

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de PósGraduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais -
PPGEMM

ESTUDO COMPARATIVO DE MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DO
VOLUME EM CORTES DE MINERAÇÃO A CÉU-ABERTO

Selmar Almeida de Oliveira
Engenheiro de Minas

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Metalúrgica e dos Materiais como parte dos requisitos para obtenção do
Título de

MESTRE EM ENGENHARIA

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa

Porto Alegre
1995

ESCOLA DE ENGENHARIA
BIBLIOTECA

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA**, Área de Concentração: Tecnologia Mineral, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador:

Prof. Jair Carlos Koppe
PPGEMM/UFRGS

Banca Examinadora:

- Prof. Francisco H. Simões Magro
Departamento de Geodésia - IG/UFRGS

- Prof. Regis Motta
Departamento de Engenharia de Minas/UFRGS

- Prof. Carlos Otávio Peter
Departamento de Engenharia de Minas/UFRGS

Prof. Telmo Roberto Strohaecker
Coordenador do PPGEMM

**Dedico este trabalho
ao Lucas**

AGRADECIMENTOS

À Copelmi Mineração Ltda., na pessoa dos Engenheiros Othelo Laurent e Cesar Medina, pela disposição em tornar exequível este trabalho através do apoio logístico dispensado.

Ao Prof. Dr. Jair Koppe, pela orientação cuidadosa e atenção dispensada ao longo de todo o trabalho.

Ao Prof. M. Sc. João Felipe pelas importantes críticas e sugestões e pelo incentivo durante todas as fases do trabalho.

Ao Engenheiro Francisco Linck Feijó, pelo apoio técnico e acompanhamento durante a execução do trabalho de campo.

Ao Geólogo Sérgio Inácio Turelli, pelas informações prestadas durante e após o trabalho de campo.

À equipe de topografia da Copelmi Mineração Ltda., pela dedicação no auxílio à coleta dos dados.

Aos Mestres em Engenharia João Cesar Simch, Carlos Alberto Pires, André Bicca de Barcelos, aos colegas de mestrado Telton Corrêa, Roberto Beal, André Zingano, aos bolsistas do Laboratório de Pesquisa Mineral, e a todos aqueles que, de alguma forma colaboraram no desenvolvimento deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE QUADROS	vii
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	viii
RESUMO	x
ABSTRACT	xi
1. INTRODUÇÃO	01
2. OBJETIVOS	02
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA	04
3.1. Situação e Vias de Acesso	04
3.2. Aspectos Geológicos	05
3.2.1. Geomorfologia	05
3.2.2. Estratigrafia	05
3.2.2.1. Seqüência Basal	06
3.2.2.2. Seqüência Pelítica	06
3.3. Mineração	07
4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	09
4.1. Medições Eletrônicas de Distância	09
4.1.1 Princípios Básicos e Classificação	09
4.1.2 Instrumentos Eletro-ópticos por Infra-Vermelho	10
4.1.3 Medição da Distância	10
4.1.4 Erros Envolvidos na Medição de Distâncias Eletronicamente	13
4.2 Cálculo da Área de Polígonos Planos	14
4.2.1 Métodos Gráficos	14
4.2.2 Método Analítico (Através de Coordenadas Retangulares)	14
4.2.1.1 Método das Duplas Distâncias Meridianas	14
4.2.1.2 Método das Coordenadas (Gauss)	15
4.2.3 Métodos Mecânicos (Planímetros)	16
4.2.4 Métodos para Avaliação de áreas Extrapolygonais	17
4.2.4.1 Método dos Trapézios (Fórmula de Bezout)	18
4.2.4.2 Método de Simpson	19
4.2.3.3 Métodos de Integração Numérica	19

4.3 Cálculo de Volumes de Sólidos Irregulares	21
4.3.1 Método das Seções Paralelas	21
4.3.2 Fórmula Prismoidal	22
4.3.3 Método do Prismóide	22
4.2.3 Métodos Numéricos	23
4.4 Geoestatística Aplicada	24
4.4.1 Considerações Gerais	24
4.4.2 Covariância e Coeficiente de Correlação	27
4.4.3 Covariograma e Correlograma	28
4.4.4 Variograma e Semivariograma	29
4.4.4.1 Propriedades dos Variogramas	30
4.4.4.2 Cálculo do Variograma	32
4.4.4.3 Ajuste do Variograma	34
4.4.5 Estimação Linear	34
4.4.5.1 Equações de Krigagem	36
4.4.5.2 Krigagem Pontual (<i>Point Kriging</i>)	37
4.4.5.3 Krigagem por Blocos (<i>Block Kriging</i>)	38
5 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	39
5.1 Considerações Gerais	39
5.2 Trabalho de Campo	39
5.2.1 Equipamento Utilizado	39
5.2.2 Coleta de Dados	39
5.3 Preparação dos Dados	41
5.3.1 Tratamento Preliminar dos Dados	41
5.3.2 Geração da Malha Padrão	41
5.3.3 Preparação dos Arquivos para Interpolação	42
5.4 Estudo da Continuidade Espacial	45
5.5 Krigagem	47
5.6 Estimação dos Volumes	49
5.6.1 Utilizando Dados Interpolados por Krigagem	49
5.6.2 Utilizando o Método das Seções Paralelas	51
6 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS	55
6.1 Diferenças na Estimação dos Volumes	55
6.2 Análise Estatística Básica dos Valores Interpolados	60

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
ANEXO A - Variogramas Onidirecionais e Direcionais	71
ANEXO B - Histogramas de Freqüência	93
ANEXO C - Dados Originais do Terreno Natural e do Carvão	97

LISTA DE FIGURAS

3.1 - Mapa de localização da área de estudo	04
4.1 - Redução da distância ao horizonte	11
4.2 - Obtenção do desnível entre os pontos A e B	12
4.3 - Regra geral para o cálculo da área da poligonal	15
4.4 - Representação gráfica do processo aritmético	16
4.5 - Polígono decomposto em figuras geométricas	16
4.6 - Representação da operação de um planímetro	17
4.7 - Processo de cálculo de áreas extrapolygonais	18
4.8 - Decomposição da área de acordo com a Fórmula de Bezout	18
4.9 - Individualização dos trapézios correspondentes a Fig 4.8	19
4.10- Método das seções paralelas	22
4.11- Aplicação da fórmula prismoidal	22
4.12- Representação do método do prismóide	23
5.1 - Área total do levantamento de campo no terreno natural	40
5.2 - Área do levantamento sobre a camada superior de carvão	41
5.3 - Distribuição dos dados em superfície e sobre a camada de carvão	42
5.4 - Distribuição dos dados em malha 10x10m - superfície e carvão	43
5.5 - Distribuição dos dados em malha 15x15m - superfície e carvão	43
5.6 - Distribuição dos dados em malha 20x20m - superfície e sarvão	44
5.7 - Distribuição dos dados em malha 25x25m - superfície e carvão	44
5.8 - Distribuição dos dados em malha 30x30m - superfície e carvão	45
5.9 - Variograma onidirecional - terreno natural 10x10m	71
5.10 - Variograma na direção E-W- terreno natural 10x10m	71
5.11 - Variogramas nas direções NE e N-S - terreno natural 10x10m	72
5.12 - Variograma na direção NO - terreno natural 10x10m	73
5.13 - Variogramas onidirecional e direção E-W - terreno natural 15x15m	73
5.14 - Variogramas direcionais NE, N-S, NO - terreno natural 15x15m	74
5.15 - Variograma onidirecional direções E-W e NE - terreno natural 20x20m	75
5.16 -Variogramas nas direções N-S e NO - terreno natural 20x20m	76
5.17 - Variograma onidirecional - terreno natural 25x25m	76
5.18 - Variograma nas direções E-W, NE, N-S - terreno natural 25x25m	77
5.19 - Variograma na direção NO - terreno natural 25x25m	78
5.20 - Variogramas onidirecional e direção E-W - terreno natural 30x30m	78
5.21 - Variogramas nas direções NE N-S e NO - terreno natural 30x30m	79
5.22 - Variogramas onidirecional e nas direções E-W e NE - carvão 10x10m	80
5.23 - Variogramas direcionais N-S e NO - carvão 10x10m	81
5.24 - Variograma onidirecional - carvão 15x15m	81

5.25 - Variogramas nas direções E-W NE e N-S - carvão 15x15m	82
5.26 - Variograma na direção NO - carvão 15x15m	83
5.27 - Variogramas onidirecional e E-W - carvão 20x20m	83
5.28 - Variogramas NE, N-S e NO - carvão 20x20m	84
5.29 - Variogramas onidirecional e nas direções E-W e NE carvão 25x25m	85
5.30 - Variogramas nas direções N-S e NO - carvão 25x25m	86
5.31 - Variograma onidirecional - carvão 30x30m	86
5.32 - Variogramas E-W, NE e N-S - carvão 30x30m	87
5.33 - Variograma na direção NO carvão 30x30m	88
5.34 - Relação - Validação Cruzada - terreno 10x10m	88
5.35 - Relação - Validação Cruzada - terreno 15x15m	89
5.36 - Relação - Validação Cruzada - terreno 20x20m	89
5.37 - Relação - Validação Cruzada - terreno 25x25m	90
5.38 - Relação - Validação Cruzada - terreno 30x30m	90
5.39 - Relação - Validação Cruzada - carvão 10x10m	91
5.40 - Relação - Validação Cruzada - carvão 15x15m	91
5.41 - Relação - Validação Cruzada - carvão 20x20m	92
5.42 - Relação - Validação Cruzada - carvão 25x25m	92
5.43 - Vista total da área teste mostrando a base dos prismas	50
5.44 - Pontos localizados sobre as seções paralelas espaçadas de 20m	52
5.45 - Pontos localizados sobre as seções paralelas espaçadas de 10m	53
6.1 - Oscilação das diferenças entre os volumes calculados a por <i>point kriging</i>	56
6.2 - Oscilação das diferenças entre os volumes calculados a partir de dados interpolados por <i>point kriging</i> excluindo-se a malha de 25x25m	56
6.3 - Oscilação das diferenças entre os volumes calculados por <i>block kriging</i>	56
6.4 - Oscilação das diferenças entre os volumes calculados a partir de dados interpolados por <i>block kriging</i> excluindo a malha de 25x25m	57
6.5 - Histograma de distribuição dos pontos originais medidos sobre a superfície	93
6.6 - Histograma da distribuição dos pontos interpolados por <i>point kriging</i> a partir da malha 10x10m das cotas do terreno natural	93
6.7 - Histograma da distribuição dos pontos interpolados por <i>point kriging</i> a partir da malhas de 15x15m 20x20m e 25x25m das cotas do terreno natural	94
6.8 - Histograma da distribuição das cotas originais medidas sobre a camada superior de carvão	95
6.9 - Histogramas de distribuição dos pontos interpolados por <i>point kriging</i> malhas 10x10m e 15x15m cotas da camada superior de carvão	95
6.10 - Histogramas referentes a distribuição dos pontos interpolados por <i>point kriging</i> das cotas da camada superior de carvão malha 20x20m e 25x25m	96

LISTA DE QUADROS

Quadro 5.1 - Parâmetros dos modelos variográficos ajustados	45
Quadro 5.2 - Volumes de <i>overburden</i> calculados por diferentes métodos a partir dos dados originais e a partir dos dados interpolados por <i>point kriging</i>	48
Quadro 5.3 - Volumes calculados a partir dos dados interpolados por <i>block kriging</i>	51
Quadro 5.4 - Volume calculado através de seções paralelas espaçadas de 20m com os dados originais	51
Quadro 5.5 - Volume calculado por seções paralelas espaçadas de 10m com os dados originais	53
Quadro 6.1 - Diferenças percentuais entre os volumes obtidos a partir de valores interpolados por <i>point kriging</i> e aqueles obtidos com os dados originais	54
Quadro 6.2 - Diferenças percentuais entre os volumes obtidos a partir de valores interpolados por <i>block kriging</i> e aqueles obtidos com os dados originais	55
Quadro 6.3 - Diferenças percentuais entre os volumes calculados a partir de valores interpolados por <i>point kriging</i> e o volume padrão	58
Quadro 6.4 - Diferenças percentuais entre os volumes calculados a partir de valores interpolados por <i>block kriging</i> e o volume padrão	58
Quadro 6.5 - Estatística descritiva dos pontos originais (padrão) e dos pontos interpolados por <i>point kriging</i> para cota do terreno natural	61
Quadro 6.6 - Estatística descritiva dos pontos originais (padrão) e dos pontos interpolados por <i>block kriging</i> para cota da camada superior de carvão	61
Quadro 7.1 - Diferenças percentuais do volume de <i>overburden</i> calculado por seções paralelas e os volumes calculados com os dados originais por métodos numéricos e pelo método do prismóide	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
EDM	Electromagnetic Distance Measurement
X	Coordenada plana - direção Este
Y	Coordenada plana - direção Norte
Z	Cota Altimétrica
i	Constante Instrumental de Reinchenbach
μ	Média da população
\bar{x}	Média amostral
$x(z)$	Valor de x no ponto z
x e y	Variáveis aleatórias
(z)	Posição da variável x
$(z + h)$	Posição da variável y
$\sigma_{xy} = \text{Cov}[xy]$	Covariância de z e y
$E[x]$	Esperança matemática de x
$E[y]$	Esperança matemática de y
σ^2	Variância a "priori"
σ_x^2	Variância de x
σ_y^2	Variância de y
ρ	Coefficiente de correlação
ρ_{xy}	Coefficiente de correlação entre x e y
$2\gamma(h)$	Função Variograma
$\gamma(h)$	Função Semivariograma
$\hat{\gamma}(h)$	Valor do variograma estimado no ponto h
α	Ângulo do vetor h
$ h $	Módulo de h
X_v	Valor da amostra X
X_k^*	Valor Estimado de X
λ_i	Ponderadores da combinação linear
$\bar{C}(V, V)$	Variância da Estimação
V	Valor da amostra
v	valor estimado
μ	Parâmetro de Lagrange

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo o estudo comparativo entre métodos de avaliação de volumes em cortes de mineração a céu-aberto. Os dados foram obtidos na mina Butiá-Leste da Copelmi Mineração Ltda.

Através da utilização de uma estação total foi executado, em campo, um levantamento topográfico, com a coleta de pontos em uma malha de 5x5m, na superfície do terreno natural e, após a remoção do *overburden*, sobre a camada superior de carvão. Os dados foram preparados no *software Surfer*, para perfeita correspondência entre as cotas de superfície e as cotas da camada superior de carvão. Este procedimento objetivou a construção de dois modelos digitais do terreno para o cálculo de um volume padrão, com o qual, foram comparados os volumes obtidos por métodos numéricos (quadratura), segundo algoritmo do *Surfer*, e métodos geométricos do prismóide e das seções paralelas.

Da malha original de 5x5m, sobre a superfície e sobre a camada superior de carvão, foram suprimidas linhas de pontos expandindo-a para 10x10m, 15x15m, 20x20m, 25x25m e 30x30m. Sobre estes novos conjuntos de dados foi feito o estudo da continuidade espacial da variável cota e definidos os modelos variográficos ajustados para aplicação da krigagem na interpolação de pontos, adensando novamente a malha e 5x5m, com os valores krigados.

Os volumes obtidos a partir das superfícies numéricas interpoladas, foram comparados, segundo o tipo de krigagem e o método de cálculo, com os volumes produzidos a partir da malha com valores originais. Todos os volumes calculados foram comparados com o volume padrão e com o volume obtido pelo método das seções paralelas, empregado atualmente pela Copelmi Mineração Ltda.

De acordo com os resultados obtidos, pode-se aplicar a krigagem como interpolador de cotas altimétricas, desde que seja realizado um criterioso estudo da continuidade espacial.

A acuracidade do método foi comprovada através das pequenas diferenças percentuais obtidas entre o volume calculado com os dados originais (volume padrão) e os volumes estimados. A comparação entre os volumes obtidos pelos vários métodos comprova, também, a precisão do método do prismóide para o cálculo do volume de *overburden*, em relação aos métodos numéricos (quadratura) e em relação ao método das seções paralelas.

O volume calculado por seções paralelas apresentou um aumento quando foi reduzida a distância entre as seções, enquanto os métodos numéricos apresentaram uma tendência, de superestimar os volumes.

ABSTRACT

This study compares volume estimation methods for open cast mines. An exhaustive data set was obtained from Compelmi Mineração Ltda., Butiá-Leste Coal Mine.

Using a total station, the field work consisted of a detailed survey, where data were collected at a regular spacing of 5x5m, from the natural surface and from the top of the first coal seam after the overburden removal. An editing step using the Surfer® software was carried producing the exact correspondence between the original surface and coal seam points.

A standard volume was defined using the 5x5m data set and the prismoid calculation method.

Mathematical methods like quadrature and geometrical methods like prismoid and parallel section were used to estimate the volume between the DTM's defined by the original surface and the surface after the excavation.

The obtained models (surface and coal) defined by the dense 5x5m grid were used to extract lines of points expanding the original grid sampling pattern (5x5m) to new grids at 10x10m, 15x15m, 20x20m, 25x25m and 30x30m. Using these new data sets, it was performed the spatial continuity study of the elevation variable and fitted variographic models. Kriging interpolation method was used in order to rebuild the original grid (5x5m).

The volumes obtained from the interpolated numerical surfaces, were compared against the volumes obtained from the original grid. All the estimated volumes were compared against the standard volume and the volume calculated by the parallel section method, normally employed by Copelmi Mineração Ltda.

The results demonstrate one can apply kriging as an interpolator at elevation values, after carrying out a careful spatial continuity study.

The accuracy of the method was measured by the percentual differences obtained between the calculated volume using the original data (standard volume) and the estimated volumes. The results also show the precision of the prismoid method used for overburden volume estimation related to the numerical methods (quadrature) and parallel section method.

The volume calculated using parallel sections increased when the distance between the sections was reduced. The numerical methods presented a tendency to over estimate the volumes.

1. INTRODUÇÃO

As técnicas aplicadas nas operações mineiras abrangem um amplo espectro do conhecimento técnico-científico. Nas últimas décadas os trabalhos mineiros vêm sofrendo um sistemático aperfeiçoamento através da utilização de procedimentos computacionais mais precisos e confiáveis, isso graças à dinâmica indústria de computadores que têm oferecido aos usuários, equipamentos de grande capacidade de processamento e armazenamento de dados a um custo cada vez menor, ao mesmo tempo em que a indústria de *software* tem feito notáveis progressos.

A utilização do computador como forma de obter a sistematização e otimização de processos, possibilita maior agilidade nas atividades de mineração que envolvem o planejamento, a lavra e o beneficiamento do minério, além de permitir a definição exata dos limites de confiabilidade nos procedimentos envolvidos.

