 2.4 - Contagem gama retroespalhada nas amostras medidas

Amostra	Densidade (g/cm ³)	Contagem retro espalhada (cps)
Cuba d'água	1	11000
Bloco de alumínio	3	390

A partir desses valores, foi construída a curva que ajusta a contagem retroespalhada com densidade, e conseqüentemente o equacionamento desse ajuste (Figura 2.26).

O ajuste escolhido foi exponencial, pois é esse tipo de ajuste que melhor representa o fenômeno do retro espalhamento. O detalhamento do fenômeno do retroespalhamento pode ser visto em diversas literaturas, como por exemplo em Hoffman, 1982 e Hearst e Nelson, 1985.

É notório que com apenas dois pontos o ajuste seja comprometido principalmente entre as densidades 1,5 e 2,5 g/cm³, que é, justamente, a faixa de densidade das litologias normalmente presentes em um depósito de carvão. Este

problema deve ser resolvido com o incremento de mais pontos medidos em amostras com densidades precisamente conhecidas.

A dificuldade para isso é a obtenção de corpos de prova com densidades homogêneas em toda sua extensão. A construção de um bloco de cimento pode ser uma boa solução.

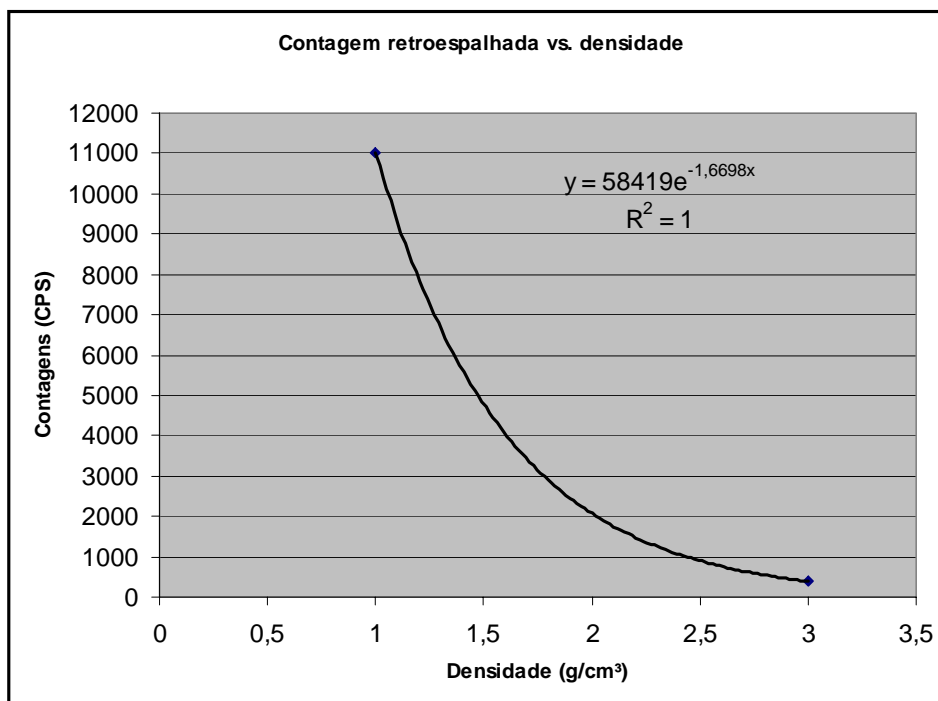


Figura 2.27 - Curva de calibração para a sonda gama retro espalhado para medição de densidade, com a função de ajuste.

As contagens medidas pela sonda são específicas para um cintilômetro que está afastado de 48 cm da fonte, devido a esse espaçamento esse cintilômetro não é adequado para densidades superiores a 3, pois, as contagens retroespalhadas tendem a um valor muito baixo, podendo ser confundida com a radiação de fundo.

Reescrevendo a equação apresentado na Figura 2.26 em função das contagens retroespalhadas tem-se:

$$densidade = 0,5988 \times \ln\left(\frac{CPS_{RETROESPALHADO}}{58419}\right), \quad (2.7)$$

Para medições em densidades superiores devem ser analisados outros sintilômetros presentes na sonda que estão posicionados mais próximos da fonte (anexo A).

2.8.7 Arquivamento dos registros

O arquivamento dos registros deve ser realizado de maneira que qualquer usuário possa compreender e utilizar os registros geofísicos. Devem ser registradas todas as informações que possam ser importantes, como fotos, anotações de campo.

2.8.7.1 Arquivamento digital

Atualmente, os registros são mantidos em forma digital, e em poucos momentos são impressos. Nesses casos, os arquivos devem ser dispostos de maneira que seja facilmente compreendido e encontrado. A Figura 2.26 abaixo faz uma sugestão de arquivamento digital.

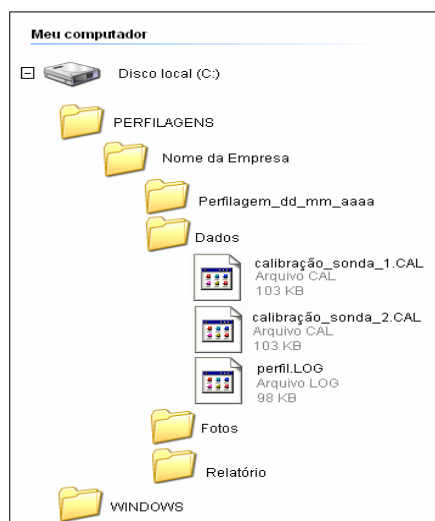


Figura 2.28 - Sugestão de organização dos dados coletados para arquivamento digital.

A disposição dos arquivos conforme Figura 2.26 é apenas uma sugestão de organização dos registros geofísicos. Porém, devem ser obrigatoriamente mantidos, junto com o arquivo do registro (perfil.LOG), os arquivos de calibração, pois são esses arquivos que mantêm os registros válidos para a época da perfilagem. As informações inerentes a perfilagem, normalmente, são preenchidas no próprio programa de aquisição dos dados.

2.8.7.2 Arquivamento impresso

Os registros geofísicos na forma impressa não são tão comuns hoje em dia, apesar de serem mais fáceis de manusear. Em caso de registro impresso, é importante que o registro apresente uma folha de rosto com informações fundamentais e inerentes a interpretação dos parâmetros medidos e a localização da perfilagem.

2.9 Dados coletados

Para maior confiabilidade dos dados medidos, é importante que se tenha o máximo de informações sobre os equipamentos utilizados para perfilagem. Os arquivos de calibrações devem ser organizados conforme sugerido no item anterior.

2.9.1 Análise dos dados coletados

A identificação de litologias em perfilagem geofísica de poço é realizada, basicamente, pelo contraste de um ou mais parâmetros entre a camada de interesse e as litologias no seu entorno. Para uma definição do pacote

estratigráfico, o geofísico de ter um conhecimento prévio da área estudada. Porém, o uso exclusivo de perfilagem geofísica para definição de camada ou de outros parâmetros, só pode ser realizado após um número satisfatório de correlações entre os dados geofísicos com os parâmetros obtidos por métodos diretos.

2.10 Características de alguns parâmetros em carvão

O carvão é uma rocha com características singulares, baixa densidade e alto grau de carbono contido. A camada de carvão pode conter impurezas como: sílica, alumina ou óxido de ferro, entre outras. Quando o carvão é queimado, as impurezas não geram energia e são consideradas como cinza. Então as quantidades de impurezas presentes no carvão são normalmente referidas como cinza contida. A perfilagem geofísica pode ser empregada para identificar, classificar e determinar a cinza contida.

2.10.1 Perfil de resistividade

A alta resistividade do carvão pode ser empregada para sua identificação na maioria dos casos. Porém, o linhito e o antracito podem apresentar baixas resistividades apesar de terem características e teores de cinzas completamente distintos (REEVES, 1971). Conseqüentemente, o perfil de resistividade deve ser usado com cuidado.

2.10.2 Perfil de radiação gama natural

A maioria dos carvões apresenta pouco ou não apresentam tório ou potássio, conseqüentemente, as leituras desses parâmetros são baixos. Existem carvões que contém urânio, nesses casos, serão registrados valores elevados de radiação gama natural. Em função disto, um registro medindo valores baixos de radiação gama natural é um bom indicador de carvão e uma excelente ferramenta para distinguir carvão e siltito. Em contrapartida, a leitura de valores altos não indica a ausência de carvão.

2.10.3 Perfil de densidade

O melhor diagnóstico do carvão é a sua baixa densidade. Um carvão com teor de cinza de 50 % a densidade é inferior a 2 g/cm³ (REEVES, 1971). Se a densidade da impureza (cinza), tipo de carvão e a densidade de bulk do carvão puro forem conhecidos, o perfil de densidade pode inferir o teor de cinza através da equação (LIU e HARVEY, 1982):

$$\text{Teor de cinza} = \frac{\rho_{\text{Perfilagem}} - \rho_{\text{Carvão}}}{\rho_{\text{Cinza}} - \rho_{\text{Carvão}}}, \quad (2.8)$$

2.10.4 Perfil sônico

A velocidade sônica, normalmente, é mais baixa no carvão que as litologias no seu entorno e isto pode ser usado para distinguir carvão de outras rochas e para inferir características mecânicas da litologia medida.

2.11 Considerações finais

Este capítulo apresentou, inicialmente, alguns aspectos teóricos e princípios de funcionamento das sondas para perfilagem geofísica aplicada ao carvão também foram expostos os procedimentos para a realização de calibrações e aferições com o intuito de se obter dados por perfilagem geofísica confiáveis. Posteriormente, foram apresentados alguns resultados experimentais de perfilagem geofísica em carvão. Esses experimentos demonstram o benefício da perfilagem geofísica, e o uso da perfilagem geofísica como ferramenta para obtenção de dados, sem a análise química, do teor de cinza, poder calorífico, espessura e densidade. Esses dados podem ser incorporados no banco de dados de informações quantitativas e qualitativas e posteriormente serem utilizados como dados secundários para realizar estimativas em pontos, blocos ou painéis não amostrados. O capítulo seguinte trata de estudos de casos de perfilagem geofísica aplicada a carvão.

Capítulo 3

Aplicadações de Perfilagem Geofísica de Poço a Depósitos de Carvão

Neste capítulo, serão apresentados alguns estudos de casos com o uso da perfilagem geofísica de poço.

3.1 Aplicação da perfilagem geofísica de poço como ferramenta de auxílio ao planejamento de lavra

Essa aplicação teve início com a verificação de zonas com deficiência de informações, causado por um espaçamento amostral muito distante ou por baixa recuperação nos testemunhos de sondagem que leva a uma baixa confiança no dado disponível.

As perfilagens foram realizadas conforme o avanço da lavra, o que levou a uma coleta de dados a cada quinzena. No bloco em operação, foram perfilados aproximadamente 30 poços (Figuras 3.1 e 3.2).



Figura 3.1 - Vista geral da principal área que foram realizadas as perfilagens

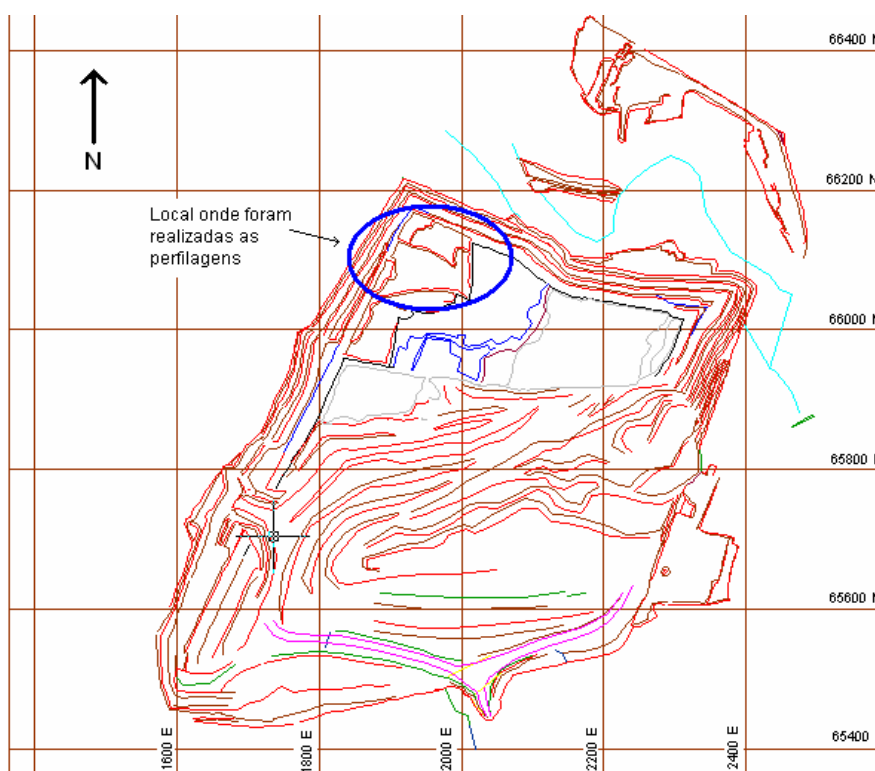


Figura 3.2 - Topografia da mina com indicação da área perfilada no bloco em operação. (planta de 11/2003).

As perfilagens foram realizadas nos furos destinados para o desmante, ou seja, em área de produção. No entanto, conforme necessidade do planejamento de curto prazo foram realizados furos adicionais para uso exclusivo da perfilagem.

Nesse caso, foram feitos furos de até 20 m de profundidade com diâmetro de 75 mm utilizando-se a perfuratriz empregada pela equipe de desmonte da mina. Esse processo foi utilizado, principalmente para definir a viabilidade de lavra da camada de uma camada inferior (denominada de I1) que não estava contemplada no planejamento original de longo prazo. Adicionalmente, foi investigada a continuidade da camada média minerada em três bancos de lavra de forma seletiva. A viabilidade dessa lavra seletiva tem impacto na produção de carvão de baixa cinza (20% de cinza) e carvão de baixo enxofre que é utilizado na blendagem para a produção de carvão 3100 kcal (aproximadamente 54% de cinza).

Com o registro geofísico, foram determinadas as espessuras da camada de carvão para cada furo perfilado (Figura 3.3). O registro da perfilagem geofísica é gerado simultaneamente com a perfilagem, sendo que a verificação da espessura e existência da camada pode ser definida ainda no campo.

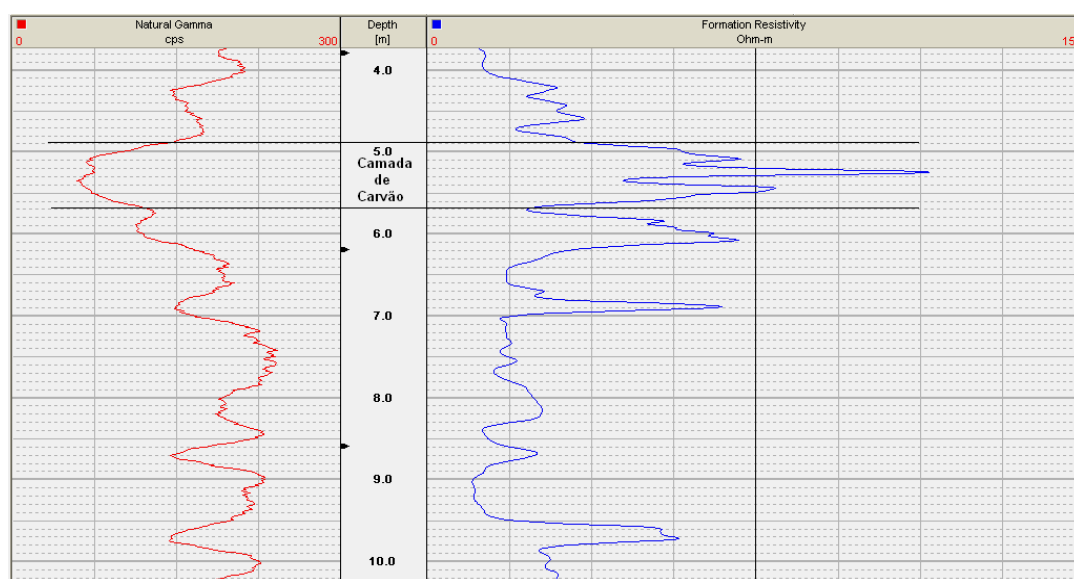


Figura 3.3 - Exemplo de um registro geofísico com a identificação da camada de carvão onde o registro em azul é o parâmetro resistividade em escala de 0 a 150 ohm.m e o vermelho é a radiação gama natural e escala de 0 a 300 CPS.

A perfilagem geofísica, também, foi utilizada para a avaliação da borda da bacia como apoio à sondagem testemunhada. Nesse caso, o uso da perfilagem foi fundamental para a correção de problemas de baixa recuperação de testemunho, bem como na correlação da camada média com sondagens qualitativas próximas. Os furos perfilados permitiram extrapolar dados de qualidade a partir da correlação com furos analisados sem a necessidade de novas sondagens de grande

diâmetro e análise físico-químicas dos testemunhos. Nessa área, foram perfiladas nove sondagens.

3.1.1 - Benefícios obtidos com a perfilagem

A utilização da perfilagem geofísica na área em operação permitiu a lavra adicional de aproximadamente 110.000 t ROM de carvão da camada I1 que não estavam computadas como reserva provada. Esse acréscimo de reserva diminuiu a relação estéril/minério do bloco, além de permitir a correção de enxofre de alguns carvões via blendagem com o carvão dessa camada. A camada I1 possui baixo teor de enxofre, sendo totalmente utilizada na forma de ROM britado, necessitando apenas a etapa de cominuição.

A perfilagem nesse bloco também definiu a reserva de carvão com vocação para produtos nobres através da redefinição da camada Média (camada M) em bancos de lavra seletivos. Na avaliação original da área, essa camada estava avaliada como M total. O que antes era considerada uma única camada, após a perfilagem a mesma camada foi dividida em MBS (M Baixo Enxofre), MBCz (M Baixa Cinza) e MAS (M Alto Enxofre).

A situação explicada pode ser entendida com o desenho abaixo (Figura 3.4). Para permitir a avaliação dessas camadas foi criado um banco de dados específico de forma a permitir seu modelamento em separado das demais camadas.

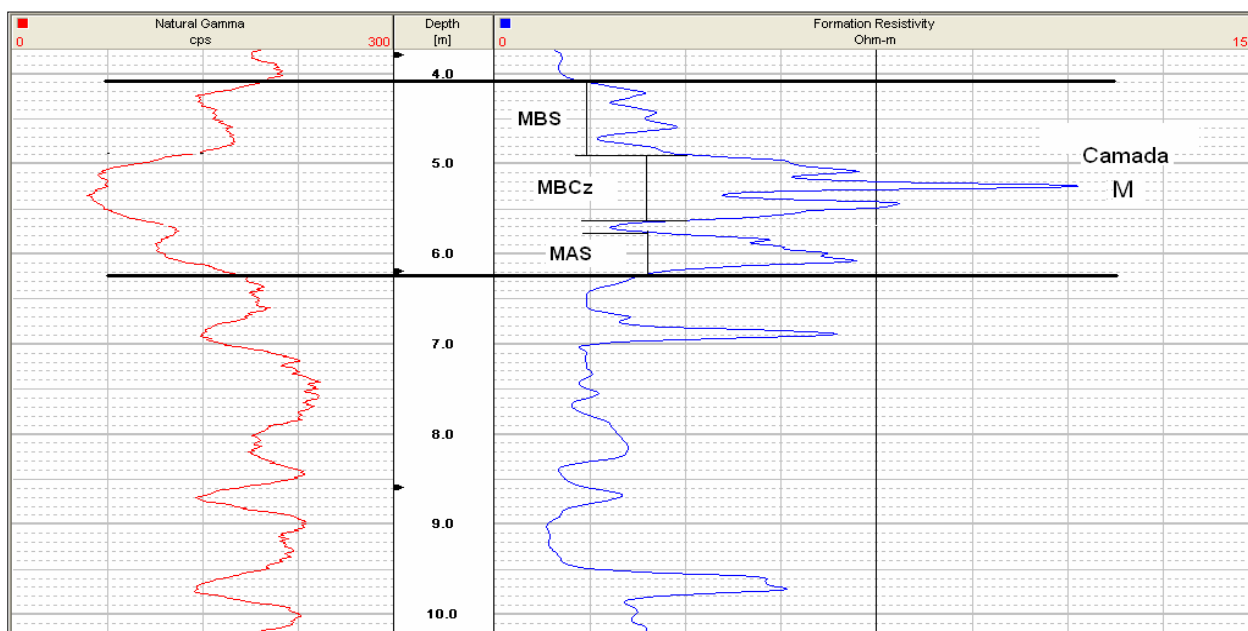


Figura 3.4 - Exemplo de perfilação no bloco NBR mostrando a camada M dividida em 03 bancos de lavra

Na Mina Butiá Leste, com a perfilação, foi possível viabilizar áreas de lavra com relação estéril/minério originalmente anti-econômicas com base nos dados até então disponíveis. O fato é que as sondagens existentes são muito antigas e possuem baixa recuperação dos testemunhos, acarretando em espessuras subestimadas. Com uma nova campanha de sondagem e utilização da perfilação geofísica, para correção das espessuras devido a baixa recuperação dos testemunhos, foram viabilizadas 120.000 t de reserva já mineradas ao longo de 2003, quantidade que onerou aproximadamente 2 meses de produção de carvão na empresa.

3.2 Benefício do adensamento amostral com perfilação geofísica de poço no planejamento de lavra a curto prazo em mineração de carvão.

O objetivo deste estudo foi comparar o volume obtido com dados amostrados por sondagem com testemunho, com o volume calculado a partir de dados amostrados por perfilação geofísica, em uma mesma área.

Com a cubagem obtida a partir desses dois bancos de dados será realizada a reconciliação com o volume real obtido, na mesma área de estudo, durante o processo de lavra à céu aberto.

3.2.1 - Aplicação do estudo de caso

A metodologia aplicada para este trabalho, foi a realização de uma campanha de amostragem, para a construção do primeiro banco de dados formado com informações de perfilagem geofísica (denominado de banco de dados A), onde os parâmetros medidos foram, a emissão de radiação gama natural, e a resistividade da rocha. A partir desses dois parâmetros, foi determinada a espessura da camada de carvão em cada ponto amostrado. Nessa campanha, foram levantados 36 perfis em malha regular de 10 x 10 metros.

O segundo banco de dados, foi construído a partir de testemunhos de sondagem (denominado de banco de dados B) com uma malha amostral média de 140 x 140 metros.

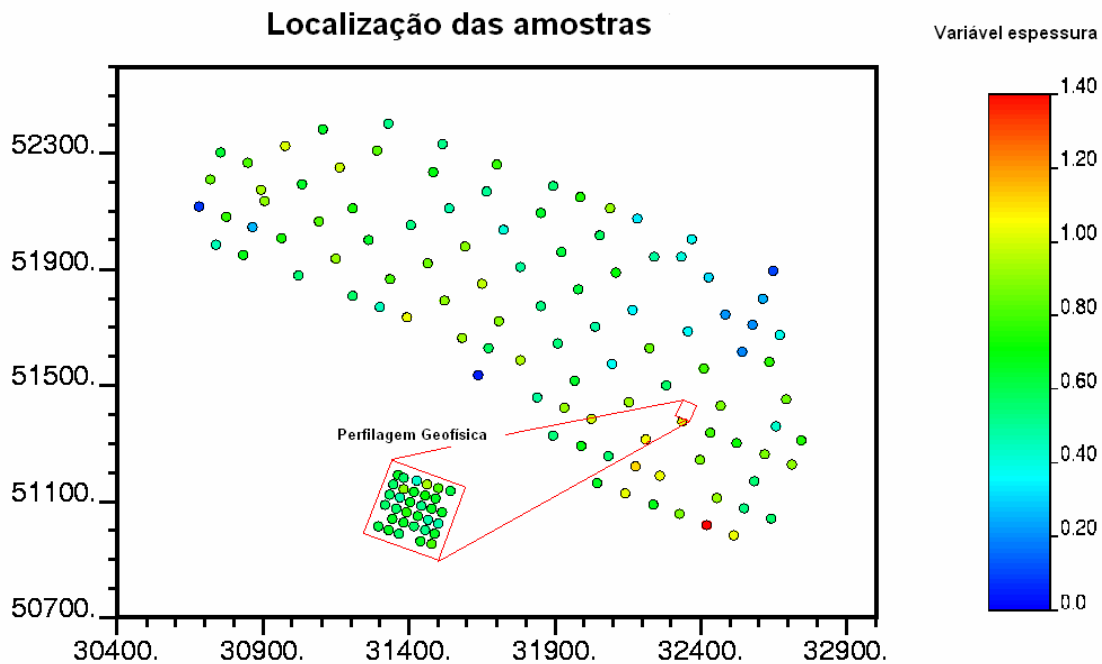


Figura 3.5 - Mapa de localização das amostras, em destaque o banco A gerado por perfilagem geofísica, as demais amostras pertencem ao banco B.

Nota-se pela figura 3.5 que existem lacunas que descaracterizam a malha em alguns pontos da perfilagem geofísica (banco A). Isto ocorreu devido à impossibilidade de identificação da camada através da perfilagem geofísica pelo fato do furo não ter sido suficientemente profundo para que pudesse ser realizada a leitura dos parâmetros em toda a camada.



Figura 3.6 - Foto da área do estudo, com delimitação da área.

A partir dos dois bancos de dados foram calculados os respectivos volumes e comparado com o volume real que foi obtido durante a lavra. A lavra foi rigorosamente supervisionada para haver credibilidade na informação que será considerada como a quantidade verdadeira do minério.

3.2.2- Cálculos dos volumes

Para o cálculo dos volumes foi determinada uma mesma área para os bancos A, B e o verdadeiro, obtido durante a lavra.

3.2.2.1 - Cálculo do volume para o banco de dados A

O banco de dados A não sofreu nenhum procedimento geoestatístico, pois a malha amostral é suficientemente densa permitindo o cálculo do volume sem nenhum tratamento.

O método empregado para o cálculo do volume foi o conhecido por "trapezoidal rule", pois aproxima a área sob uma curva em forma de um trapézio.

Foi utilizado o software surfer® (Golden Software, Inc.) como ferramenta para o cálculo do volume. Esse software, calcula o volume por "Trapezoidal rule" que utiliza a seguinte equação:

$$A_i = \frac{\Delta x}{2} [G_{i,1} + 2G_{i,2} + 2G_{i,3} \dots + 2G_{i,nCol-1} + G_{i,nCol}]$$
$$\text{Volume} \approx \frac{\Delta y}{2} [A_1 + 2A_2 + 2A_3 + \dots + 2A_{nCol1} + A_{nCol}] \quad (1)$$

onde: Δx - espaçamento entre as colunas da malha; Δy - espaçamento entre as linhas da malha e $G_{i,j}$ - valor do nó da malha na linha i e coluna j .

O volume obtido na área de estudo com os dados de perfilagem geofísica foi de 1009 metros cúbicos.

3.2.2.2 - Cálculo do volume para o banco de dados B

Devido ao espaçamento amostral muito grande, deve ser realizado tratamento geoestatístico nesse banco de dados.

A escolha do tamanho de bloco a ser estimado foi tomada devido ao tamanho da área estudada 40 x 40 m, aproximadamente ¼ do espaçamento amostral do banco de dados B.

Para que o valor do bloco estimado apresentasse a mesma orientação da área de estudo, os dados foram rotacionados afim de que a área obtivesse

orientação Norte-Sul (mesma orientação das estimativas), com isto é previsto que a área de estudo esteja completamente dentro de um único bloco estimado.

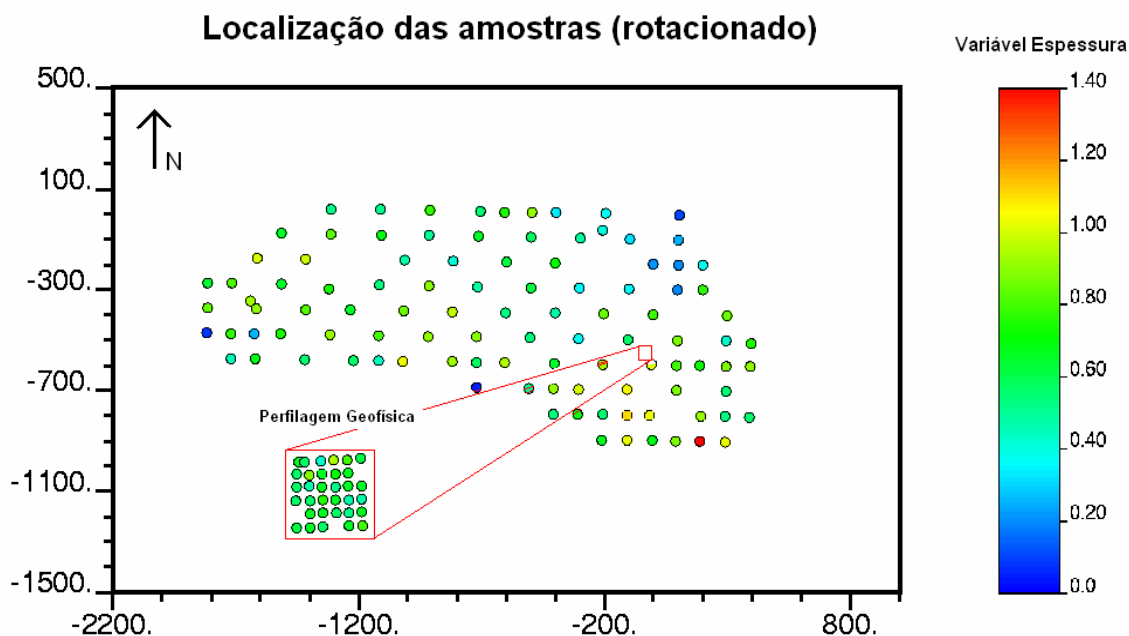


Figura 3.7 - Mapa de localização das amostras, rotacionado.

Nota-se pela figura 6 que não existem zonas preferencialmente amostradas no banco de dados B.

3.2.2.3 - Estimativa do bloco a partir do banco de dados B

A estimativa da espessura da camada foi obtida por Krigeage onde o ponto estimado é obtido por regressão linear (MATHERON, G. 1963).

Com o histograma podemos verificar a estatística básica dos dados e sua distribuição.

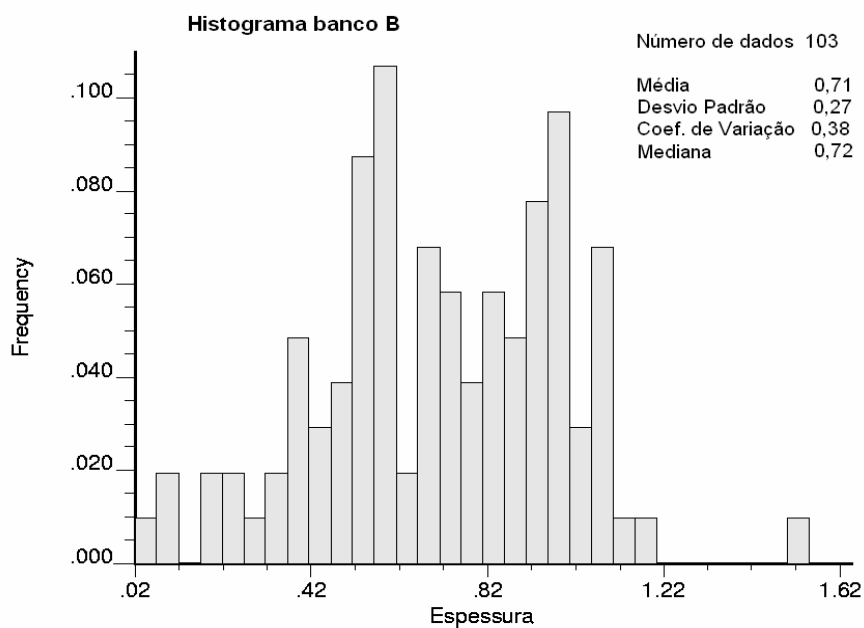


Figura 3.8 - Histograma de espessura referente ao banco de dados B

Devido a regularidade da malha amostral, a média desagrupada não apresentou diferença significativa com relação a média dos dados originais.