Atualmente, no sistema administrativo-operacional de uma empresa de mineração, um dos aspectos mais importantes está relacionado aos custos envolvidos em cada setor do complexo mineiro. Os preços da maioria dos bens minerais têm sistematicamente caído em função da reciclagem e da utilização de bens minerais obtidos como subproduto em minérios polimetálicos, além da substituição de determinados produtos primários por produtos sintéticos oferecidos para variadas aplicações em diversas áreas.

A terceirização, ou seja, a execução de determinadas atividades por empresas prestadoras de serviços contratadas especificamente para desenvolver determinada tarefa pela companhia mineradora, tem sido adotada, ultimamente, como uma alternativa para reduzir custos e aumentar a produtividade. Esse sistema porém, obriga ao desenvolvimento de formas e métodos para calcular e compor o valor dos serviços prestados pelas empresas que atuam por empreitada, isto é, que realizam determinadas tarefas e cujas atividades devem ser remuneradas de uma maneira justa, tanto para a empresa gerenciadora como para a executante do serviço.

Os serviços executados por empreiteiras envolvem, por exemplo, os trabalhos de descobertura, carregamento e transporte de estéril. A forma de compor os valores para remunerar uma empresa responsável pela remoção e transporte do estéril da cobertura em uma mina a céu-aberto, é através do volume de *overburden* removido e transportado durante determinado período.

A derminação de volumes em mineração a céu-aberto, tem fundamental importância desde a fase de avaliação da jazida até a mineração propriamente dita. Na fase de avaliação da

jazida, a cubagem objetiva a definição (nos diferentes blocos e em toda a área pesquisada) da reserva de minério, metal contido (em minas metálicas), e dos parâmetros médios do minério, tais como teor, acumulação, densidade e espessura (Maranhão, 1985).

A obtenção dos dados necessários para o cálculo das reservas, segundo Maranhão (1985), pode ser de forma direta através de sondagens, trabalhos mineiros (poços, galerias etc...) ou através de estudos geofísicos. O tratamento desses dados em função das áreas de abrangência da pesquisa e da quantidade de informações, pode ser feito através de estatística convencional ou utilizando-se técnicas de geoestatística.

Durante a fase de mineração, o conhecimento dos volumes envolvidos nas diversas etapas do processo é a base para todo o controle operacional da mina, otimização do desmonte, transporte, beneficiamento, bem como todos os fatores de controle de produção e de custos envolvidos.

Tanto a geologia como a indústria mineira tem contribuído de forma bastante ativa para o desenvolvimento de rotinas computacionais aplicadas, que têm sido utilizadas por um número cada vez maior de empresas de mineração as quais observam, em curto intervalo de tempo, a transformação do investimento feito em *hardware* e *software* em crescentes e imediatos lucros, processo este, que tem sido verificado nas indústrias de grande, médio e até pequeno porte.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é apresentar uma metodologia computacional aplicada à estimativa de volumes em cortes de mineração a céu-aberto, empregando a técnica da krigagem na interpolação de dados de topografia (cotas).

A aplicação da krigagem como interpolador permitiu a criação de modelos digitais de terreno, considerando a superfície do *overburden* e o topo da camada superior de carvão, avaliando-se o volume através de superfícies interpoladas a partir de malhas de amostras com diferentes espaçamentos.

Os procedimentos aqui apresentados podem ser utilizados em outras situações que envolvam a estimativa de volumes em movimentação de grandes quantidades de material de escavações.

Além do objetivo básico, este estudo apresenta uma metodologia de cálculo de volumes utilizando o conceito de prismóide, fazendo a comparação dos resultados obtidos com

os métodos numéricos clássicos e com o método de seções paralelas empregado pela empresa para estimação dos volumes de *overburden*.

Através da criação de um modelo padrão e da criação de diferentes bases de dados utilizando pontos coletados em campo em uma malha amostral de 5x5m, foi utilizada a krigagem como método de interpolação, visando reduzir a quantidade de pontos medidos em campo e aumentar a precisão na estimativa do volume.

Durante a execução do estudo, foi implantada na empresa Copelmi Mineração Ltda. uma sistemática automatizada de medição envolvendo a aquisição eletrônica de dados com o emprego de estação total e coletor eletrônico de dados, preparação e manipulação destes dados com a utilização de interfaceamento do coletor eletrônico com microcomputador e utilização de *software* específico. O resultado deste estudo, aliado ao processo de aquisição eletrônica de dados em campo, permitirá avaliar os volumes envolvidos com maior precisão, rapidez e com menor interferência humana no processo.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

A caracterização da área onde foi executado o trabalho, foi obtida a partir das informações contidas no Relatório de Pesquisa referente ao processo DNPM-802.527/77 (Souza et al., 1988).

3.1. Situação e Vias de Acesso

A mina Butiá-Leste situa-se ao norte da BR 290 na direção E-W, distante 5 km a leste da cidade de Butiá e a 75 km oeste de Porto Alegre, no local denominado Fazenda Butiá, município de Butiá, Rio Grande do Sul.

O ponto central da área teste está situado no paralelo $30^{\circ} 6' 58''$ S e no meridiano $51^{\circ} 54' 0''$ W, onde foi desenvolvido o trabalho de campo através do levantamento topográfico da superfície e da capa da camada superior de carvão.

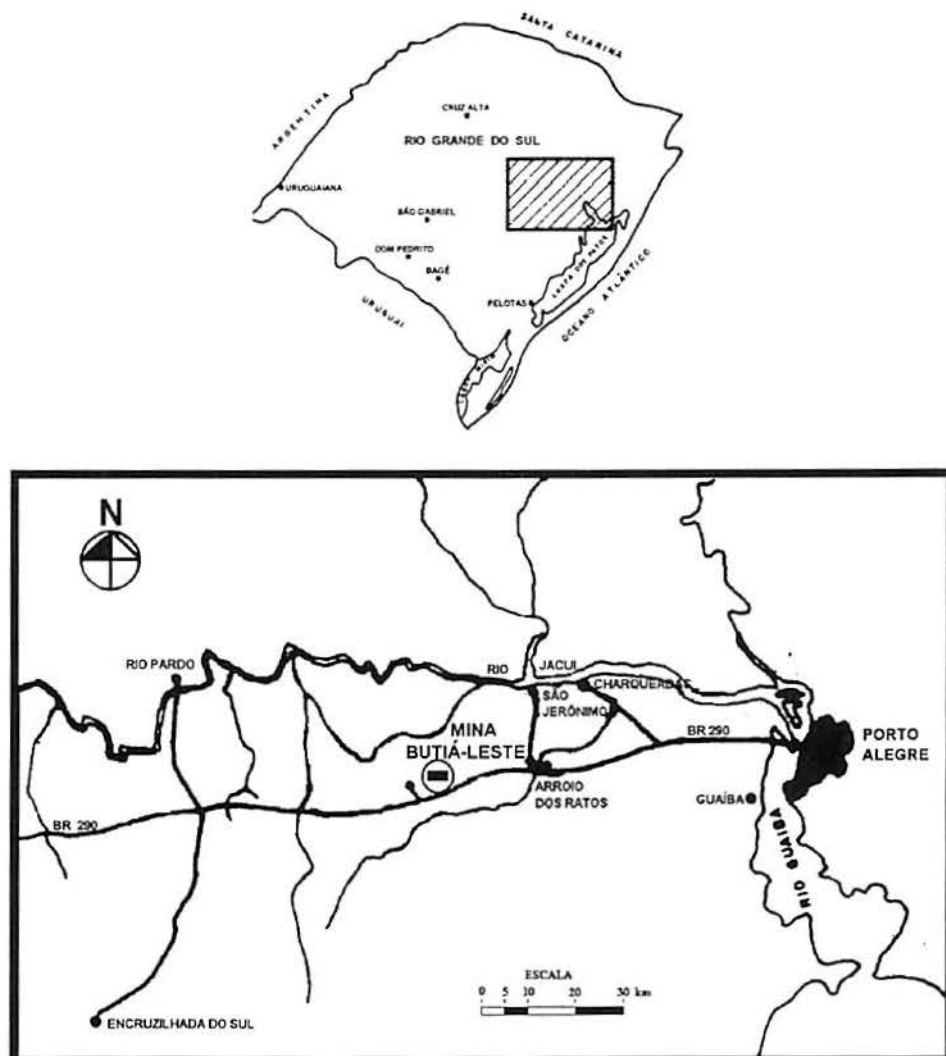


Figura 3.1 - Localização da Mina Butiá Leste.

3.2. Aspectos Geológicos

3.2.1. Geomorfologia

Geomorfologicamente, a área situa-se na Depressão Periférica Central, na zona de transição de Escudo Sulriograndense para Bacia do Paraná.

Na área referente à jazida observam-se apenas processos exógenos de formação de relevo, especificamente os de erosão e agradacia simultânea. Estes processos (água, vento e variações climáticas), agindo sobre as formações sedimentares ocorrentes (Rio Bonito e Palermo), formam colinas com flancos alongados e de ângulos suaves.

A erosão é eminentemente físico-química. Inicia pela microfissuração das rochas, com o subsequente transporte para áreas topograficamente rebaixadas. Os processos de agradacia são típicos de perda do poder de transporte, com deposição fluvial em planície de inundação.

Nos flancos sul e norte, circundantes à jazida, ocorreram processos endógenos de formação de relevo, principalmente distróficos epirogenéticos e orogênicos, relacionados geneticamente a falhamentos ou intrusões de corpos ígneos.

3.2.2. Estratigrafia

O Granito Butiá in Souza et al.(1988) aflora tangenciando a jazida em seus limites norte e sul, constituindo-se num Granito grosseiro e avermelhado.

O Grupo Itararé (Schneider et al., 1974) caracteriza-se por uma sedimentação eminentemente glacial e periglacial preenchendo antigas fossas tectônicas pertencentes à Bacia do Paraná.

A Formação Rio Bonito depositou-se sobre uma superfície muito irregular do embasamento e/ou do Itararé (Schneider et al., 1974), aliada à subsidência diferencial e tectônica pré, sin e pós deposicional da bacia sedimentar. Em decorrência disto, vários microambientes (fluvial, lacustre, microdelta, escorregamento subaquático e enxurrada) instalaram-se, originando variações bruscas na constituição litológica, espessura e até mesmo ausência em algumas zonas de paleo-altos.

Pode-se individualizar, no Rio Grande do Sul, três fácies distintas e transicionais da Formação Rio Bonito (Medeiros et al., 1973): Fácies Superior, Média e Inferior. A sedimentação inferior (basal), arenosa e siltica, com laminação plano ondulada, está presente no Graben Mariana Pimentel. A fácies média com característica fluvial associada a enxurradas

e planície de inundação (ciclotemas), marca um estágio de maior instabilidade deposicional na bacia, também com localidade. A fácies superior apresenta uma sedimentação pelítica, onde estão inseridas as Bacias Carboníferas do Leste do Estado (Butiá-Leão, Charqueadas, Arroio dos Ratos, Faxinal, Sul do Leão, Gravataí, Chico-Lomã e Santa Terezinha) in Souza et al. (1988).

A Falha do Leão secciona a Bacia Carbonífera Butiá-Leão, delimitando na mesma duas porções distintas: Butiá e Leão. Butiá caracteriza-se pela ocorrência de carvão a céu aberto (Pouca profundidade) e subsolo. Leão, por ocorrência de carvão com profundidade somente compatível para lavra de subsolo.

Processos variados tectônico-sedimentares e subsidência diferencial são os principais responsáveis pelas variações bruscas a curtas distâncias e por particularidades locais do pacote carbonoso de certas áreas no interior da jazida.

A fácies superior da Formação Rio Bonito, na Bacia Carbonífera Butiá-Leão, está representada por duas seqüências sedimentares distintas: uma basal, constituída predominantemente por clásticos grosseiros, e outra superior, composta por pelitos finos e camadas de carvão.

3.2.2.1. Seqüência Basal

Constitui-se basicamente de conglomerados, ortoconglomerados, siltitos, lamitos, folhelhos, carvão e, mais raramente, arenitos, interdigitados, geralmente maciços e sem estratificação.

Nesta seqüência ocorrem, por vezes, níveis carbonosos de pequena espessura e de distribuição horizontal descontínua, sem importância econômica.

3.2.2.2. Seqüência Pelítica

Seqüência clástica fina depositada em ambiente lacustre calmo, por vezes perturbada por torrentes relacionadas a período de cheias dos rios e sangas que drenavam a região.

Constituída por pelitos (siltitos, lamitos, folhelhos, argilitos e camadas de carvão). A "pedra areia" ocorre como estéril intermediário ou na transição da seqüência basal para pelítica. Localmente tem-se a presença de margas calcáreas em formas de lentes, tanto na cobertura como no pacote carbonoso.

Com o objetivo de facilitar o planejamento da lavra, foram individualizados na seqüência dois intervalos de sedimentação: cobertura e pacote carbonoso.

- Cobertura

As camadas de carvão são recobertas por pelitos e, em situações especiais, tem-se a presença de arenitos.

Os pelitos predominam em toda a área e não oferecem problemas para descobertura, sendo escarificáveis sem utilização de explosivos.

Dois são os modos de ocorrência dos arenitos:

- Arenitos ou conglomerados bastante coesos resultantes de paleocanais fluviais no interior da turfeira;
- Arenitos finos a médios e menos coesos que os anteriores, relacionados ao rompimento de barreiras litorâneas da transição Rio Bonito-Palermo.

A cobertura varia de 3 a 50 metros aproximadamente.

- Pacote Carbonoso

A espessura do pacote carbonoso minerável no extremo leste da jazida de butiá é bastante variável. O mesmo está condicionado, basicamente, à variação de espessura do estéril intermediário, bem como, à presença de camadas ou bancos marginais interdigitados indiferenciados (camada média). A espessura média do pacote carbonoso é de 2,65 m, com desvio padrão de $\pm 0,80$ m.

A camada superior é extremamente regular, apresentando espessura média de 0,85m, com desvio padrão de $\pm 0,18$ m. Apresenta espessura reduzida nas bordas (da ordem de centímetros). Caracteriza-se por ser uma camada sem leitos de estéril, constituindo-se portanto num único banco de carvão, à exceção de uma lâmina centimétrica (± 5 cm) de *tonstein*, presente em seu terço inferior.

3.3. Mineração

A Mina do Butiá-Leste, em função das características geológicas, é dividida em blocos, sendo que a lavra é feita a céu aberto (*open cast mining*). O sistema de descobertura empregado, consiste em remover a cobertura estéril com o uso de escavadeiras e caminhões e

transportá-lo para o preenchimento do corte adjacente anteriormente minerado. O corte na área onde foi realizado o trabalho, foi minerado através do método *strip mining* com a utilização de escavadeiras e caminhões.

O carvão é desmontado com o auxílio de explosivo em bancadas descendentes. O carregamento é feito em caminhões basculantes por carregadeiras sobre pneus.

O relevo dos cortes minerados preenchidos com estéril é restaurado suavizando-se a topografia para evitar erosões. A drenagem das águas superficiais é feita através da construção de canais que contornam a área de lavra, fazendo o escoamento destas para áreas mais baixas, fora da zona de lavra ou para depósitos de água previamente construídos.

4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

4.1. Medições Eletrônicas de Distância

Os instrumentos que utilizam o sistema eletromagnético de medição de distância são chamados distanciômetros eletrônicos e baseiam-se na emissão e recepção de radiações eletromagnéticas.

4.1.1 Princípios Básicos e Classificação

O princípio de medição de distância utilizado por todos os distanciômetros eletrônicos está baseado na transmissão contínua de um sinal modulado a partir de um ponto em um alinhamento até o ponto onde se quer medir a distância, o sinal é, então, refletido ou retransmitido ao ponto de emissão (Blachut et al., 1979). A diferença de fase entre a referência (transmitida) e o sinal modulado de retorno é medida no instrumento transmissor.

Os distanciômetros eletrônicos são classificados em dois grupos de acordo com o tipo de radiação eletromagnética responsável pela medição:

1 - Distanciômetros de micro-ondas, os quais empregam ondas de rádio que têm comprimento de onda $\lambda_0 = 3$ cm.

2 - Distanciômetros eletro-ópticos que utilizam a luz visível ou radiação infra-vermelho nas medições.

Geralmente, quanto menor o comprimento da onda portadora (sinal) maior a acuracidade do instrumento, sendo que os instrumentos que utilizam micro-ondas apresentam uma acuracidade menor do que os instrumentos eletro-ópticos.

Quanto maior o comprimento de onda utilizado pelos instrumentos de micro-ondas melhor a penetração através do meio de propagação, por exemplo, em nevoeiros ou neblina, sendo instrumentos empregados em levantamentos de longas distâncias. Os distanciômetros eletro-ópticos são úteis apenas com boa visibilidade.

Todos os distanciômetros empregados em topografia, utilizam uma radiação modulada para medição de distâncias. O comprimento de onda do sinal modulado é chamado comprimento de onda padrão, sendo usado como uma unidade de medida.

4.1.2 Instrumentos Eletro-ópticos por Infra-Vermelho

Segundo Doubek (1974) a região do I. V. a atmosfera tem uma forte absorção, com exceção da região 0,72-0,94 μm que é chamada de "janela do I.V.", que implica no uso dessa região em todos os instrumentos.

Os instrumentos dessa categoria usam radiação infra-vermelho como onda portadora, com comprimento de onda de 0,9 μm .

Para instrumentos que utilizam o infra-vermelho a modulação é feita diretamente em amplitude (Doubek, 1974).

O índice de refração padrão usado para o I.V. é tomado geralmente como 1,000280, para uma precisão de 1 ppm a temperatura deve ser obtida com erro inferior a 1 $^{\circ}\text{C}$ e pressão atmosférica com erro inferior a 3 mm Hg.

Instrumentos que utilizam radiação infra-vermelho apresentam pequeno alcance, da ordem de 1 a 3 km, porém, em função da largura do feixe, a pontaria é crítica, o que confere a instrumentos de I. V. a maior precisão possível de todos os outros instrumentos, da ordem do mm.

4.1.3 Medição da Distância

Se um número inteiro exato m de meios-comprimentos de onda está contido na distância medida, a diferença de fase é zero. Nos outros casos, a diferença na fase é traduzida em uma fração U de meios comprimentos de onda e mostrado em unidades lineares (Blachut, 1979).

A distância S entre o transmissor e o refletor é igual a:

$$S = U + m\lambda/2 \quad 4.1.1$$

O comprimento de onda padrão λ é função da frequência de modulação f e da velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas v .

No vácuo, a a velocidade de propagação é constante para todas as ondas eletromagnéticas e é igual a:

$$c = 299.792,5 \text{ km/s}$$

Na atmosfera, a velocidade de propagação é sempre menor que c e pode ser calculada de:

$$v = c / n \quad 4.1.2$$

onde n é o índice de refração do ar, que é uma função da densidade do ar e da onda portadora.

O valor de n vai de $1 = n$ (no vácuo) até aproximadamente $n = 1,000320$ para condições atmosféricas médias.

A fórmula geral para a distância corrigida é:

$$S = [U_1(n_1/n_2) + (m\lambda_1 n_1)2n_2] = S_1(n_1)n_2 \quad 4.1.3$$

onde: $\lambda_1 = \lambda$, fornecido pelo fabricante do equipamento para condições atmosféricas específicas onde $n = n_1$.

A equação é utilizada para corrigir a distância registrada pelo distanciômetro eletrônico quando $n = n_2 \neq n_1$:

$$S_1 = U_1 + m(\lambda_1/2) \quad 4.1.4$$

onde U_1 é uma fração de $\lambda_1/2$.

A Fig. 4.1 mostra, esquematicamente, o procedimento utilizado para a redução da distância ao horizonte.

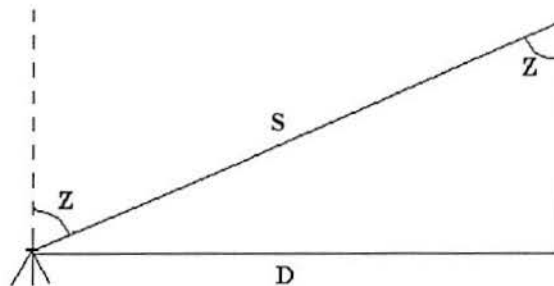


Figura 4.1 - Redução da distância ao horizonte

A equação deduzida da Fig. 4.1 possibilita obter D , a distância horizontal, em função do ângulo zenital Z da seguinte forma:

$$D = S \operatorname{sen}Z \quad 4.1.5$$

onde:

D é a distância reduzida ao horizonte

S é a distância inclinada

Z é o ângulo zenital

As coordenadas dos pontos são obtidas da seguinte forma:

$$N_B = N_A + \Delta N \quad \text{e} \quad E_B = E_A + \Delta E \quad 4.1.6$$

onde ΔN e ΔE são as projeções das coordenadas calculadas a partir do azimute inicial fornecido pelo operador do equipamento:

$$\Delta E = D \operatorname{sen}Az \quad \text{e} \quad \Delta N = D \operatorname{cos}Az \quad 4.1.7$$

N_A e E_A são as coordenadas da estação.

O desnível é calculado pela fórmula:

$$\Delta H = D \operatorname{tg}Z + h - i \quad 4.1.8$$

obtida do procedimento esquemático apresentado na Fig. 4.2, válida para distâncias até 500m,

onde:

ΔH é a diferença de nível entre as estações

D é a distância horizontal

Z é o ângulo zenital

h é a altura do instrumento na estação

i é a altura do prisma

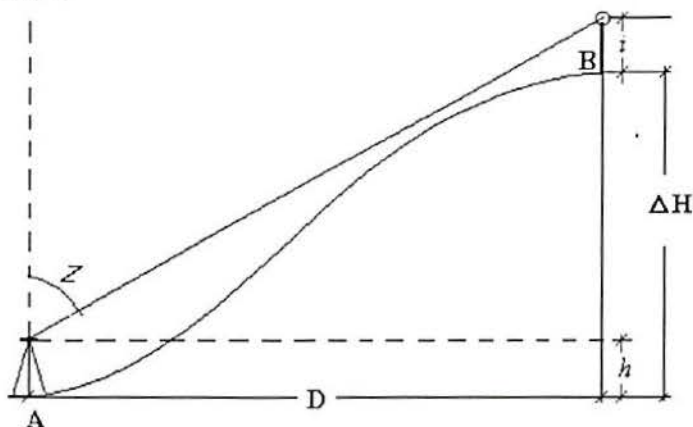


Figura 4.2 - Obtenção do desnível entre os pontos A e B.

A cota do ponto é dada por:

$$C_B = C_A + \Delta H \quad 4.1.9$$

4.1.4 Erros Envolvidos na Medição de Distâncias Eletronicamente

A qualidade das observações está relacionada, segundo Gripp (1987), ao conhecimento das diversas fontes de erros introduzidos nas distâncias observadas. Entre estas fontes, tem-se:

1. Erros na centragem do distanciômetro e refletores;
2. Pontaria inadequada;
3. Erros nas alturas dos instrumentos;
4. Medição sob condições extremas ou em áreas onde fatores externos não previstos afetam o instrumento.
5. Não familiaridade com as condições de operação do instrumento;
6. Erro de alinhamento (problemas no sistema óptico de visada);
7. Erros inerentes ao processo eletrônico de obtenção de distâncias (constantes do instrumento, variação de frequências, etc.).

Muitos destes erros podem ser minimizados por meio de procedimentos adequados e cuidados na obtenção das observações.

Os erros inerentes ao processo eletrônico de obtenção de distâncias podem ser determinados por um processo de calibração.

Os erros na obtenção das condições meteorológicas junto às medições (ou erros no índice de refração n), bem como um desvio da frequência utilizada pelo equipamento levam a um erro de escala.

Para a calibração da frequência é utilizado um freqüencímetro ou através de medidas de campo, determinando-se a influência do erro de frequência somado a outros erros sistemáticos.

Entre outros erros sistemáticos, devem ser conhecidos o erro zero e o erro cíclico. O erro zero ou constante aditiva é a distância entre o centro eletrônico e o centro geométrico de centragem do instrumento (Gripp, 1987). Já o erro cíclico é resultante de erros na determinação da diferença de fase (U).

Todos os erros mencionados são minimizados através de procedimentos de campo, sendo que alguns, como o erro zero, podem ser desconsiderados em instrumentos mais modernos ou são fornecidos pelo fabricante.

4.2. Cálculo da Área de Polígonos Planos

Existem vários métodos para a determinação de áreas planas entre os quais, os métodos gráficos, métodos analíticos e métodos mecânicos.

4.2.1. Métodos Gráficos

Os métodos gráficos não oferecem grande precisão devido aos erros gráficos decorrentes da medição na própria planta (Garcia & Piedade, 1978), além das aproximações necessárias para transformar trechos curvos em segmentos de retas. Estes métodos consistem na divisão da área total em figuras geométricas (triângulos, trapézios, etc.), calcular a área dessas figuras e, posteriormente, calcular a área total.

4.2.2. Método Analítico (Através das Coordenadas Retangulares)

Os métodos analíticos permitem a obtenção do valor da área, apenas através de cálculos o que confere uma maior precisão ao método. Segundo Garcia & Piedade (1978), são utilizados para o cálculo de áreas poligonais por terem sido deduzidas para áreas formadas de lados retos.

4.2.2.1. Método das Duplas Distâncias Meridianas

A distância meridiana (DM) é a distância que vai do meio de um alinhamento, representado graficamente através de eixos de coordenadas, até o eixo meridiano ou eixo dos "Y". A dupla distância meridiana (DDM) é o dobro do valor de DM que será a longitude do ponto no extremo do alinhamento. De acordo com Garcia & Piedade (1978) a fórmula utilizada é:

$$DDM_n = DDM_{n-1} + \text{long } p_{n-1} + \text{long } p_n \quad 4.2.1$$

onde p é o ponto com índice n ou n-1.

Para o primeiro e o último alinhamento a DDM será a longitude parcial, sendo que para não se trabalhar com valores negativos, inicia-se pelo ponto mais oriental, pois o método foi deduzido com a figura representada do lado direito dos eixos das latitudes.

Segundo Espartel (1982), para o cálculo da área (Fig. 4.3) multiplica-se a projeção de cada lado pela abcissa dupla do mesmo, e dá-se os sinais aos produtos de acordo com os sinais dos fatores; a semi-soma algébrica desses produtos representa a área do polígono.

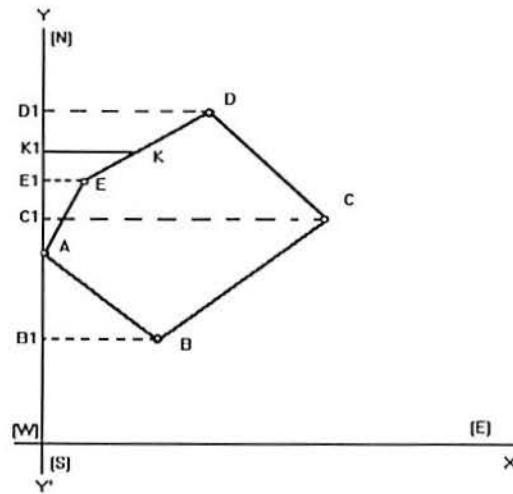


Figura 4.3 - Regra geral para o cálculo da área da poligonal.

Fonte: Espartel (1982) p.234

Os produtos referidos são chamados áreas duplas, visto que cada um deles representa o dobro da área de um trapézio ou de um triângulo. O sinal do resultado pode ser negativo, mas, como isso indica simplesmente a posição relativa das superfícies com sinais positivos e negativos, pode ser desprezado, e deve-se tomar a diferença aritmética entre a soma dos produtos positivos e negativos.

4.2.2.2. Método das Coordenadas (Gauss)

Através deste método utiliza-se as coordenadas totais de acordo com a fórmula (Garcia & Piedade, 1978):

$$S = (-x_1y_2 - x_2y_3 - x_3y_4 - \dots - x_ny_0 + x_2y_1 + x_3y_2 + x_4y_3 + \dots + x_0y_n)/2 \quad 4.2.2$$

a qual, para fins de facilidade de memorização, pode ser disposta com as longitudes totais sobre as respectivas latitudes totais, fazendo-se a multiplicação em cruz, respeitando-se os sinais das coordenadas e adotando-se o critério de que numa direção os produtos serão positivos e na outra negativos, fechando com as coordenadas totais do ponto de origem.

A avaliação da área de um contorno poligonal fechado, pode ser resolvido além dos métodos apresentados anteriormente, pelos processos descritos a seguir:

- Processo Aritmético

Consiste em medir diretamente no terreno todos os elementos necessários à divisão do polígono em figuras geométricas perfeitamente definidas (Fig. 4.4), cujas áreas são avaliadas

pelas fórmulas da geometria elementar. A soma das áreas parciais representará a superfície total do polígono.

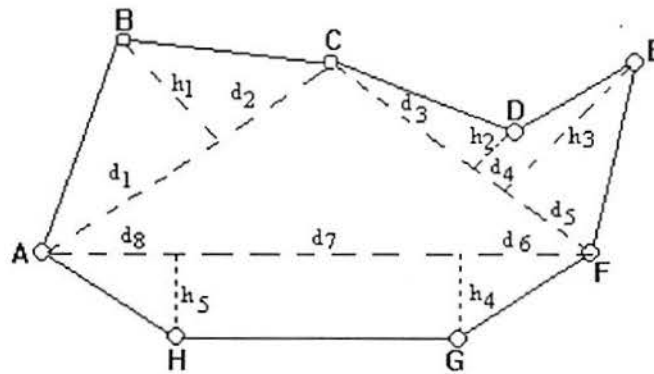


Figura 4.4 - Representação gráfica do processo aritmético.

Fonte: Espartel (1982) p.239

- Processo Geométrico

Mede-se no terreno somente os elementos indispensáveis para o desenho da planta em escala reduzida do polígono levantado (Fig. 4.5). Em seguida decompõe-se o polígono desenhado em figuras geométricas, nas quais se determinam os dados para o cálculo das áreas parciais.

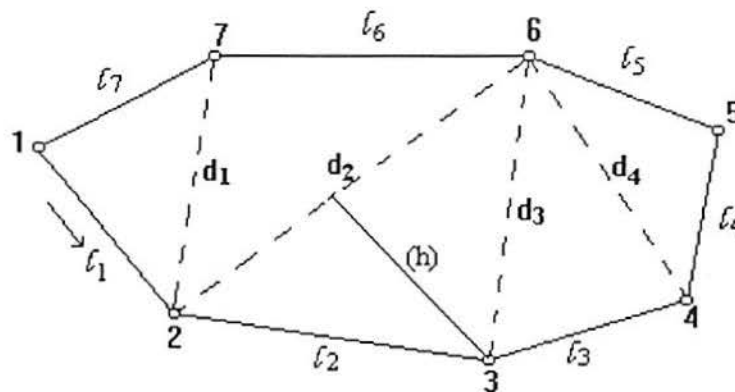


Figura 4.5 - Polígono decomposto em figuras geométricas para o cálculo da área.

Fonte: Espartel (1982) p.239

4.2.3. Métodos Mecânicos. Planímetros

Os métodos mecânicos para avaliação de áreas, são baseados no emprego de instrumentos, entre os quais destacam-se os planímetros ou integradores (Fig 4.6), o vidro quadriculado e a balança de precisão. A precisão desses instrumentos varia conforme a extensão da superfície a avaliar; desce a 1/100 para as pequenas superfícies, e atinge a 1/1000 nas superfícies de 200 cm², ou superiores no desenho.

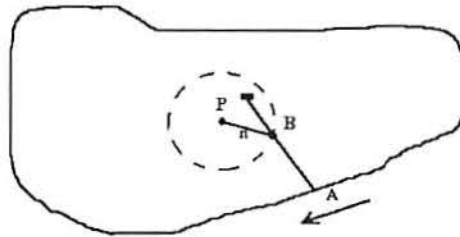


Figura 4.6 - Representa a operação de um planímetro polar com polo no interior da área.

Fonte: Espartel(1980) p.251

Técnicas empregadas na utilização dos principais métodos mecânicos:

a) Processo da Quadrícula - Permite contar o número de quadrados e de frações em vidro ou papel transparente, milimetrado ou duplo-milimetrado com relativa exatidão;

b) Processo das Pesadas ou da Balança - Consiste em gravar e recortar numa folha de alumínio, latão fino, ou mesmo cartolina uniforme a superfície em escala a avaliar, pesá-la com precisão e comparar com o peso, no mesmo material, de outra superfície padrão inteira cuja relação resulta na área aproximada;

c) Planímetro - São instrumentos compostos de duas hastes articuladas, sendo que a extremidade de uma destas é fixa em um ponto (polo), na extremidade oposta (na outra haste), há uma ponta chamada traçador, que percorre o perímetro das áreas a avaliar, nessa segunda haste está ligado rigidamente um tambor graduado (integrante) que está em comunicação com um contador de voltas.

4.2.4. Métodos para Avaliação das Áreas Extrapoligonais

Basicamente consiste na decomposição dos contornos curvilíneos da área a ser avaliada em outros de compensação (Fig. 4.7), considerando as porções curvas entre duas ordenadas como linhas retas, avaliando a área, de acordo com Espartel (1982), pela fórmula 4.2.3, comum para o caso de trapézios desiguais:

$$A = 1/2[x_1(y_0+y_1)+x_2(y_1+y_2)+...] \quad 4.2.3$$

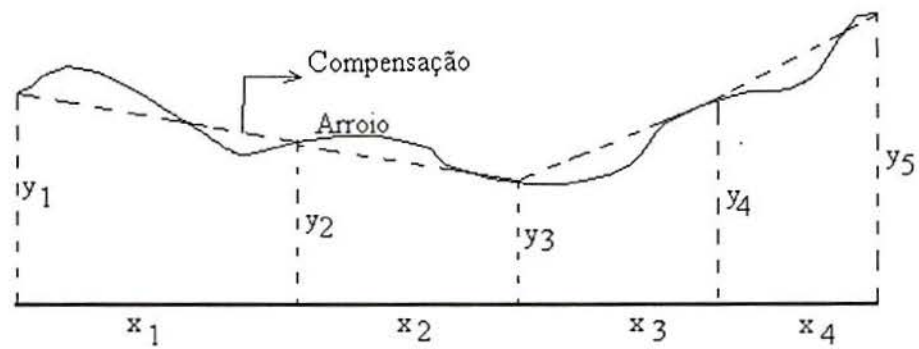


Figura 4.7 - Processo de cálculo de áreas extrapolygonais.

Fonte: Espartel (1982) p.253

Não havendo forte sinuosidade da linha curva limite, usa-se as fórmulas baseadas na divisão da superfície plana em trapézios a intervalos regulares, empregando uma das fórmulas clássicas de Bezout e Simpson (Espartel, 1982).

4.2.4.1. Método dos Trapézios (Fórmula de Bezout)

Se a curva limite não apresentar uma sinuosidade considerável, divide-se a superfície em n partes iguais (Fig. 4.8), ficando esta decomposta em trapézios retângulos. A área será (Espartel, 1982):

$$A = 1/2(y_0 + y_1)x + 1/2(y_1 + y_2)x + \dots + 1/2(y_{n-1} + y_n)x \quad 4.2.4$$

$$\text{ou } A = \left(\frac{y_0 + y_n}{2}\right)x + \sum y_r \quad 4.2.5$$

que é a fórmula de Bezout, na qual $\sum y_r$ exprime a soma de todas as ordenadas intermediárias.

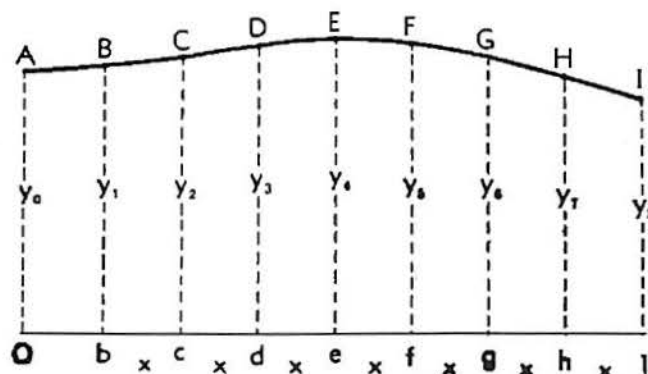


Figura 4.8 - Decomposição da área em trapézios iguais de acordo com a fórmula de Bezout.

Fonte: Espartel (1982) p.253

4.2.4.2. Método de Simpson

Considerando ainda a Fig 4.8, porém, dividida em um número par de figuras parciais, segundo Espartel (1982), toma-se as duas primeiras figuras parciais (Fig. 4.9) limitadas por a - c e ABC e traça-se ordenadas m e n a $2/3x$, resultando em:

$$A = x/3[(y_0 + y_n) + 4\sum y_i + 2\sum y_p] \quad 4.2.6$$

que é a fórmula de Simpson, na qual $4\sum y_i$ é o quádruplo da soma das ordenadas ímpares e $2\sum y_p$ é o duplo da soma das ordenadas pares, ambas intermediárias.