As direções preferenciais de continuidade espacial foram 158° e 68° foram a de maior e de menor continuidade, respectivamente, considerando o ângulo de rotação.

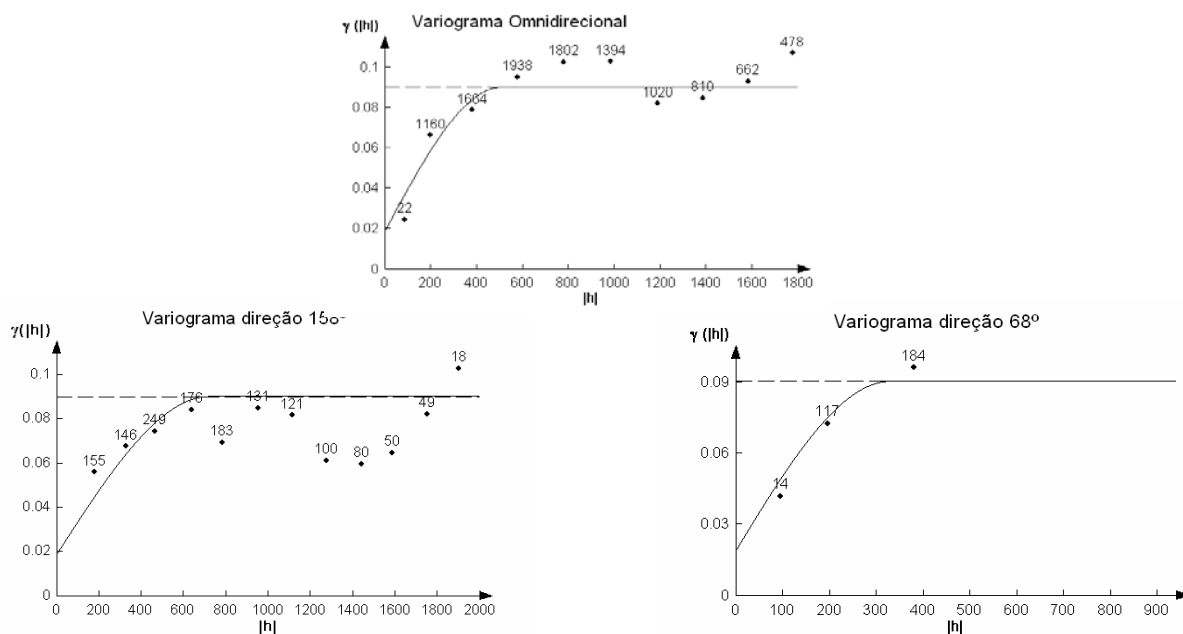


Figura 3.9 - Variogramas obtidos a partir do banco de dados B.

Os variogramas foram ajustados pelo modelo esférico, onde as demais características são:

- Alcance N68 = 330 m
- Alcance N158 = 720 m
- Efeito pepita = 0.019
- Patamar = 0.0715

O método de interpolação empregado foi a krigagem ordinária. Nesse tipo de interpolação, o desconhecimento da média local pode ser filtrado induzindo a soma dos pesos de krigagem igual a 1 (GOOVAERTS, P. 1997 p. 133).

Foi realizada a estimativa da espessura no centro do bloco estudado, onde o volume estimado por krigagem foi de aproximadamente 1271 m^3 de carvão da camada estudada, na área de estudo. Esse volume foi obtido pela espessura (estimada por krigagem ordinária) multiplicada pela área.

3.2.3 - Obtenção do volume verdadeiro

O volume verdadeiro foi obtido na lavra do minério. Durante a lavra foram pesados todos os caminhões envolvidos no transporte do minério, assim no final das operações de lavra foi obtido a tonelagem total do minério " *in situ*", considerando uma densidade, obtida das análises dos testemunhos, de 1,8 g/cm³ torna-se possível determinar o volume.

$$\text{Tonelagem lavrada} = 1813t$$

$$\text{Volume} = \frac{1813}{1,8} 1007m^3$$

3.2.4 - Discussão dos resultados

Houve uma diferença muito significativa entre o volume calculado a partir do banco de dados B quando comparado com o volume real, no entanto, pode-se dizer que não houve diferença entre o volume real e o volume calculado a partir do banco de dados A.

Tabela 3.1 - Quadro comparativo entre os resultados obtidos

Informação	Volume (m ³)
Banco A	1009
Banco B	1271
Verdadeiro	1007

Com a tabela 3.1 é possível observar a diferença, desprezível, entre o volume obtido com o banco A e o volume verdadeiro. Mas a diferença entre o volume do banco B com o verdadeiro é aproximadamente 26%.

3.2.5 - Conclusões sobre o estudo

Com este trabalho pode se concluir que informações originadas com espaçamento amostral muito grande não é adequado para o planejamento de lavra de curto prazo.

Com a perfilagem geofísica a ausência de informações pode ser suprida de maneira rápida e de baixo custo de operação, onde as informações podem ser obtidas no momento da perfilagem, o que permite a tomada de decisões imediata.

Conclui-se também que a espessura obtida por meio da interpretação dos registros de perfilagem geofísica são confiáveis, e que o método de interpretação para obtenção da espessura de camada de carvão é adequado.

3.3 Estimativa do poder calorífico do carvão com o uso de perfilagem gama retro-espalhado (gama-gama)

No caso de mineração de carvão (carvão energético), um dos principais parâmetros que define sua qualidade e o valor de venda é o poder calorífico (PC), o qual possui correlação inversa com a densidade (figura 3.10). Para realização dessa estimativa, foram utilizados os dados de uma campanha de perfilagem geofísica realizada pela Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM). Este levantamento foi realizado no ano de 1996 onde foram perfilados poços de uma campanha de sondagem, com isto todos os poços foram analisados quimicamente em toda a sua extensão com os parâmetros, teor de cinza, poder calorífico, densidade, teor de enxofre, entre outros.

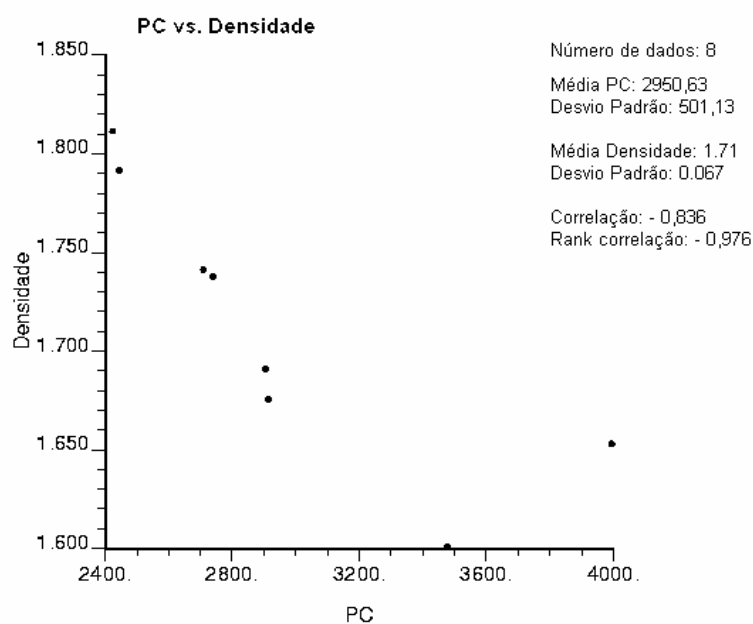


Figura 3.10 - Correlação entre densidade e PC na camada CS (formação Rio Bonito, Mina do Seival RS).

A cinza do carvão, impurezas que não agregam poder calorífico, apresentam densidades superiores à do carvão. Quanto maior a porcentagem de cinza, maior a densidade e, conseqüentemente, menor o poder calorífico do carvão.

Conforme discutido no capítulo anterior, a contagem gama retro-espalhada depende da densidade do material perfilado; portanto, é possível associar o perfil de radiação retro-espalhada (contagem retro-espalhada) com densidade e conseqüentemente com o poder calorífico (figura 3.11).

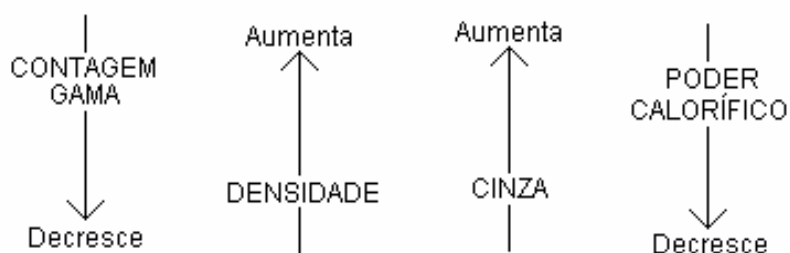


Figura 3.11 - Relação entre contagem gama medida pela sonda com o poder calorífico do carvão.

A camada de carvão pode ser identificada com os perfis de radiação gama natural e de resistividade. O perfil de gama retro espalhado deve ser empregado, em caso de dúvidas, para identificação do carvão. Este último é o mais eficaz devido à baixa densidade do carvão (figura 3.12).

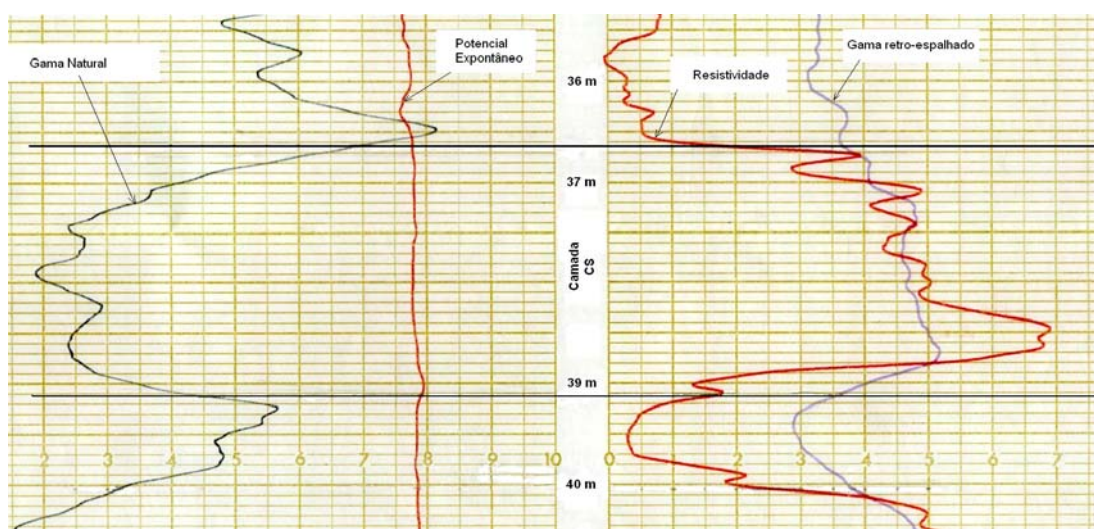


Figura 3.12 - Registro impresso da perfuração geofísica com a identificação dos parâmetros medidos. Convém comentar que esse registro é datado do ano de 1997 onde não se possui nenhuma informação técnica do equipamento utilizado.

As análises químicas são importantes para correlacionar o parâmetro medido com as propriedades químicas do carvão.

Tabela 3.2 - Uma parte do banco de dados, referente às análises químicas com a contagem gama retro espalhada da camada de carvão estudada.

Nome do segmento	De (m)	Para (m)	Espessura (cm)	Litologia	Cinza (%)	Matéria Volátil (%)	Poder Calorífico (kCal/kg)	Contagens gama (CPS)
Pc 1.01	36,83	37,08	0,25	Siltito	62,10	18,00	1756	822,4
Pc 1.02	37,08	37,36	0,28	Carvão	52,00	17,60	2849	928,6
Pc 1.03	37,36	37,65	0,29	Carvão	49,70	17,40	2926	936,2

A figura 3.13 mostra a correlação entre o poder calorífico e as contagens gama obtida por perfilagem geofísica. A curva de correlação é referente a um único furo, onde os pontos colocados nos gráficos são relativos a cada segmento (ply) do furo.

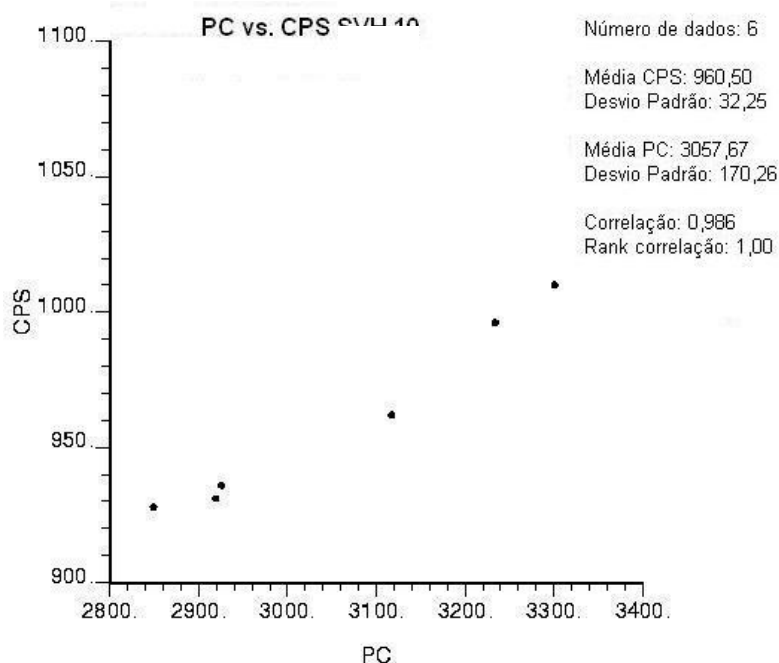


Figura 3.13 - Curva de correlação entre contagens gama (CPS) e poder calorífico (PC).

A curva de correlação mostram a forte correlação entre o poder calorífico e contagens gama, no qual é possível inferir o parâmetro poder calorífico do carvão diretamente com a perfilagem geofísica de poço com o método gama retro-espalhado. Isto é de grande valia, pois, os equipamentos de perfilagem geofísica permitem a inserção de uma equação de correlação entre o parâmetro medido com o parâmetro físico-químico que a ele é correlacionado. O que significa dizer, que o parâmetro físico-químico procurado é obtido em campo, sem análise laboratorial. Na curva de correlação apresentada na figura 3.13, o índice “correlação” se refere ao ajuste linear e o “Rank correlação” para o coeficiente de correlação de não linear.

3.4 Estimativa do teor de cinza do carvão com o uso dos perfis de resistividade e de radiação gama natural.

A cinza contida no carvão também é um parâmetro importante que determina a qualidade e conseqüentemente seu valor comercial. O método de estimativa discutido no item anterior exige o uso do perfil gama retro-espalhado ou seja o uso de uma fonte radioativa. O uso de fontes radioativas requer um cuidado muito grande nos procedimentos de perfilagem, treinamento especializado e autorização da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) com as normas NE 5.01 para obtenção da licença de transporte e da norma NN 3.01 e NN 6.01 para elaboração do plano de radio-proteção. Todas as normas da CNEN estão disponíveis no site web <http://www.cnen.gov.br/seguranca/normas.asp> (22/10/2005).

Com o perfil de resistividade e de radiação gama natural é possível estimar o teor de cinza contido no carvão. A resistividade do carvão varia diretamente com o grau de carbonização (VAN KREVELEN, 1961). A variação de resistividade do carvão reflete nas mudanças no teor de cinza (BOND *et al.*, 1971). Conforme Reeves (1971,1976), o teor de cinza pode ser estimado com a quantificação de folhelhos presentes no carvão. A contagem de radiação gama natural aumenta com o aumento de folhelhos (cinza) contido no carvão (KAYAL, 1981)

Baseado nesses fatos, é possível obter estimativas do teor de cinza do carvão com a construção de gráficos de resistividade com contagens gama (figura 3.14).

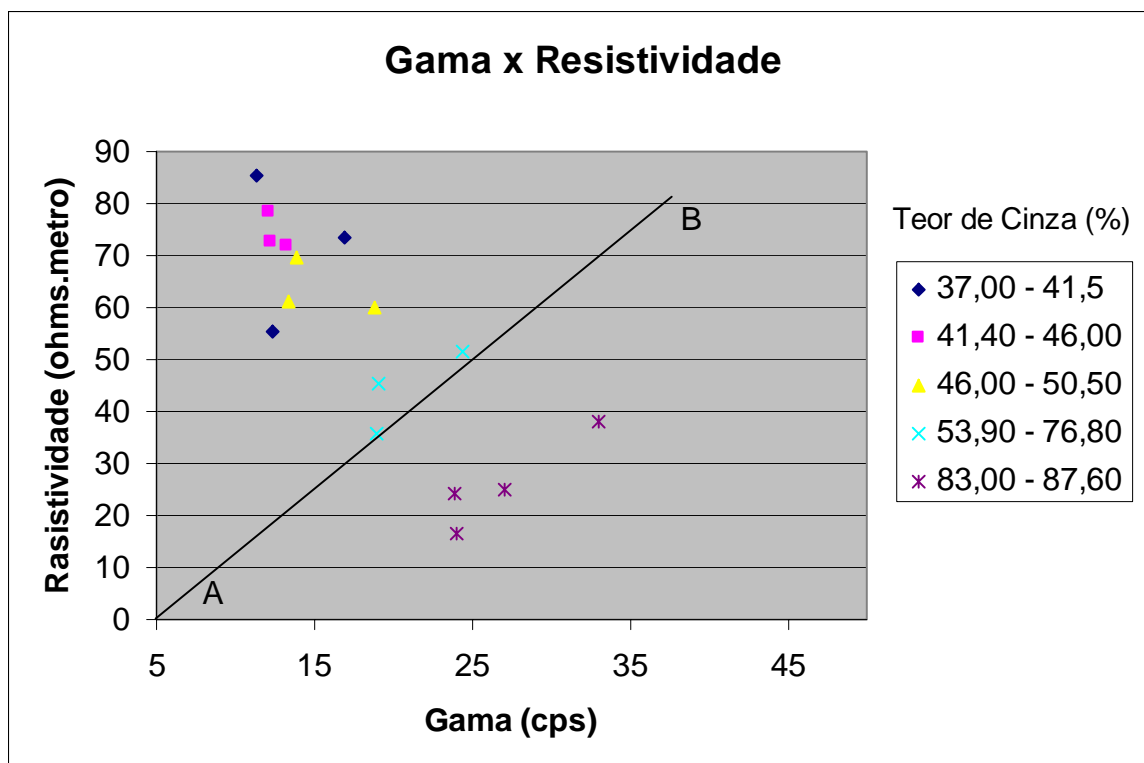


Figura 3.14 - Gráfico de resistividade versus radiação gama natural para diversas faixas de teores de cinza (camadas perfiladas na Mina do Seival, RS).

A figura 3.14 mostra que as classes dos teores de cinza são bem definidas. Resistividade alta e contagens de radiação gama natural baixos implicam em um carvão de melhor qualidade, ou seja, baixo teor de cinza. A linha arbitrária AB demarca o carvão dos arenitos e siltitos, onde esse limite é delimitado pela descrição dos testemunhos e análises químicas realizadas nas amostras dos testemunhos.

A figura 3.5 mostra a curva de calibração para o teor de cinza estimado por resistividade e contagem gama natural. A partir da curva de calibração pode-se estimar o teor de cinza somente com os dados de perfilagem geofísica. Um ábaco de previsão de cinzas, a partir dos dois parâmetros geofísicos, pode ser contruído com os seguintes procedimentos:

- Desenhar uma linha paralela ao eixo dos X, a partir de um valor verdadeiro de resistividade medido com perfilagem;
- Desenhar uma linha paralela ao eixo dos Y, a partir de um valor real de contagem gama medido com perfilagem;

- iii. No ponto de intersecção dessas duas linhas retas, projetar uma linha que seja paralela à linha AB.

Mesmo existindo uma variação no valor medido que é inerente ao método de amostragem, esse procedimento, de fácil aplicação, é válido somente para a bacia estudada.

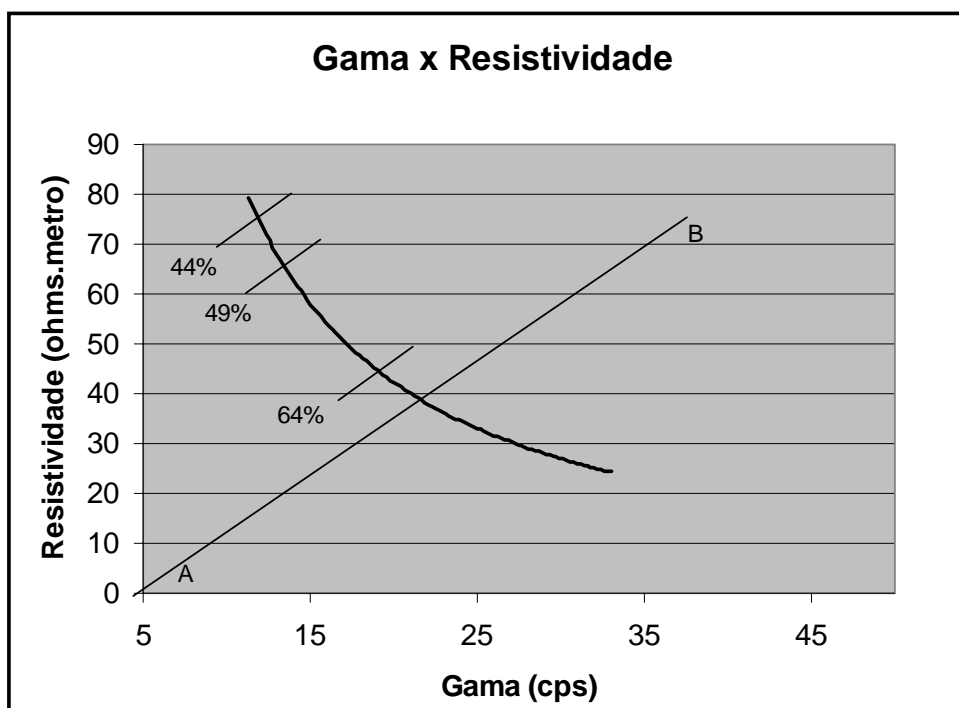


Figura 3.15 - Ábaco de correlação para o teor de cinza estimado por resistividade e contagem gama natural para carvões da Mina do Seival no estado do Rio Grande do Sul.

A partir do ábaco construído com os perfis de resistividade e gama natural, podem ser obtidos teores de cinza aproximado para a camada de carvão. Os teores obtidos por esse método podem ser empregados como informação de apoio nas estimativas de teores de cinza.

3.5 Determinação da densidade a partir do perfil gama retro espalhado

Com o ajuste da sonda gama gama, citado no capítulo anterior (item 2.8.6) e obtenção da equação 2.7, a densidade pode ser obtida diretamente durante a perfilagem.

Para verificar o ajuste, foram realizadas perfilagens com a sonda ajustada para densidade. As perfilagens foram realizadas em um depósito de carvão onde o intuito foi à obtenção da densidade *in situ*. A figura 3.16 apresenta o registro geofísico com o perfil estratigráfico.

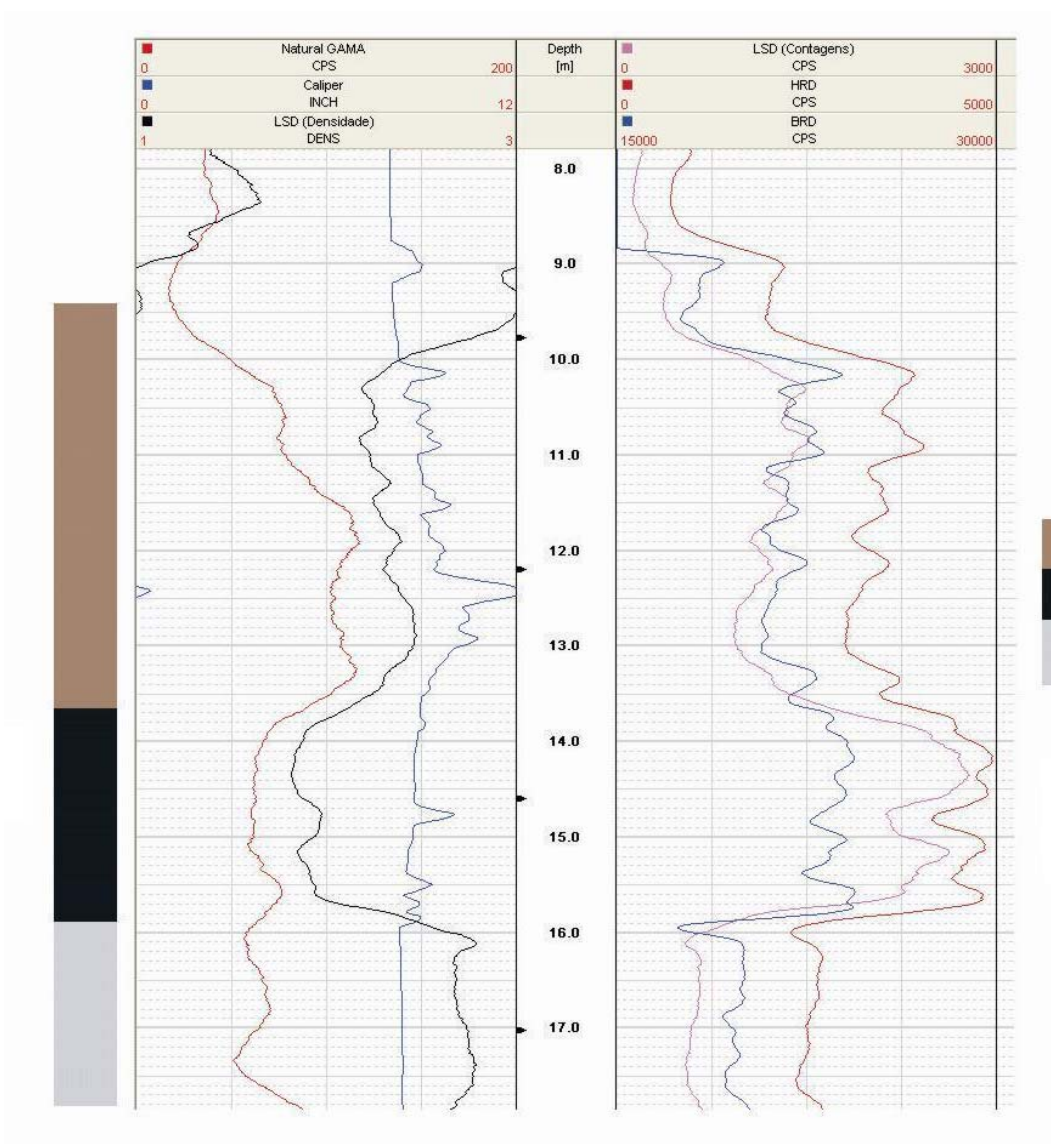


Figura 3.16 - Registro geofísico do equipamento de perfilagem geofísica com a descrição litológica.

O registro da figura 3.16 deve ser interpretado da seguinte forma:

- i - Os números no centro indicam a profundidade em metros (Depth)
- ii - Os sinais da coluna à esquerda do registro são:
 - i - gama natural na cor vermelha, em escala que varia de 0 a 200 CPS;
 - ii - diâmetro do furo na cor azul, em escala que varia de 0 a 12 polegadas;
 - iii - densidade na cor preta em escala que de 1 a 3 g/cm³.
- iii - Os sinais da coluna à direita do registro são:
 - i - Contagens gama retroespalhado para o sintilômetro LSD na cor rosa em escala que varia de 0 a 3000 CPS;
 - ii - Contagens gama retroespalhado para o sintilômetro HRD na cor vermelho em escala que varia de 0 a 5000 CPS;
 - iii - Contagens gama retroespalhado para o sintilômetro BRD na cor azul em escala que varia de 15000 a 30000 CPS;

A partir do perfil da figura 3.16, constata-se que a densidade na camada de carvão é em média 1,77 g/cm³ que é uma densidade condizente para o carvão. Não foram realizados ensaios densimétricos laboratoriais para obtenção da densidade real do carvão, por isso não pode ser realizado o comparativo.

Devido à rapidez da realização dos ensaios, as densidades obtidas por geofísica tendem a ter um suporte amostral substancialmente maior, quando comparado com as densidades medidas por testemunhos de sondagem.

3.6 Considerações finais

Este capítulo apresentou alguns resultados experimentais de perfilagem geofísica em carvão. Esses experimentos demonstram o benefício da perfilagem geofísica, e o uso da perfilagem geofísica como ferramenta para obtenção de dados, sem a análise química, do teor de cinza, poder calorífico, espessura e

densidade. Esses dados podem ser incorporados no banco de dados de informações quantitativas e qualitativas e posteriormente serem utilizados como dados secundários para realizar estimativas em pontos, blocos ou painéis não amostrados. A utilização de informações secundárias (obtidas por perfilagem geofísica por exemplo) para o cálculo de co-estimativas será apresentado nos capítulos seguintes dessa dissertação.

Capítulo 4

Informação secundária, modelos de incorporação

Neste capítulo, é apresentada uma discussão dos tipos de informações secundárias possíveis de serem utilizados em modelos de teores e estimativa de recursos. Serão abordados alguns métodos geoestatísticos para incorporação de informação secundária

4.1 Tipos de informação secundária

Considera-se informação secundária exaustivamente amostrada a informação disponível em todos os locais contendo dados primários e em todos os pontos onde a variável primária será estimada (dado colocado). Deste modo, a informação podem ser dois tipos:

- atributo categórico (tipo de litologia)
- atributo contínuo (outro parâmetro amostrado)

Se a informação secundária é densamente amostrada, mas não exaustivamente, é aceitável a uma aproximação por interpolação para completá-la, ou melhor ainda, através de simulação (ALMEIDA e JOURNAL 1994).

Para os casos de informação secundária exaustivamente amostrada os métodos apropriados que serão apresentados são:

- Krigagem Simples Variando Médias Locais (KSvml);
- Co-krigagem colocada aplicando o Modelo de Markov 1 (MM1)
- Co-krigagem colocada aplicando o Modelo de Markov 2 (MM2)

Os métodos mencionados acima exigem a variável secundária colocada em todos os nós da malha onde a variável primária será estimada. Em casos de informações secundárias não exaustivamente amostradas deve ser empregado, entre outros, o método de co-krigagem, o qual também será apresentado.

4.2 Medidas de continuidade espacial para duas variáveis

4.2.1 Coeficiente de correlação

O coeficiente de correlação é o parâmetro geoestatístico mais amplamente empregado para medir a relação entre duas variáveis. O coeficiente de correlação linear é dado por (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989):

$$\rho = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)(y_i - m_y)}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (4.1)$$

onde n é o número de dados, os índices x e y referem-se aos dados das variáveis primária e secundária, suas médias e desvios padrão são respectivamente m_x , m_y e σ_x , σ_y .