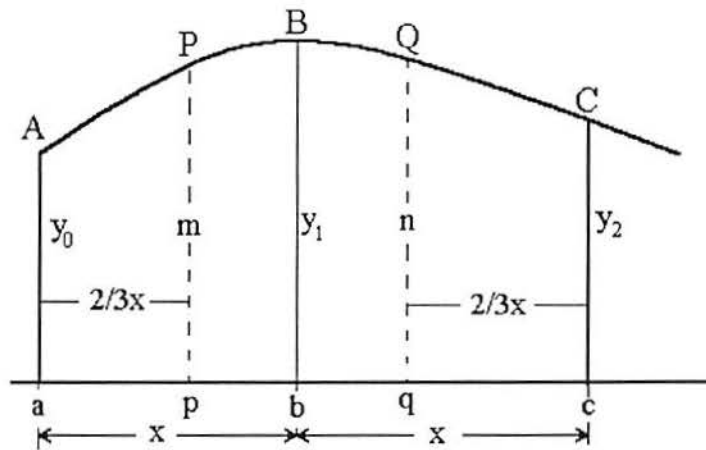


Figura 4.9 - Mostra a individualização de um dos trapézios correspondentes à Fig. 4.8.

Fonte: Espartel (1982) p.255

4.2.4.3. Métodos de Integração Numérica

As fórmulas apresentadas acima são casos particulares de integração numérica para variáveis discretas, a seguir são apresentados os métodos numéricos de avaliação de áreas através de polinômios interpoladores.

A integração numérica, também chamada quadratura (Press et al. 1986), tornou-se aplicável analiticamente a partir do surgimento dos computadores uma vez que, manualmente, as fórmulas aplicáveis eram operacionalmente difíceis de empregar. As fórmulas de Newton-Cotes para integração numérica são um caso especial da aplicação da integral:

$$I = \int_a^b f(x) dx \quad 4.2.7$$

que é precisamente a solução da equação diferencial para o valor $I \equiv y(b)$ ou seja:

$$\frac{dy}{dx} = f(x) \quad 4.2.8$$

para as condições $y(a) = 0$.

O método da quadratura é baseado na soma dos valores do integrando que é uma função obtida pela aproximação numérica de um polinômio a partir de uma tabela de valores (Cunha, 1993) que pode vir ou não contaminada de erros, dentro de um intervalo definido.

- Fórmulas de Newton-Cotes

As fórmulas de Newton-Cotes para integração numérica, de acordo com Cunha (1993), usam pontos de integração igualmente espaçados. Dentre estas destacam-se as fórmulas clássicas para abscissas igualmente espaçadas, onde é determinada a área sob a curva no intervalo fechado x_0 e x_{N+1} .

As fórmulas fechadas avaliam a função dentro de um intervalo fechado enquanto as fórmulas abertas resolvem a função considerando um intervalo aberto sendo aplicadas quando o algoritmo está dentro deste intervalo.

A partir do ajuste de uma função polinomial a um conjunto de valores, três regras de integração numérica são normalmente empregadas, para a avaliação da área sob a curva.

A seqüência apresentada abaixo está relacionada ao aumento do número de intervalos, fornecendo soluções exatas para polinômios de ordem maior, o que não significa que o aumento da ordem do polinômio produza necessariamente um aumento na acuracidade da avaliação (Press et al., 1986).

Em outras palavras, a maior precisão é obtida em função de um melhor ajuste da curva quando aumenta o número de intervalos.

Conforme Press et al. (1986), a fórmula clássica para integração da função cujo valor é conhecido dentro de um intervalo com pontos igualmente espaçados (malha regular) é a Regra Trapezoidal:

$$\int_{x_1}^{x_2} f(x) dx = h \left[\frac{1}{2} f_1 + \frac{1}{2} f_2 \right] + O(h^3 f'') \quad 4.2.9$$

O termo de erro $O(h^3 f'')$ significa que a resposta real difere do valor estimado por uma quantidade que é produto de algum coeficiente numérico multiplicado por h^3 e pela derivada

de 2ª ordem da função dentro do intervalo de integração (Press et al., 1986), sendo uma fórmula exata inclusive para polinômios de grau 1.

Regra de Simpson:

$$\int_{x_1}^{x_2} f(x)dx = h\left[\frac{1}{3}f_1 + \frac{4}{3}f_2 + \frac{1}{3}f_3\right] + O(h^5 f^{(4)}) \quad 4.2.10$$

A regra de Simpson é uma fórmula exata para polinômios de grau 2, porém, por sua simetria, existe uma compensação de áreas tornando-a exata para polinômios de grau até 3 inclusive. Pode ser calculada usando apenas uma parábola que interpole três pontos do polinômio e o valor será exato qualquer que seja o intervalo de integração.

Regra de Simpson 3/8:

$$\int_{x_1}^{x_2} f(x) = h\left[\frac{3}{8}f_1 + \frac{9}{8}f_2 + \frac{9}{8}f_3 + \frac{3}{8}f_4\right] + O(h^5 f^{(4)}) \quad 4.2.11$$

Aqui $f^{(4)}$ é a derivada de ordem 4 da função $f(x)$, avaliada em algum lugar desconhecido do intervalo. Esta fórmula também é exata para polinômios de grau 3 inclusive.

4.3. Cálculo do Volume de Sólidos Irregulares

4.3.1. Método das Seções Paralelas

Em cortes de mineração ou em cortes de estrada, os volumes envolvidos normalmente são calculados utilizando o método das seções paralelas. Em Geral, nestes casos, o corpo ou sólido a ser avaliado apresenta uma forma irregular.

A área de cada seção pode ser obtida por planimetria manual, digitalização computadorizada ou pela regra de Simpson. O volume associado a cada seção poderá ser estimado extendendo sua área até a metade da distância entre duas seções adjacentes para cada lado ou ainda, calculada a área média entre duas seções adjacentes, a qual é multiplicada pela distância entre elas. A Fig. 4.10 mostra o método e uma correção que deve ser feita nas extremidades do corpo (Annels, 1991). Essa correção, alternativamente, pode ser substituída pelo aumento do número de seções, quando as extremidades do corpo tornam-se mais estreitas.

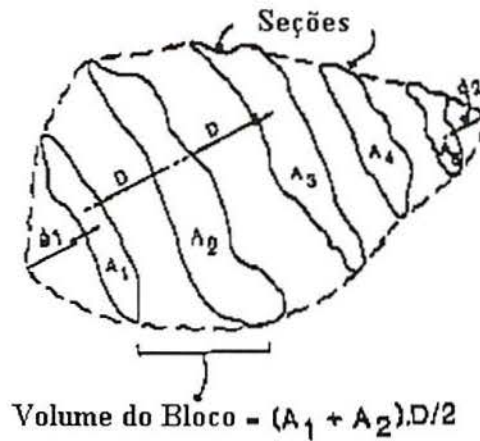


Figura 4.10 - Método das seções paralelas. Correção utilizado nas extremidades do corpo para determinação do volume.

Fonte: Annels (1991) p.134

4.3.2. Fórmula Prismoidal

Consiste na aplicação de uma fórmula prismoidal na qual três seções (Fig. 4.11) são usadas para determinar o volume do bloco entre as seções paralelas, sendo que neste caso a seção central é ponderadamente dominante. O procedimento pode ser repetido para as outras seções, observando-se também a correção que deve ser feita nas extremidades.

Cubagem por Seções Paralelas



Figura 4.11 - Aplicação da fórmula prismoidal.

Fonte: Annels (1991) p.135

4.3.3. Método do Prismóide

A representação do terreno através de seções não é perfeita, pois o terreno normalmente é irregular, enquanto as seções apresentam trechos retilíneos. A aproximação é, porém, boa quando é feita de 5 em 5 metros (Garcia & Piedade, 1978), o que, em mineração, não é um procedimento operacional.

Desta forma, utilizando-se valores interpolados de um levantamento topográfico, ou seja, através do adensamento e regularização de uma malha de pontos, pode-se dividir o sólido a ser avaliado em um determinado número de prismas retangulares ou quadrados, cujas bases superior e inferior, correspondem a uma fração da área da superfície superior e inferior respectivamente, considerando a diferença entre as cotas da superfície superior e inferior no centro da área da base, a altura do prisma. Esse prisma é determinado pelas dimensões planas da malha de "amostragem", a partir de pontos coletados no terreno ou interpolados adequadamente para um adensamento da malha original.

A Fig. 4.12 mostra esquematicamente a utilização dos prismas na avaliação do volume entre duas superfícies. O volume total do sólido será a soma dos volumes de cada prisma utilizando como espessura do sólido a altura média de cada prisma individualmente. A área da base de cada prisma, terá as dimensões da malha interpolada ou medida, sendo que a precisão da avaliação do volume aumenta com a redução da área da base.

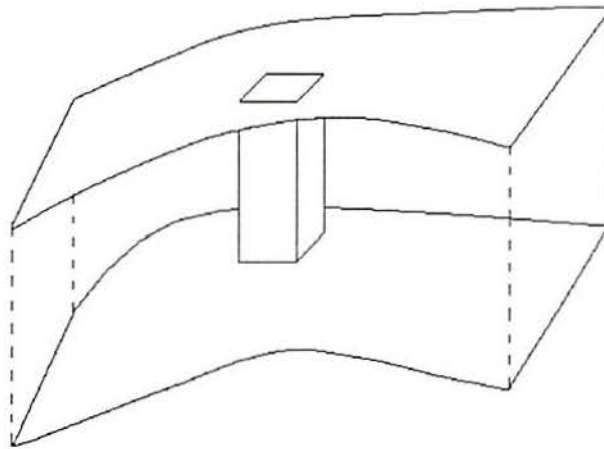


Figura 4.12 - Representação da forma de cálculo do volume através de prismóides.

4.3.4 - Métodos Numéricos

De acordo com Ferguson (1988), o volume de um sólido pode ser calculado estendendo-se o método da integração para o cálculo de áreas sob curvas, descritos no subitem 4.2.4.3, através da rotação da curva em relação a um eixo.

O volume gerado pela rotação de uma curva $y = f(x)$ em relação ao eixo x , entre os limites a e b , é dado por (Ferguson, 1988):

$$\int_a^b \pi y^2 dx \quad 4.3.4$$

Similarmente, o volume gerado pela curva $y = g(y)$, ao redor do eixo y entre os limites c e d é dado por:

$$\int_c^d \pi x^2 dx \quad 4.3.4$$

Em geologia e mineração, os volumes são geralmente expressos em termos de sistemas de coordenadas cartesianas tridimensionais. Uma maneira de definir matematicamente a superfície a ser avaliada é através da aplicação da técnicas de análise tais como *trend surface analyses* que é uma forma de análise de regressão múltipla (Harbaugh & Merriam, 1968). Este método produz superfícies na forma de mapas de contorno, que são descritas por séries polinomiais inteiras que, em geologia, vão desde funções lineares até polinômios do sexto grau (Ferguson, 1988).

Para o cálculo de volumes, a superfície é descrita por um polinômio da forma $z = f(x,y)$, onde x e y representam as coordenadas geográficas e z a espessura. Aqui o volume em uma determinada região R no plano (x,y) é dado pela dupla integração (Ferguson, 1988):

$$\iint_R z \, dx dy = \iint_R f(x,y) \, dx dy \quad 4.3.5$$

Em muitos casos, é mais simples encontrar uma aproximação numérica para integrar a função. De acordo com Ferguson (1988), pode ser encontrada uma solução numérica, dividindo a área de interesse em um número convenientemente dimensionado de células e calcular o valor de z no centro de cada célula, substituindo as coordenadas na função. O volume é encontrado através da soma para todas as células do produto entre a área da célula e a espessura. Este é o princípio utilizado no método do prismóide, descrito no item 4.3.3, utilizando porém, uma distribuição discreta de dados para representar a superfície através de uma malha de pontos, quando não se tem uma função matemática para defini-la.

4.4. Geoestatística Aplicada

4.4.1. Considerações Gerais

Os corpos geológicos, ou qualquer volume de rocha selecionado para estudo, apresentam como principal fator de variabilidade, a sua forma ou arquitetura (Grossi Sad, 1986), sendo classificados de maneira geral, segundo esta particularidade. O estudo de um jazimento mineral depende da definição precisa da forma do corpo de minério através de modelos que servirão para caracterizar e quantificar a jazida em estudo.

Para avaliar-se quantitativamente algum tipo de informação, incluindo valores que não podem ser medidos, existe a necessidade de utilizar-se modelos, os quais podem ser construídos de diversas formas.

Em se tratando de um depósito mineral, por exemplo, pode-se utilizar procedimentos que possibilitem dividir o corpo de minério em zonas, seguindo determinados critérios, dentro dos quais os parâmetros são tratados de maneira uniforme. Esse é o método mais simples e o que produz erros mais grosseiros com respeito ao comportamento real da mineralização.

Outra forma de modelar um corpo mineral, é ajustar os parâmetros envolvidos através de uma função matemática. São técnicas de interpolação empregadas para a produção de mapas de contorno, representando a variável em estudo (teor, espessura, acumulação, etc...). Essa técnica, no entanto, deve ser aplicada considerando-se implicitamente que a superfície a ser modelada apresenta um comportamento suficientemente uniforme, o que pode estar em contradição com o fenômeno real.

Variáveis como teor, espessura, acumulação, cota, permeabilidade, tendem a apresentar uma distribuição consideravelmente dispersa em pequena escala. Suas variações espaciais são tão complexas que não parecem ajustar-se representativamente em termos de funções matemáticas ordinárias.

A maioria das vezes porém, um estudo mais apurado revela que estas variáveis não são completamente aleatórias. Pontos vizinhos parecem estar relacionados por conjuntos de correlações complexas, que podem ser zonais, onde os teores (valores) podem ser altos ou baixos, padrões sistemáticos, *clusters*, efeitos de orientação, etc.... Para enfatizar a natureza particular dessas variáveis que combinam dois aspectos aparentemente contraditórios:

- um aspecto aleatório, abrangendo irregularidades locais;
- um aspecto estrutural que reflete feições globais do fenômeno.

estas são denominadas de "Variáveis Regionalizadas" (Matheron, 1971).

A teoria descrita neste item teve seu ponto de partida no tratado desenvolvido por Georges Matheron durante a década de 60 sobre a Teoria das Variáveis Regionalizadas. A aplicação desta teoria aos estudos geológicos e problemas envolvendo a mineração, tornou-a popular sob a denominação de Geoestatística (Clark, 1979).

A geoestatística está baseada na teoria das variáveis regionalizadas, que podem ser entendidas como funções que variam no espaço, com certa aparência de continuidade (Guerra, 1988), isto é, são variáveis que apresentam uma relação com a posição espacial que ocupam.

De acordo com Guerra (1988), as variáveis regionalizadas possuem características qualitativas que estão ligadas ao fenômeno natural que elas representam, como o relevo por exemplo. Estas características são:

- a localização
- a continuidade
- a anisotropia

No desenvolvimento deste trabalho a Teoria das Variáveis Regionalizadas é aplicada para obter o melhor estimador não tendencioso através da técnica da Krigagem.

A aplicação da geoestatística para estimar reservas de minério é bastante conhecida, entretanto essa técnica de estimação pode ser usada sempre que forem feitas medições contínuas em amostras em determinada localização do espaço ou tempo, onde os valores são afetados pela sua posição e sua relação com valores de pontos vizinhos.

Neste trabalho, a técnica de Krigagem foi utilizada para estimar os valores de cotas topográficas, com o objetivo de adensar uma malha amostral esparsa para a avaliação do volume de *overburden* sobre a primeira camada de carvão na área da jazida estudada.

Os métodos estatísticos, permitem a estimação da média m e o cálculo dos limites de confiança para os valores. Estes são baseados na independência dos valores das amostras e da aleatoriedade.

Quando um razoável número de amostras é obtido dentro de um depósito mineral, são executadas avaliações locais ou estimação de blocos de minério dentro do depósito. As considerações com respeito à independência dos valores devem ser rejeitadas e avaliações locais somente são possíveis se houver uma relação entre o valor de uma amostra e o valor considerado do minério nas vizinhanças desta amostra (Rendu, 1981).

As considerações acima levam a concluir que o valor $x(z)$ de uma amostra centrada em um ponto z , tem propriedades que são função deste ponto (Rendu, 1981) de sorte que existe uma certa estrutura espacial na distribuição das amostras. Observa-se que ocorre, desta forma, um fenômeno regionalizado e que deve-se tratar $x(z)$ como uma variável regionalizada. Isto pode ser feito estatisticamente por um modelo que represente a estrutura espacial do fenômeno.

É importante perceber que um modelo estatístico é obtido pela análise das propriedades de valores de amostras conhecidas e será usado para a estimação de blocos de

valores desconhecidos, portanto, tal inferência estatística é válida apenas se o modelo desenvolvido representa as propriedades, tanto da seção amostrada do corpo de minério, como da seção a ser avaliada. Para tanto, deve ser satisfeita alguma condição de estacionaridade e o modelo deve ter o mínimo de condições restritivas.

4.4.2. Covariância e Coeficiente de Correlação

Considerando duas variáveis aleatórias x e y sendo que x poderia ser o teor de cobre na posição z e y o teor de cobre na posição $z + h$, onde h é a distância entre as duas amostras e supondo haver uma relação entre z e y , a maneira de determiná-la é através da covariância de z e y definida assim:

$$\sigma_{xy} = \text{Cov}[xy] = E[(x - E[x])(y - E[y])], \quad 4.4.1$$

O coeficiente de correlação entre x e y é:

$$\rho_{xy} = \frac{\text{Cov}[xy]}{\sigma_x \sigma_y} \quad 4.4.2$$

Considerando n observações de x e y , e sendo x_i e y_i os valores de x e y obtidos na i ésima observação ($i = 1, 2, \dots, n$). São usados os seguintes estimadores:

$$\text{estimador de } \mu_x: \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\text{estimador de } \mu_y: \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

$$\text{estimador de } \sigma_x^2: s_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

$$\text{estimador de } \sigma_y^2: s_y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

$$\text{estimador de } \sigma_{xy}: s_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

Os estimadores anteriormente referidos, são ditos não tendenciosos. O estimador de ρ_{xy} geralmente usado é r_{xy} , onde:

$$r_{xy} = s_{xy} / s_x s_y \quad 4.4.3$$

Este estimador é tendencioso a menos que $\rho_{xy} = 0$.

O coeficiente de correlação varia de -1 a +1, sendo que, quando apresentam valores de -1 ou +1 indicam uma relação linear entre x e y , segundo Rendu (1981), quando o coeficiente de correlação apresenta o valor 0 não há relação linear entre as variáveis.

4.4.3. Covariograma e Correlograma

Considerando o valor da variável regionalizada x , localizada em um ponto z qualquer do corpo de minério ($x(z)$), e $x(z+h)$ é o valor de x em um ponto $z+h$ a uma distância h de z , o (auto) covariograma entre $x(z)$ e $x(z+h)$ para um dado h é (Rendu, 1981) :

$$\sigma(h) = E\{ \{x(z) - E[x(z)]\} \{x(z+h) - E[x(z+h)]\} \}$$

onde $E[.]$ é o valor esperado (esperança matemática) de $[.]$ onde ambos z e $z+h$ pertencem ao mesmo corpo de minério.

Sendo σ_1^2 a variância de $x(z)$ e dada por $\sigma_1^2 = \{ \{x(z) - E[x(z)]\}^2 \}$ e σ_2^2 a variância de $x(z+h)$ dada por $\sigma_2^2 = \{ \{x(z+h) - E[x(z+h)]\}^2 \}$, o coeficiente de correlação entre $x(z)$ e $x(z+h)$ é:

$$\rho(h) = \sigma(h) / \sigma_1 \sigma_2.$$

A função $\rho(h)$ é o (auto) correlograma da variável regionalizada x .

Sendo σ^2 a variância de x , para $h=0$ tem-se $\sigma(h) = \sigma^2$ e $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma^2$, e portanto, $\rho(0) = 1$. Isso indica que se fosse possível tomar duas amostras idênticas exatamente no mesmo ponto, e se não houvesse erro de amostragem, as amostras teriam o mesmo valor.

Na prática, porém, não é possível obter-se duas amostras exatamente no mesmo local, mas, se for analisada a mesma amostra duas vezes para determinada variável, certamente não serão obtidos os mesmos valores, devido aos erros de determinação. Caso, por exemplo, duas amostras sejam tomadas próximas uma da outra dentro de um corpo mineralizado, os valores obtidos serão diferentes, não somente pelo erro de amostragem, mas também pela variação na mineralização em microescala, ou devido a microestruturas que, na prática, não podem ser detectadas. Em consequência, a descontinuidade é, normalmente, observada no covariograma e no correlograma próximo da origem, o que é chamado "efeito pepita", dado por:

$$N = \sigma^2 - \lim_{h \rightarrow 0} [\sigma(h)] \quad 4.4.4$$

Existem situações onde não é observado o efeito pepita, por exemplo, se $x(z)$ é a espessura de um depósito acamadado e a capa e a lapa são superfícies contínuas uniformes.

4.4.4. Variograma e Semivariograma

Uma outra forma para medir a relação entre os valores de amostras separadas por uma distância h , é a função variograma (Rendu 1981). Por definição, o valor do variograma $2\gamma(h)$ para uma dada distância h , em um corpo de minério, é a diferença ao quadrado esperada entre os valores das amostras separadas por h ;

$$2\gamma(h) = E\{[x(z)-x(z+h)]^2\} \quad 4.4.5$$

A função semivariograma é:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E\{[x(z)-x(z+h)]^2\} \quad 4.4.6$$

O variograma é, também, uma medida do erro quadrático médio (ou variância) da estimativa de $x(z+h)$ para $x(z)$, ao considerar-se que uma amostra na posição $z+h$ tem o mesmo valor que na posição z , comete-se um erro $x(z) - x(z+h)$ cujo valor médio quadrático é $2\gamma(h)$.

A relação entre covariograma e semivariograma é dada por $\gamma(h) = \sigma^2 - \sigma(h)$. Deve-se notar que pela definição de semivariograma, o valor de $\gamma(h)$ para $h=0$ é $\gamma(0) = 0$. Na prática, é freqüente uma descontinuidade na origem que é igual ao "efeito pepita" N .

O estimador $\hat{\gamma}(h)$ do semivariograma $\gamma(h)$ é:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [x(z_i) - x(z_i+h)]^2. \quad 4.4.7$$

O semivariograma pode ser calculado em uma, duas ou três dimensões. Neste trabalho foram considerados variogramas em duas dimensões.

Se as amostras disponíveis estão localizadas em planos (cotas) ou em volumes (teores dentro de um corpo de minério), é importante calcular o semivariograma (covariograma) em mais de uma direção para possibilitar a detecção de qualquer anisotropia nas propriedades estatísticas das variáveis.

O semivariograma pode ser calculado abrangendo todos os valores amostrados e em todas as direções (onidirecional) e ainda ser calculado em quatro direções principais indicando assim a existência ou não de anisotropia em determinada direção.

Com relação à expressão (4.4.7), de acordo com Guibal (1989), z e $z + h$, referem-se aos pontos de dados em um espaço n -dimensional ($n=1, 2$ ou 3), por exemplo, quando $n=2$ (plano), z denota o ponto com coordenadas (z_1, z_2) e h é um vetor com coordenadas $(h_1$ e $h_2)$. Considerando que no espaço bidimensional o variograma é função das coordenadas polares h_1 e h_2 , γ é função do módulo de h , de h e do ângulo polar α :

$$\gamma(h) = \gamma(h_1, h_2) = \gamma(|h|, \alpha) \quad 4.4.8$$

Para um α fixo, o variograma indica quão diferentes, entre si, se tornam os valores, à medida que aumenta a distância entre os pontos onde estes são medidos.

Quando α varia, os variogramas representam as feições direcionais do fenômeno considerado.

O gráfico de $\gamma(h)$ versus h , geralmente, apresenta o seguinte comportamento:

- Inicia em 0 (para $h=0$, $x(z) = x(z + h)$)
- aumenta com h
- aumenta ou torna-se estável próximo de um determinado nível (alcance).

4.4.4.1. Propriedades dos Variogramas

- *Range* (alcance) ou zona de influência

De acordo com Guibal (1989) o aumento mais ou menos rápido do variograma reflete a taxa de deterioração da influência de uma amostra sobre os pontos mais e mais distantes no campo. Quando o variograma atinge um determinado valor limite (chamado *sill* ou patamar) significa que há uma distância além da qual $x(z)$ e $x(z + h)$ não há mais correlação positiva. Essa distância é chamada *range* ou alcance. Quando h atinge o *range*, a correlação linear entre $x(z)$ e $x(z + h)$ torna-se nula.

O alcance, dá um significado preciso para o conceito de "zona de influência" de uma amostra. Este parâmetro depende da direção e pode haver vários alcances refletindo diferentes escalas de estruturas.

O valor que limita o alcance é exatamente a variância da população dos pontos amostrados. Nem todos os variogramas atingem um patamar, podendo ocorrer variogramas que não atingem um patamar, tornando indefinido o alcance.

- Comportamento próximo à origem

Observações com relação ao comportamento do variograma próximo à origem trazem informações com relação à continuidade e regularidade espacial (Guibal, 1989). A representação gráfica da função variograma, apresenta as características da variável quanto aos aspectos de continuidade e regularidade de acordo com a forma da curva:

a) Forma parabólica - Identifica uma variável regionalizada com alta continuidade e diferenciabilidade, indicando que esta pode estar associada a uma tendência de comportamento.

b) Forma linear - Indica que a variável é contínua mas não diferenciável, sendo desta forma, menos regular.

c) Descontinuidade na origem - Indica o "Efeito Pepita", quando h tende a zero $\gamma(h)$ tende para uma constante diferente de zero. Isto significa que a variável não é contínua e assim altamente irregular.

d) Reta paralela ao eixo dos x - Indica aleatoriedade pura, ou seja, $x(z)$ e $x(z + h)$ têm correlação nula para quaisquer dois pontos distintos, não importando a proximidade entre eles. Esse é o caso limite da total ausência de estrutura.

- Anisotropia

Como o argumento h do variograma é um vetor, o variograma pode ser calculado ao longo de várias direções no espaço, considerando, em média, os quadrados dos desvios de pares de pontos que têm uma orientação definida. Quando $\gamma(h)$ não varia com a direção a estrutura espacial é dita isotrópica.

Segundo Guibal (1989), a anisotropia pode ser classificada em duas categorias:

a) Anisotropia elíptica (também chamada anisotropia geométrica) - É o caso onde a anisotropia pode ser corrigida pela transformação das coordenadas. Isto é particularmente simples se os eixos principais da elipse coincidem com os eixos coordenados.

Deve-se, porém, considerar o variograma em mais do que duas direções perpendiculares desde que seja possível desconsiderar os eixos principais de anisotropia e levar em conta o variograma isotrópico aparente.

Quando os eixos principais da elipse não coincidem com os eixos coordenados, a função torna-se um pouco mais complexa, pois envolve o ângulo φ entre o eixo x e o eixo principal ox' da elipse.

b) Anisotropia estratificada - É um tipo mais complicado de anisotropia que ocorre, por exemplo, no espaço tridimensional em que a direção vertical representa um comportamento particular, ocorre uma variação maior transversalmente ao estrato do que dentro do estrato. Um modelo comum decompõe o variograma em dois termos:

- Presença de tendências - A teoria mostra que para grandes distâncias entre pares os variogramas crescem mais lentamente que uma parábola. Mais especificamente:

$$\gamma(h)/h^2 \rightarrow 0 \quad \text{e} \quad h \rightarrow \infty \quad 4.4.9$$

Na prática entretanto, o variograma parece crescer até mais rápido que h^2 indicando assim a presença de uma tendência.

- Estruturas aninhadas - Superposição de diferentes escalas de variação.

- Periodicidade - Variogramas, assim como covariâncias podem demonstrar periodicidade, porém, é importante verificar se estas são reais ou aparentes, especialmente em se tratando de variáveis espaciais. O fenômeno tempo apresenta realmente períodos, as variáveis da natureza, e em consequência as atividades humanas sofrem influência do ciclo dos dias e anos. Porém, no espaço, não há claramente uma definição de período devido à irregularidade do ambiente natural.

- Efeito buraco - Refere-se a presença de um ou vários picos no variograma (que poderiam ser buracos na covariância). O efeito buraco denota uma tendência de áreas com valores altos estarem cercadas por áreas de valores baixos. Deve-se ter o cuidado de não confundir o real efeito buraco com flutuações de amostragem.

4.4.4.2. Cálculo do Variograma

- Ao longo de uma Linha

A determinação do variograma pode ser reduzido ao cálculo ao longo de uma linha, exemplo: variograma ao longo de furos de sondagem, variograma ao longo de um perfil de sísmica, etc. Se os pontos estão regularmente espaçados ao longo de uma linha, o variograma pode ser computado para *lags* múltiplos de h através da fórmula:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [x(z_i) - x(z_i + h)]^2 \quad 4.4.12$$

onde:

- $x(z_i)$ são os dados
- z_i e $z_i + h$ são as posições dos dados
- $n(h)$ é o número de pares de pontos realmente considerados no somatório, se algum dado é perdido, o par é simplesmente ignorado.

No caso de vários perfis, pode-se calcular o variograma médio para cada grupo de linhas paralelas ao longo de uma direção.

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{\sum_j n_j(h) \hat{\gamma}_j(h)}{\sum_j n_j(h)} \quad 4.4.13$$

onde:

$\hat{\gamma}_j(h)$ é o variograma do $j^{\text{ésimo}}$ perfil.

Se o espaçamento ao longo das linhas não é constante deve ser feito um agrupamento por classes.

- Ao longo de um plano

a) Malha Regular

Esse caso é similar ao caso dos perfis paralelos. O variograma será computado em quatro direções principais, sendo que os *lags* serão diferentes ao longo do comprimento e das diagonais do malha.

b) Amostragem em Perfis

Quando os dados estão alinhados segundo perfis não paralelos, deve-se agrupar os variogramas em classes de ângulos entre perfis. O algoritmo consiste essencialmente em adicionar os desvios ao quadrado correspondentes aos pares de pontos que têm a orientação

desejada, a seleção pode ser feita, por exemplo, através de uma linha reta que passe pelos pontos.

c) Caso Geral

Se os pontos não mostram um padrão sistemático, o variograma é calculado agrupando os valores por classes de ângulos e distâncias. Isto resulta em valores médios do variograma dentro de cada classe.

4.4.4.3. Ajuste do Variograma

De acordo com a experiência prática, a forma mais apropriada para fazer-se o ajuste do variograma, é através do conjunto de características gráficas seguintes:

- declividade;
- efeito pepita;
- *range* (alcance);
- *sill* (patamar);
- anisotropia.

A declividade na origem, normalmente, é analisada pelos primeiros três pontos do variograma. A extrapolação para a origem resulta do efeito pepita.

O *range* ou alcance é analisado visualmente. O *sill* ou patamar é o ponto onde o variograma estabiliza e é comparado com a variância dos dados, σ^2 . A variância e o *sill* devem ser aproximadamente iguais se o *range* é menor que as dimensões do domínio estudado.

As anisotropias são as maiores fontes de dificuldade, sendo complexa a distinção entre tendência e anisotropia.

4.4.5. Estimção Linear

A elaboração de um mapa de contorno de forma manual, ou através do computador, utiliza métodos de interpolação. Tais métodos baseiam-se em funções de ajuste e superfícies de tendência, suavização de superfícies por triangulação, todos necessitando satisfazer algum critério.

Manualmente, são feitas interpolações entre pares de pontos para conectar curvas de nível em um mapa plani-altimétrico, por exemplo, fazendo-se algum tipo de suavização para

que estes pareçam visualmente mais reais e até refletindo alguma experiência prática do técnico que elabora o mapa.

Em geologia ou na área da mineração, os dados disponíveis apresentam informações detalhadas sobre uma base quase pontual, o problema reside em estender estas informações para a área total a ser avaliada ou para todo o depósito mineral.

Isto somente pode ser feito através de estimações, sendo que a acuracidade destas estimações dependem de vários fatores:

- do número de amostras e da qualidade dos dados em cada amostra;
- da posição das amostras dentro do depósito;
- das distâncias entre as amostras e a área de interesse;
- da continuidade espacial das variáveis interpoladas.

A krigagem é o método de estimação que leva em conta todos esses fatores, consistindo essencialmente em tomar o melhor estimador linear não tendencioso (*Best Linear Unbiased Estimator-B.L.U.E.*), da quantidade a ser estimada, isto é, ponderar as diferentes amostras disponíveis de forma a obter um estimador com o menor erro quadrático médio.

É o método que permite estimar valores de variáveis regionalizadas em um ponto, sobre uma superfície ou dentro de um volume e usa o critério da minimização da variância da estimação. Quando calculada em interseções de uma malha regular, os valores estimados por krigagem podem ser usados para produzir mapas de contorno. Os passos para construção de mapas por computador são os seguintes (Hohn, 1988):

1. Coleta de dados, provavelmente dispostos de forma irregular;
2. Superposição de uma malha regular;
3. Interpolação dos valores nos nós da malha;
4. Construção dos contornos;
5. Suavizar as linhas quando necessário;
6. Desenhar os mapas.

Segundo David (1988), apesar da proliferação de diferentes tipos de krigagem, a krigagem ordinária, que foi formulada por Matheron em 1965, ainda é uma técnica aplicável na maioria das circunstâncias que envolvem a estimação de valores em geologia e mineração.

4.4.5.1. Equações de Krigagem

Considerando que a variável regionalizada em estudo tem o valor $x_i = x(z_i)$, representando o valor no ponto z_i , e que a variável regionalizada é estacionária de segunda ordem com:

$$E\{X(z)\} = m \quad 4.4.14$$

cuja covariância centrada é:

$$E\{X(z+h)X(z)\} - m^2 = \sigma(h) \quad 4.4.15$$

e o variograma expresso por:

$$E\{[X(z+h) - X(z)]^2\} = 2\gamma(h) \quad 4.4.16$$

Um estimador krigado X_k^* é uma combinação linear de n valores da variável regionalizada:

$$X_k^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i X_i \quad 4.4.17$$

Os pesos λ_i são calculados de acordo com os seguintes critérios:

1. O estimador é não tendencioso;
2. A variância da estimação é minimizada.

O primeiro critério é satisfeito somando-se os pesos um a um, assegurando que a esperança matemática tenha o seguinte valor:

$$E\{X_k^*\} = m \sum_i \lambda_i = m = E\{X_r\} \quad 4.4.18$$

e:

$$E\{X_r - X_k^*\} = 0 \quad 4.4.19$$

O segundo critério diz que a variância da estimação $E\{X_r - X_k^*\}$ deve ser mínima, escrevendo a variância como:

$$E\{[X_v - X_k^*]^2\} = E\{X_v^2\} - 2E\{X_v X_k^*\} + E\{X_k^{*2}\} \quad 4.4.20$$

Então:

$$\text{Variância da Estimação} = \bar{C}(V, V) - 2 \sum_i \lambda_i \bar{C}(V, v_i) + \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j \bar{C}(v_i, v_j) \quad 4.4.21$$

onde $\bar{C}(A, B)$ é a covariância média em cada ponto dentro de uma área A, e cada ponto em uma área B (Hohn, 1988).

O sistema de krigagem é um conjunto de n+1 equações lineares com (n+1) incógnitas, obtidas igualando a zero cada uma das derivadas parciais:

$$\gamma \left[E\{[X_v - X_k^*]^2\} - 2\mu \sum_i \lambda_i \right] / \gamma \lambda \quad 4.4.22$$

onde os n pesos λ são calculados, e μ é um parâmetro de Lagrange (Hohn, 1988).

4.4.5.2. Krigagem Pontual (*Point Kriging*)

A estimação pontual (*point estimation*) é um método que permite estimar valores desconhecidos em áreas pequenas, ou seja, fazer estimações locais de valores desconhecidos a partir de dados próximos.

Para estimações locais são usadas combinações lineares ponderadas, mas os pesos aplicados agora de acordo com Isaac & Srivastava (1989), precisam ser quantificados não apenas por grupos de amostras mas também pela distância das amostras mais próximas.

Existem vários métodos de estimação pontual, neste trabalho foi aplicado o método da krigagem ordinária para estimar valores de cotas considerando os pontos medidos na vizinhança do local a ser estimado.

- Krigagem Ordinária

A krigagem ordinária está associada ao termo B.L.U.E. (*Best Linear Unbiased Estimator*) ou seja, o melhor estimador linear não tendencioso, (Isaac & Srivastava, 1989). É um método de estimação "linear" porque os estimadores utilizados são combinações lineares

ponderadas dos dados disponíveis, é não tendencioso porque tenta fazer com que a média residual ou erro seja igual a zero e é o melhor porque ajuda a minimizar a variância dos erros.

O objetivo da krigagem ordinária, que a diferencia de outros métodos de estimação é minimizar a variância do erro. Na prática porém, o erro só pode ser conhecido após a estimação. A importância disto para a krigagem ordinária reside no fato de que como o erro não é conhecido, não se pode garantir que este seja exatamente igual a zero e como não se conhece também a variância do erro não se pode minimizá-la (Isaac & Srivastava, 1989).

A solução do problema está em construir-se um modelo dos dados em estudo e trabalhar como a média e variância do erro deste modelo, podendo-se então calcular estes parâmetros e escolher os ponderadores para as amostras mais próximas que assegurem que a média do erro deste modelo é exatamente igual a zero e que a variância dos erros do modelo criado é minimizada.