O numerador da equação 4.1 é a covariância entre x e y para $h=0$. Em resumo, o coeficiente de correlação é a covariância padronizada pelo desvio

padrão das duas variáveis, o que garante que o coeficiente de correlação esteja sempre no intervalo -1 e +1.

A partir da existência de correlação de duas variáveis pode ser obtida a equação que correlaciona as mesmas. A regressão linear é o método mais simples de equacionamento, pois assume que a dependência entre uma variável com a outra é descrita pela equação da reta (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989).

$$y = ax + b, \quad (4.2)$$

onde as constantes a e b da equação acima são obtidas por:

$$a = \rho \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \quad b = m_y - a m_x, \quad (4.3)$$

onde ρ é o coeficiente de correlação, e os índices m_x e σ_x são a média e desvio padrão da variável x e σ_y m_y média e desvio padrão da variável y.

4.2.2 Covariância cruzada

A covariância entre duas variáveis z_i e z_j separados por uma distância h é obtida por (GOOVAERTS, 1997):

$$C_{ij}(h) = \frac{1}{N(h)} \sum z_i(u_\alpha) \cdot z_j(u_\alpha + h) - m_i(-h) \cdot m_j(+h), \quad (4.4)$$

com:

$$m_i(-h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{\alpha=1}^{N(h)} z_i(u_\alpha) \quad \text{e} \quad m_j(+h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{\alpha=1}^{N(h)} z_j(u_\alpha + h) \quad (4.5)$$

onde $N(h)$ é o número de pares separados pela distância h e m_i e m_j são as médias das variáveis z_i e z_j respectivamente.

4.2.3 Variograma cruzado

A função variograma direto mede a variância entre pares de amostras separadas por uma distância h . Essa função é obtida pelo somatório das semi diferenças quadráticas dos valores da variável Z no ponto u ($z(u)$) conforme (GOOVAERTS, 1997):

$$\gamma_{(h)} = \frac{1}{2N(h)} \sum_{\alpha=1}^{N(h)} [z(u_\alpha) - z(u_\alpha + h)]^2, \quad (4.6)$$

onde $\gamma_{(h)}$ é a função variograma, $N(h)$ é o número de pares de dados $Z(u)$ separados por um vetor h .

O variograma cruzado é definido como a meia esperança matemática da soma dos valores das variáveis z_i e z_j separadas por h . A função variograma cruzado pode ser obtida por:

$$\gamma_{(ij)} = \frac{1}{2N(h)} \sum_{\alpha=1}^{N(h)} [z_i(u_\alpha) - z_i(u_\alpha + h)] \times [z_j(u_\alpha) - z_j(u_\alpha + h)], \quad (4.7)$$

onde $\gamma_{(ij)}$ é a função variograma cruzado, $N(h)$ é o número de pares de dados Z_i e Z_j separados por um vetor h .

Diferentemente da covariância cruzada, o variograma cruzado é simétrico em relação a h , sendo que seu equacionamento não é alterado trocando os incrementos ou alterando o sentido do vetor h .

Como o intuito do modelamento do variograma cruzado é a melhoria de estimativas de variáveis sub-amostradas (variáveis primárias) por métodos de co-estimativas, o seu cálculo está limitado às amostras da variável primária. No seu cálculo, é necessário que as variáveis Z_i e Z_j sejam presentes em u_α e $u_\alpha+h$.

4.3 Krigagem simples variando médias locais (KSvmI)

A krigagem simples é um método de estimativas linear não tendencioso com a esperança matemática dos valores estimados subtraídos dos valores originais na posição u igual a zero. A equação de krigagem simples é dada por:

$$Z_{SK}^*(u) - m = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}^{SK}(u) [Z(u_{\alpha}) - m], \quad (4.8)$$

onde $\lambda_{\alpha}^{SK}(u)$ é o peso relativo ao dado $z_{(u\alpha)}$ e m é a média global.

Respeitando a decisão de estacionariedade, a média m não depende da localização u , porém representa informação global comum para todos os pontos não amostrados.

Considerando uma informação secundária em cada ponto u , a média estacionária m , poder ser substituída por uma média local conhecida $m_{SK}^*(u)$ (GOOVAERTS, 1997).

$$z_{SK}^*(u) - m_{SK}^* = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}^{SK}(u) [z(u_{\alpha}) - m_{SK}^*] \quad (4.9)$$

Em caso de informação secundária seja um atributo contínuo y , a média local da variável primária pode ser uma função (linear ou não) do atributo secundário colocado.

$$m_{SK}^*(u) = f(y(u)) \quad (4.10)$$

Uma alternativa para o uso de regressão para determinar a função f consiste na discretização do intervalo de variação do atributo secundário em K classes (y_k, y_{k+1}). A média local primária $m(u)$ é identificada como a média dos valores de z desde que os dados co-locados y estejam dentro da classe (y_k, y_{k+1}).

$$m_{SK}^*(u) = m_{|k} \quad (4.11)$$

A média condicional m_k é calculada como:

$$m_{|k}(u) = \frac{1}{n_k} \sum_{\alpha=1}^n i(u_\alpha; k) z(u_\alpha) \quad (4.12)$$

O número dos dados primários $z(u_\alpha)$, tais como $y(u_\alpha)$ pertencente ao intervalo $(y_k, y_{k+1}]$, é n_k , e o y -indicador $i(u_\alpha; k)$ é definido por:

$$i(u_\alpha; k) = \begin{cases} 1 & \text{se } y(u_\alpha) \in (y_k, y_{k+1}] \\ 0 & \text{para outro valor} \end{cases}$$

Os pesos de krigagem da eq. 4.3.1 são obtidos pela resolução de:

$$\sum_{\beta=1}^{n(u)} \lambda_{\beta}^{SK}(u) C_R(u_{\alpha} - u_{\beta}) = C_R(u_{\alpha} - u) \quad \alpha = 1, \dots, n(u), \quad (4.13)$$

onde $C_R(h)$ é a função de covariância do resíduo $R(u)$ ao invés da variável primária $Z(u)$, onde $R(u) = Z(u) - m(u)$.

Um exemplo extraído de Goovaerts (1997) auxilia a compreensão do método KSvml. Considere a estimativa de teor de Cd usando como informação secundária blocos estimados por krigagem ordinária de teor de Ni (atributo contínuo). A figura 4.1 mostra os passos que correspondem à aproximação por krigagem.

Para cada dado primário locado em u_{α} , o valor de resíduo $r(u_{\alpha})$ é obtido pela subtração do dado primário com o dado secundário colocado ajustado pela função de correlação entre as duas variáveis.

O semi-variograma dos resíduos é calculado e modelado.

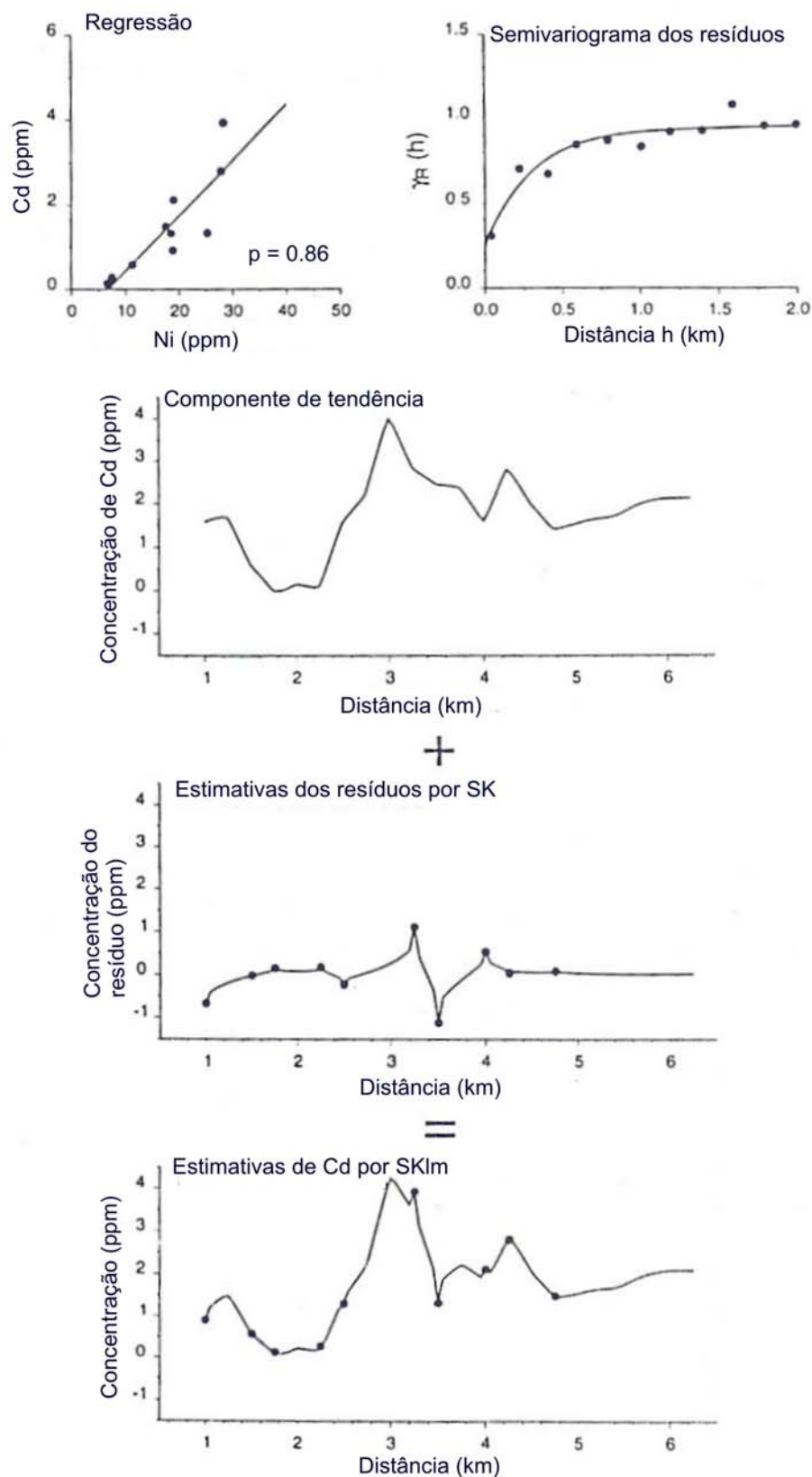


Figura 4.1 - Krigagem simples variando médias locais. A componente de tendência em u é estimado por regressão do teor Cd a partir do teor Ni em cada bloco contendo o ponto u (GOOVAERTS, 1997).

A estimativa final do teor de Cd z_{KSvml}^* é a soma do modelo de tendência com as estimativas do resíduo.

$$z_{KSvml}^*(u) = r_{KS}^*(u) + m_{SK}^*(u) \quad (4.14)$$

onde $z_{KSvml}^*(u)$ é a estimativa por krigagem simples variando médias locais, $r_{KS}^*(u)$ é a estimativa do resíduo e $m_{SK}^*(u)$ modelo de tendência.

4.4 Estimativas por cokrigagem

Informações secundárias não exaustivamente amostradas podem ser incorporadas pelo algoritmo de cokrigagem. Este algoritmo aplica a correlação espacial cruzada entre as variáveis primárias e secundárias, que pode assumir diversos modelos para correção regionalização.

Considere uma situação onde uma variável primária seja suplementada por dados secundários (N_v) de um atributo contínuo em qualquer ponto diferente. O estimador linear de krigagem é estendido de maneira a incorporar os N_v dados adicionais.

$$Z_1^*(u) - m_1(u) = \sum_{\alpha 1=1}^{n1(u)} \lambda_{\alpha 1}(u) [Z_1(u_{\alpha 1}) - m_1(u_{\alpha 1})] + \sum_{i=2}^{N_v} \sum_{\alpha i=1}^{ni(u)} \lambda_{\alpha i}(u) [Z_i(u_{\alpha i}) - m_i(u_{\alpha i})] \quad (4.15)$$

onde $\lambda_{\alpha 1}(u)$ são os pesos dos dados primários $Z_1(u_{\alpha 1})$ e $\lambda_{\alpha i}(u)$ com $i > 1$, são os pesos dos dados secundários, terciários, etc $Z_i(u_{\alpha i})$.

Somente os dados primários e secundários próximos ao ponto a ser estimado serão computados. A quantidade dos dados retidos e o tamanho da busca não precisam ser necessariamente os mesmos para todos os atributos. A cokrigagem pode ser de diferentes tipos, conforme o modelo de tendência $m_i(u)$ assumido:

- cokrigagem simples: considera tendência estacionária para toda a área.
- cokrigagem ordinária: limita a domínio de estacionariedade da tendência em uma vizinhança local.

Em uma notação simplificada de estimativas por cokrigagem para uma variável primária e uma secundária é dada por:

$$Z_1^*(u) = \sum_{\alpha_1=1}^{n_1(u)} \lambda_{\alpha_1}(u) Z_1(u_{\alpha_1}) + \sum_{\alpha_2=1}^{n_2(u)} \lambda_{\alpha_2}(u) Z_2(u_{\alpha_2}) \quad (4.16)$$

onde $Z_1^*(u)$ é o dado primário estimado em u e Z_1 e Z_2 são as variáveis primárias e secundárias localizadas em α_1 e α_2 respectivamente, com os pesos λ_{α_1} para a variável primária e λ_{α_2} para a secundária.

Para esses casos, os pesos de cokrigagem ordinária das variáveis $Z_1(u)$ e $Z_2(u)$ são respectivamente (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989):

$$\sum_{\alpha_1=1}^{n_1} \lambda_{\alpha_1}^{CKO} = 1 \quad \sum_{\alpha_2=1}^{n_2} \lambda_{\alpha_2}^{CKO} = 0 \quad (4.17)$$

Com as condições impostas acima, pode resultar em pesos negativos de cokrigagem para variável secundária, e conseqüentemente, a possibilidade de estimativas negativas ou muito pequenas, e também os pesos muito pequenos tendem a reduzir a influência da variável secundária (BOEZIO, 2004).

Para resolver esse problema foi proposta uma única condição para os pesos, onde o somatório dos pesos da variável primária e secundária deve somar 1 (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989).

$$\sum_{\alpha_1=1}^{n_1} \lambda_{\alpha_1}^{CKO} + \sum_{\alpha_2=1}^{n_2} \lambda_{\alpha_2}^{CKO} = 1 \quad (4.18)$$

Essa nova condição para os pesos infere uma modificação da equação 4.16 onde as médias das duas variáveis são computadas.

$$Z_1^*(u) = \sum_{\alpha 1=1}^{n1(u)} \lambda_{\alpha 1}(u) Z_1(u_{\alpha 1}) + \sum_{\alpha 2=1}^{n2(u)} \lambda_{\alpha 2}(u) [Z_2(u_{\alpha 2}) - m_{z2} + m_{z1}] \quad (4.19)$$

onde $Z_1^*(u)$ é o dado primário estimado com m_{z1} e m_{z2} sendo as médias desagrupadas de Z_1 e Z_2 respectivamente.

4.5 Estimativas por cokrigagem colocada

Freqüentemente, em aplicações práticas, a amostragem da variável secundária é muito mais extensiva que a variável primária. O caso limite é quando a variável secundária é tão exaustivamente amostrada que apresenta informações em cada nó da malha onde a variável primária vai ser estimada. Em casos de dados exaustivamente amostrados, os sistemas de cokrigagem tornam-se instáveis pelo fato de que a correlação entre os dados secundários próximos é muito maior do que os dados primários afastados.

Uma solução para os problemas de instabilidade causada pelo uso redundante de informações secundárias consiste na utilização somente do dado secundário colocado no ponto a ser estimado. O sistema de cokrigagem é então escrito como:

$$Z_1^*(u) - m_1(u) = \sum_{\alpha 1=1}^{n_1(u)} \lambda_{\alpha 1}(u) [Z_1(u_{\alpha 1}) - m_1(u_{\alpha 1})] + \sum_{i=2}^{N_y} \lambda_i(u) [Z_i(u) - m_i(u)] \quad (4.20)$$

onde:

$Z_1^*(u)$ é o dado primário estimado em u ,

$\sum_{\alpha_1=1}^{n_1(u)} \lambda_{\alpha_1}(u)$ pesos de krigagem para a variável primária,

$Z_1(u_{\alpha_1})$ dado primário,

$m_1(u_{\alpha_1})$ média do dado primário,

$\sum_{i=2}^{n_v} \lambda_i(u)$ pesos de krigagem para a variável secundária colocada,

$Z_i(u)$ dado secundário,

$m_i(u)$ média do dado secundário.

Diferentes estimativas por cokrigagem podem ser construídos dependendo do modelo de tendência adotado.

4.5.1 Cokrigagem simples colocada (CKSC)

A cokrigagem simples colocada de um atributo primário z_1 locado em u é dado por:

$$Z_{CKSC}^{(1)*}(u) = \sum_{\alpha_1=1}^{n_1(u)} \lambda_{\alpha_1}^{CKSC}(u)[Z_1(u_{\alpha_1}) - m_1] + \lambda_2^{CKSC}(u)[Z_2(u) - m_2] + m_1 \quad (4.20)$$

Os pesos de cokrigagem são obtidos a partir das equações abaixo:

$$\left. \begin{aligned} & \sum_{\beta_1=1}^{n_1(u)} \lambda_{\beta_1}^{CKSC}(u) C_{11}(u_{\alpha_1} - u_{\beta_1}) + \lambda_2^{CKSC}(u) C_{12}(u_{\alpha_1} - u) \\ & \qquad \qquad \qquad = C_{11}(u_{\alpha_1} - u) \qquad \alpha_1 = 1, \dots, n_1(u) \\ & \sum_{\beta_1=1}^{n_1(u)} \lambda_{\beta_1}^{CKSC}(u) C_{21}(u - u_{\beta_1}) + \lambda_2^{CKSC}(u) C_{22}(0) = C_{21}(0) \end{aligned} \right\} \quad (4.21)$$

onde:

$\sum_{\alpha_1=1}^{n_1(u)} \lambda_{\alpha_1}^{CKSC}$ é o somatório dos pesos das informações da variável primária $Z_1(u_{\alpha_1})$,

λ_2^{CKSC} é o peso destinado ao dado da variável secundária $Z_2(u)$ locado no ponto u que está sendo estimado,

$C_{11}(u_{\alpha_1} - u_{\beta_1})$ covariância da variável primária entre os locais u_{α_1} e u_{β_1} ,

$C_{12}(u_{\alpha_1} - u)$ covariância cruzada entre a variável primária em u_{α_1} e da variável secundária no ponto u que está sendo estimado,

$C_{11}(u_{\alpha_1} - u)$ covariância da variável primária entre os locais u_{α_1} e o ponto u que está sendo estimado,

$C_{21}(u - u_{\beta_1})$ covariância cruzada da variável secundária no ponto u que está sendo estimado com a variável primária em u_{β_1}

$C_{21}(0)$ covariância cruzada para o vetor de separação h igual a zero

$C_{22}(0)$ (co) variância dos dados da variável secundária

Diferentemente da cokrigagem, a cokrigagem colocada não emprega a covariância entre as variáveis secundárias para $|h| > 0$.

4.5.2 Cokrigagem ordinária colocada (CKOC)

O formalismo usual da cokrigagem ordinária, ao considerar o somatório os pesos dos dados secundários igual a zero, não pode ser aplicado em casos de dados secundários colocados. Em consequência disso, deve ser empregado a cokrigagem ordinária padronizada. Com isso, a cokrigagem ordinária colocada de um dado primário z_1 locado em u é obtida por:

$$Z_{CKOC}^{(1)*}(u) = \sum_{\alpha_1=1}^{n_1(u)} \lambda_{\alpha_1}^{CKOC}(u) Z_1(u_{\alpha_1}) + \lambda_2^{CKOC}(u) [Z_2(u) - m_2 + m_1], \quad (4.22)$$

onde $Z_{CKOC}^{(1)*}(u)$ é o dado primário estimado em u com $\sum_{\alpha_1=1}^{n_1(u)} \lambda_{\alpha_1}^{CKOC}$ e λ_2^{CKOC} sendo os pesos das amostras associadas à variável primária Z_1 e com a secundária Z_2 respectivamente, m_1 refere-se a média de Z_1 e m_2 a média de Z_2 .

A soma de todos os pesos deve ser igual a um:

$$\sum_{\alpha_1=1}^{n_1(u)} \lambda_{\alpha_1}^{CKOC}(u) + \lambda_2^{CKOC}(u) = 1 \quad (4.23)$$

Os pesos de cokrigagem são obtidos a partir da solução das equações abaixo:

$$\left. \begin{aligned} & \sum_{\beta_1=1}^{n_1(u)} \lambda_{\beta_1}^{CKOC}(u) C_{11}(u_{\alpha_1} - u_{\beta_1}) + \lambda_2^{CKOC}(u) C_{12}(u_{\alpha_1} - u) + \mu^{CKOC}(u) \\ & \qquad \qquad \qquad = C_{11}(u_{\alpha_1} - u) \qquad \alpha_1 = 1, \dots, n_1(u) \\ & \sum_{\beta_1=1}^{n_1(u)} \lambda_{\beta_1}^{CKOC}(u) C_{21}(u - u_{\beta_1}) + \lambda_2^{CKOC}(u) C_{22}(0) + \mu^{CKOC}(u) = C_{21}(0) \\ & \sum_{\beta_1=1}^{n_1(u)} \lambda_{\beta_1}^{CKOC}(u) + \lambda_2^{CKOC}(u) = 1 \end{aligned} \right\} \quad (4.24)$$

onde :

$\sum_{\alpha_1=1}^{n_1(u)} \lambda_{\alpha_1}^{CKOC}$ é o somatório dos pesos das informações da variável primária $Z_1(u_{\alpha_1})$,

λ_2^{CKOC} é o peso destinado ao dado da variável secundária $Z_2(u)$ locado no ponto u que está sendo estimado,

$C_{11}(u_{\alpha_1} - u_{\beta_1})$ covariância da variável primária entre os locais u_{α_1} e u_{β_1} ,

$C_{12}(u_{\alpha_1} - u)$ covariância cruzada entre a variável primária em u_{α_1} e da variável secundária no ponto u que está sendo estimado,

$C_{11}(u_{\alpha_1} - u)$ covariância da variável primária entre os locais u_{α_1} e o ponto u que está sendo estimado,

$C_{21}(u - u_{\beta_1})$ covariância cruzada da variável secundária no ponto u que está sendo estimado com a variável primária em u_{β_1}

$C_{21}(0)$ covariância cruzada para o vetor de separação h igual a zero

$C_{22}(0)$ (co) variância dos dados da variável secundária

μ^{CKOC} parâmetro Lagrangeano para incorporar a condição da soma dos pesos de Z_1 e Z_2 ser igual a 1.

4.5.3 Modelo de Markov 1 (MM1)

O MM1 foi aceito na prática, pois não necessita do sistema linear de co-regionalização diretamente, porém esta facilidade tem seu preço. Tudo que o MM1 precisa é a covariância primária $C_{11}(h)$ e a covariância cruzada $C_{12}(h)$. Almeida (1993) sugere o seguinte tipo de aproximação para a covariância cruzada:

$$C_{12}(h) \approx \frac{C_{12}(0)}{C_{11}(0)} C_{11}(h) , \quad (4.25)$$

onde a covariância cruzada $C_{12}(h)$ é ajustada pela covariância da variável primária $C_{11}(h)$, os índices $C_{12}(0)$ e $C_{11}(0)$ é a covariância cruzada e da variável primária para $h=0$ respectivamente.

A equação 4.25 escrita sob a forma de correlograma é dada por:

$$\rho_{12}(h) = \rho_{12}(0) \cdot \rho_1(h) , \quad (4.26)$$

onde o correlograma cruzado para $h \neq 0$ $\rho_{12}(h)$ é igual a multiplicação do correlograma cruzado para $h = 0$ $\rho_{12}(0)$ pelo correlograma da variável primária $\rho_1(h)$.

Reescrevendo a equação 4.25 em termos de variograma:

$$\gamma_{12}(h) = \frac{C_{12}(0)}{C_{11}(0)} \gamma_{11}(h) \quad , \quad (4.27)$$

onde o variograma cruzado $\gamma_{12}(h)$ é ajustado pela covariância da variável primária $C_{12}(0)$ e $C_{11}(0)$ para $h=0$ e pelo variograma da variável primária $\gamma_{11}(h)$.

Uma limitação do MM1 é de que os dados secundários $Z_2(u)$ são dependentes dos dados primários colocados $Z_1(u)$ o que filtra a influência dos dados primários mais afastados $Z_1(u')$.

O MM1 é empregado quando o correlograma cruzado experimental for proporcional ao correlograma experimental da variável primária (GOOVAERTS, 1997).

O MM1 é um modelo aceitável se $Z_1(u)$ apresentar o mesmo ou um maior volume de suporte que $Z_2(u)$, permitindo que isto projete a influência de dados mais afastados de $Z_1(u')$ (JOURNEL, 1999).

Em várias aplicações práticas, no entanto, a variável primária $Z_1(u)$ é definida como um suporte muito menor que a variável secundária $Z_2(u)$. Por esse motivo o MM1 não é um modelo indicado, pois, o ajuste variográfico da variável secundária (menos abundante) pode ser menos preciso.

Finalmente, devido aos dados secundários Z_2 serem tipicamente mais abundantes, a inferência de $\rho_2(h)$ é mais fácil que $\rho_1(h)$. Então, em casos semelhantes, um modelo revertendo às posições de Z_1 e Z_2 no modelo MM1 proposto poderia ser mais apropriado. Isto é precisamente o modelo de Markov 2 (MM2) que será introduzido a seguir.

4.5.4 Modelo de Markov 2 (MM2)

O MM2 foi desenvolvido para os casos em que a variável secundária $Z_2(u)$ é muito mais abundantemente amostrada que a variável primária $Z_1(u)$. Essa é uma característica que, normalmente, ocorre na prática. Para respeitar essa hipótese foi considerado que (JOURNEL, 1999):

$$E\{Z_1(u) | Z_2(u) = Z_2, Z_2(u') = Z_2'\} = E\{Z_1(u) | Z_2(u) = Z_2\} \quad (4.28)$$

$$\forall u, u', Z_2, Z_2'$$

Em outras palavras, os dados secundários colocados $Z_2(u)$ filtram a influência dos dados secundários mais afastados $Z_2(u')$, obrigando o sistema a computar somente o dado secundário colocado $Z_2(u) = z_2$.

O correlograma cruzado para MM2 pode ser aproximado pela seguinte equação(JOURNEL, 1999):

$$\rho_{12}(h) = \rho_{12}(0) \cdot \rho_2(h), \quad (4.29)$$

onde o correlograma cruzado para $h \neq 0$ $\rho_{12}(h)$ é igual a multiplicação do correlograma cruzado para $h = 0$ $\rho_{12}(0)$ pelo correlograma da variável primária $\rho_2(h)$.

Devido à abundância amostral da variável secundária, o correlograma cruzado a partir dessa variável é mais adequado, pois seu ajuste com o maior número de dados é mais preciso, considerando a correlação entre as amostras.

O MM2 exige que sejam devem ser respeitadas as condições de definição positiva. No entanto, o MM2 é um modelo linear de correlograma onde a covariância cruzada é proporcional a variável secundária, restando então uma equação para calcular a covariância da variável primária (BOESIO, 2004).

$$\rho_1(h) = \rho_{12}^2(0) \cdot \rho_2(h) + (1 - \rho_{12}^2(h)) \cdot \rho_R(h) \quad (4.30)$$

O correlograma de $Z_1(u)$ pode ser ajustado pela combinação linear do correlograma de $Z_2(u)$ mais um correlograma $\rho_R(u)$, onde os coeficientes são determinados pelo coeficiente de correlação entre Z_1 e Z_2 .

Se o gráfico de dispersão entre $\{\rho_{12}(hi), \rho_2(hi), i = 1, \dots, N\}$ apresentar os pontos alinhados no entorno de uma reta de 45° , o MM2 é mais adequado.

Normalmente, o MM2 é preferido, porém, o MM1 deve ser empregado quando o correlograma cruzado experimental é proporcional ao correlograma experimental da variável primária (JOURNEL, 1999).

4.6 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados alguns métodos para o aumento da certeza nas estimativas através da incorporação de informações secundárias aos dados primários. Os dados secundários podem ser informações de análises químicas de um outro parâmetro correlacionável ou de um método de amostragem diferente que mede um parâmetro correlacionável ou o mesmo parâmetro, como a perfilagem geofísica por exemplo, assunto abordado nos capítulos 2 e 3 dessa dissertação. O capítulo seguinte aplica os métodos geoestatísticos apresentados neste capítulo em um estudo de caso.

Capítulo 5

Estudo de Caso

Este capítulo trata da aplicação de métodos geoestatísticos capazes de reduzir a incerteza associada às estimativas por meio de incorporação de informações secundárias. Como não houve tempo e nem a possibilidade de ser criado um banco de dados com informações coletadas por perfilagem geofísica, buscou-se um banco de dados que representasse uma situação semelhante, onde os métodos aplicados podem ser estendidos para uma situação com informações por geofísica. O banco de dados empregado para o estudo de caso foi disponibilizado pela Carbonífera Metropolitana S.A., que opera no município de Treviso no estado de Santa Catarina.

5.1 Aspectos Geológicos

A área de estudo está localizada na Bacia Carbonífera Sul-catarinense, sendo esta uma das mais importantes bacias carboníferas do Brasil.

5.1.1 Geologia Local

A área de concessão da Carbonífera Metropolitana S.A. localiza-se no setor norte da Bacia Carbonífera Sul-catarinense que engloba os municípios de Treviso, Lauro Muller e Siderópolis. A estratigrafia local foi descrita por Krebs et al. (1994) e é apresentada simplificada na tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Estratigrafia local da região de estudo (KREBS et al., 1994).

Período	Litoestratigrafia				Litologia
	Grupo	Subgrupo	Formação	Membro	
PERMEANO			Estrada Nova		Siltitos cinza-escuros e folhelhos com finos estratos de arenito violeta
			Irati		Folhelhos escuros e siltitos com porções pirobetuminosas,
			Palermo		Siltitos cinzas a esverdeados com estratos de
			Rio Bonito	Siderópolis	Arenitos cinza claros de finos a médios. Presença de siltitos, folhelhos e
				Paraguaçu	Siltitos cinza a esverdeados, finas camadas de carvão e
				Triunfo	Arenitos cinza-claros de finos a grosseiros, presença de siltito cinza escuro, raramente camadas de carvão
		Tubarão		Guatá	

A camada de carvão estudada é denominada de camada Bonito, que pertence ao membro Siderópolis. Originada por depósitos de mangue formados após uma regressão marinha. Estende-se descontinuamente do município de Lauro Muller, no estado de Santa Catarina, até as proximidades do município de Torres no estado do Rio Grande do Sul.

Sendo a última camada da formação Rio Bonito Superior, a camada Bonito, no local estudado, apresenta uma espessura que varia de 0,56 a 4,77 m e teores médios de cinza, enxofre e poder calorífico de 60,7%, 4,67% e 2908 kcal/t respectivamente.

5.2 Banco de dados

O banco de dados é composto por 471 amostras, adquiridas por sondagem com recuperação de testemunhos com 36,4 mm de diâmetro. Das amostras contidas no banco de dados, 131 foram descartadas, principalmente, por motivos de baixa recuperação ou de diferentes métodos de descrição dos testemunhos (SOUZA, 2000). A tabela 5.1 apresenta os parâmetros analisados a partir das amostras contidas no banco de dados.

Tabela 5.2 - Variáveis contidas no banco de dados com os respectivos parâmetros estatísticos.