4.4.5.3. Krigagem Por Blocos (*Block Kriging*)

Para áreas onde o número de pontos a serem estimados é muito grande, a estimação pontual pode necessitar de procedimentos computacionais demorados e dispendioso. Por exemplo, segundo Isaac & Srivastava(1989), em aplicações mineiras nas quais seja necessário estimar centenas de milhares de blocos, se cada bloco for discretizado em 100 pontos, e cada ponto estimado é feito por krigagem ordinária, haverá milhões de sistemas de krigagem a serem resolvidos. A krigagem por blocos é um método que permite reduzir significativamente os procedimentos computacionais, construindo e resolvendo apenas um sistema de equações para cada bloco estimado.

O sistema de krigagem por blocos é semelhante ao sistema de krigagem pontual, entretanto, é utilizada para estimar-se o valor médio de algum fenômeno sobre uma área ao invés de um ponto local.

Considerando o modelo de função randômica para definir a continuidade espacial, a média de uma função randômica sobre uma área é simplesmente a média (combinação linear) de todos os pontos aleatórios contidos dentro da área.

Na prática, a covariância média bloco a bloco é aproximada pela discretização da área considerada em vários pontos.

5. Metodologia Experimental

5.1. Considerações Gerais

Na fase inicial do presente estudo, foi definida uma área projetada para extração situada na borda norte da mina de Butiá-Leste da Copelmi Mineração Ltda. A fração da área, denominada de Zona Norte, onde foi delimitada a área de estudo e coletados os dados para posterior tratamento e análise, abrangeu uma superfície aproximada de 23.000 m².

Os dados utilizados para o desenvolvimento do estudo experimental foram obtidos através do levantamento topográfico planialtimétrico da superfície e, após a conclusão dos trabalhos de descobertura, este mesmo procedimento foi executado sobre a primeira camada de carvão, abrangendo-se desta forma, a área total do corte minerado possibilitando estimar o volume do material de cobertura removido.

5.2. Trabalho de Campo

5.2.1. Equipamento utilizado

O levantamento topográfico foi realizado com o emprego de uma Estação Total (*Total Station*), da marca WILD modelo TC-500. Esse equipamento apresenta como principal característica a utilização do sistema EDM (*Electromagnetic Distance Measurement*), através da emissão de radiação na faixa do infra-vermelho com comprimento da onda portadora de 0,86 μ m, frequência de 50 MHz e desvio padrão de 5 mm + 5 ppm. A precisão angular é expressa por um desvio padrão de 6".

Além das distâncias horizontais lidas em um *display* digital, o equipamento também fornece as projeções das coordenadas em função do azimute inicial fornecido pelo operador, o que permite arbitrar o sistema de coordenadas a ser utilizado. O aparelho é equipado com um coletor eletrônico de dados, no qual são registradas as leituras sob a forma de blocos para que, posteriormente, estas sejam transferidas a um microcomputador através de um *software* específico, responsável pela transferência e a execução dos cálculos de desníveis (cotas) e coordenadas. O *software* utilizado, foi o *WILDSOFT*, desenvolvido pelo mesmo fabricante do equipamento.

5.2.2. Coleta dos Dados

De forma a conciliar a rotina operacional da mina com o trabalho de coleta dos dados, especificamente para a realização deste estudo, o levantamento topográfico foi executado

dentro do sistema de coordenadas, utilizado pela equipe de topografia na época do levantamento.

Inicialmente, foi locada na área, uma linha-base com azimutes e coordenadas definidas. A partir desta linha base, iniciou-se o levantamento topográfico formando-se um reticulado regular em malha quadrada de 5x5m. Ao todo na superfície, foram medidos 1788 pontos. A Fig. 5.1 mostra a disposição dos pontos medidos e a área definida para a abertura do corte.

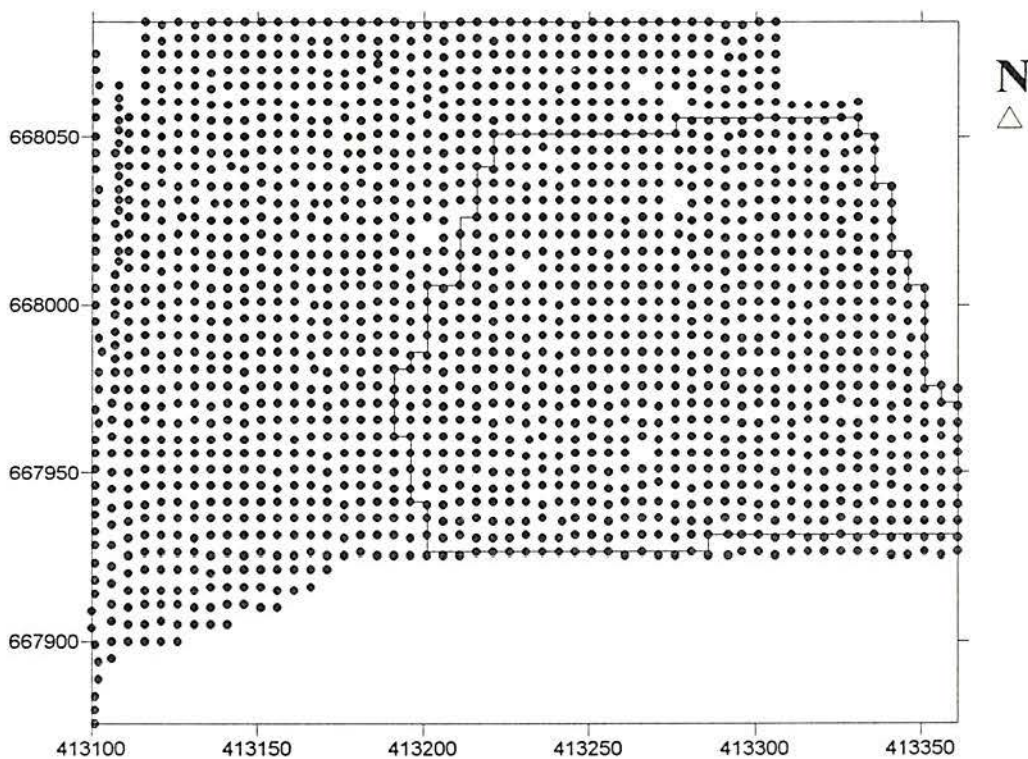


Figura 5.1 - Área total do levantamento de campo no terreno natural, com a localização dos pontos e a poligonal da área de estudo.

Após a conclusão dos trabalhos no terreno natural, foi iniciado o processo de descobertura do carvão, dentro dos limites definidos para o estudo.

A sistemática de coleta dos dados sobre a superfície da primeira camada do carvão, seguiu a rotina operacional dos trabalhos de descobertura, isto é, após a conclusão da descobertura em determinada faixa do corte, imediatamente era realizado o levantamento planialtimétrico da capa da primeira camada de carvão na porção descoberta, de forma que, a medida que o corte avançava, a equipe de topografia executava o levantamento antes da fase de extração do minério.

Na capa da camada de carvão, foram coletados 1130 pontos, seguindo o mesmo procedimento conduzido na superfície, ou seja, executando-se o levantamento em uma malha regular de 5x5m, dentro do mesmo sistema de coordenadas e buscando manter a

correspondência dos pontos da superfície natural com os pontos levantados no carvão. A Fig. 5.2 mostra a distribuição dos pontos coletados sobre o topo da camada superior de carvão e a área delimitada para o cálculo do volume.

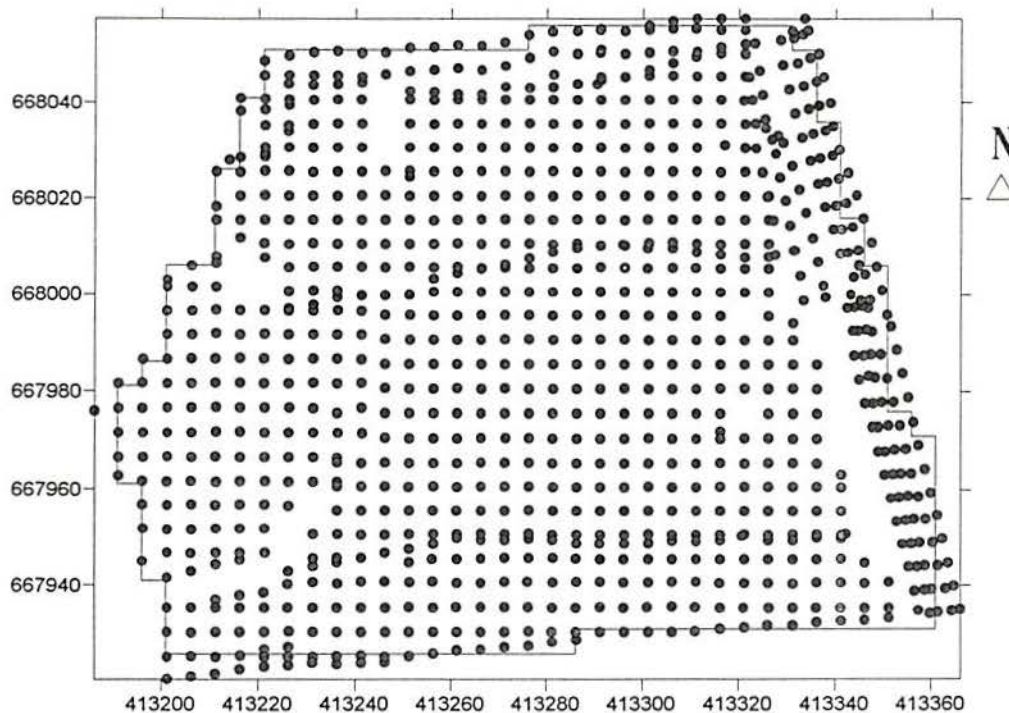


Figura 5.2 - Área do levantamento sobre a camada superior de carvão com a posição de cada ponto levantado.

5.3. Preparação dos Dados

5.3.1. Tratamento Preliminar dos Dados

Após o trabalho executado em campo, em cada etapa, os dados das cadernetas eram transferidos para o sistema *WILDSOFT*, o qual era responsável pela elaboração das planilhas contendo os dados de coordenadas e cotas (x,y,z) , que, posteriormente, foram transformados em formato *ASCII*, para utilização nos sistemas de estatística, geoestatística e geração de curvas de contorno.

5.3.2. Geração da Malha Padrão

Para a criação de um modelo padrão, com o qual seriam comparados os vários ensaios realizados, os dados de campo foram tratados através da correção e eventual eliminação de valores erráticos e, ainda, foi feita a correspondência exata dos pontos na superfície com os pontos medidos sobre o topo da primeira camada do carvão. Com estes procedimentos, o conjunto de dados da superfície e do carvão, ficaram exatamente com o mesmo número de pontos distribuídos dentro de uma mesma área, de forma que em cada par de coordenadas $(N,$

E) estão localizados dois pontos medidos, um na superfície natural e outro no topo da camada de carvão a uma distância que varia em função da espessura do *overburden* naquela posição.

O procedimento de preparação da malha padrão mencionado acima foi necessário para possibilitar que o volume do corte pudesse ser avaliado e padronizado, já que a variável espessura seria a única responsável pelo resultado do volume estimado em função de cada método empregado, uma vez que cada ponto sobre a camada de carvão teria um outro correspondente na mesma posição na superfície. A distribuição dos dados na malha padrão pode ser observada na Fig. 5.3.

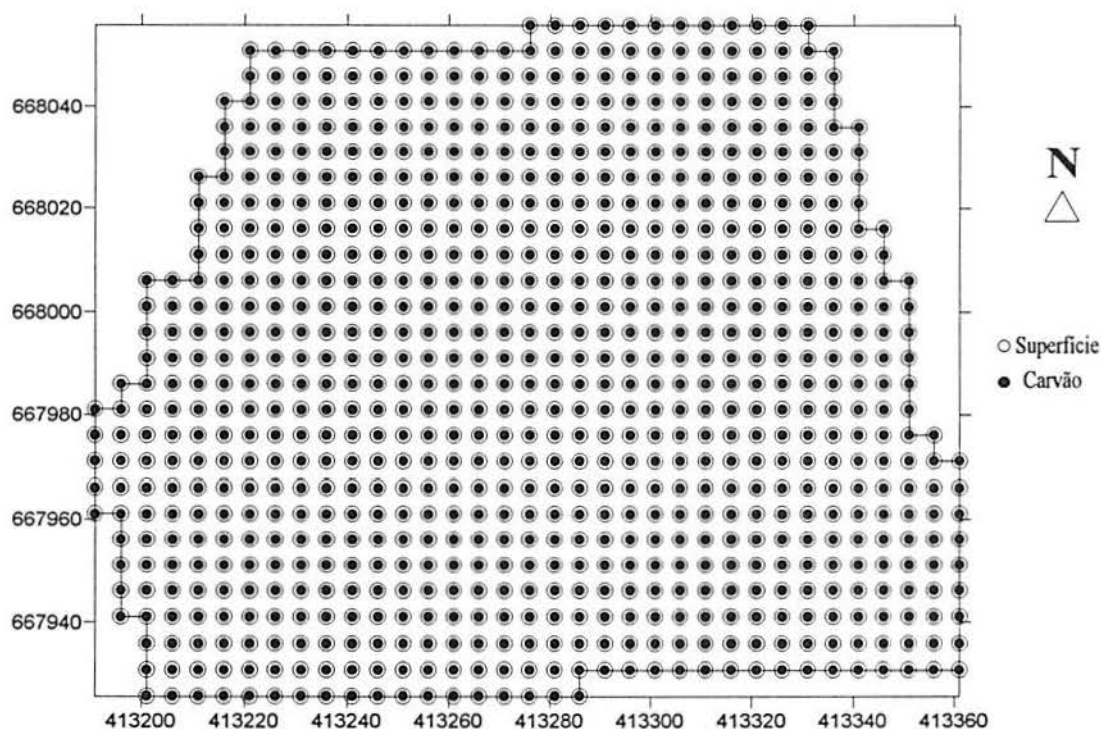


Figura 5.3 - Distribuição dos dados em superfície e sobre a primeira camada de carvão em malha 5x5m. Malha padronizada para o cálculo do volume de *overburden* na área delimitada.

5.3.3. Preparação dos Arquivos Para Interpolação

O resultado do processo de preparação da malha padrão foi a obtenção de dois arquivos de dados com pontos espaçados de 5m em cada um, a partir dos quais, foram suprimidas colunas intercaladas de pontos nas duas direções (N e E), incrementando-se de 5 metros a distância entre os pontos em cada conjunto, formando-se subconjuntos com arquivos de dados contendo pontos distanciados de 10, 15, 20, 25 e 30 metros, todos os conjuntos abrangendo a mesma área.

Os vários conjuntos podem ser vistos nas Fig. 5.4 até Fig. 5.8 correspondendo aos pontos na superfície e no topo da primeira camada de carvão representando respectivamente as malhas de amostragem regular de 10x10m, 15x15m, 20x20m, 25x25m e 30x30m.

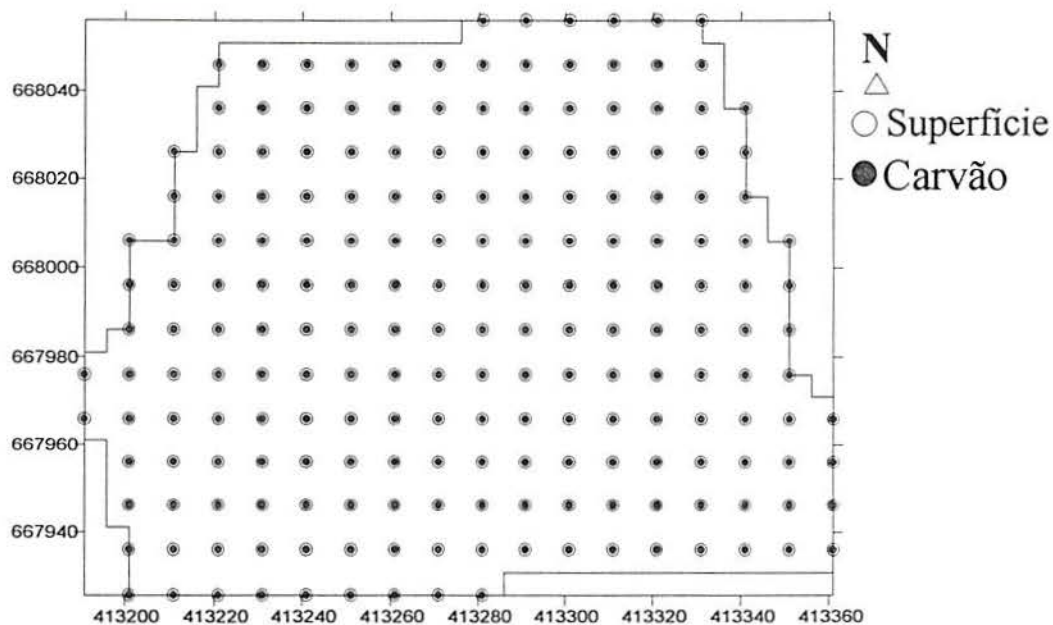


Figura 5.4 - Distribuição dos pontos em malha 10x10m, na superfície e no topo da camada superior de carvão, dentro da área delimitada.

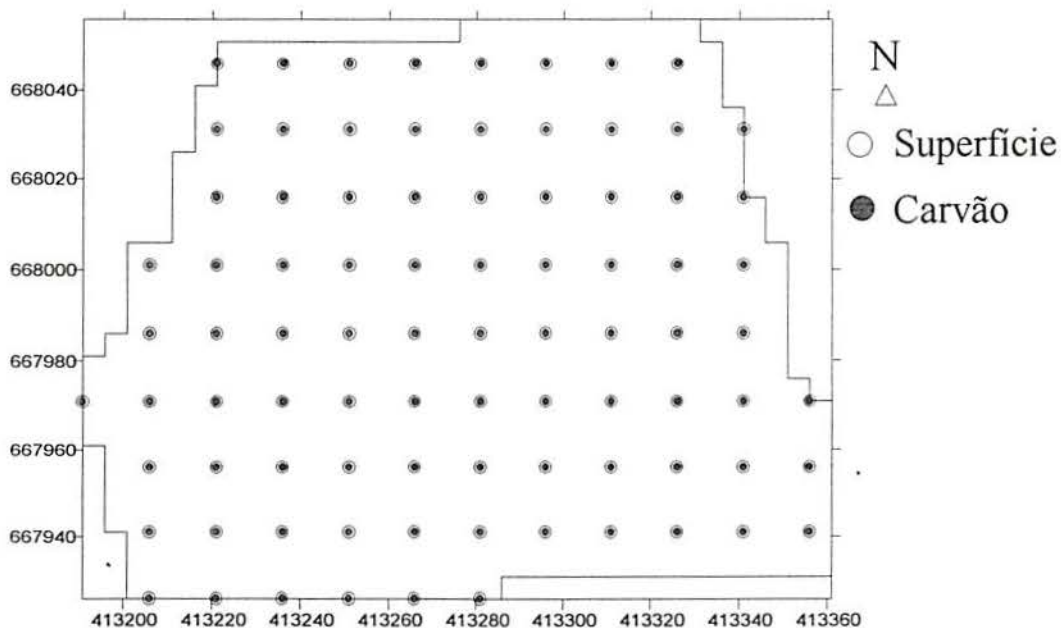


Figura 5.5 - Distribuição dos pontos dentro da área de estudo em malha 15x15m, sobre o terreno natural e sobre a primeira camada de carvão.