Variável Parâmetro	Enxofre	Material Volátil	Cinza	Densidade	Poder Calorífico	Espessura
Nº de dados	278	125	288	248	27	338
Máximo	8,82 %	29,6 %	74,9 %	2,31 t/m ³	3428 kcal/t	4,77 m
Mínimo	1,53 %	5,5 %	41,5 %	1,6 t/m ³	2309 kcal/t	0,56 m

Os furos de sondagens abrangem uma área de aproximadamente 180 km² e são dispostos conforme mostra a figura 5.2.

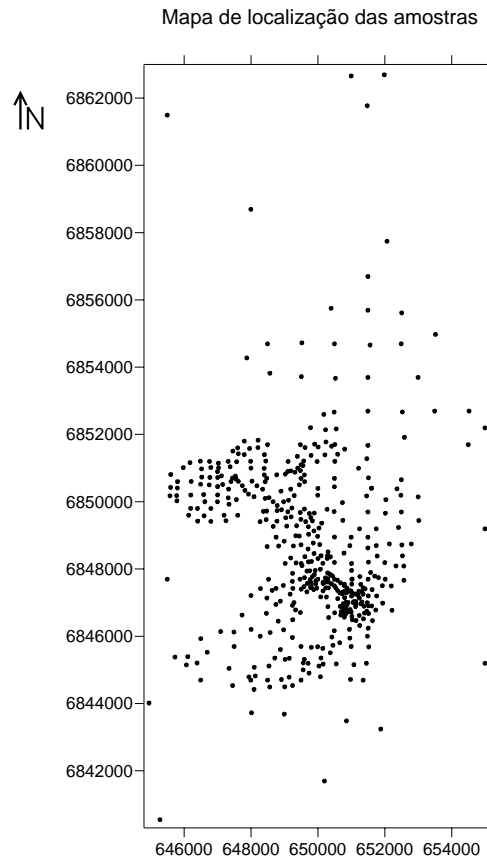


Figura 5.1 - Mapa de localização das amostras.

O mapa da figura 5.1 apresenta a localização de todos os furos de sondagens contidos no banco de dados, e conforme pode ser visto na tabela 5.2, não existe a análise de todos os parâmetros em todos os furos. Observam-se também zonas preferencialmente amostradas.

5.2.1 Análise estatística dos parâmetros

Como o intuito do trabalho é o emprego das metodologias geoestatísticas para redução da incerteza via incorporação de informações secundárias, é necessário, inicialmente, analisar as correlações entre as variáveis presentes no banco de dados. Por meio do coeficiente de correlação, pode ser determinado o

par de parâmetros que apresente a melhor correlação. Somente o par de variáveis que apresentar o melhor índice de correlação será analisado para o emprego dos métodos geoestatísticos de combinação de informações.

5.2.1.1 - Cálculo dos índices de correlação

Para o cálculo dos coeficientes de correlação foi empregada a rotina *scatplt.exe* (DEUTSCH e JOURNEL, 1998). Essa rotina calcula o coeficiente de correlação ρ conforme a equação 4.1.

$$\rho = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)(y_i - m_y)}{\sigma_x \sigma_y}$$

Os gráficos de dispersão e os respectivos índices de correlação são apresentados na figura 5.2a, 5.2b e 5.2c.

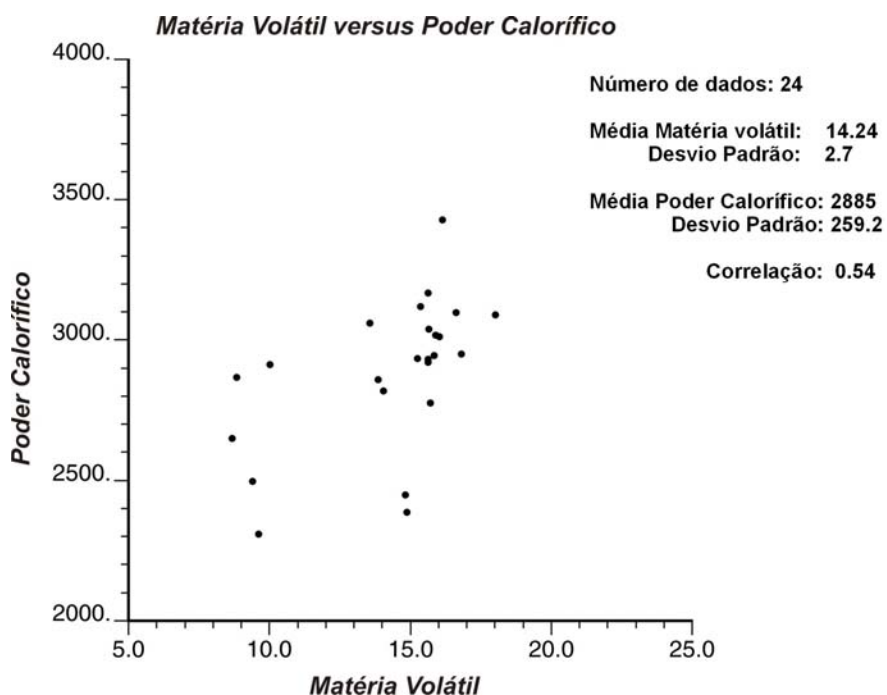


Figura 5.2a - Curva de dispersão com os coeficientes de correlação.

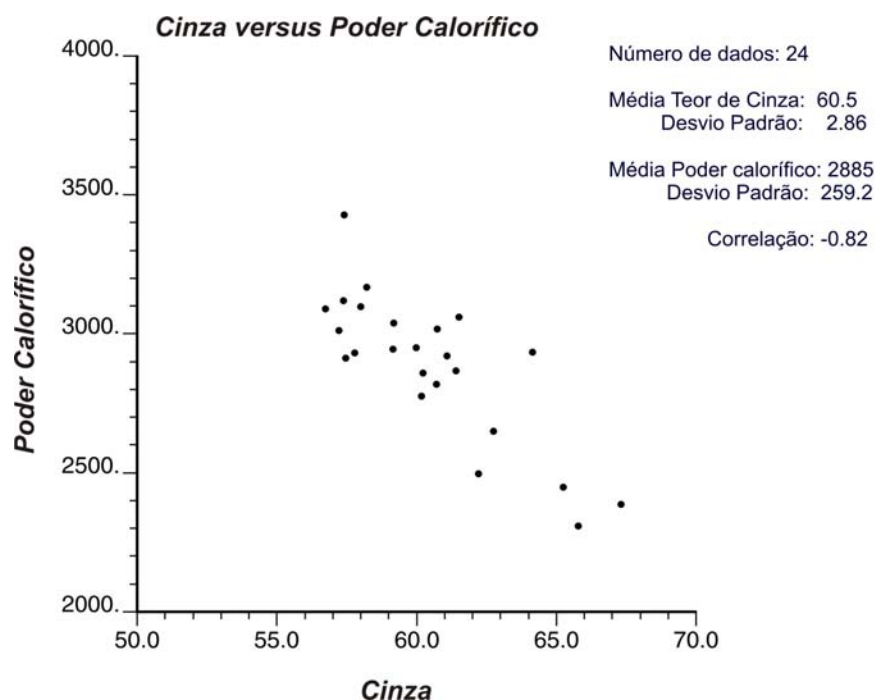


Figura 5.2b - Curvas de dispersão com os coeficiente de correlação.

O resumo de todos os coeficientes de correlação calculados entre as variáveis disponíveis é apresentado na tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Resumo das correlações entre as variáveis

Par de parametros	Correlação linear
Cinza x Poder calorífico	- 0,818
Densidade x Poder calorífico	- 0,635
Matéria volátil x Poder calorífico	0,539
Cinza x Densidade	0,648
Enxofre x Matéria volátil	0,006

Conforme a tabela 5.3, conclui-se que o grupo de variáveis que apresenta o melhor coeficiente de correlação é teor de cinza x poder calorífico com $\rho = -0.818$, (correlação inversa). No que segue, essas variáveis serão referidas como CZ e PC respectivamente.

Baseado em 4.2 e 4.3, e com os parâmetros estatísticos da variável CZ e PC (figura 5.4) a equação de correlação entre as variáveis é ajustada linearmente por:

$$pc = -75,139 \times cz + 7437,5$$

5.2.1.2 - Localização das amostras de teor de cinza e poder calorífico

Os mapas de localização das amostras são importantes para verificar sua disposição espacial, checar a ocorrência de zonas preferencialmente amostradas e distribuição dos teores. A figura 5.3 apresenta o mapa de localização dos parâmetros CZ e PC.

Mapas de localização das amostras.

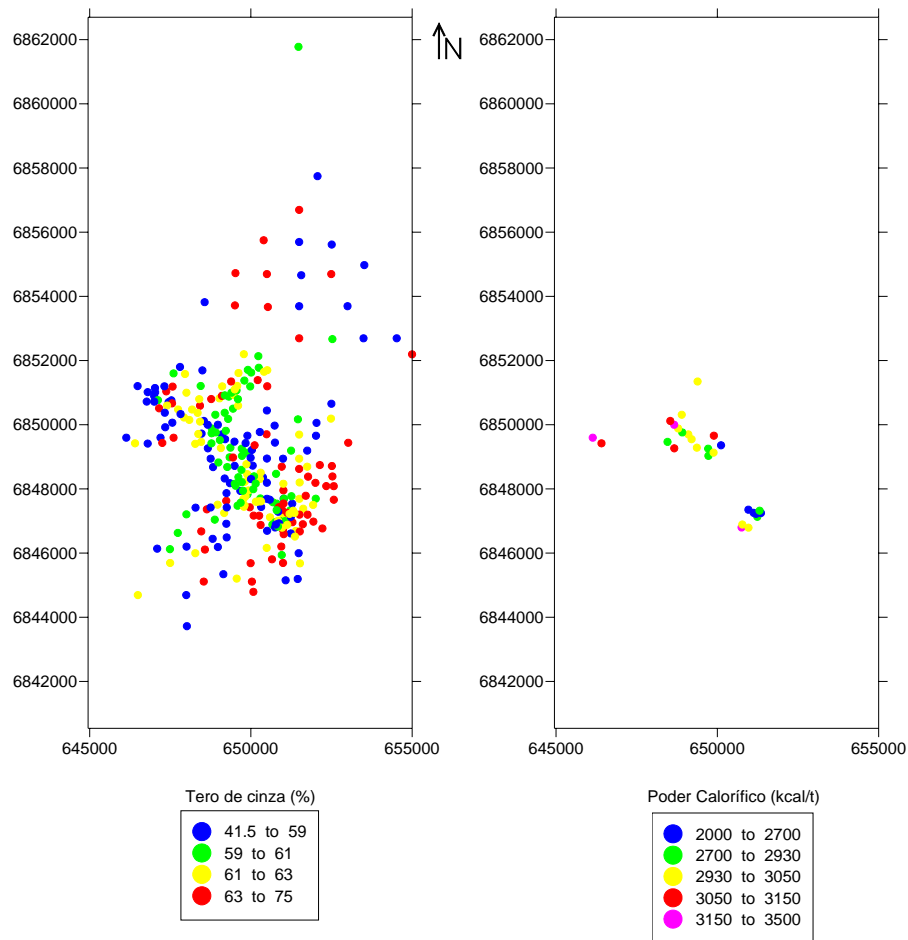


Figura 5.3 - Mapa de localização dos parâmetros CZ e PC, a esquerda e direita respectivamente.

5.2.1.3 - Estatística básica dos parâmetros teor de cinza e poder calorífico

A estatística básica foi obtida empregando a rotina *histplt.exe* (DEUTSCH e JOURNAL, 1998). Além de calcular a estatística básica dos dados essa rotina imprime o histograma da distribuição dos valores das amostras. A figura 5.4 e 5.5 apresenta os histogramas das variáveis CZ e PC.

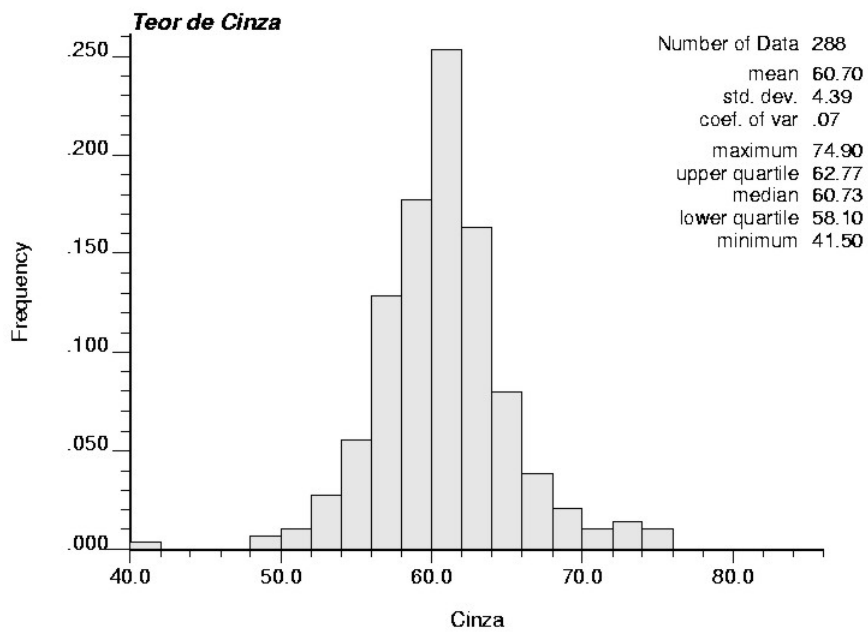


Figura 5.4 - Histograma da variável CZ.

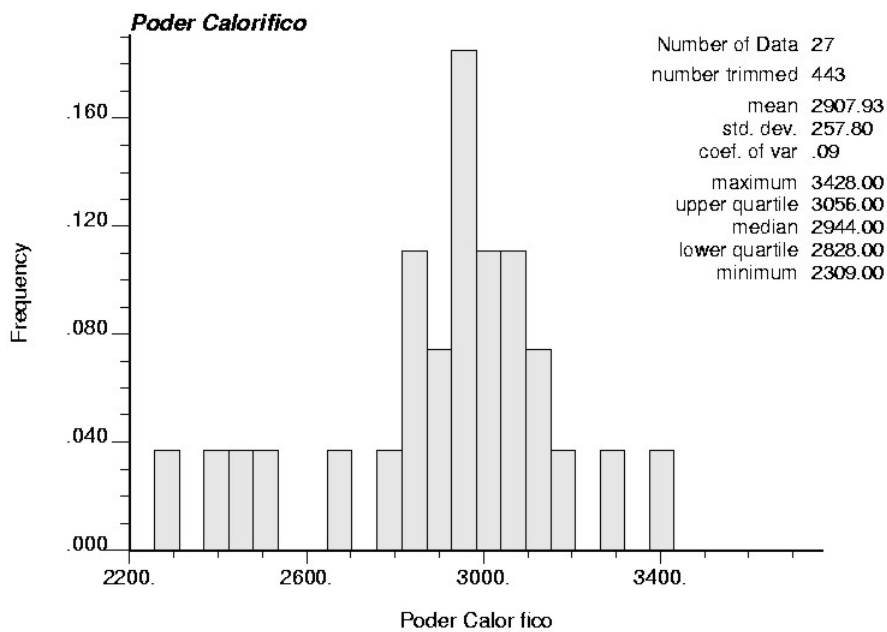


Figura 5.5 - Histograma da variável PC.

Os histogramas das figuras 5.4 e 5.5, foram obtidos com o banco de dados original sendo influenciado pelo efeito do agrupamento amostral.

Devido ao agrupamento amostral, (mapa da figura 5.3 com zonas preferencialmente amostradas) deve ser inferida a estatística global não tendenciosa.

O desagrupamento amostral foi obtido pelo método dos polígonos (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989). O método dos polígonos infere pesos aos pontos amostrais conforme a área do polígono construído no entorno do ponto. A área do polígono é proporcional à malha amostral. Nesse método, a média desagrupada é obtida por:

$$\hat{m} = \frac{1}{|A|} \sum_{\alpha=1}^n \varpi_{\alpha} \cdot Z(x_{\alpha}), \quad (5.1)$$

onde: \hat{m} é a média desagrupada, $|A|$ é a área de estudo, ϖ é a área do polígono referente ao ponto x_{α} de valor z .

A figura 5.6 apresenta um polígono construído no entorno de um ponto, onde seu processo de construção pode ser visto detalhadamente em Isaaks e Srivastava (1989).

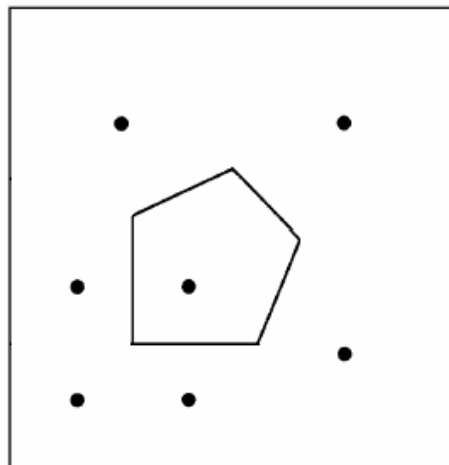


Figura 5.6 - Polígono de influência.

A figura 5.6 - Apresenta os histogramas das variáveis PC e CZ desagrupadas por polígonos de influência. A obtenção dos polígonos de influência foi obtida com o programa 3Plot98® (KAVENSKI et al., 1998).

A tabela 5.4 faz um resumo das médias originais e desagrupadas das variáveis CZ e PC.

Tabela 5.4 - Resumo entre a média original e desagrupada.

Variável	Média original	Média desagrupada
Teor de cinza (%)	60,70	60,89
Poder Calorífico (kcal/t)	2907,9	2925,8

A partir dos resultados conclui-se que é pequeno o efeito do agrupamento sobre a estatística das amostras, pois é pequena a sua influência na estatística dos dados.

5.2.2 Medida da continuidade espacial das variáveis: teor de cinza e poder calorífico

A medida da continuidade espacial é obtida pela função variograma. A função variograma mede a variância entre pares de amostras separadas por uma distância h , conforme foi mostrado na equação 4.6.

5.2.2.1 - Determinação da continuidade espacial da variável teor de cinza

O cálculo do variograma foi realizado com o auxílio do programa VarioWin 2.2® (PANATIER, 1995).

A estratégia de varredura para determinação das direções principais de continuidade espacial foi tomada principalmente com a construção do variograma de superfície conforme mostra a figura 5.7.

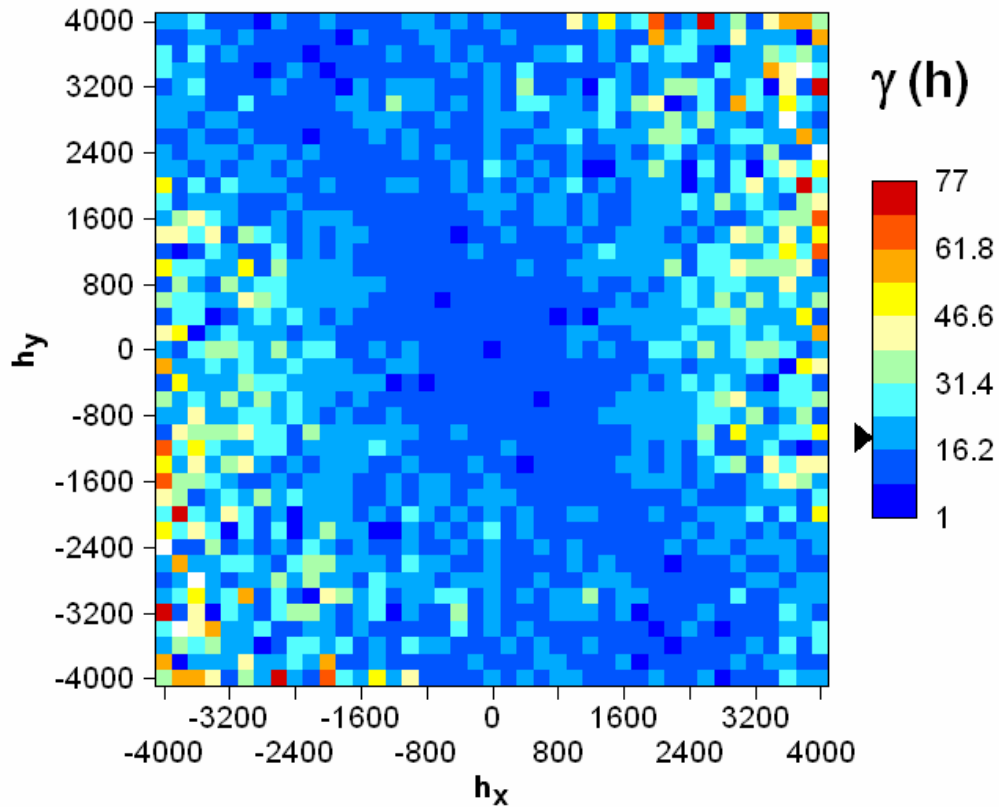


Figura 5.7 - Variograma de superfície da variável CZ.

A partir do variograma de superfície, é possível conhecer a orientação prévia das direções preferenciais de continuidade espacial. Para esse caso, a direção de maior continuidade espacial se encontra no quadrante NW.

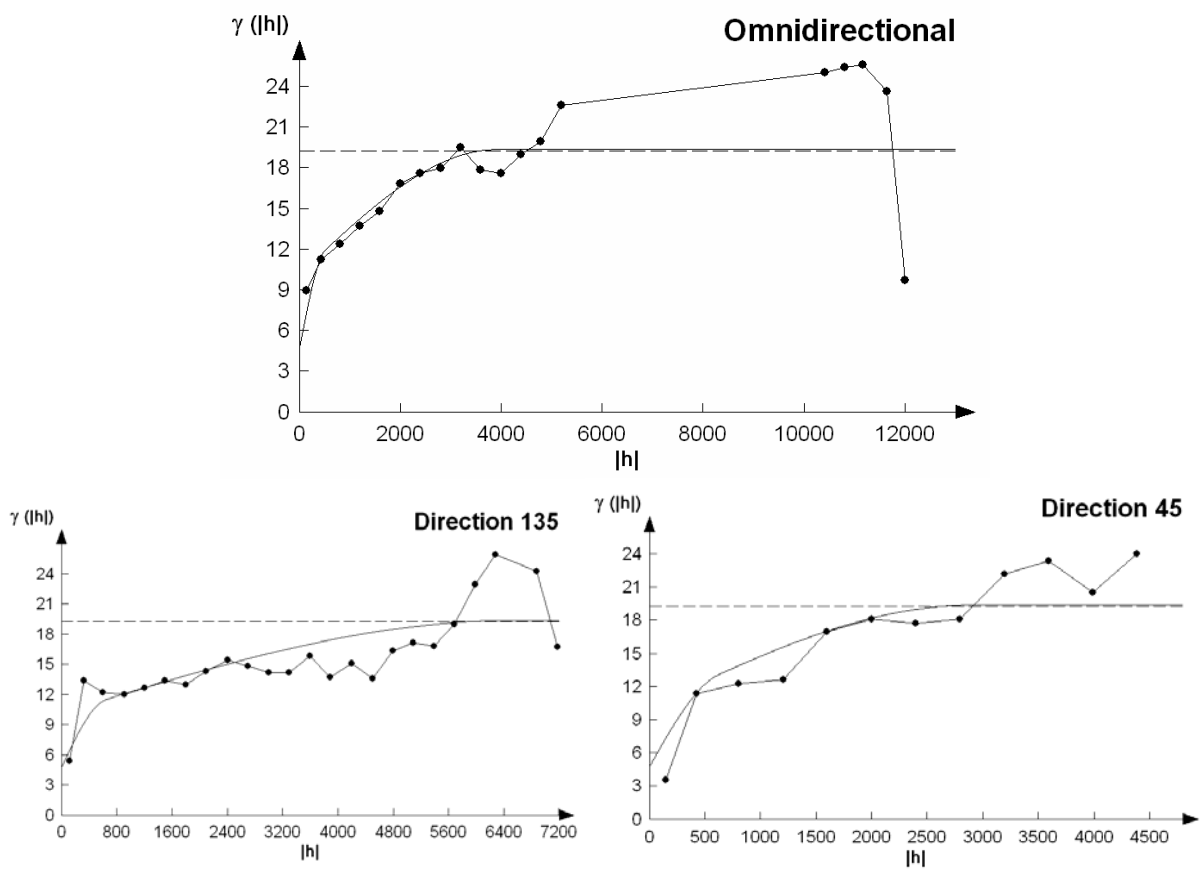


Figura 5.8 - Variogramas omnidirecional, direção 135° e direção 45° da variável CZ.

A seguir é apresentada a equação que resume os parâmetros do ajuste variográfico.

$$\gamma_2(h) = 4,8 + 5,4Sph\left(\frac{N_{135^\circ}}{648}, \frac{N_{45^\circ}}{580}\right) + 9,2Sph\left(\frac{N_{135^\circ}}{6480}, \frac{N_{45^\circ}}{2800}\right), \quad (5.2)$$

onde os termos da equação acima são:

$$\gamma(h) = C_0 + C_{1a}Sph\left(\frac{ang_{1a}}{a_{1a}}, \frac{ang_{2a}}{a_{2a}}\right) + C_1Sph\left(\frac{ang_{1b}}{a_{1b}}, \frac{ang_{2b}}{a_{2b}}\right) \quad (5.3)$$

sendo:

$\gamma(h)$ a função variograma,

C_0 - efeito pepita,

C_{1a} - patamar referente à primeira estrutura,

C_{1b} - patamar referente à segunda estrutura,

ang_{1a} e a_{1a} - direção e alcance da maior continuidade espacial referente à primeira estrutura,

ang_{1b} e a_{1b} - direção e alcance da maior continuidade espacial referente à segunda estrutura,

ang_{2a} e a_{2a} - direção e alcance da menor continuidade espacial referente à primeira estrutura,

ang_{2b} e a_{2b} - direção e alcance da menor continuidade espacial referente à segunda estrutura,

Sph - ajuste esférico.

5.2.2.2 - Determinação da continuidade espacial da variável poder calorífico

A determinação da continuidade espacial da variável PC foi dificultada devido à carência de informações. A alta correlação existente entre CZ e PC auxiliou na determinação das direções preferenciais. O variograma de superfície calculado para o PC não evidenciou nenhuma direção preferencial, devido a carência de informações. Os alcances obtidos no modelamento da variável CZ também determinaram no ajuste do modelo variográfico da variável PC.

A seguir, figura 5.9, são apresentados os variogramas das direções principais de continuidade espacial.

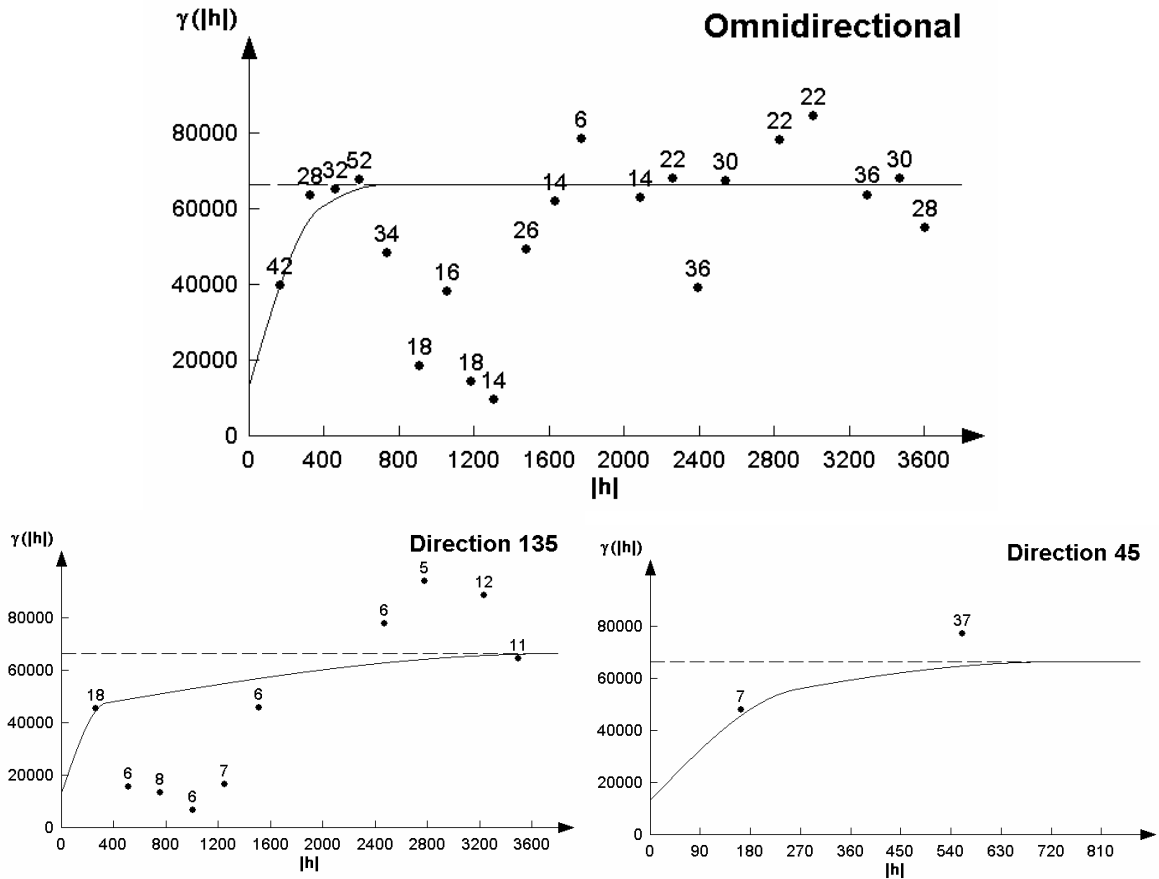


Figura 5.9 - Variogramas omnidirecional, direção 135° e direção 45° da variável PC.

A 27 amostras de PC, não permite o ajuste variográfico adequado, conforme pode ser observado na figura 5.9. Como pode ser observado, os variogramas calculado para o PC não são adequados, principalmente para a direção de 45°, de menor continuidade espacial.

Por esse motivo, pode se imaginar que o Modelo de Markov 2, seria o mais adequado para o uso de informações secundária, já que utiliza o variograma da variável primária (mais abundante e conseqüentemente o modelo variográfico adequado) para o cálculo de co-estimativas.

A seguir é apresentada a equação que resume os parâmetros do ajuste variográfico para a variável PC.

$$\gamma_1(h) = 16475 + 18545 Sph\left(\frac{N_{135^\circ}}{342}, \frac{N_{45^\circ}}{264}\right) + 31600 Sph\left(\frac{N_{135^\circ}}{3800}, \frac{N_{45^\circ}}{750}\right), \quad (5.4)$$

onde os termos dessa equação são descritos na equação 5.3.

5.2.2.3 - Determinação da continuidade espacial cruzada entre a variável poder calorífico e teor de cinza.

Conforme pode ser visto na equação 4.2.6, o cálculo do variograma cruzado fica condicionado à qualidade de ambos os bancos de dados, em termos de quantidade de amostras. O banco de dados primário, para o caso variável PC, apresenta apenas 27 informações, conforme já mostrado anteriormente.

O variograma cruzado foi calculado para realização da co-krigagem. Este método exige que o modelo de correlogramização entre as variáveis seja linear.

Para isso os variogramas devem atender essa exigência o que significa dizer que as direções e os alcances dos modelos variográfico de todas as variáveis empregadas devem os mesmos.

Utilizando o banco de dados de CZ para referência, foram obtidos novos variogramas das variáveis PC, CZ e cruzado para o cálculo de estimativas por co-krigagem.

Os variogramas cruzados não terão os ajustes adequados, pois, cada variável apresenta continuidade espacial própria apesar da grande correlação.

A seguir, nas figura 5.10 são apresentados os variogramas cruzados das direções principais de continuidade espacial.

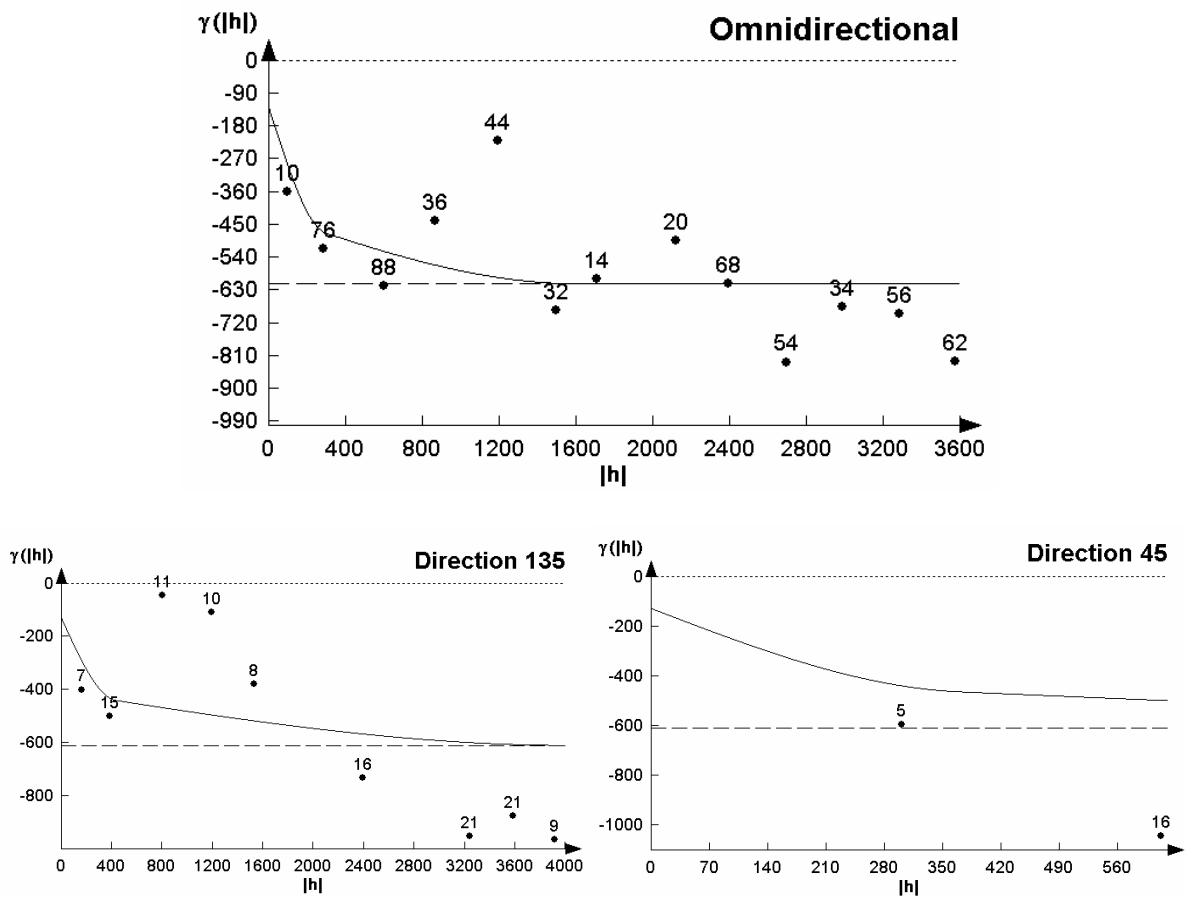


Figura 5.10 - Variograma cruzado entre PC e CZ, nas direções 135° e 45°, maior e menor direção respectivamente.

Nota-se que o variograma é invertido devido a correlação negativa entre as variáveis CZ e PC. A equação 5.5 resume os parâmetros do ajuste do variograma cruzado das variáveis PC e CZ. O que é importante observar também, é que a qualidade do modelo variográfico fica comprometida ao pequeno número de informações do banco de dados PC.

$$\gamma_{12}(h) = 130 + 280Sph\left(\frac{N_{135^\circ}}{432}, \frac{N_{45^\circ}}{370}\right) + 202Sph\left(\frac{N_{135^\circ}}{4032}, \frac{N_{45^\circ}}{2000}\right), \quad (5.5)$$

onde os termos dessa equação são descritos na equação 5.3.

A tabela 5.5 apresenta o resumo dos novos ajustes variográficos das variáveis PC e CZ e do variograma cruzado respeitando as exigências do modelo de co-regionalização da cokrigagem. Note que os alcances, direções e modelos são os mesmos nos variogramas diretos e cruzados.

Tabela 5.5 - Resumos dos ajustes variográficos, sendo os ângulos 135° (índice 1) e 45° (índice 2), maior e menor continuidade respectivamente. Modelo esférico com duas estruturas índices a e b referentes a primeira e segunda estrutura.

	C_0	C_{1a}	C_{1b}	a_{1a}	a_{2a}	a_{1b}	a_{2b}
CZ	4,10	8,7	6,4	432	370	4032	2000
PC	14140	30015	22010	432	370	4032	2000
PC x CZ	130	280	202	432	370	4032	2000

Para respeitar a correção linear, os modelos dos variogramas das variáveis empregadas e o cruzado devem ser proporcionais. e todos devem apresentar o mesmo alcance. Este novo ajuste variográfico pode ser inadequado, quando comparado com o variograma modelado exclusivamente para cada variável.

A figura 5.11 e 5.12 apresenta o comparativo entre os variogramas das variáveis CZ e PC ajustados singularmente com os variogramas das mesmas variáveis ajustadas para co-krigagem.

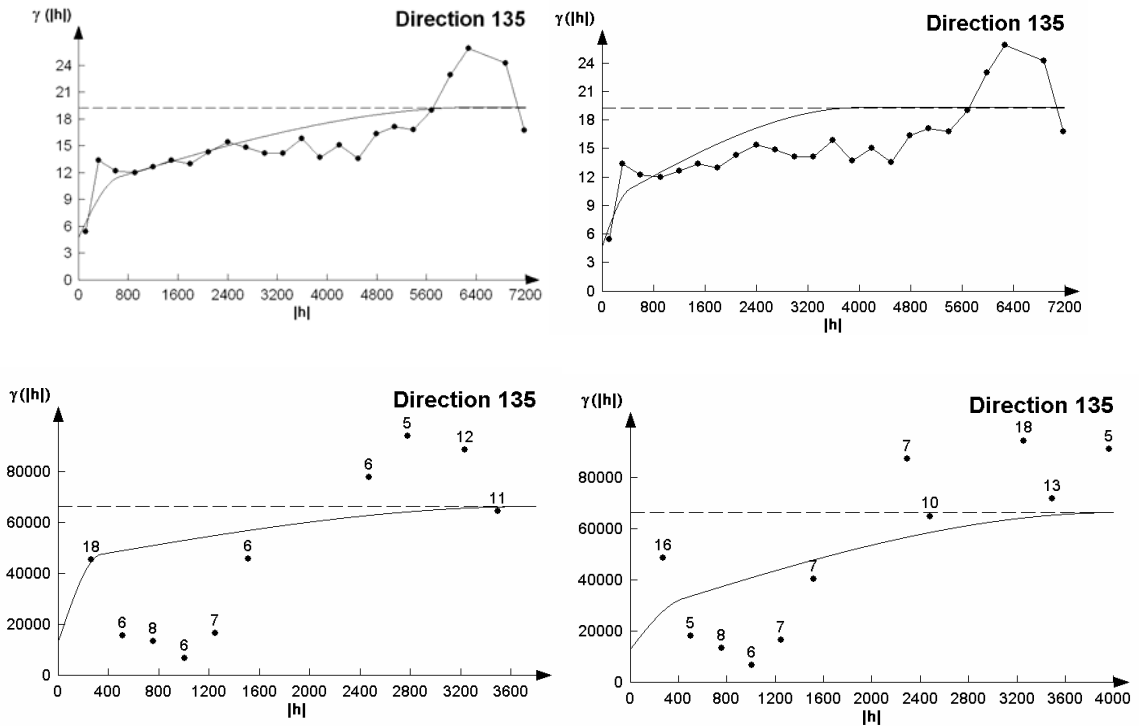


Figura 5.11 - Comparativo do ajuste variográfico para direção 135° para CZ e PC, par superior e inferior respectivamente. A esquerda o ajuste singular e a direita é o ajuste para co-krigagem.

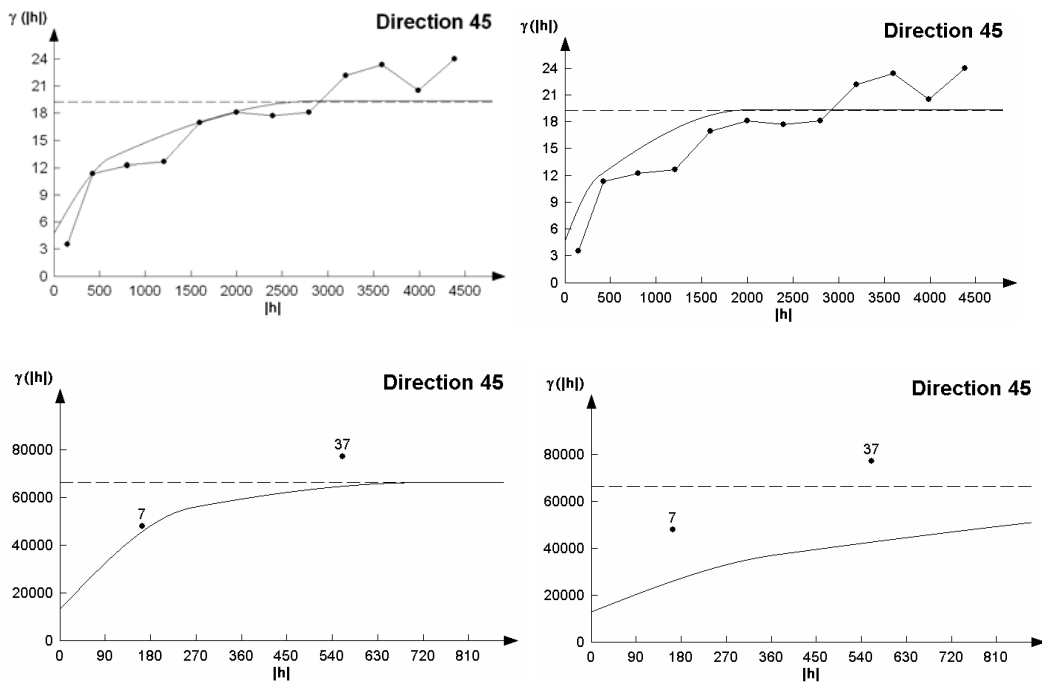


Figura 5.12 - Comparativo do ajuste variográfico para direção 45° para CZ e PC, par superior e inferior respectivamente. À esquerda o ajuste singular e a direita é o ajuste para co-krigagem.

Nota-se que os ajustes realizados para respeitar a correionalização linear é menos adequado quando comparado com o ajuste sem a preocupação de correionalização.

Esse é o maior problema da co-krigagem que tende a aumentar na medida que se emprega mais variáveis de apoio.

5.3 Krigagem ordinária (KO) das variáveis teor de cinza e poder calorífico

Para fins de comparação, entre os resultados obtidos ou para geração de informações secundárias exaustivamente amostradas, foi realizada a krigagem ordinária das variáveis estudadas.

Diferentemente da krigagem simples (MATHERON, 1963), a krigagem ordinária limita a domínio de estacionariedade em uma vizinhança local.

$$Z^*(u) = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}(u) Z(u_{\alpha}) + \left[1 - \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}(u) \right] m(u), \quad (5.6)$$

onde a média local desconhecida $m(u)$ é filtrada pelo fato que a soma dos pesos de krigagem ser igual 1. O estimador por krigagem ordinária ($Z_{OK}^*(u)$) é escrito por (GOOVAERTS, 1997):

$$Z_{OK}^*(u) = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}(u) Z(u_{\alpha}) \quad \text{com} \quad \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}^{OK}(u) = 1, \quad (5.7)$$

As estimativas por krigagem foram calculadas com o auxílio da rotina *kt3d.exe* (DEUTSCH e JOURNAL, 1998).

5.3.1 Krigagem ordinária do teor de cinza

Os parâmetros definidos para o cálculo da malha de estimativas por krigagem ordinária foram:

- parâmetros do variograma calculados e apresentados no item 5.2;
- malha de krigagem de 200 x 200 metros;
- empregada a discretização para estimativas de blocos;
- estimativa com o mínimo de quatro dados e máximo oito;
- máximo quatro dados na busca por quadrante.

Primeiramente, foi realizada a validação cruzada, procedimento que retira uma informação do banco de dados e estima um valor no mesmo ponto com as condições de busca e de continuidade inferida pelo variograma. A figura 5.10, mostra o histograma do erro das estimativas.

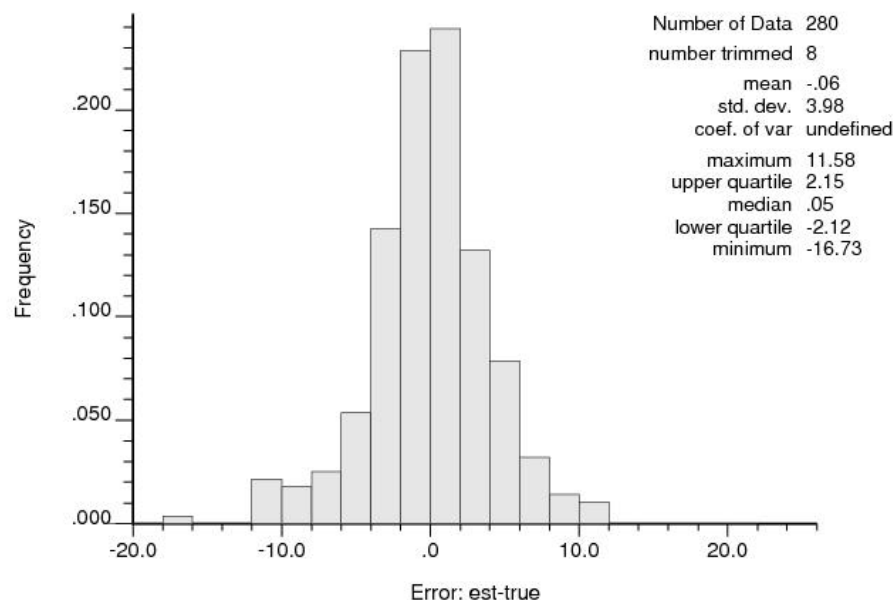


Figura 5.13 - Histograma do erro das estimativas por krigagem ordinária referente a variável CZ obtido pelos procedimentos de validação cruzada.

Analisando a média do erro das estimativas, no processo de validação cruzada, verificamos a não tendenciosidade das estimativas.

Após, foi gerado o mapa da malha de krigagem ordinária com os mesmos parâmetros de busca e do variograma empregados na validação cruzada (figura 5.14).

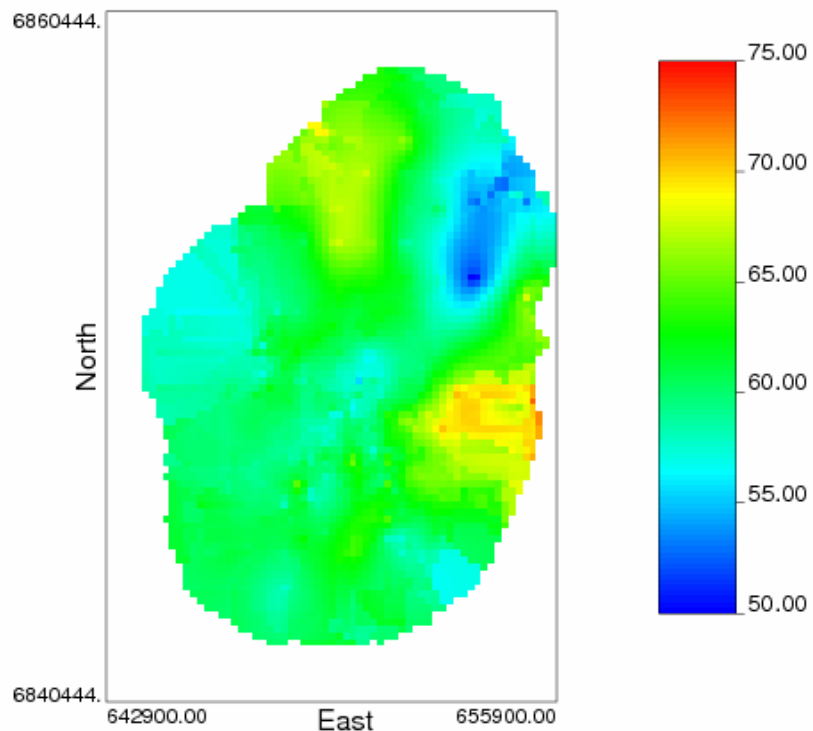


Figura 5.14 - Mapa da malha de krigagem da variável CZ.

O mapa da malha da variância de Krigagem revela as áreas que apresentaram maior variância (figura 5.15).

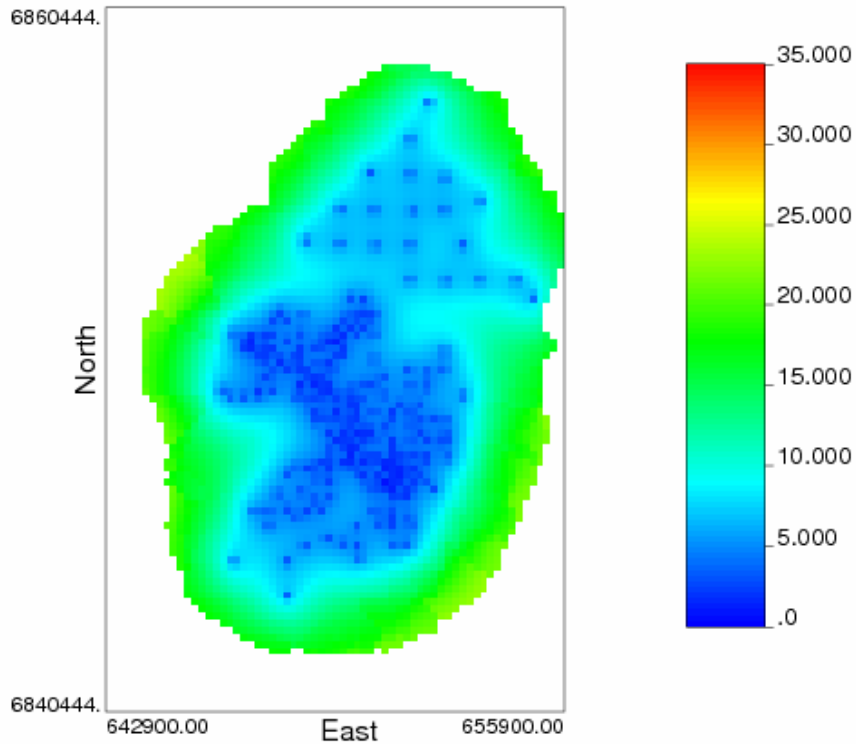


Figura 5.15 - Mapa da malha da variância de krigagem da variável CZ.

O histograma dos blocos estimados da variável CZ é apresentado na figura 5.16.

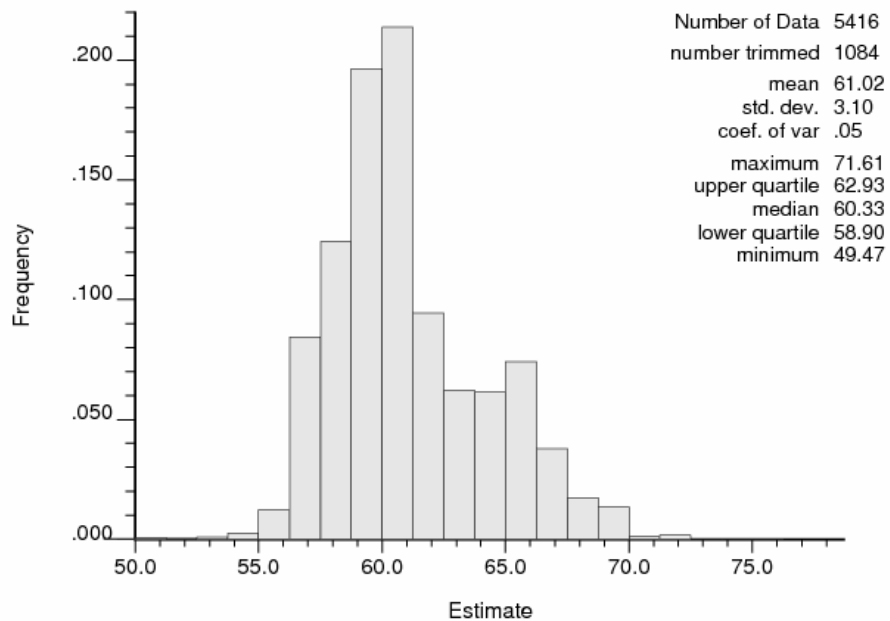


Figura 5.16 - Histograma dos blocos estimados por krigagem ordinária da variável CZ.

5.3.2 Krigagem ordinária do poder calorífico

Os parâmetros definidos para o cálculo da malha de estimativas foram:

- parâmetros do variograma calculados;
- malha de krigagem de 200 x 200 metros;
- empregada a discretização para krigagem de blocos;
- estimativa com o mínimo de dois dados e máximo oito;
- máximo dois dados na busca por quadrante.

A figura 5.17, mostra o histograma do erro das estimativas no procedimento de validação cruzada, a figura 5.18 apresenta o histograma das estimativas por krigagem ordinária do PC.

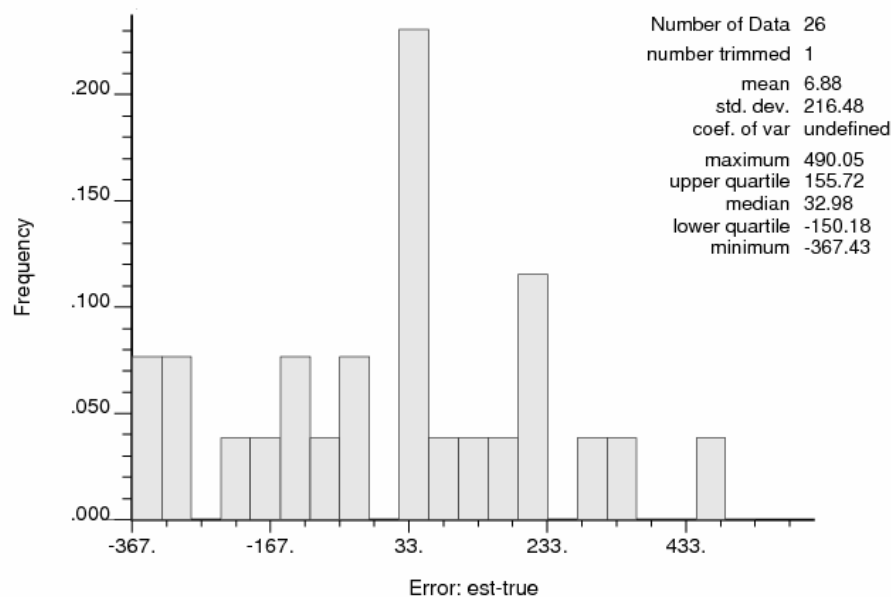


Figura 5.17 - Histograma do erro das estimativas por krigagem ordinária da variável PC, nos procedimentos de validação cruzada.

Com o histograma da figura 5.17 nota-se a média da validação cruzada obtida é relativamente próxima de zero, quando comparada com a grandeza da variável estudada e a pequena quantidade de informações disponíveis.

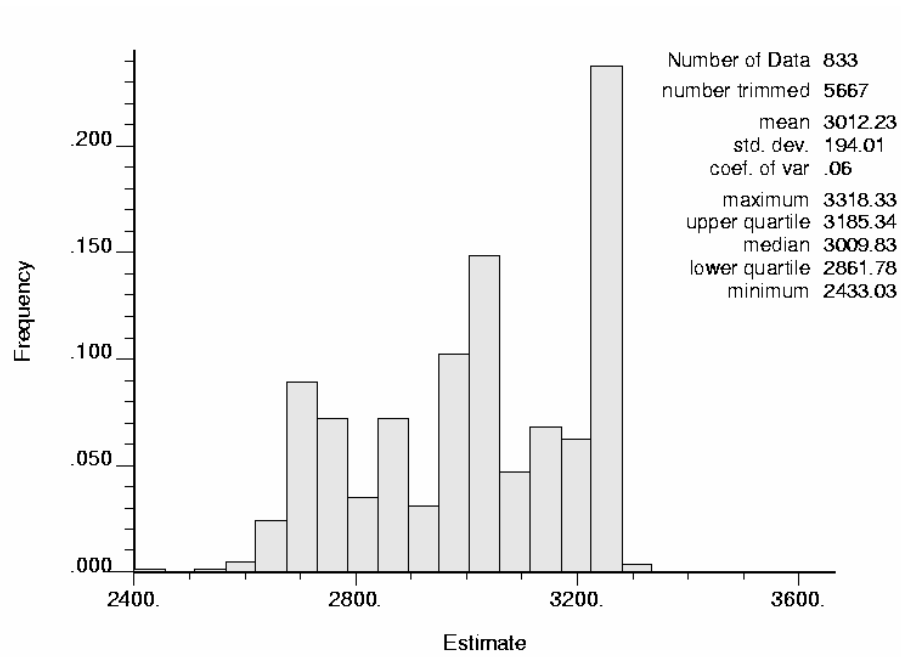


Figura 5.18 - Histograma das estimativas por krigagem ordinária referente a variável PC.

A partir do histograma da figura 5.18, nota-se que a média global estimada é próxima da média global dos dados originais desagrupados, e o desvio padrão menor, como é esperado de um estimador.

Foi gerado o mapa da malha de krigagem e de variância de krigagem conforme mostram as figuras 5.19 e 5.20.

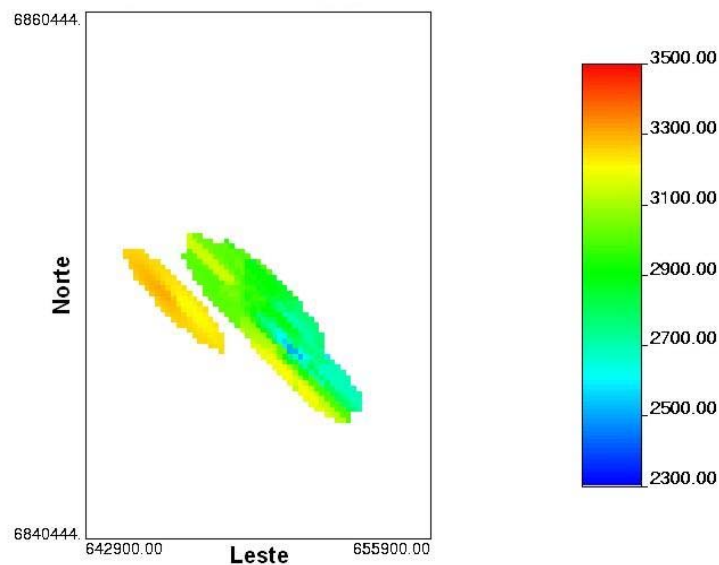


Figura 5.19 - Mapa da malha de krigagem ordinária da variável PC.

Com o intuito de verificação de áreas com maior variância, foi gerado o mapa de variância de krigagem para a variável PC (figura 5.20).

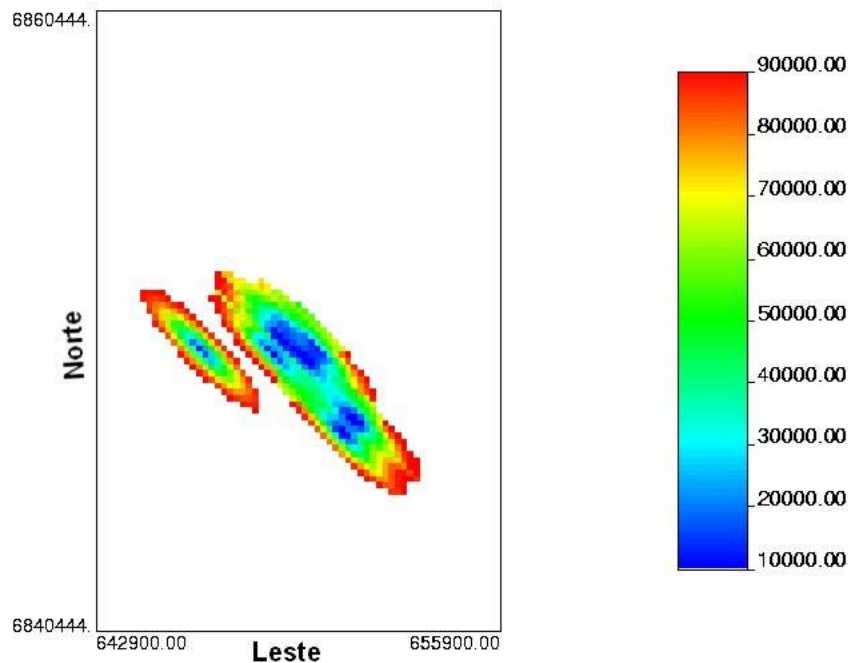


Figura 5.20 - Mapa da malha da variância de krigagem ordinária da variável PC.

Os mapas das figuras 5.19 e 5.20 serão utilizados para comparação entre as estimativas geradas por krigagem ordinária com estimativas geradas por metodologias geoestatísticas contemplando informações secundárias.

5.4 Estimativas contemplando informações secundárias

Nesse item, são apresentadas as estimativas obtidas por métodos geoestatísticos com incorporação de variáveis secundárias.

Foram aplicados os seguintes modelos de incorporação de informação secundária:

- Modelo de Markov 1;
- Modelo de Markov 2;

- Krigagem simples variando as médias locais;
- Co-krigagem ordinária.

Os três primeiros modelos, apresentados acima, exigem que a variável secundária seja colocada ao ponto onde realiza-se a estimativa da variável primária (restrições dos métodos).

A malha gerada por krigagem ordinária (item 5.3.1) da variável CZ foi empregada como informação secundária para todos os métodos de incorporação de informação secundária.

Os motivos para essa escolha dessas duas variáveis foram:

- relação no número de amostras entre as variáveis (tabela 5.2);
- melhor índice de correlação entre si (tabela 5.3);
- interesse em melhorar as estimativas da variável PC devido sua grande importância na avaliação na qualidade do carvão mineral para fins energéticos e a forte correlação com a variável CZ.

5.4.1 Estimativa do poder calorífico incorporando informações secundárias a partir do Modelo de Markov 1 (MM1).

O modelo MM1 foi aceito na prática, pois não necessita do sistema linear de co-regionalização. Conforme visto no capítulo anterior, a covariância cruzada $C_{12}(h)$ é aproximada pela covariância da variável primária.

Também já mencionado, utilizou-se a malha gerada por krigagem ordinária da variável CZ como informação secundária.

Foi utilizada a programa *Newcokb3d.exe* (DEUTSCH e JOURNEL, 1998) para o cálculo das estimativas. Convém citar, que essa rotina não apresenta a opção de validação cruzada. Mesmo que o conceito de validação cruzada tenha diversas aceitações em estimativas com informações secundárias, foi desenvolvido um

programa em linguagem Visual Basic, para executar o procedimento de validação cruzada.