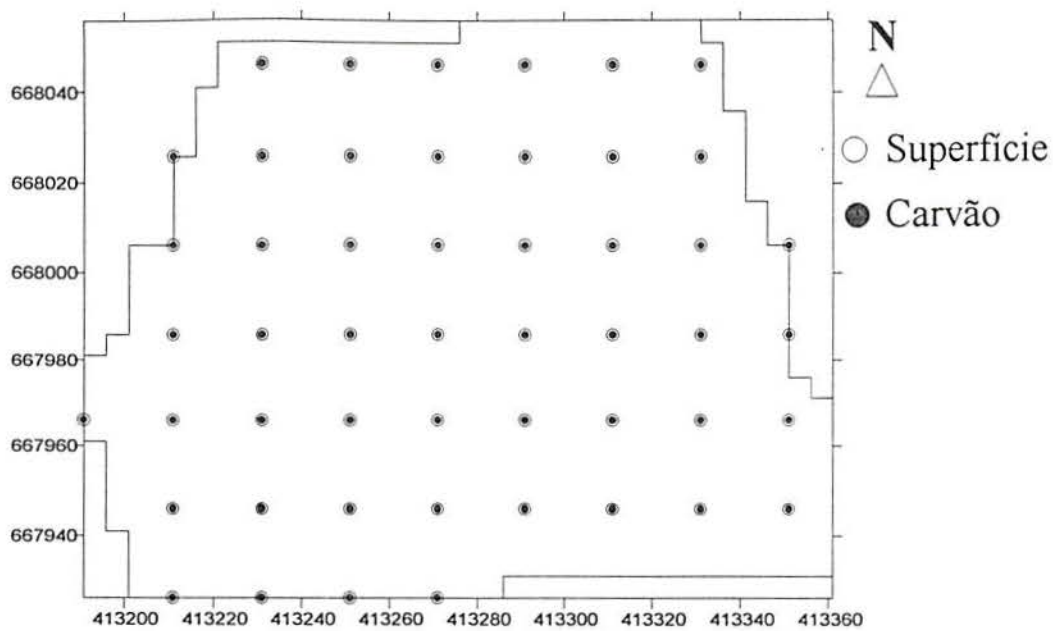


Figura 5.6 - Distribuição dos dados em malha 20x20m na superfície e sobre o carvão.

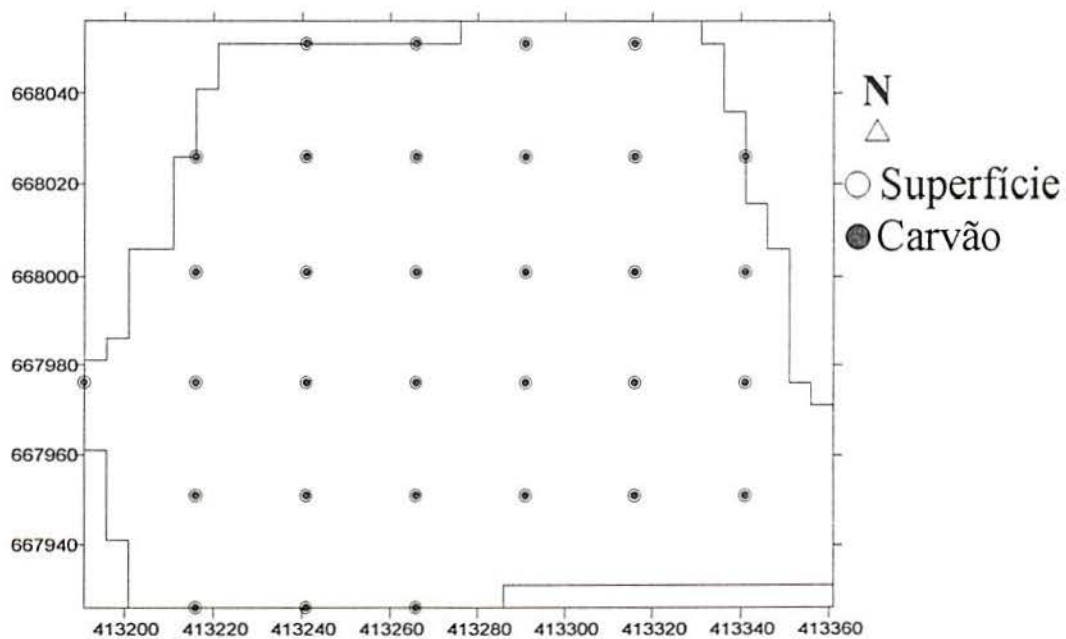


Figura 5.7 - Distribuição dos dados em malha de 25x25m, sobre a superfície e sobre o carvão.

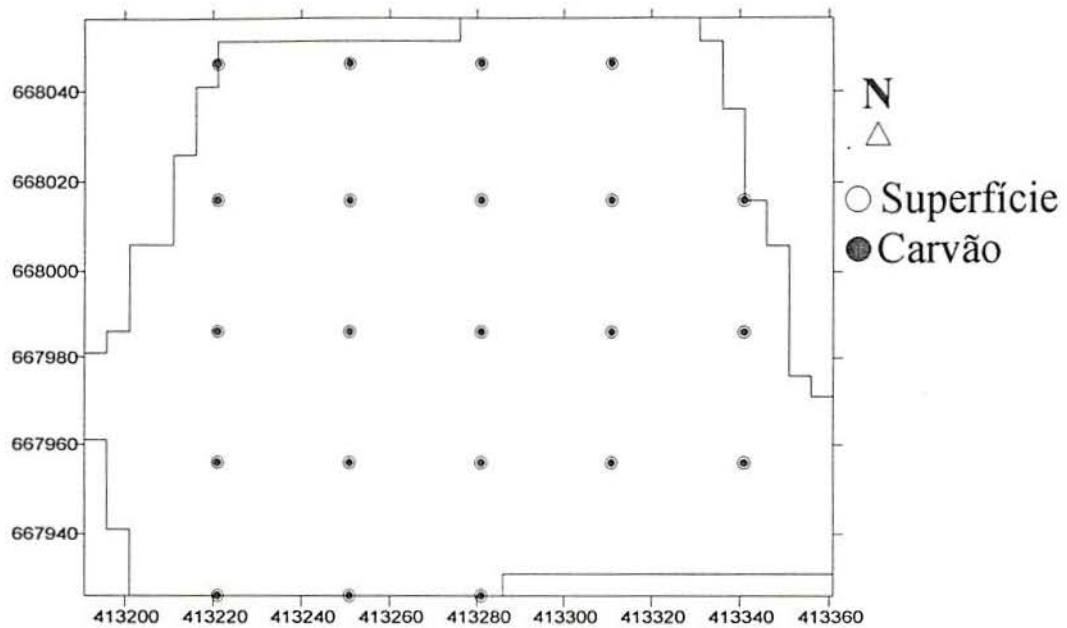


Figura 5.8 - Dados coletados em superfície e sobre a camada de carvão distribuídos em malha de 30 x 30m.

5.4. Estudo da Continuidade Espacial

Após a preparação dos arquivos, os conjuntos de pontos foram submetidos a um tratamento estatístico com o objetivo de conhecer-se suas médias, variâncias, desvios padrão etc., para que, em seguida, fosse realizado o estudo da continuidade espacial da variável cota, de acordo com cada conjunto de dados individualizado por diferentes distâncias inter-amostrais. Os parâmetros estatísticos são mostrados no quadro 5.1.

Quadro 5.1 - Parâmetros estatísticos dos dados originais

SUPERFÍCIE	MEDIANA	MÉDIA	VARIÂNCIA	D. PADRÃO	C. VARIAÇÃO
5 x 5	59,4930	59,0890	3,4725	1,8635	3,1537
10 x 10	59,4645	59,0500	3,5226	1,8769	3,1784
15 x 15	59,5460	59,1167	3,3300	1,8248	3,0868
20 x 20	59,3765	58,9678	3,6771	1,9176	3,2519
25 x 25	59,3735	58,9432	3,6704	1,9158	3,2503
30 x 30	59,4045	59,0523	3,8616	1,9651	3,3277
CARVÃO	MEDIANA	MÉDIA	VARIÂNCIA	D. PADRÃO	C. VARIAÇÃO
5 x 5	49,2870	50,4270	20,1976	4,4942	8,9122
10 x 10	49,4175	50,5611	20,2286	4,4176	8,8954
15 x 15	49,2400	50,3726	18,3227	4,2805	8,4977
20 x 20	49,6360	50,4836	18,2420	4,2711	8,4603
25 x 25	48,7305	50,1240	23,8393	4,8826	9,7410
30 x 30	49,5480	50,7841	24,3900	4,9386	9,7247

O estudo variográfico foi aplicado sobre os conjuntos de pontos obtidos da superfície (terreno natural) e sobre a camada superior de carvão com a utilização do *software* GEO-EAS.

A área de estudo foi limitada para a aplicação da krigagem, através de um polígono definido por 34 vértices, dentro do qual, foi aplicada a krigagem ordinária (GEO-EAS User's Guide, 1988) para interpolação dos valores em uma malha de 5x5m.

Os resultados do estudo da continuidade espacial da área são apresentados no anexo A, através da representação gráfica dos variogramas experimentais e do modelo onidirecional ajustado para os dados de superfície e do topo da camada superior de carvão de acordo com cada conjunto de pontos separados por 10, 15, 20, e 25 metros apresentando ainda os variogramas direcionais E-W, NE, N-S e NO correspondentes a cada conjunto de dados (Fig. 5.9 até 5.32 do anexo A).

Cada malha, individualmente, gerou um conjunto de modelos, os quais foram, posteriormente, validados através da técnica de validação cruzada (anexo A) e cujos respectivos parâmetros foram utilizados na krigagem dos valores de cota, adensando a malha, através de interpolação, para 5x5m.

O estudo da continuidade espacial foi realizado através dos variogramas onidirecionais e nas direções 0°, 45°, 90°, e 135°, com tolerância de $\pm 22,5^\circ$, correspondentes as direções geográficas E-W, NE, N e NO considerando que o corte foi executado segundo a direção E-W.

Aos variogramas obtidos foi aplicada a validação cruzada, cujos resultados são apresentados no anexo A. O *lag* aplicado na formação dos pares foi coincidente com a distância entre as amostras para cada malha respeitando uma *bandwith* de acordo com o quadro 5.2.

Através dos variogramas apresentados (anexo A), observa-se que os dados de cota, obtidos para a superfície natural, apresentam um comportamento variográfico estruturado, mesmo com o afastamento dos pontos através da expansão da malha amostral. A medida que a distância entre os pontos aumenta, ocorre, naturalmente, uma redução no número de amostras e, portanto, a formação de um número menor de pares utilizados para o estudo da continuidade espacial do terreno natural.

A função que produziu um resultado gráfico visualmente mais representativo da continuidade espacial da área na superfície, em função de cada conjunto de pontos com diferentes densidade amostral, foi o inverso da covariância, notando-se que à medida que diminui a densidade de pontos, o número de pares capturados é menor, resultando desta forma uma confiabilidade menor nos parâmetros que definem a estruturação dos valores de cota da superfície.

A validação cruzada dos modelos definidos para cada malha de pontos da superfície natural (anexo A), mostra uma forte relação entre os valores estimados e os valores medidos, indicando um ajuste adequado do modelo definido ao comportamento experimental da variável cota em relação à continuidade espacial da área estudada.

Com relação aos dados obtidos sobre o topo da camada superior de carvão, verifica-se uma anisotropia zonal em algumas direções devido à existência dos taludes da cava, que produzem um aumento na variância quando os pontos medidos tornam-se distantes uns dos outros diminuindo o número de pontos amostrados. Isto ocorre em razão da variação dos valores da cota quando estes aproximam-se e alcançam os taludes do corte.

O número de pontos (amostras) do conjunto que resulta da expansão da malha amostral diminui bastante prejudicando a representação da possível estruturação existente na área. Por este motivo, não foi possível, com os poucos dados restantes, obter uma resolução adequada para a representação variográfica da continuidade espacial com amostras espaçadas de 30 metros sobre a camada superior de carvão.

5.5. Krigagem

De posse dos modelos representativos da continuidade espacial da área em função da variável cota, tanto para a superfície natural quanto para o topo da camada superior de carvão e considerando a malha de 5x5m como sendo o padrão para a avaliação do volume, foi feita a krigagem dos pontos espaçados de 10, 15, 20 e 25 metros, para os conjuntos de dados do terreno e da superfície da camada superior de carvão.

Os valores do quadro 5.2 abaixo individualizam para cada conjunto, os parâmetros obtidos no estudo da continuidade espacial.

Quadro 5.2 - Parâmetros do modelo variográfico ajustado para cada conjunto de pontos da superfície natural e do topo da camada superior de carvão espaçados de 10, 15, 20, 25 e 30 m.

Superfície 10x10	ONIDIR. <i>Bandwidth = max</i>	E - W <i>Bandwidth = 20</i>	NE <i>Bandwidth = 40</i>	N <i>Bandwidth = 20</i>	NO <i>Bandwidth = 40</i>
<i>NUGGET</i>	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
MODELO	GAUSSIANO	GAUSSIANO	GAUSSIANO	GAUSSIANO	GAUSSIANO
<i>SILL</i>	3,52	3,52	3,52	3,52	3,52
<i>RANGE</i>	75	65	100	80	70
Superfície 15x15	ONIDIR. <i>Bandwidth = max</i>	E - W <i>Bandwidth = 30</i>	NE <i>Bandwidth = 60</i>	N <i>Bandwidth = 30</i>	NO <i>Bandwidth = 60</i>
<i>NUGGET</i>	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
MODELO	GAUSSIANO	GAUSSIANO	GAUSSIANO	GAUSSIANO	GAUSSIANO
<i>SILL</i>	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33
<i>RANGE</i>	75	65	100	110	70
Superfície 20x20	ONIDIR. <i>Bandwidth = max</i>	E - W <i>Bandwidth = 50</i>	NE <i>Bandwidth = 100</i>	N <i>Bandwidth = 50</i>	NO <i>Bandwidth = 100</i>
<i>NUGGET</i>	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
MODELO	GAUSSIANO	GAUSSIANO	GAUSSIANO	GAUSSIANO	GAUSSIANO
<i>SILL</i>	3,68	3,68	3,68	3,68	3,68
<i>RANGE</i>	70	70	95	140	65
Superfície 25x25	ONIDIR. <i>Bandwidth = max</i>	E - W <i>Bandwidth = 50</i>	NE <i>Bandwidth = 100</i>	N <i>Bandwidth = 50</i>	NO <i>Bandwidth = 100</i>
<i>NUGGET</i>	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
MODELO	GAUSSIANO	GAUSSIANO	GAUSSIANO	GAUSSIANO	GAUSSIANO
<i>SILL</i>	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67
<i>RANGE</i>	75	70	120	135	70
Superfície 30x30	ONIDIR. <i>Bandwidth = max</i>	E - W <i>Bandwidth = 60</i>	NE <i>Bandwidth = 120</i>	N <i>Bandwidth = 60</i>	NO <i>Bandwidth = 120</i>
<i>NUGGET</i>	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
MODELO	GAUSSIANO	GAUSSIANO	GAUSSIANO	GAUSSIANO	GAUSSIANO
<i>SILL</i>	3,86	3,86	3,86	3,86	3,86
<i>RANGE</i>	70	70	85	150	70
Carvão 10x10	ONIDIR. <i>Bandwidth = max</i>	E - W <i>Bandwidth = 20</i>	NE <i>Bandwidth = 40</i>	N <i>Bandwidth = 20</i>	NO <i>Bandwidth = 40</i>
<i>NUGGET</i>	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
MODELO	EXPONENCIAL	EXPONENCIAL	EXPONENCIAL	EXPONENCIAL	EXPONENCIAL
<i>SILL</i>	20,23	20,23	20,23	20,23	20,23
<i>RANGE</i>	90	160	75	75	6115
Carvão 15x15	ONIDIR. <i>Bandwidth = max</i>	E - W <i>Bandwidth = 30</i>	NE <i>Bandwidth = 60</i>	N <i>Bandwidth = 30</i>	NO <i>Bandwidth = 60</i>
<i>NUGGET</i>	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
MODELO	ESFÉRICO	ESFÉRICO	ESFÉRICO	ESFÉRICO	ESFÉRICO
<i>SILL</i>	18,32	18,32	18,32	18,32	18,32
<i>RANGE</i>	65	140	55	55	49
Carvão 20x20	ONIDIR. <i>Bandwidth = max</i>	E - W <i>Bandwidth = 50</i>	NE <i>Bandwidth = 100</i>	N <i>Bandwidth = 50</i>	NO <i>Bandwidth = 100</i>
<i>NUGGET</i>	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
MODELO	ESFÉRICO	ESFÉRICO	ESFÉRICO	ESFÉRICO	ESFÉRICO
<i>SILL</i>	18,24	18,24	18,24	18,24	18,24
<i>RANGE</i>	68	150	50	55	60
Carvão 25x25	ONIDIR. <i>Bandwidth = max</i>	E - W <i>Bandwidth = 60</i>	NE <i>Bandwidth = 120</i>	N <i>Bandwidth = 60</i>	NO <i>Bandwidth = 120</i>
<i>NUGGET</i>	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
MODELO	GAUSSIANO	GAUSSIANO	GAUSSIANO	GAUSSIANO	GAUSSIANO
<i>SILL</i>	23,84	23,84	23,84	23,84	23,84
<i>RANGE</i>	60	150	40	41	52

Os valores marcados no quadro 5.2, identificam os parâmetros da elipse de busca utilizada na krigagem para interpolação de valores de cota. Foram aplicados dois métodos partindo-se dos mesmos parâmetros, quais sejam, *block kriging* e *point kriging*, verificando-se posteriormente, o método que produz o melhor resultado na estimativa do volume em relação ao padrão.

A krigagem, foi executada interpolando os valores de cota de cada conjunto de dados em uma malha de 5x5m, possibilitando assim a obtenção de um modelo digital de terreno (MDT) com as mesmas dimensões do padrão para cada conjunto o que garante a confiabilidade na comparação dos vários modelos.