A validação cruzada foi realizada retirando apenas os dados do banco de dados primário, mantendo a informação secundária colocada ao ponto retirado.

Os parâmetros para da rotina foram:

- informações do PC como variável primária, e a malha das estimativas por krigagem ordinária do CZ;
- parâmetros do variograma do CZ e PC;
- malha de estimativas de 200 x 200 metros;
- empregada a discretização para estimativa de blocos;
- estimativa com o mínimo de dois dados e máximo 8 da variável primária e máximo quatro da variável secundária.

O programa desenvolvido para realizar a validação cruzada deve ser utilizado com o arquivo de parâmetros (newcokb3d.par) já usado nos procedimentos normais empregados nas rotinas do GsLib (Geostatistical Software and Library - DEUTSCH e JOURNAL, 1998).

A informação do arquivo de parâmetros é dada conforme mostra a figura 5.21.

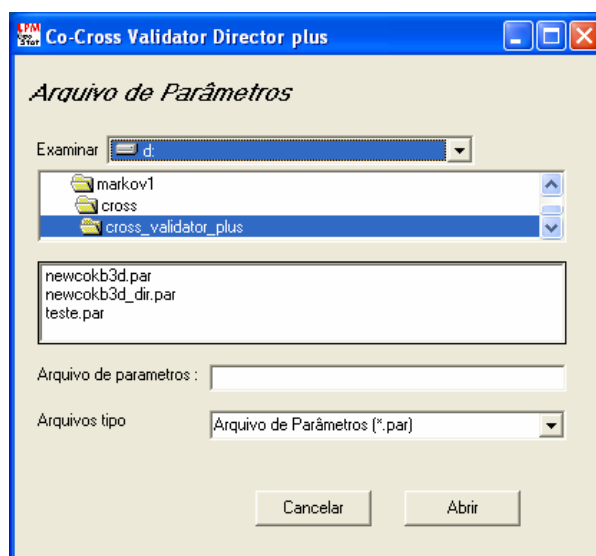


Figura 5.21 - Apresentação do programa desenvolvido para o cálculo da validação cruzada para estimativas contemplando informações secundárias.

As figuras 5.22 e 5.23, mostram os histogramas do erro das co-estimativas obtido pelo procedimento de validação cruzada e das estimativas por MM1.

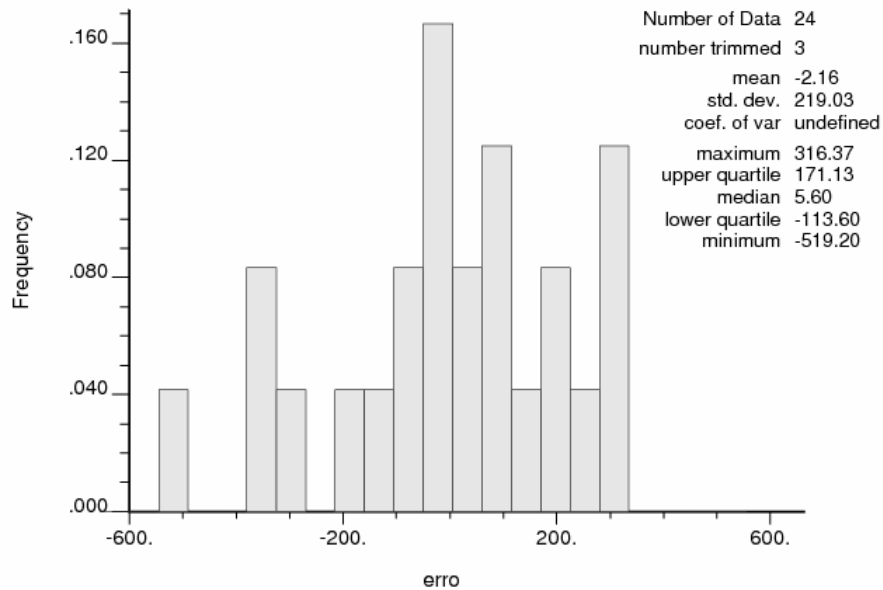


Figura 5.22 - Histograma dos erro da co-estimativas por MM1 da variável PC (validação cruzada).

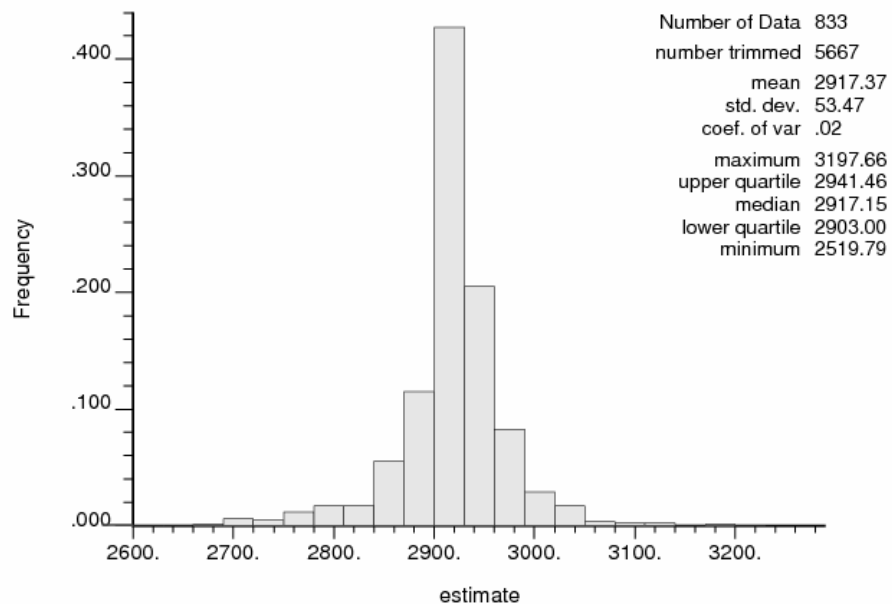


Figura 5.23 - Histograma das co-estimativas por MM1 da variável PC.

Comparando a média do erro das estimativas por krigagem ordinária com a média do erro das co-estimativas MM1, nota-se que houve uma grande melhoria nas

co-estimativas, pois a média do erro, em MM1, foi muito menor, quando comparada com a média do erro das estimativas por KO.

O mapa da malha de co-estimativa MM1 e o mapa da variância da co-estimativa são apresentados na figura 5.24 e 5.25 respectivamente.

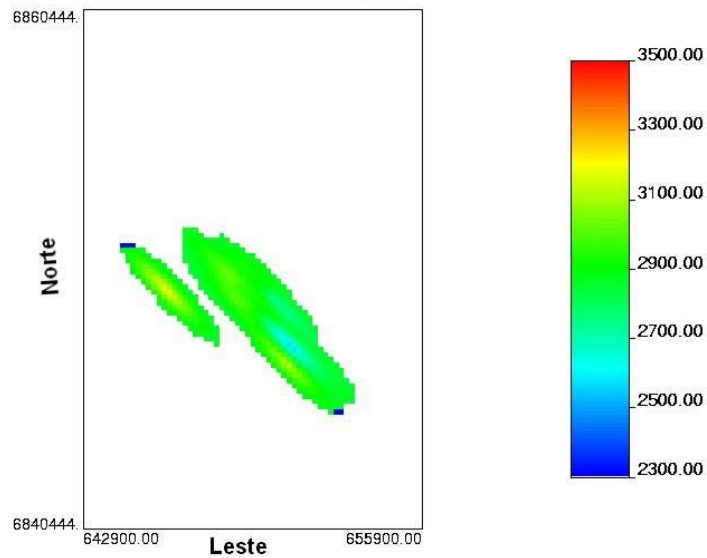


Figura 5.24 - Mapa da malha de co-estimativa por MM1 da variável.

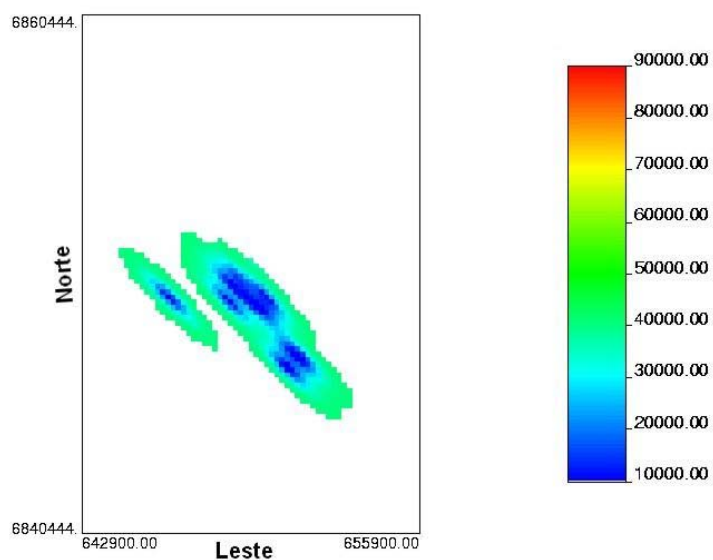


Figura 5.25 - Mapa da variância de co-estimativa por MM1 da variável PC.

Nota-se, que não há diferença de área na estimada por KO e MM1. Isso ocorreu uma vez que os parâmetros de busca e de estimativa referente a variável PC são as mesmas nos dois métodos.

A área estimada pode ser ampliada se modificado os parâmetros de co-estimativa, ou seja, reduzindo o nível de exigência de número mínimo de dados no entorno do ponto (ou bloco) a ser estimado.

5.4.2 Estimativa do poder calorífico incorporando informações secundárias a partir do Modelo de Markov 2 (MM2).

O modelo MM2 foi desenvolvido para os casos que a variável secundária for muito mais abundante que a variável primária. O MM2 condiciona a variável primária a ser estimada somente com o dado secundário co-locado (JOURNEL, 1999).

Foi utilizada a rotina *Newcokb3d.exe* (DEUTSCH e JOURNEL, 1998) para o cálculo das estimativas por MM2.

A validação cruzada foi realizada com o mesmo programa citado no item 5.4.1 retirando apenas os dados do banco de dados primário, mantendo a informação secundária co-locada ao ponto retirado.

Os parâmetros para da rotina foram:

- informações do PC como variável primária, e a malha das estimativas por krigagem ordinária do CZ;
- parâmetros do variograma do CZ e PC;
- malha de estimativas de 200 x 200 metros;
- empregada a discretização para estimativa de blocos;
- estimativa com o mínimo de dois dados e máximo 8 da variável primária e máximo quatro da variável secundária.

A figura 5.26 apresenta o histograma do erro das co-estimativas por validação cruzada.

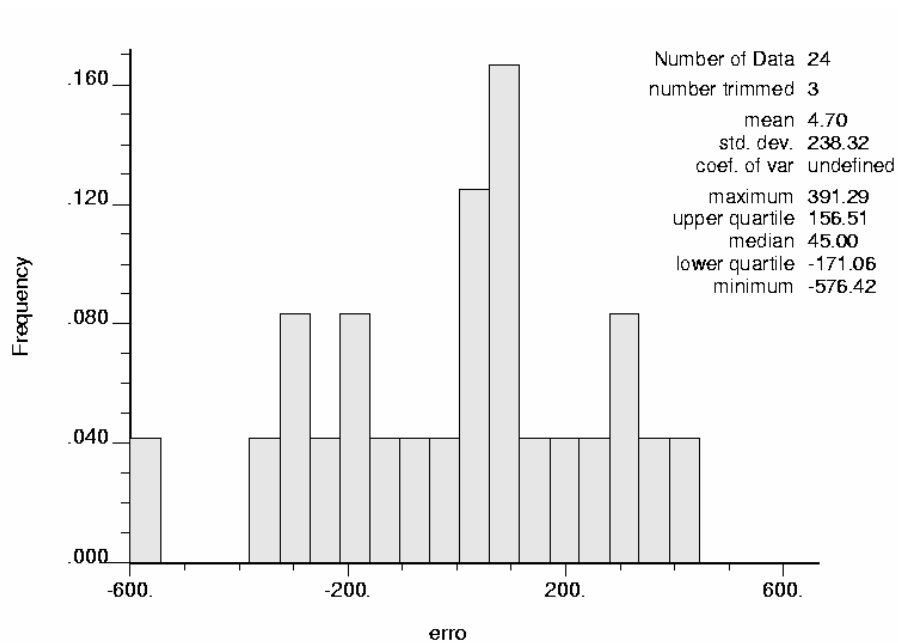


Figura 5.26 - Histograma do erro das co-estimativas por MM2 da variável PC.

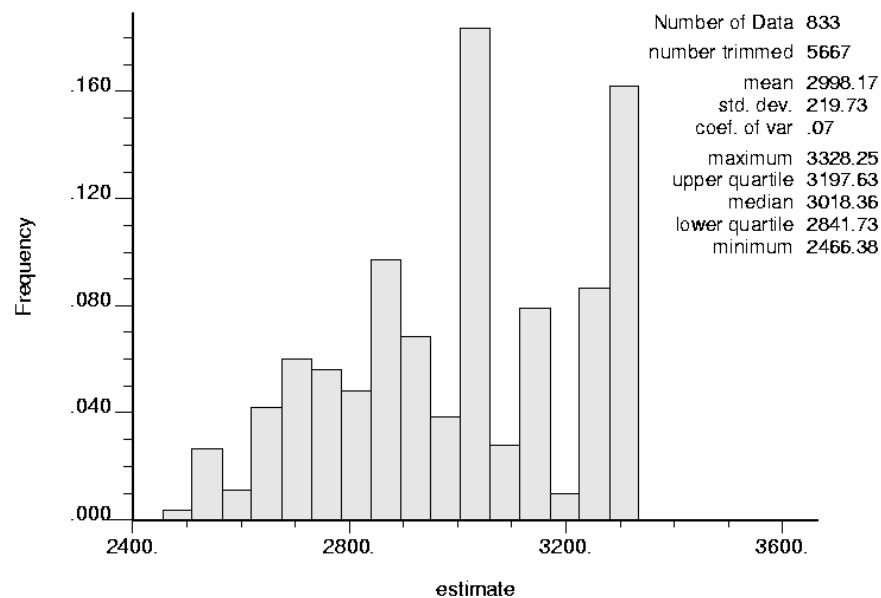


Figura 5.27 - Histograma das co-estimativas por MM2 da variável PC.

Comparando a média do erro das estimativas por krigagem ordinária (figura 5.17) com a média do erro das co-estimativas MM1 (figura 5.22) e MM2 (figura 5.26), nota-se que houve uma redução do erro em MM2. Quanto aos resultados das

co-estimativas (figura 5.27) a média global obtida foi bem próxima da global original desagrupada, com o desvio padrão bem próximo do original.

A seguir nas figuras 5.28 e 5.29, são apresentados os mapas da malha de co-estimativa e de variância de co-estimativa, obtidos pelo modelo MM2.

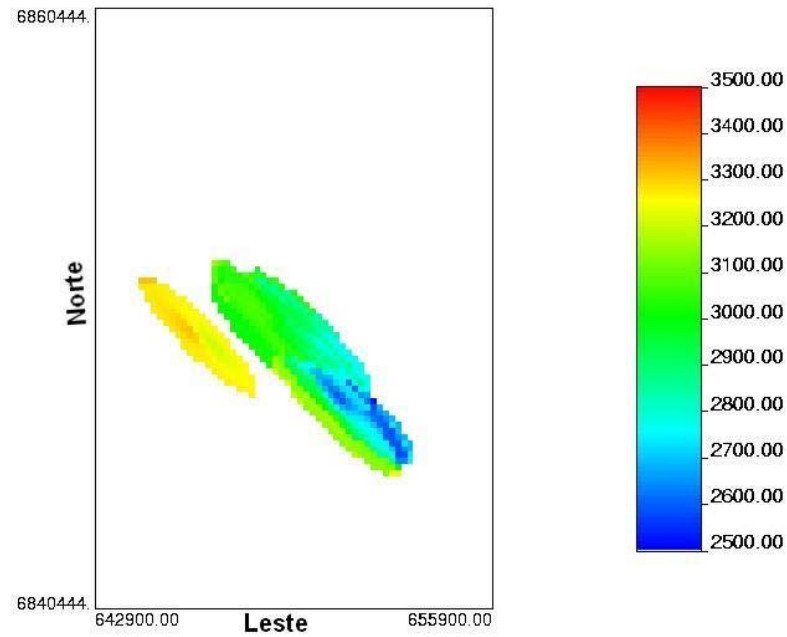


Figura 5.28 - Mapa da malha de co-estimativa por MM2 da variável PC.

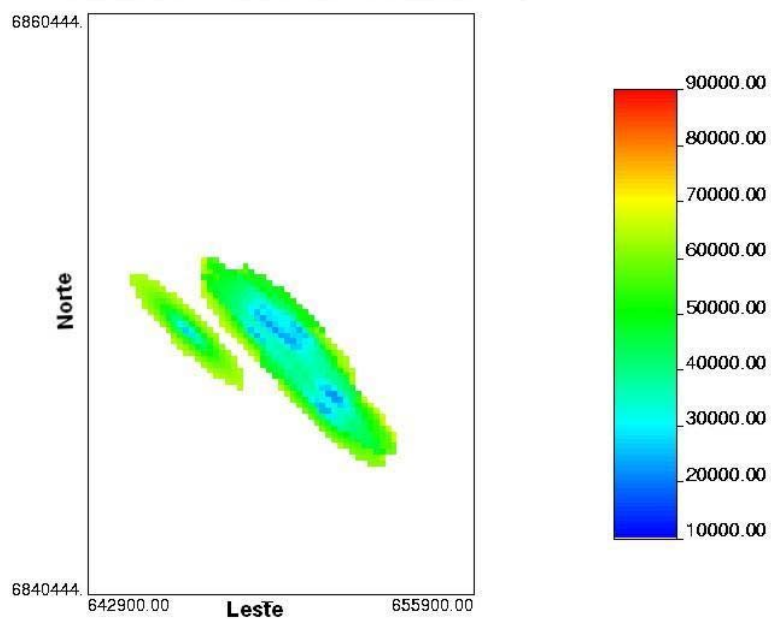


Figura 5.29 - Mapa da variância de co-estimativa por MM2 da variável PC.

5.4.3 Estimativa do poder calorífico incorporando informações secundárias a partir do método de krigagem simples variando as médias locais (KSVML).

Conforme visto anteriormente, este método substitui a média global aplicada ao sistema de krigagem simples por uma média local obtida por meio da variável secundária.

Com a equação de correlação entre as variáveis PC e CZ obtida (equação 5.2.4), o valor de PC pode ser obtido em todos os pontos onde os dados de CZ estão amostrados.

Em pontos onde existem amostras de CZ e PC pode ser calculado o resíduo do PC real com o PC obtido pela regressão com o CZ. A figura 5.30 ilustra a obtenção do resíduo. Com isso, o PC pode ser obtido em todos os pontos em que existam amostras de CZ.

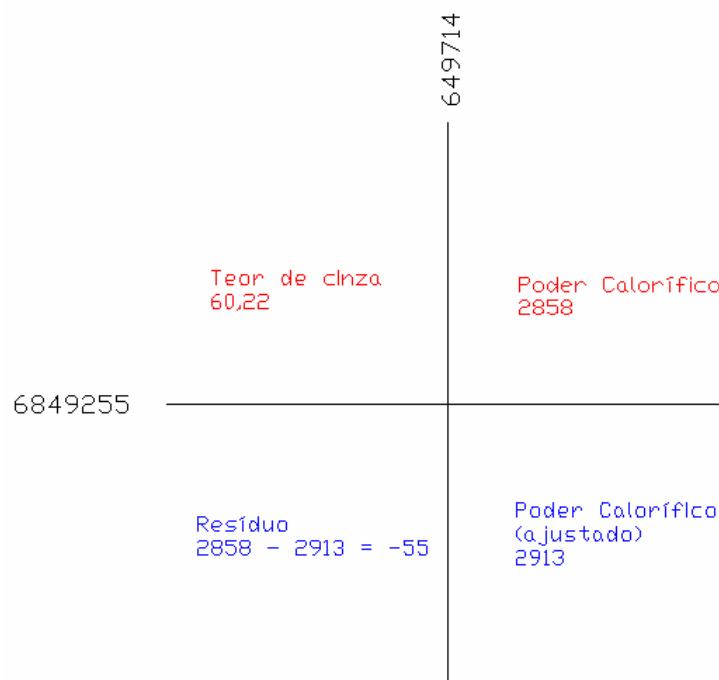


Figura 5.30 - Ilustração do cálculo do resíduo no ponto do centro do grid onde existem as informações teor de cinza e PC medido (vermelho). Em azul são os valores calculados para o PC pela regressão e para o resíduo.

Determinando a continuidade espacial do resíduo e do PC obtido pela CZ (PCcz), é possível calcular o PC somando as malhas das estimativas por krigagem

simples do resíduo com o PCcz. A partir dos modelos variográficos do resíduo e do PCcz foram gerados os mapas de tendência desses dois parâmetros. A soma dessas duas tendências forma o mapa do poder calorífico (figura 5.31).

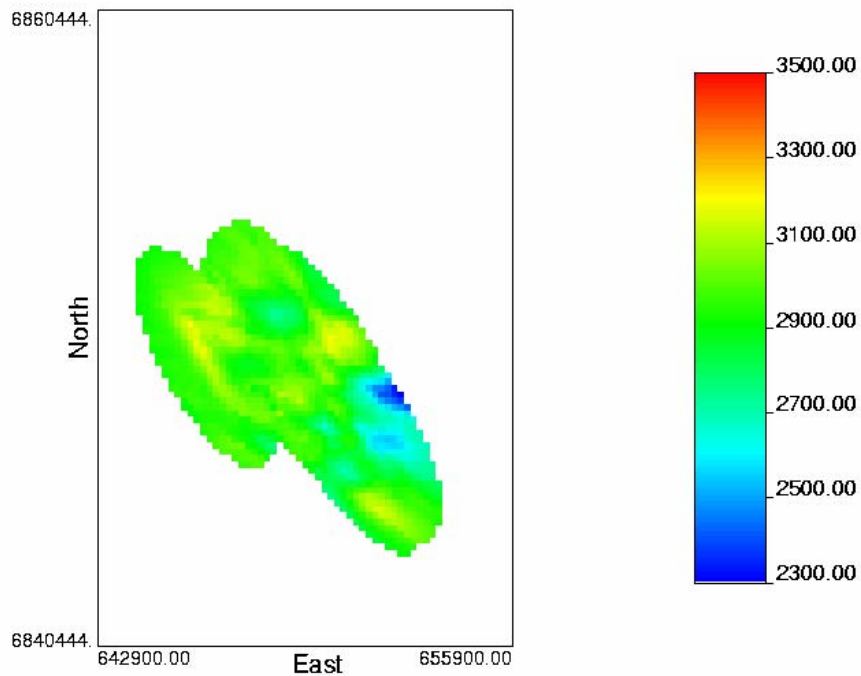


Figura 5.31 - Mapa da malha das estimativas do PC por KSVML.

A área das estimativas pôde ser ampliada devido a menor exigência nos parâmetros de busca para o cálculo das estimativas.

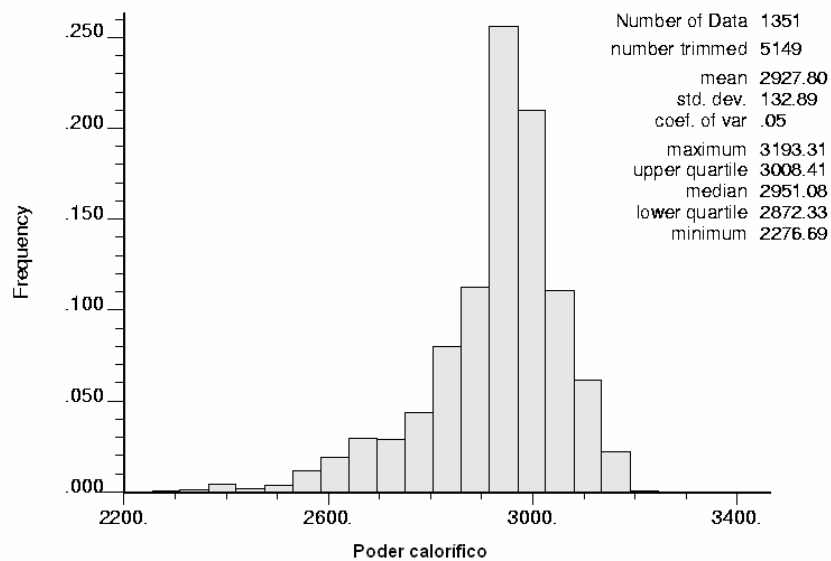


Figura 5.32 - Histograma das estimativas por KSVML.

A média global obtida por KSVML foi próxima da média global dos dados originais.

5.4.4 Estimativa do poder calorífico incorporando informações secundárias a partir do método de cokrigagem.

A cokrigagem é uma extensão da krigagem em casos de múltiplas variáveis. As mesmas características aplicadas para a krigagem podem ser associadas para a cokrigagem.

- Cokrigagem simples: considera a média global estacionária para toda a área.
- Cokrigagem ordinária: limita a domínio de estacionariedade em uma vizinhança local.

Neste trabalho, foi empregada a cokrigagem ordinária. Para isto foi utilizada a rotina cokb3d.exe (DEUTSCH e JOURNAL, 1998), onde os principais parâmetros para executar essa rotina foram:

- informações do PC como variável primária, e a malha das estimativas por krigagem ordinária do CZ;
- parâmetros do variograma da CZ, do PC e cruzado;
- malha de estimativas de 200 x 200 metros;
- empregada a discretização para estimativa de blocos;
- estimativa com o mínimo de dois dados e máximo oito da variável primária e máximo quatro da variável secundária.

A seguir são apresentados os resultados obtidos referente às estimativas por cokrigagem. A figura 5.33 e 5.34 apresentam o histograma do erro no procedimento de validação cruzada e o histograma das estimativas.

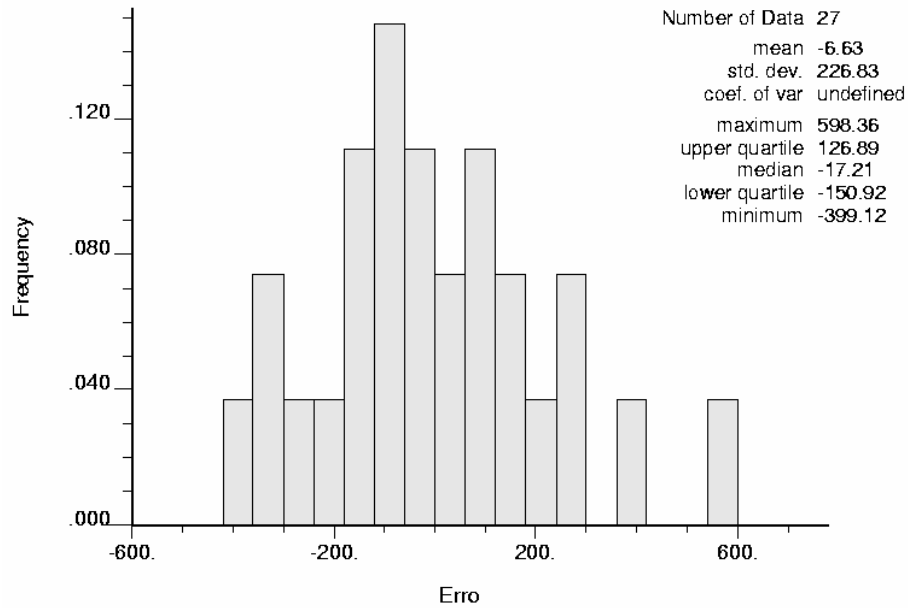


Figura 5.33 - Histograma do erro das co-estimativas por cokrigagem, obtido pelo processo de validação cruzada.

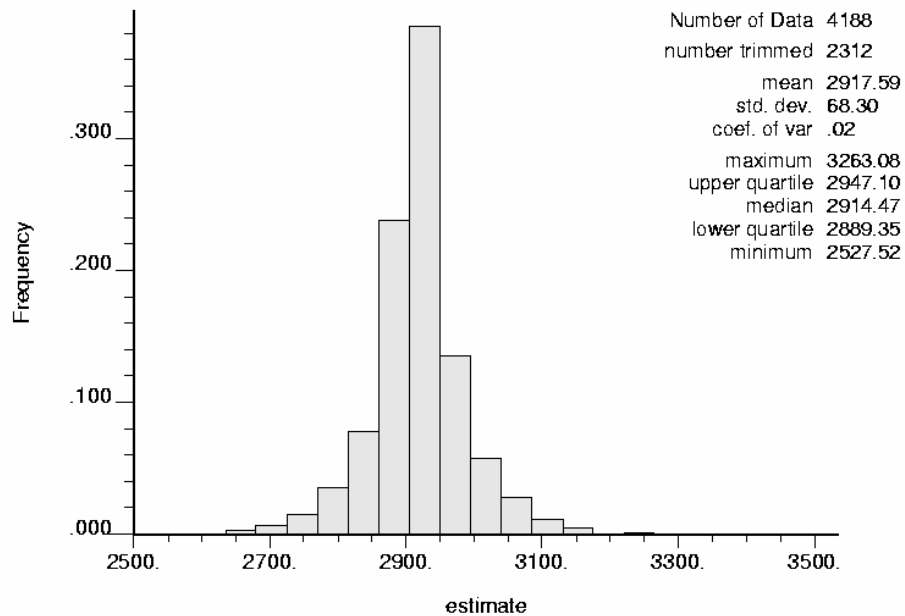


Figura 5.34 - Histograma das co-estimativas por cokrigagem da variável PC.

As figuras 5.35 e 5.36 apresentam os mapas das estimativas e da variância das estimativas por co-krigagem respectivamente.

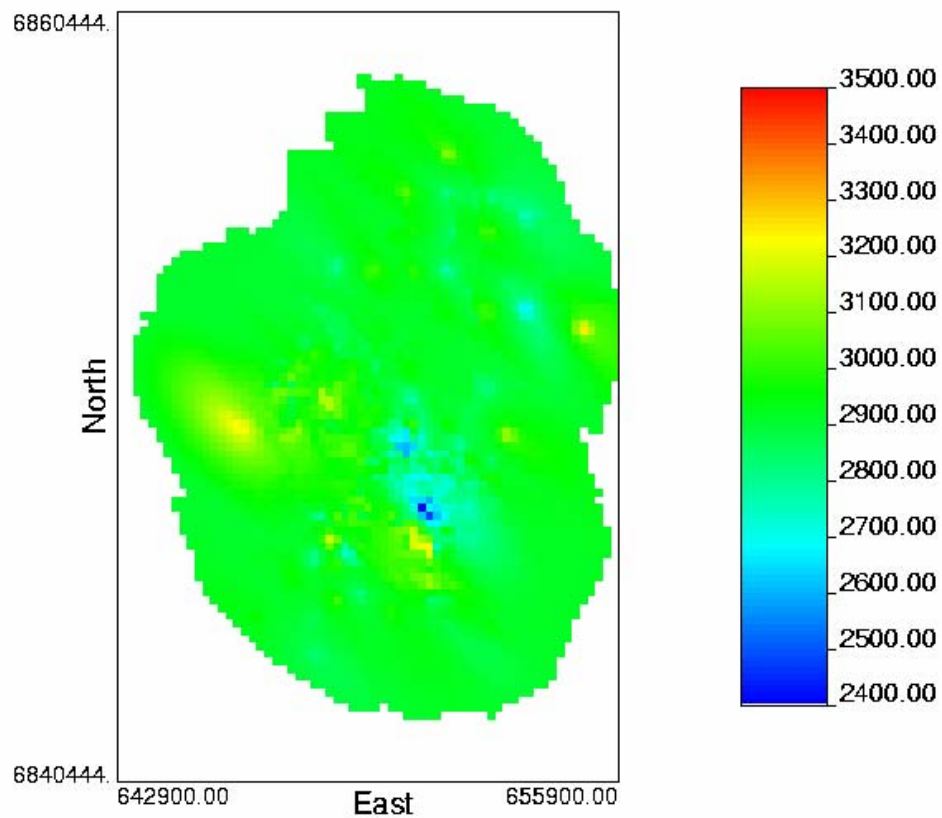


Figura 5.35 - Mapa da malha de estimativa por cokrigagem da variável PC.

As estimativas geradas por cokrigagem abrangem uma área muito maior, quando comparado com os demais métodos. Isso se deve pelo fato do método de cokrigagem pode estimar somente pela contribuição dos dados secundários, porém, isso infere que o somatório dos pesos incida somente nessa variável.

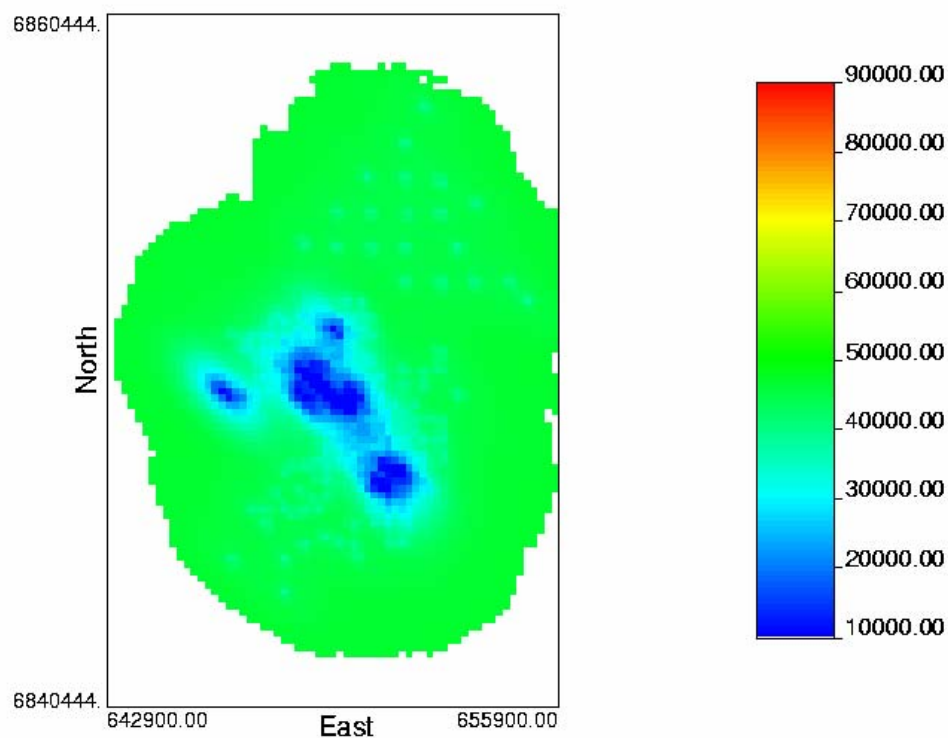


Figura 5.36 - Mapa da variância de estimativa por cokrigagem da variável PC.

5.5 Comentário e discussão dos resultados

O método empregado para comparação e avaliação dos resultados foi à análise dos mapas de variância das estimativas. Como não foi possível realizar nenhum tipo de reconciliação, foi analisado se a distribuição dos blocos estimados é semelhante à distribuição apresentada pelas amostras.

Inicialmente, serão apresentados na figura 5.37 os mapas de variância de estimativa entre os métodos apresentados, exceto o método de KSVML.

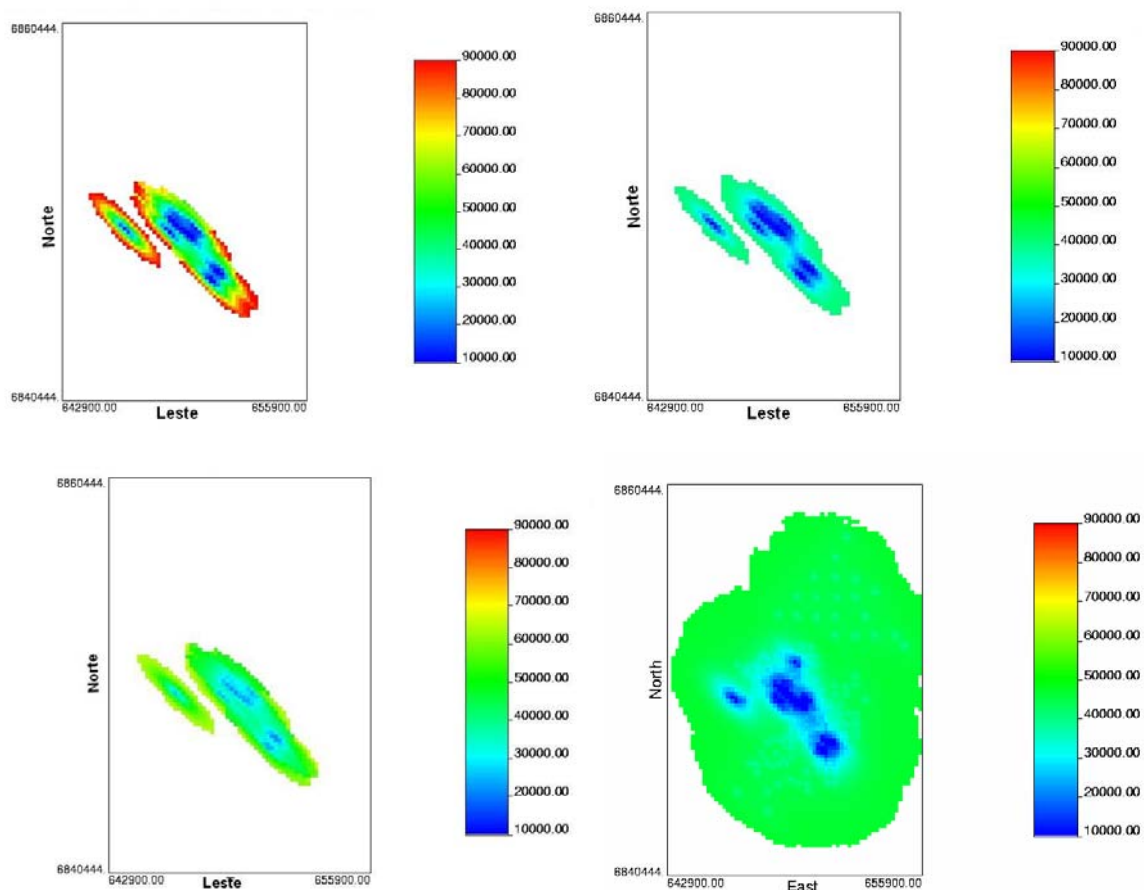


Figura 5.37 - Comparativo das variâncias das estimativas dos métodos KO, MM1, MM2 e CKO da variável poder calorífico.

Analisando os mapas da figura 5.37, observa-se que a variância das co-estimativas apresentaram valores médios inferiores ao comparar com a variância obtida, principalmente, por KO.

A próxima análise a ser realizada é a comparação da distribuição das estimativas no entorno dos dados. A figuras 5.38, 5.39, 5.40, 5.41 e 5.42 apresentam esse comparativo.

Estimativa por krigagem Ordinária com dados de poder calorífico

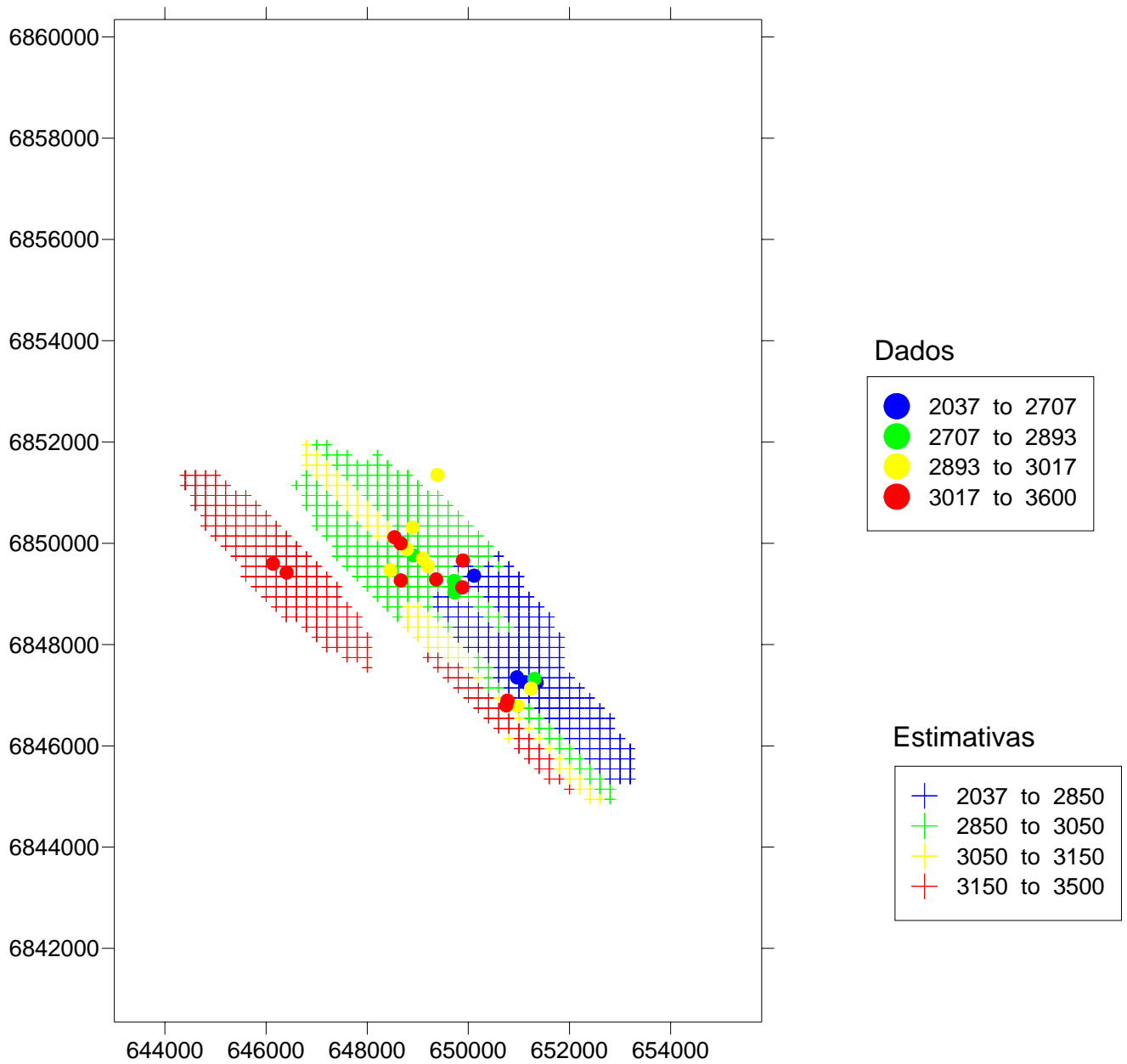


Figura 5.38 - Sobreposição entre as estimativas por krigagem ordinária com os dados originais.

Co-estimativas por MM1 com dados de poder calorífico

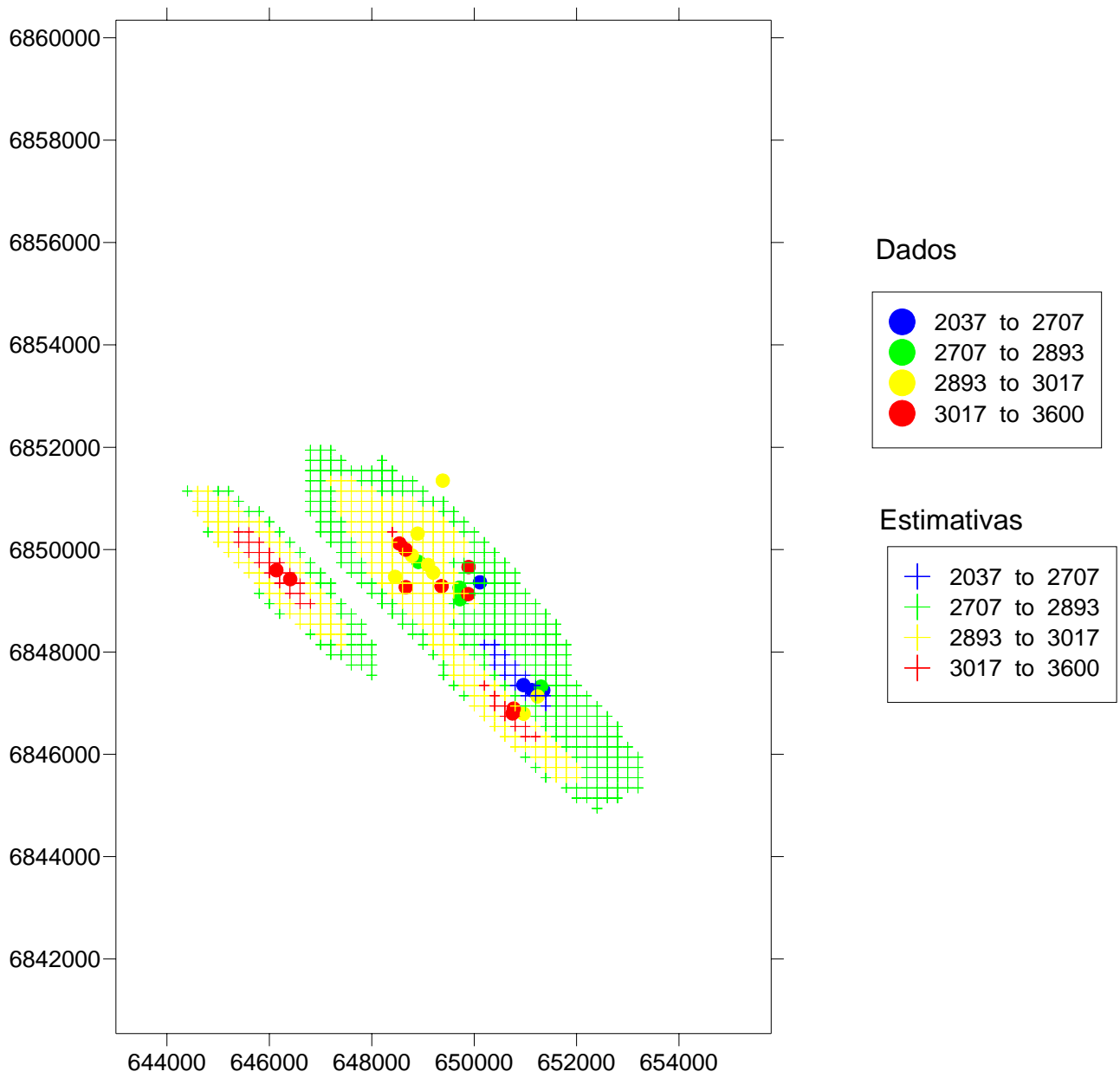


Figura 5.39 - Sobreposição entre as estimativas por co-krigagem colocada (MM1) com os dados originais.

Co-estimativas por MM2 com dados de poder calorífico

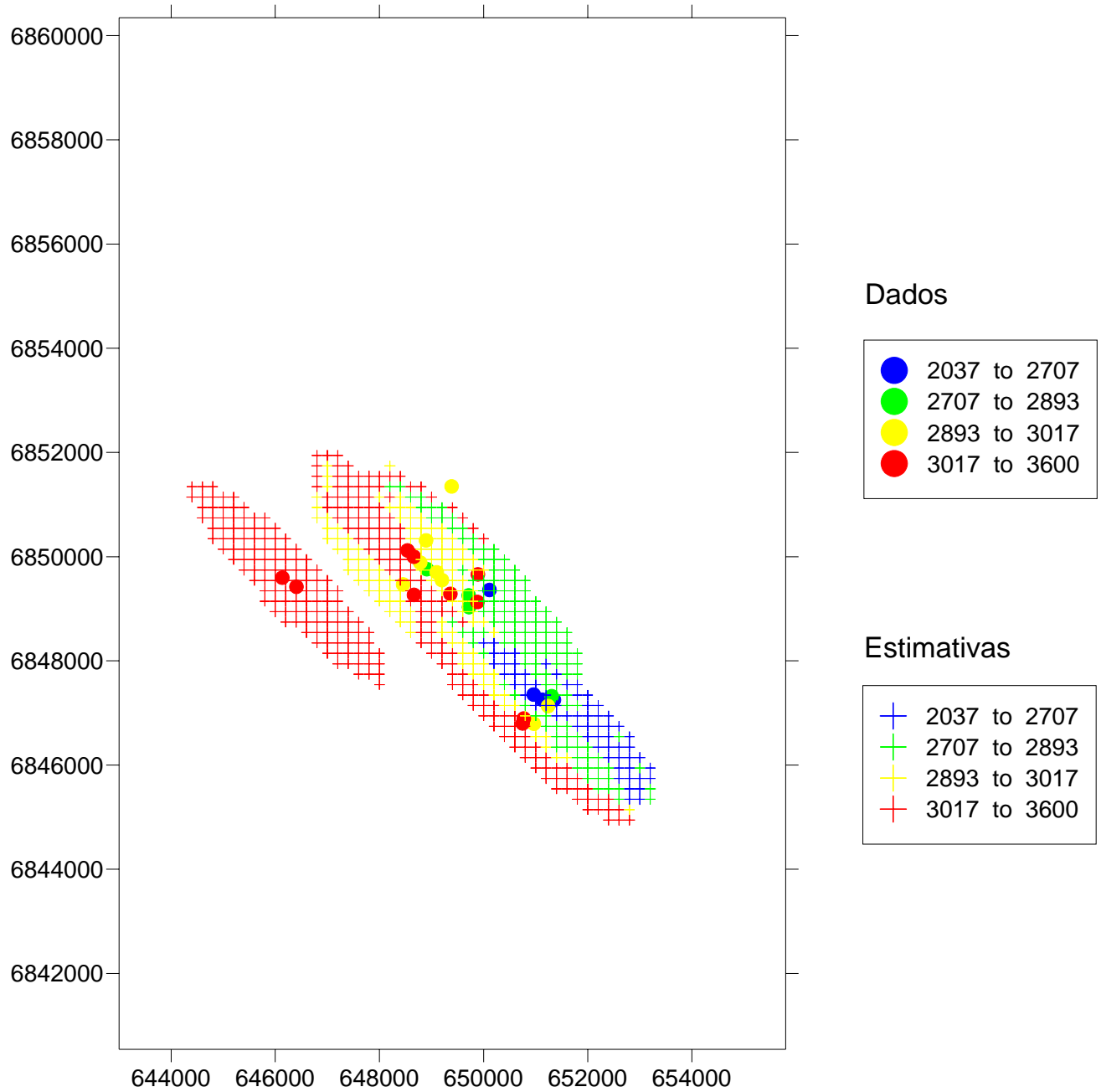


Figura 5.40 - Sobreposição entre as estimativas por co-krigagem colocada (MM2) com os dados originais.

Estimativa por cokrigagem com dados de poder calorífico

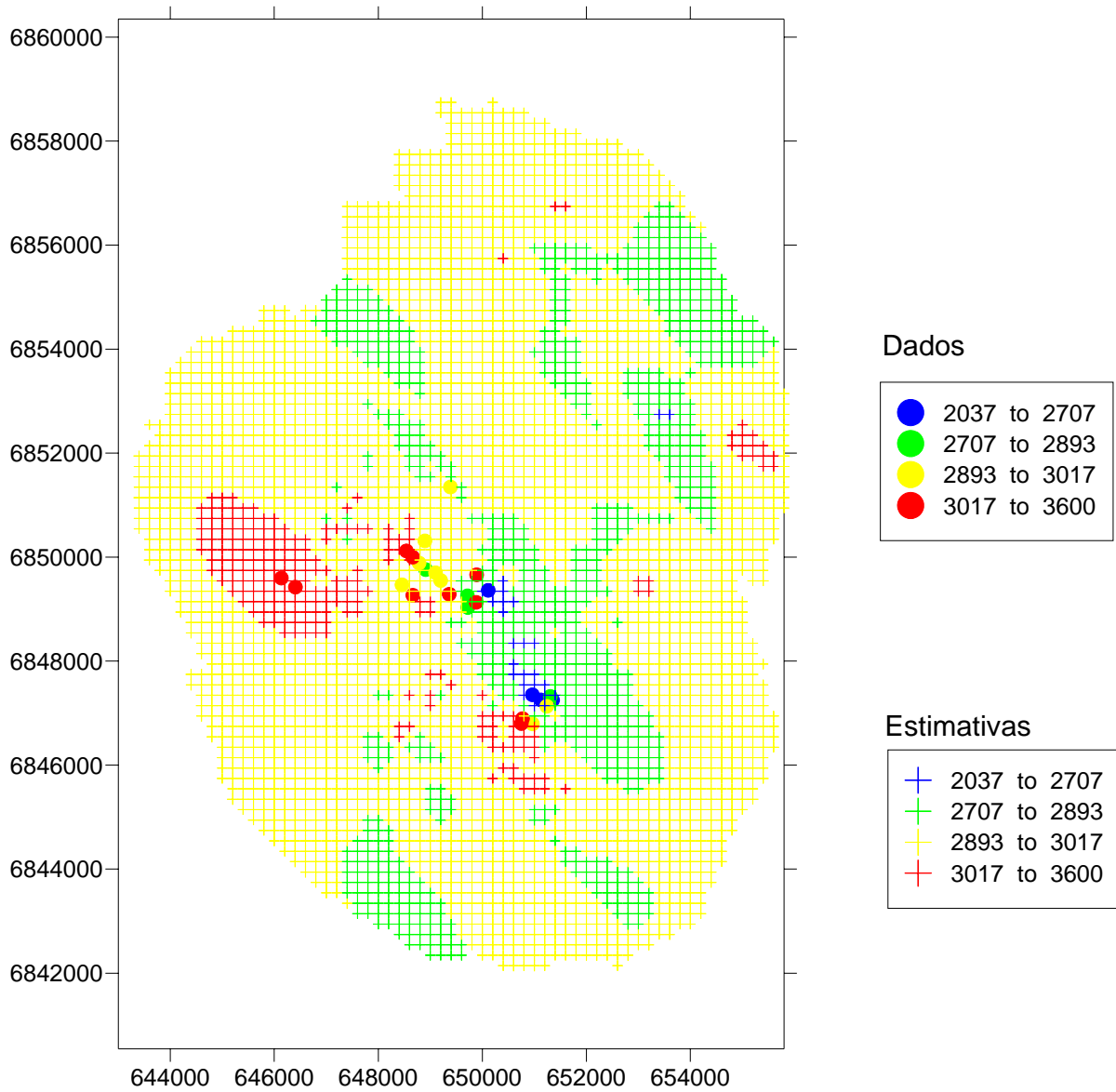


Figura 5.41 - Sobreposição entre as estimativas por co-krigagem com os dados originais.

Estimativa por Krigagem Simples Variando Médias Locais

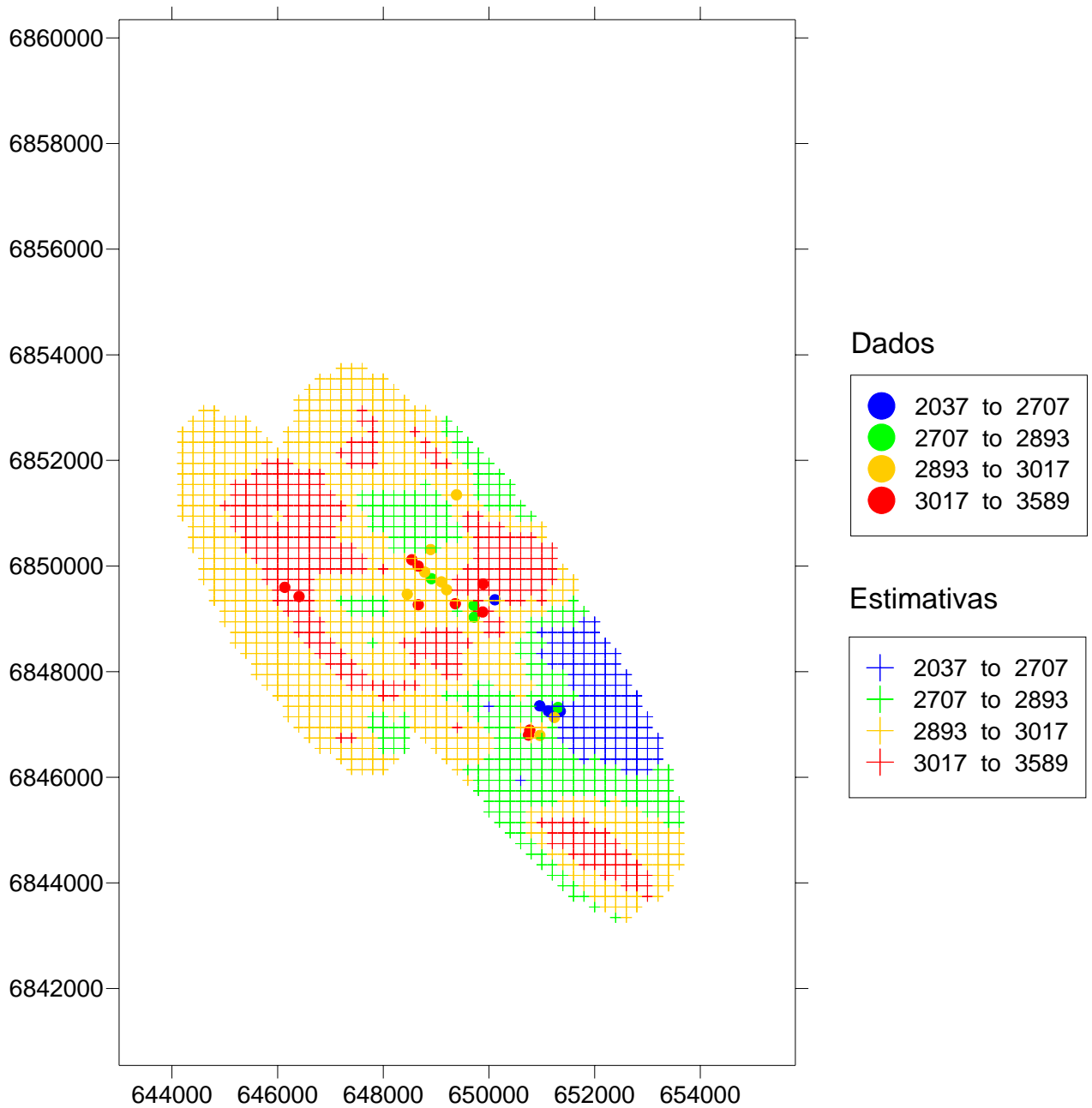


Figura 5.42 - Sobreposição entre as estimativas por krigagem simples variando médias locais com os dados originais.

A tabela 5.6 apresenta uma comparação entre os métodos empregados para as estimativas da variável PC.

Tabela 5.6 - Resumo dos parâmetros estatísticos (variável poder calorífico).

	Original*	Estimativas (KO)	Co-estimativas (MM1)	Co-estimativas (MM2)	Co-estimativas (VML)	Co-estimativas (CKO)
Média do erro das (co)estimativas (validação cruzada)	-	6,88	-2,16	4,70	-	-6,63
Média global	2926	3012	2917	2998	2928	2918
Desvio padrão	192,8	194	53,47	219	133	68,3
Máximo	3295	3318	3198	3328	3193	3263
Mínimo	2309	2433	2520	2466	2277	2527

*- dados originais desagrupados.

A partir dos resultados obtidos, podem ser tomadas algumas considerações a respeito do uso de informações secundárias. Nota-se, que independente do método empregado, houve uma aproximação das estimativas com os dados originais e uma considerável melhoria quando comparada a krigagem sem o emprego de uma variável de apoio.

É importante comentar que cada caso exige um método particular, dependendo de alguns fatores como: o número de variáveis a serem empregadas, a quantidade de dados disponível em cada banco de dados, o grau de correlação entre as variáveis, a dispersão das amostras, entre outros.

Para o caso estudado, a pequena quantidade de amostras referente ao banco de dados do PC dificultou o modelo variográfico desta variável e o cruzado. Conseqüentemente, os métodos que empregam o ajuste do PC (MM1) ou cruzado (cokrigagem) podem não ser os mais adequados. Outra observação que pode ser feita, para o caso de CKO, é que a área extrapolada para variável primária foi obtida somente a partir dos dados secundários, então, essa extrapolação pode não ser uma vantagem, apesar da baixa variância de estimativas. Além disso, a correlação obtida, corresponde a uma vizinhança local, o que não significa que pode ser estendida globalmente. Esse problema poderia ser resolvido com poucas amostras da variável primária localizadas nas regiões de sua plena ausência, uma pequena campanha de amostragem (em termos de quantidade de amostras)

adequadamente planejada, pode levar a uma maior confiança nas estimativas obtidas na área extrapolada.

Em função disso, o modelo MM2 seria o mais adequado para o caso estudado, pois já que o banco de dados secundário é mais amplamente amostrado que o banco de dados primário e apresenta alta correlação com a variável primária. Com isso, o modelo do variograma cruzado $\gamma_{12}(h)$ aproximado pelo variograma secundário $\gamma_2(h)$, melhor modelado, seria o mais indicado, mesmo que não seja o atributo de interesse.

A correionalização inferida por MM1, onde o variograma $\gamma_{12}(h)$ é aproximado pelo $\gamma_1(h)$, modelado por um banco pouco amostrado, mostrou-se o mais aconselhado para o caso apresentado. Os resultados obtidos mostram que a variância das estimativas de MM1 foram as menores apresentadas e ainda a figura 5.39 mostra que os blocos estimados, por esse modelo, são os que mais honram dados originais.

O método de KSVML é um método bastante indicado para os casos de poucos dados primários, desde que o resíduo da regressão entre as variáveis empregadas seja baixo. A facilidade de aplicação desse método o torna muito atrativo. Porém, sua simplicidade pode prover um descrédito para esse método, principalmente se a correlação entre as variáveis não for extremamente alta. A extrapolação da área estimada pode ser obtida pela redução das exigências para as estimativas do resíduo.

Contudo, os resultados mostraram que o MM2 foi o menos adequado, dentre os métodos de co-estimativas aplicados, para o banco de dados disponível. Isto mostra que nem sempre uma variável secundária, abundantemente amostrada e com grande correlação, pode representar o adequadamente comportamento espacial de outra variável.

Para o caso da cokrigagem, o ajuste dos variogramas (diretos e cruzados) para respeitar o modelo linear de correionalização forçou uma melhor aproximação para o comportamento espacial da variável de interesse. Por isso, as estimativas geradas por esse método foram boas, tendo como base o mapa das variâncias das estimativas (figura 5.36), e o mapa com a sobreposição dos blocos estimados com os dados originais (figura 5.41) que evidencia a boa aproximação entre as estimativas com os dados.

As estimativas geradas por MM1, também, se apresentaram satisfatórias quando analisados os mapas de variâncias de estimativa e a sobreposição com os dados originais (figuras 5.25 e 5.39 respectivamente). A facilidade de operacionalização e os resultados obtidos tornam esse método o mais indicado entre os apresentados para o caso estudado. A tabela 5.6, também retrata as mesmas conclusões, onde o MM1 apresentou a menor média do erro, e a média global das estimativas ficou muito próxima da média global dos dados originais e com o desvio padrão consideravelmente inferior.

Capítulo 6

Conclusões e recomendações

Neste capítulo, são apresentadas algumas considerações sobre os trabalhos realizados referentes a esta dissertação e serão feitos comentários relevantes para a avaliação do trabalho.

6.1 - Considerações finais

Foi mostrado que os métodos indiretos de amostragem podem ser eficazes quando os fenômenos físicos envolvidos e as particularidades do equipamento utilizado sejam conhecidos. Com isso, o uso dos dados obtidos por métodos geofísicos podem empregados para uma avaliação local. Sem dúvida podem ser perfeitamente utilizados como informação secundária, desde que sejam conhecidas as limitações do equipamento e do método.

No ponto de vista da geoestatística, foi mostrado que o uso informações secundárias normalmente melhora as estimativas de atributos pouco amostrados (primário). Isso é de grande valia, pois com uma boa estratégia de locação de amostras, pode ser inferida uma grande área com um pequeno número de informações primárias.

Então, as vantagens provindas da perfilagem geofísica como o baixo custo de operação, agilidade e facilidade de manuseio, rapidez na obtenção nos resultados aliadas a um método geoestatístico capaz de reduzir a incerteza com pequeno número de informações, pode ser uma combinação de extrema valia para um empreendimento de mineração.

O capítulo 1 faz uma introdução sobre o trabalho, abordando um pequeno histórico sobre os temas estudados.

Nos dois capítulos seguintes, foi dado o enfoque para perfilagem geofísica apresentando os conceitos básicos de perfilagem e o princípio de funcionamento de algumas ferramentas de perfilagem de poço. O ponto importante dessa parte foi à utilização de métodos geofísicos para inferir a densidade do carvão e dos demais parâmetros que correlacionam-se com a densidade, como o teor de cinza e poder calorífico, onde é possível a inferência de poder calorífico diretamente com a contagem gama retroespalhada. Os valores de densidades obtidos por geofísica estão dentro dos limites normalmente encontradas no carvão, entre 1,72 e 1,84 g/cm³, porém até o momento não foi possível comparar estes resultados com as análises de laboratório.

Os capítulos finais abordaram no aproveitamento de informações secundárias para redução da incerteza. O capítulo 4 trata dos aspectos teóricos dos métodos escolhidos para incorporação dessa informação secundária. O capítulo 5 aplica as metodologias em um estudo de caso onde o banco de dados analisado apresenta diversas variáveis, sendo o par poder calorífico e teor de cinza o que melhor se correlaciona, com o coeficiente $r = -0,82$. Entre essas variáveis, o poder calorífico, com apenas 27 amostras, foi empregado como informação primária e o teor de cinza, com 288 dados, foi considerado como banco de apoio (secundário). Situação que caracteriza uma circunstância corriqueira e que pode ser estendida para um verdadeiro caso de informação secundária originada por perfilagem geofísica.

O estudo de caso mostrou que houve uma grande redução da variância de estimativas quando se faz uso de informações secundárias e que a área a ser estimada pode ser ampliada sem grande aumento na variância das estimativas.

6.2 - Recomendações para os próximos trabalhos

No que concerne à perfilagem geofísica, essa dissertação apresentou uma metodologia para inferência de parâmetros quantitativos a partir de informações coletadas por perfilagem geofísica. A equipe pertencente ao LPM possui blocos calibradores que permite a inferência de densidade de valores entre de 1,5 e 2,5 g/cm³, o que significa que seu uso está restrito a rochas que apresentem essa faixa de densidade. Uma recomendação importante, para expandir a medida de densidade é a verificação para emprego dos demais cintilômetros existentes na sonda, com novos procedimentos de calibração que devem ser realizados com outros padrões (blocos com densidade conhecida) de calibragem.

Outra recomendação importante, a ser realizada em longo prazo, é a verificação da influência do diâmetro do furo na contagem gama retroespalhada, e conseqüentemente incluir esse parâmetro como uma melhoria na determinação da densidade. É interessante, também, pesquisar o uso da sonda sônica para inferência de parâmetros geomecânicos da litologia.

A curto prazo, recomenda-se um melhor ajuste da curva existente para determinação de densidade através de novos ensaios em materiais de pesos específicos diversos, homogêneos e adequadamente conhecidos. Se possível, estipular o ajuste final incorporando a variável diâmetro do furo obtido pelo compasso de calibre.

Em se tratando do tema abordando a geoestatística, poderia ser verificado a real redução do erro através de simulação estocástica. Seria importante, também, a determinação do número mínimo de informações primárias para obtenção da variância de coestimativa, por MM1, semelhante à alcançada nas estimativas por krigagem ordinária.

Referências Bibliográficas

ALMEIDA, A., 1993. Joint Simulation of Multiples Variables with a Markov type Coregionalization Model. Dissertação de Doutorado, Stanford University, Stanford, Califórnia, Estados Unidos, 199 p.

AMERICAM PETROLIEUM INSTITUTE (API), 1974. Recommended *practice for standart calibration and format for nuclear logs.*, API rept. no. 33, API, Dallas, Texas.

ARCHIE, G.E. 1942. *The Electrical resistivity Log as na Aid in Determining Some Reservoir Characteristics.* Trans. AIME, vol. 146 - pp 54-62.

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. Programa de Pós-Graduação em engenharia de Minas, Materiais e Metalúrgica (PPGEM), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 292 p.

BOND, L.O., ALGER, R.P. e SCHMIDT, A.W, 1971. *Well log interpretation in coal mining and rock mechanics, Soil Mech. Eng.*, Trans, 250:355-362.

DEUTSCH, C. V. & JOURNEL, A.G. 1998. *GSLIB: Geoestatistical Software Library and User's Guide.* Oxford University Press. New York, 2ª Edição, 369 p.

DORTMAN N. B., 1976. Fizeskie svoistva gornich porod i polesnich iskopamykh. Izdat. Nedra, Moskva (Extraído do Seismic Exploration - PHYSICAL PROPERTIES OF ROCKS: Fundamentals and Principles of Petrophysics).

EVANS, R. D., 1955. *The Atomic Nucleus.* McGraw-Hill, New York.

FIRTH, D. *Log Analysis for Mining Applications. Peter Elkington, 164p. Reeves Oilfield Services Ltd.* Este artigo pode ser encontrado na internet via <http://www.reeves-wireline.com/webpages2/publications.html>. Capturado em Julho de 2004.

GOOVAERTS, P. 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation.* Oxford University Press.

GUYOD, H., 1944b. *The single-point resistance methode.* Oil Weekly. v. 114 no. 12.

GUYOD, H., 1951. *The Shielded-electrode methode.* World Oil.

HEARST, Joseph R., NELSON, Philip H., 1985. Well logging for physical properties. New York, McGraw-Hill Publications, 571 p.

HOFFMAN G.L., JORDAN G.R. & WALLIS G.R. 1982. *Geophysical Borehole Logging Handbook for Coal Exploitation*. The Coal Mining Research Centre, Edmonton, Alberta Canada, 270 p.

ISAAKS, E. H & SRIVASTAVA, M. R. 1989. *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press. New York, 561 p.

JOURNEL, A. G. 1999. *Markov Models for Cross-covariances*. International Association for Mathematical Geology.

JOURNEL, A. G. e HUIJBREGTS, CH., 1978. *Mining Geostatistics*, Academic Press, London 600 p.

KANEVSKI M., SAVELIEVA E., CHERNOV S., DEMYANOV V., TIMONIN V., 1998. *3D Plot*. GeoStat Group Office. Moscow.

KAYAL, J.R., 1981. *In situ analysis of coal from single electrode resistance, self-potential and gamma rays logs*. Geophys. Res. Bull., 19: 117-121.

KREBS, A.S.J. et al., 1994. Potencial Mineral para Não-Metálicos no município de Criciúma/SC, Porto Alegre: CPRM/MME, Série Recursos Minerais nº 3. Programa de informações Básicas para Gestão Territorial de Santa Catarina - PROESC, 45 p.

LIU, J. e HARVEY, A. H. , 1982. Coal Logging in the Peoples´ s Republic of China. Log Analyt, vol. 23, no. 2, 3p.

MATHERON, G . 1963. *Principles of Geostatistic. Economic Geology*.

OLHOEFT G. R. e JOHNSON G. R., 1989. *Densities of Rocks and Minerals*, in: Carmichael (ed.) Practical Handbook of Physical Properties of Rocks and Minerals, section II, CRC Press, Boca Raton Florida. (Extraído do Seismic Exploration - PHYSICAL PROPERTIES OF ROCKS: Fundamentals and Principles of Petrophysics).

PANNATIER, Y. 1996. *Variowin: Software for Spatial Data Analysis in 2D*. Springer-Verlag, New York, USA, 91 p.

REEVES, D.R., 1971. *In situ analysis of coal by borehole logging techniques*. CIM Trans., 74: 61-69.

REEVES, D.R., 1976. *Application of wire-line logging techniques of coal exploration*. Proc. Int. Coal Exploration Symp., 1st, London, pp. 112-128.

RIVOIRARD, Jacques, 1999. *Which Models for collocated Cokriging?*. Centre de G´ eostatistique, Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau France.

SOUZA, L.E. 2002. *Estimativa de incertezas e suas aplicações na classificação de recursos minerais*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em engenharia de Minas, Materiais e Metalúrgica (PPGEM), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 170 p.

TELFORD, W.M., GELDART, L.P. e SHERIFF, R.E., 1990. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, Second Edition, 770 p.

VAN KREVELEN, D.W., 1961. *Coal: Topology-Chemistry-Physics-Constitution*. Elsevier, Amsterdam, pp. 373-381.

WINSAUER, W. O., SHEARIN, H. MASON Jr., P. H. e WILLIAMS, M. 1952. *Resistivity of Brine-Saturated Sand in Relation to Pore Geometry*. Bull. AAPG, vol 36, no. 2 - pp 253-277.

WOHLENBERG J. (1982) Vol.1 Density, in: *LANDOLT-BÖRNSTEIN Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology*, New Series; Group V. Geophysics and Space Research, Physical Properties of Rocks, Subvol. a Springer-Verlag Berlin. Heidelberg. New York. (Extraído do Seismic Exploration - PHYSICAL PROPERTIES OF ROCKS: Fundamentals and Principles of Petrophysics).

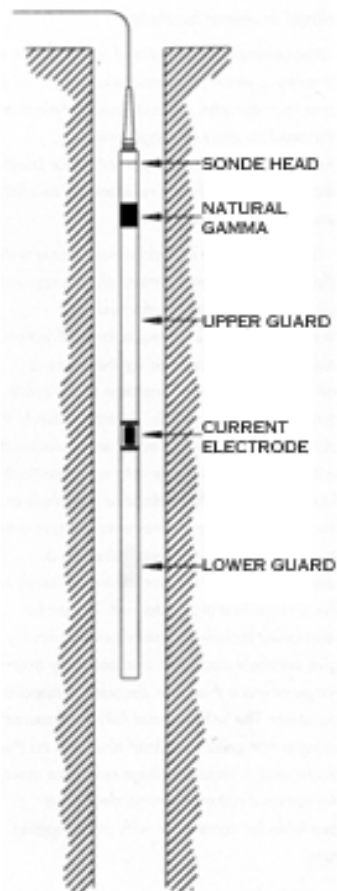
YAMAMOTO, J. K., 2001. *Avaliação e Classificação de Reservas Minerais*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 227 p.

ANEXO A

Especificações das sondas utilizadas para realização do trabalho - Fabricante *Robertson Geologging Limited*.

Sonda GLOG

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 A.1).



ESPECIFICAÇÕES	
Diâmetro	38mm
Comprimento	2,82m
peso	8kg
Temperatura máxima	70°C
Pressão Máxima	20MPa
Eletrodo de corrente	10cms
Eletrodos focalizadores	2 x 1m
Tensão de referência	Fio terra em superfície.
Escala de medida	1 a 10×10^3 ohm.m
Detector de radiação gama natural (contagem total)	50mm x 25mm NaI(Tl) Sintilômetro

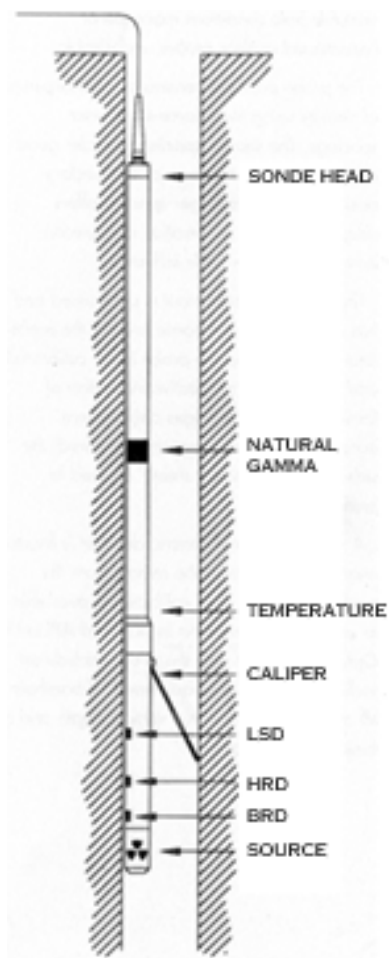
Figura A.1 - Sonda GLOG com especificações.

Acessório

- Unidade de calibração para o parâmetro resistividade.

Sonda SWDS

Sonda para medição de densidade, radiação gama natural, diâmetro de furo e temperatura*. Abaixo é apresentada a especificação da sonda (figura A.2).



ESPECIFICAÇÕES	
Diâmetro	50mm
Comprimento	2.88m
Peso	20kg
Max. temperature	70°C
Max. pressure	20MPa
Densidade	Tipo de detectores: NaI(Tl) sintilômetros Espaçamento entre detectores: 48cm (LSD) 24cm (HRD) 14 cm (BRD) Raio de calibração de densidade (LSD): 1 to 3.0g/cc
Gama Natural	Detector: 50mm x 25mm NaI (TI) sintilômetros
Compasso de calibre	raio: 50mm to 300mm

Figura A.2 - Sonda SWDS com especificações.

* - A sonda adquirida pelo laboratório não apresenta o dispositivo para medição de temperatura.

Acessórios

- Fonte de Césio 137 (Cs 137) de 3,7 mCi de atividade, utilizada para medição.
- Fonte de Césio 137 (Cs 137) de 3,7 μ Ci de atividade, utilizada para calibração do equipamento.
- Haste para calibração API.
- Bloco de alumínio para calibração.

Guincho (“Smart Winche”)

Equipamento utilizado para o içamento das sondas para medições dos parâmetros. O guincho é provido por uma polia que registra a profundidade. A figura A.3 abaixo mostra o guincho com a unidade de aquisição encaixada.



Figura A.3 - Foto do guincho com a unidade aquisição encaixada.

A partir da foto da figura A.3 e das especificações contidas na Tabela A.1, conclui-se que o guincho é portátil e com isso apresenta uma versatilidade para o deslocamento em campo.

Tabela A.1 - Especificações referente ao guincho

ESPECIFICAÇÕES	
Comprimento do cabo	180m 4 - fios
Velocidade	0.5 - 15m/min (1.6 - 49ft/min)
Motor	120W - 12VDC (bateria de automóvel)
Tamanho	265 (w) x 465 (l) x 370mm (h)
Peso	22kg (excluindo o cabo)
Capacidade	Guincho apropriado para sonda de medição de densidade com a fonte. Aproximadamente 23 kg.

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 A.4 e a Tabela A.2 apresentam a foto e as especificações respectivamente.

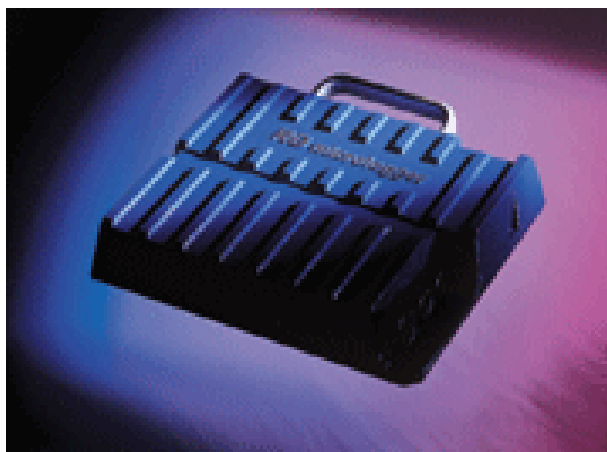


Figura A.4 - Foto da unidade aquisição

Tabela A.2 - Especificações referente ao guincho

ESPECIFICAÇÕES	
Dimensões	284mm x 240mm x 56mm
Peso	2,8kg
Alimentação	12VDC (equivalente à bateria de automóvel)

ANEXO B

Comparação entre a profundidade medida pelo equipamento de geofísica com a profundidade real levantada com a trena.

1 - Objetivo

O objetivo principal do ensaio foi verificar o nível de precisão da profundidade informada pelo equipamento de perfilagem geofísica e ainda determinar alguns ajustes dos parâmetros do equipamento para garantir a maior precisão possível na medida da profundidade.

2 - Metodologia

Para verificar a precisão da profundidade informada foi comparado o comprimento de cabo liberado (e informado) pelo equipamento com a medida do comprimento do mesmo trecho com uma trena.

3 -Ensaio

Foram realizados testes com o equipamento para comparar a profundidade com a circunferência da polia ajustada em 400 milímetros (sugerido pelo fabricante).

O primeiro teste foi realizado da seguinte maneira:

- Foi liberado 70 m de cabo e realizadas marcas a cada 10 metros;
- A medição foi realizada do 70 para o 0 metro.

Tabela B.1 - Resultados do teste 1

Trena (m)	Logger (m)	Diferença (cm)
70	70	0
60	60,06	0,06
50	50,14	0,14
40	40,2	0,2
30	30,28	0,28
20	20,32	0,32
10	10,41	0,41
0	0,87	0,87

A partir da tabela B.1 nota-se que a maior variação ocorre nos 10 metros finais (de 10m para 0 m) com uma variação de aproximadamente 46 cm somente nessa parte do cabo.

Anexo B - Comparação entre a profundidade medida pelo equipamento de perfilagem geofísica com a profundidade real com a trena

Depois de diversas análises no sistema de medição de profundidade, foi sugerido que a diferença de profundidade, que surge na parte onde o cabo é revestido, ocorre devido a um aumento virtual, de aproximadamente 3 mm, no diâmetro. Não há o encaixe adequado entre o cabo e a polia que registra a profundidade (figura B.1).

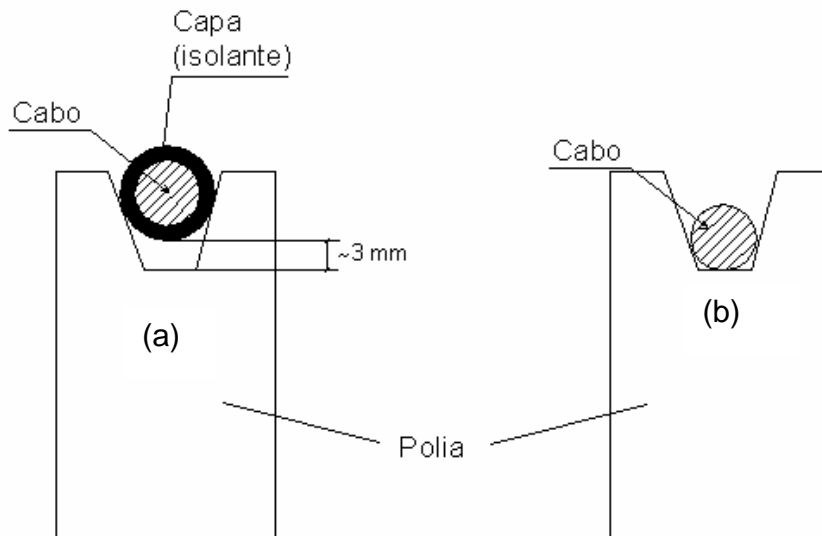


Figura B.1 - Aumento do diâmetro causado pela capa

O raio da polia em (b) na figura 1 é de 63,667 mm (circunferência = 400 mm) e o raio da polia com o efeito do cabo (a) apresenta 66,667 mm (circunferência = 419 mm).

Isso significa, que o equipamento de perfilagem registra 19 mm (1,9 cm) a menos de cabo por volta da polia, justificando os 46 cm relativos aos 10 metros iniciais de cabo.

Para uma polia com circunferência de 40 cm (400 mm) são necessárias 25 voltas para registrar 10 m de cabo.

$$\text{Fazendo: } \Rightarrow 25_{\text{VOLTAS}} \times 1,9 \frac{\text{cm}}{\text{volta}} = 47,5 \text{ cm}$$

Anexo B - Comparação entre a profundidade medida pelo equipamento de perfilagem geofísica com a profundidade real com a trena

Foi realizado, em um segundo teste, o procedimento inverso de comparação entre o comprimento real com o informado pelo equipamento. O teste foi realizado partindo-se de zero (tabela 2).

Tabela B.2 - Resultados do segundo ensaio (unidades em metros).

trena	Logger	Diferença
0	0	0
10	9,5	0,5
20	19,44	0,56
30	29,37	0,63
40	39,32	0,68
50	49,24	0,76
60	59,2	0,8
70	69,04	0,96

Na tabela B.2 também nota-se que a diferença maior é nos 10 m iniciais o qual o cabo é revestido por uma capa isolante.

A diferença de profundidade relativa ao trecho restante é justificada pelo ajuste do equipamento. Com o ajuste da circunferência em 403 mm (ao invés de 400 mm) houve apenas a diferença nos 10 m iniciais. A tabela B.3 mostra os resultados do teste com o novo ajuste.

Tabela B.3 - Resultados do terceiro ensaio com o equipamento ajustado em 403 mm (unidades em metros)

Trena	Logger	Diferença
0	0	0
10	9,58	0,42
20	19,58	0,42
30	29,6	0,4
40	39,6	0,4
50	49,61	0,39
60	59,61	0,39
70	69,61	0,39

4 - Conclusão

Com os testes conclui-se realmente que a diferença é nos 10 m iniciais (o guincho do equipamento registra 42cm a menos que o real) e a partir dessa profundidade as variações de medida são inferiores a 0,1%, para uma profundidade de até 70 metros. Ficando estabelecido então a circunferência da polia em 403 mm e uma diferença de aproximadamente 40 cm na profundidade (em profundidades superiores a 10 m), devido à capa do cabo.

Como o comprimento total do cabo do guincho é de 180 m, a verificação do restante do cabo será apurada em uma ocasião futura, conforme a necessidade do uso.

No entanto, o procedimento mais adequado para que a diferença seja desprezível é de manter o guincho suficientemente afastado de modo que o isolante seja completamente desenrolado.

ANEXO C

Determinação das curvas de iso-dose para a fonte de Césio 137 de 100 mCi, utilizada pelo Laboratório de Pesquisa Mineral para perfilagens de poço.

1 - Objetivo

O ensaio foi realizado para determinação da distribuição de taxa dose no entorno da fonte e para verificação da sua direção de colimação (direção preferencial de emissão de radiação gama).

2 - Importância do ensaio

A determinação da direção de colimação tem importância fundamental, tanto para os cuidados do manuseio com a fonte quanto para constatação da qualidade das medições feitas pelo equipamento de geofísica, pois, a existência de colimação é um

Anexo C - Determinação das curvas de iso-dose para a fonte de Cs 137 de 100 mCi utilizada pelo LPM

fator fundamental. O conhecimento da distribuição de taxa dose é um fator fundamental para os procedimentos de campo.

3 - Metodologia

A fonte de Cs 137, com 100 mCi de atividade, foi circundada por canetas dosimétricas devidamente calibradas e zeradas. As canetas foram dispostas conforme o croqui apresentado figura C.1.

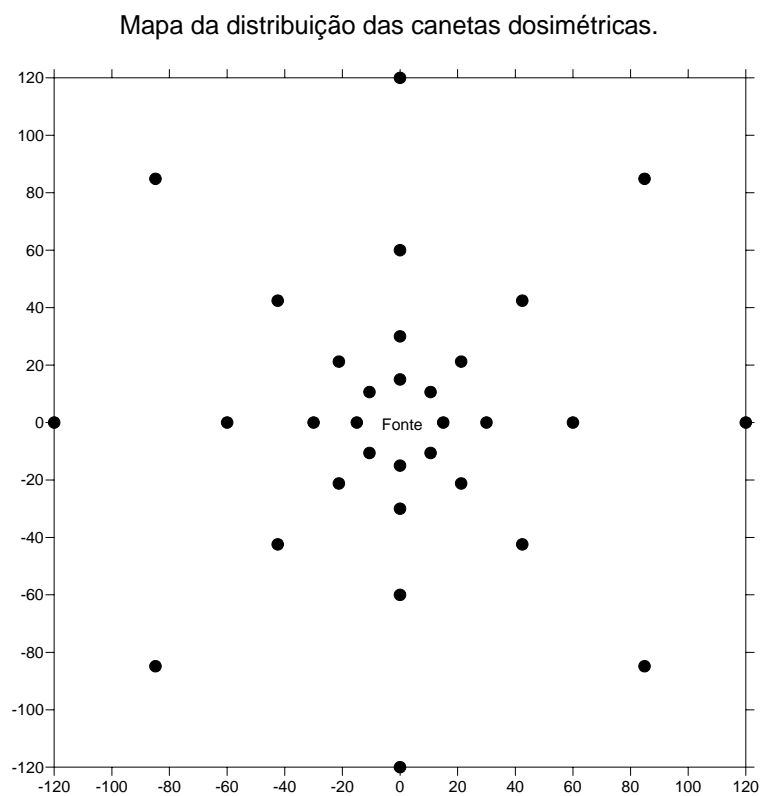


Figura C.1 - Croqui da distribuição das canetas (coordenadas X e Y em cm).

Anexo C - Determinação das curvas de iso-dose para a fonte de Cs 137 de 100 mCi utilizada pelo LPM

As canetas foram identificadas e posicionadas em raios de 15, 30, 60 e 120 cm com ângulos de 45° entre as direções de posicionamento das canetas. Com a fonte na posição central, as canetas foram expostas para medição das doses.

A identificação foi feita da seguinte forma: para cada raio as canetas foram identificadas de 1 até 8 no sentido horário partindo-se de "12 horas do relógio", conforme mostra a figura C.2.

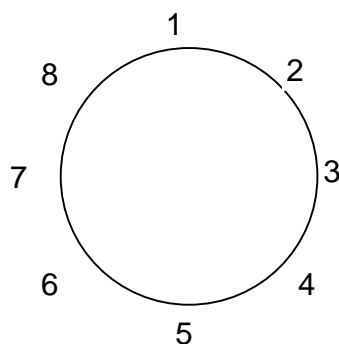


Figura C.2 – Identificação das canetas.

A fonte posicionada no centro com a direção de colimação apontada para a caneta 1. Os valores medidos são apresentados nas tabelas que seguem.

Anexo C - Determinação das curvas de iso-dose para a fonte de Cs 137 de 100 mCi utilizada pelo LPM

Tabela C.1 - Valores de dose medidos com as canetas (mR)

Distância	15 (cm)		30 (cm)	60 (cm)	120 (cm)
	Tempo de exposição				
Caneta	17 minutos	10 minutos	17 minutos	30 minutos	30 minutos
1	>200	165	65	30	0
2	>200	178	63	25	0
3	145	65	30	15	0
4	40	18	10	8	0
5	12	7	0	0	0
6	47	20	5	0	0
7	55	43	20	12	0
8	180	110	53	30	0

Anexo C - Determinação das curvas de iso-dose para a fonte de Cs 137 de 100 mCi utilizada pelo LPM

Tabela C.2 - Valores de taxa de dose medidos com as canetas (mR/h)

Distância	15 (cm)		30 (cm)	60 (cm)	120 (cm)
	Caneta				
1	0	990	2,3	60	0
2	0	1068	2,2	50	0
3	511,9	390	1,06	30	0
4	141	108	0,35	16	0
5	42,4	42	0	0	0
6	166	120	0,17	0	0
7	194	258	0,7	24	0
8	635	650	1,87	60	0

Anexo C - Determinação das curvas de iso-dose para a fonte de Cs 137 de 100 mCi utilizada pelo LPM

Tabela C.3 - Valores de taxa de dose medidos com as canetas (mSv/h), a caneta posicionada a 15 cm foi considerado o tempo de 10 minutos.

Distância	15 (cm)	30 (cm)	60 (cm)	120 (cm)
Caneta				
1	9,9	2,3	0,6	0
2	10,68	2,2	0,5	0
3	4,5	1,06	0,3	0
4	1,25	0,35	0,16	0
5	0,42	0	0	0
6	1,42	0,17	0	0
7	2,26	0,7	0,24	0
8	6,5	1,87	0,6	0

Na figura C.3 é apresentado o mapa de distribuição de doses.

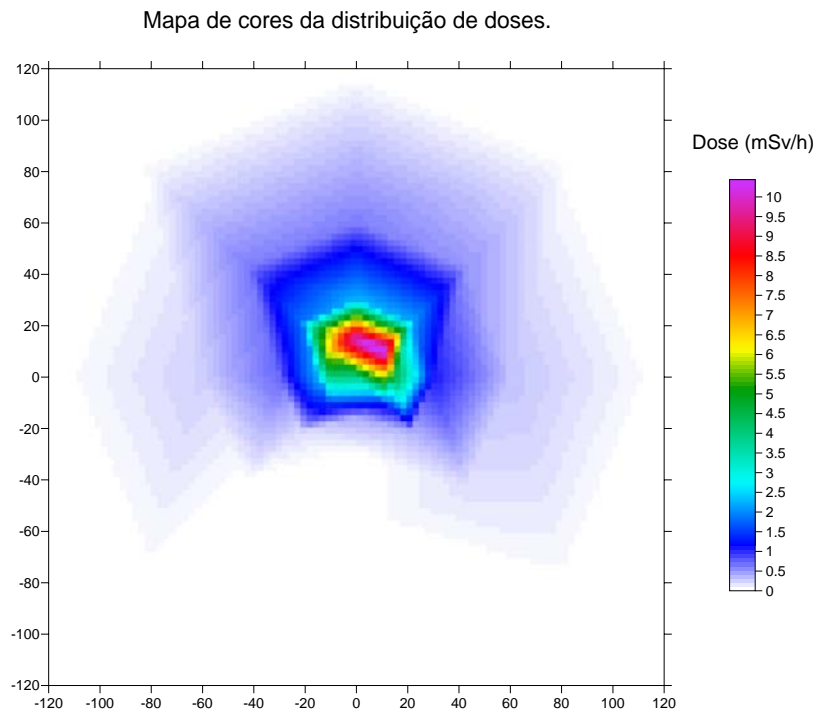


Figura C.3 - Mapa de cores de distribuição de doses (coordenadas X e Y em cm).

4 - Conclusão

O ensaio teve grande importância para determinação da direção de colimação da fonte e bem como o mapeamento das taxas doses no seu entorno. Com isso os procedimentos de campo foram tomados considerando a direção de colimação e distâncias apropriadas.

A direção de colimação da fonte utilizada pelo Laboratório de Pesquisa Mineral é mostrada na foto da figura C.4.

Anexo C - Determinação das curvas de iso-dose para a fonte de Cs 137 de 100 mCi utilizada pelo LPM



Figura C.4 - Foto da embalagem com indicação da direção de colimação da fonte radioativa.