5.6. Estimação dos Volumes

5.6.1. Utilizando dados Interpolados por Krigagem

A estimativa dos volumes de *overburden* foi realizada utilizando-se os valores interpolados por krigagem a partir dos conjuntos de pontos medidos no terreno natural e sobre a camada superior de carvão após a descobertura.

Utilizando-se os modelos definidos através do estudo da continuidade espacial dos conjuntos de dados distribuídos nas diferentes malhas amostrais, foi feita a interpolação por krigagem pontual e por blocos utilizando-se 16 pontos por bloco, produzindo uma malha com espaçamento padrão de 5x5m, recriando-se desta forma, a malha construída experimentalmente e utilizada como padrão.

O volume estimado corresponde ao resultado da aplicação de dois métodos de avaliação. Um método numérico, através da integração (método da quadratura) utilizando a regra trapezoidal, a regra de Simpson e a regra de Simpson 3/8, de acordo com o algoritmo empregado pelo *Surfer*, entre duas superfícies numéricas, uma representando o terreno natural e a outra representando o topo da camada superior de carvão, e um método geométrico, através do somatório de prismas retangulares cuja área da base é 25m^2 , correspondente a área unitária formada pela malha de amostragem e a altura correspondente à cota do centro da base do prisma (Fig. 5.42). Este procedimento foi repetido para todas as superfícies numéricas geradas pela interpolação por krigagem dos pontos distribuídos em distâncias de 10, 15, 20 e 25 m.

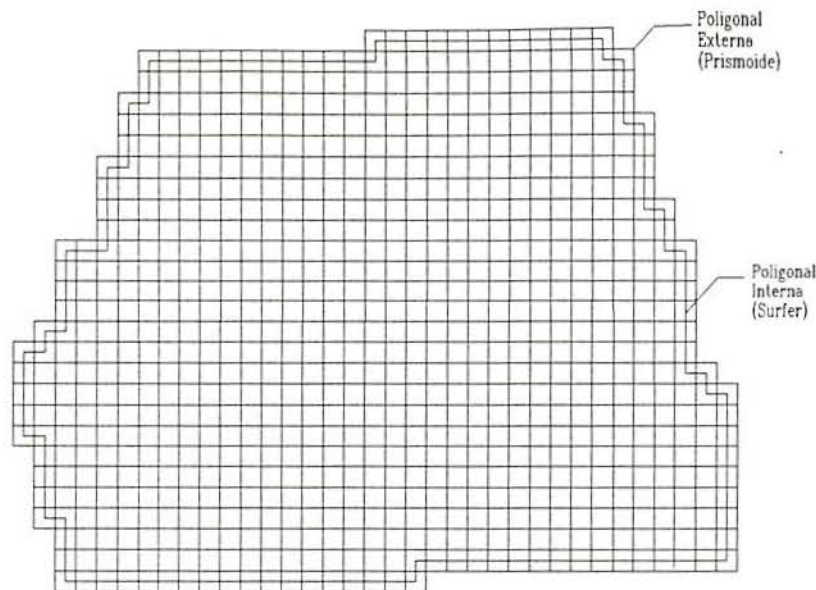


Figura 5.42 - Vista total da área teste, mostrando a base de cada prisma considerado no cálculo do volume e a poligonal envolvente relativa a cada método.

No cálculo do volume, foi considerada a área relativa à poligonal interna (18.350m^2), tendo sido descontado o volume pelo excedente de área resultante da aplicação do método do prismóide considerando cada ponto como sendo o centro da base dos prismas unitários. Este passo pode ser evitado, fazendo-se com que o ponto no centro da base do prisma, seja a média dos pontos do vértice de cada um, o que diretamente consideraria a poligonal interna, mostrada na Figura 5.42.

A diferença de área descontada foi de 1.525m^2 (8,3106%), cujo volume correspondente de 3.462m^3 (2,0110%) foi também descontado para obter-se o volume padrão.

A malha com espaçamento de 30m não foi considerada em razão da redução do número de amostras produzida pela retirada de linhas e colunas da matriz amostral a fim de distanciar cada ponto. Em função do pequeno número de pontos restantes, não foi possível obter um modelo variográfico com confiabilidade suficiente para a aplicação da krigagem na interpolação.

Para a obtenção dos volumes foram testadas várias alternativas com interpolação de pontos a partir das malhas com diferentes espaçamentos entre os pontos medidos na superfície natural e no topo da camada superior de carvão.

Para a interpolação foram aplicadas a krigagem ordinária por blocos (*block kriging*) e a krigagem pontual (*point kriging*). A krigagem por blocos foi testada para diferentes números de pontos na estimação, (16, 9 e 4).

A estimativa de volume que mais se aproxima do padrão avaliado a partir dos dados originais, foi obtida com os dados interpolados por *point kriging* e *block kriging* utilizando 16 pontos por bloco para estimação. Os resultados são apresentados nos quadros 5.3 e 5.4.

O quadro 5.4 mostra os volumes de *overburden* estimados por diferentes métodos de avaliação a partir dos valores originais (padrão 5x5m) e a partir dos valores interpolados por *point kriging* em 5x5m, a partir de conjuntos dos dados distribuídos em malhas de 10, 15, 20 e 25m, mostra também, a área em m² considerada no cálculo pelos métodos da aplicação da quadratura pelo *Surfer* e pelo método do prismóide.

Quadro 5.3 - Volumes de *overburden* estimados por diferentes métodos a partir dos dados originais e com os dados interpolados por *point kriging*, mostrando a área considerada pelo método aplicado.

MÉTODO/GRID	Dados Originais	Valores Interpolados por krigagem puntual em distância de 5m				Área m ²
	Padrão 5 x 5m	10 x 10m	15 x 15m	20 x 20m	25 x 25m	
Regra Trapezoidal	171165	170199	171621	171671	185609	18.350
Regra de Simpson	171526	170412	171945	172129	186043	18.350
Regra de Simpson 3/8	171549	170648	172140	172364	186233	18.350
Prismoide	168695	167067	167583	167245	181017	18.350

Quadro 5.4 - Volumes estimados pelos métodos numéricos e pelo método do prismóide a partir os dados interpolados por *block kriging*.

Valores Interpolados por Krigagem com 16 pontos por bloco de 5 x 5 m				
Método/grid	10 x 10m	15 x 15m	20 x 20m	25 x 25m
Regra Trapezoidal	170065	171527	171591	185523
Regra de Simpson	170337	171871	172062	185954
Regra de Simpson 3/8	170545	172076	172286	186126
Prismoide	166877	167462	167126	180905

5.6.2. Utilizando o Método das Seções Paralelas

O método das seções paralelas utilizado pela Copelmi, consiste no cálculo da área de seções paralelas levantadas em campo pela equipe de topografia, distantes 20m uma da outra.

Utilizando os recursos do AutoCAD (Costa et al., 1992), faz-se a digitação das coordenadas a partir de uma linha base pré-estabelecida, onde uma das direções é fixada. Normalmente o sistema de coordenadas é arbitrário e escolhido de acordo com cada corte. Tendo-se uma direção fixa ortogonal à linha base, o sistema é alimentado com as coordenadas

(distâncias da linha base) e as cotas dos pontos medidos em cada seção que coincide com a direção fixada. A seção vai sendo eletronicamente desenhada formando uma poligonal fechada cuja área é calculada pelo próprio programa.

O volume é calculado então, somando as áreas de duas seções adjacentes e multiplicando o resultado pela metade da distância entre estas (Annels, 1991). Este processo resulta no volume de um bloco com 20m de comprimento, que é a distância entre as duas seções adjacentes. O somatório destes volumes entre a primeira e a última seção (Fig. 5.43) da área a ser avaliada, corresponde ao volume total de *overburden* removido desta área. Este método foi aplicado à área de estudo, utilizando-se distâncias de 20m entre seções, sendo que nas extremidades da área, devido ao menor número de pontos por seção, as distâncias entre as mesmas foram reduzidas para 10m a oeste da área, e para 15m a leste.

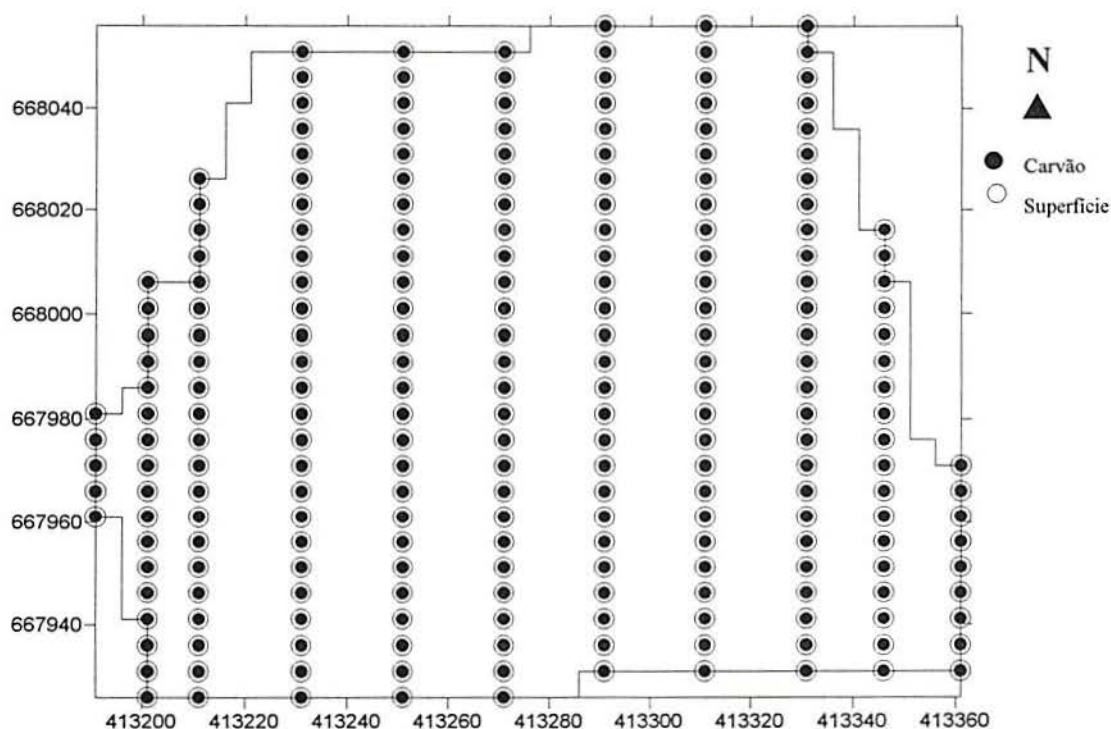


Figura 5.43 - Pontos localizados sobre seções paralelas espaçadas de 20m, a partir das quais foi calculado o volume de acordo com o método atualmente utilizado pela empresa Copelmi Mineração Ltda..

Os volumes calculados entre os pares de seções são mostrados no quadro 5.5, com a coordenada na direção E-W referente a cada uma delas.

Quadro 5.5 - Volume de *overburden* total da área calculado pelo método das seções paralelas. Cada seção está indicada na Fig. 5.43 a partir da extremidade oeste da área.

SEÇÕES	ÁREA (m ²)	COORDENADA (ESTE)	SEMI-DISTÂNCIA (m)	VOLUME
1	204,1675	413191	-----	
2	787,4675	413201	5	4958,1750
3	901,6025	413211	5	8445,3500
4	1060,3475	413231	10	19619,5000
5	1192,5375	413251	10	22528,8500
6	1229,7975	413271	10	24223,3500
7	1324,1025	413291	10	25539,0000
8	1312,6750	413311	10	26367,7750
9	985,2175	413331	10	22978,9250
10	437,7750	413346	7.5	10672,4440
11	9,9550	413361	7.5	3357,9750
VOLUME TOTAL				168691,3440

Com o objetivo de obter o volume com maior precisão, o mesmo procedimento de cálculo foi executado considerando a distância de 10m entre as seções, lembrando-se que na prática, o método atualmente empregado na empresa, considera seções distanciadas de 20m.

Na extremidade leste da área, onde esta é limitada pelo talude remanescente do corte, foi calculada a área das 4 (quatro) últimas seções distanciadas de 5 metros (Fig. 5.44).

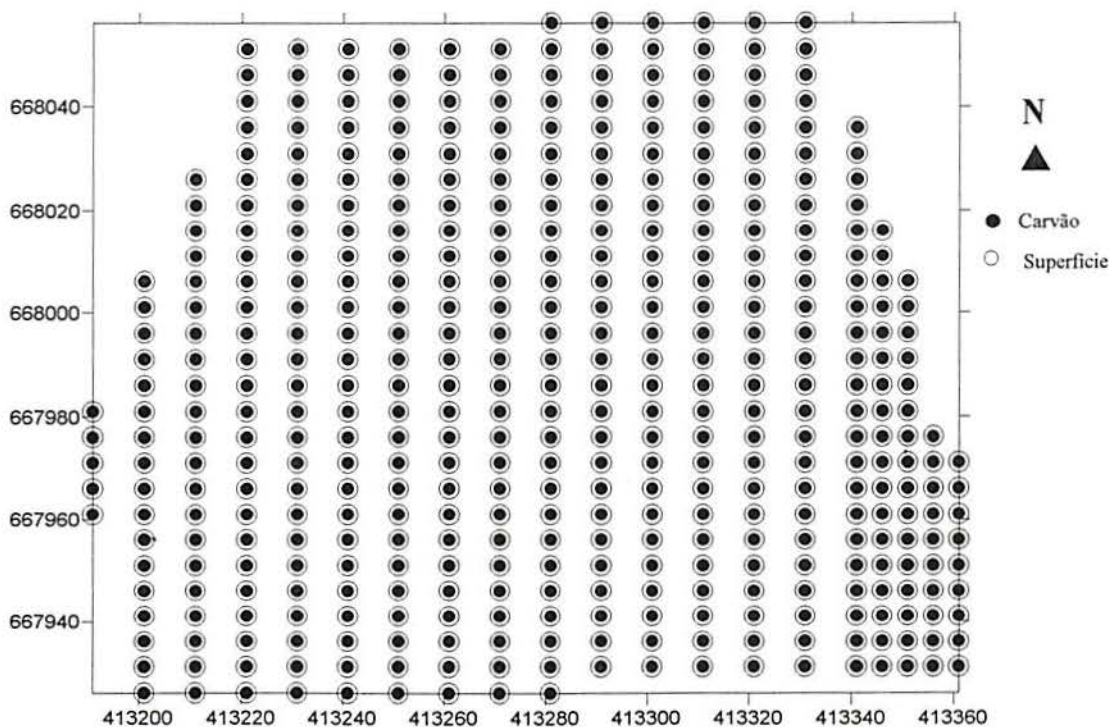


Figura 5.44 - Pontos sobre seções paralelas espaçadas de 10m, a partir das quais foi calculado o volume de *overburden* através do método empregado atualmente pela empresa Copelmi Mineração Ltda..

Os valores da área das seções, a coordenada E-W referente a cada uma delas, o volume correspondente ao bloco entre duas seções adjacentes e a semi-distância considerada são apresentados no quadro 5.6.

Quadro 5.6 - Valores relativos às áreas das seções paralelas, direção destas, semi-distâncias e o volume relativo ao bloco de overburden entre duas seções adjacentes.

SEÇÕES	ÁREA (m ²)	COORDENADA (ESTE)	SEMI-DISTÂNCIA (m)	VOLUME (m ³)
1	204,1675	413191	-----	-----
2	787,4675	413201	5	4958,175
3	901,6025	413211	5	8445,350
3-4	998,8250	413221	5	9502,1375
4	1060,3475	413231	5	10295,8625
4-5	1140,6675	413241	5	11005,0750
5	1192,5375	413251	5	11666,0250
5-6	1223,4575	413261	5	12079,9750
6	1229,7975	413271	5	12266,2750
6-7	1290,4550	413281	5	12601,2625
7	1324,1025	413291	5	13072,7875
7-8	1310,4525	413301	5	13172,7750
8	1312,6750	413311	5	13115,5375
8-9	1298,5700	413321	5	13056,2250
9	985,2175	413331	5	11418,9375
9-10	687,1175	413341	5	8361,6750
10	437,7750	413346	2.5	2812,2313
10-11	164,1625	413351	2.5	1504,8438
11	69,4725	413356	2.5	584,0875
11-12	9,9550	413361	2.5	198,5688
VOLUME	TOTAL			170117,9064

Com a redução das distâncias entre as seções ocorre um aumento do volume calculado, o que não significa um resultado mais preciso, uma vez que o volume padrão foi calculado discretizando-se a área com a distribuição dos pontos em uma malha de 5x5m.

6. ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS

6.1. Diferenças na Estimação dos Volumes

Os valores obtidos para o volume de *overburden* na área de estudo utilizando dados de cota interpolados por krigagem em malha de 5x5m, foram comparados com o volume produzido pela aplicação dos mesmos métodos de cálculo utilizando os valores originais medidos em malha padrão de 5x5m. Os resultados obtidos foram comparados também, com os volumes calculados para a mesma área com a aplicação do método das seções paralelas espaçadas de 20m e de 10m.

As diferenças percentuais relativas ao volume calculado com os dados originais e com os valores interpolados são mostradas nos quadros 6.1 e 6.2.

Quadro 6.1 - Diferenças percentuais entre os volumes obtidos a partir dos valores interpolados por *point kriging* e aqueles obtidos a partir dos dados originais.

Método/grid	10 x 10m	15 x 15m	20x20m	25 x 25m
Regra Trapezoidal	-0.5644	0.2664	0.2956	8.4386
Regra de Simpson	-0.6495	0.2443	0.3516	8.4634
Regra de Simpson 3/8	-0.5252	0.3445	0.4751	8.5597
Prismoide	-0.9651	-0.6592	-0.8595	7.3043

Quadro 6.2 - Diferenças percentuais entre os volumes obtidos a partir dos valores interpolados por *block kriging* com 16 pontos por bloco e aquele obtido a partir dos dados originais.

Método/grid	10 x 10m	15 x 15m	20x20m	25 x 25m
Regra Trapezoidal	-0.6427	0.2115	0.2489	8.3884
Regra de Simpson	-0.6932	0.2011	0.3125	8.4116
Regra de Simpson 3/8	-0.5853	0.3072	0.4296	8.4973
Prismóide	-1.0777	-0.7309	-0.9301	7.2379

As Figs. 6.1 e 6.4, ilustram graficamente as oscilações nos volumes calculados com os dados originais (padrão 5x5m) e com os dados interpolados por krigagem pontual e por blocos respectivamente, considerando o método de cálculo de volume e as malhas de pontos com diferentes espaçamentos.

Ao excluir-se os valores obtidos a partir da malha de 25x25m (Figs. 6.2 e 6.4), que apresenta valores discrepantes no volume, é possível notar-se com mais clareza a relação existente entre os volumes obtidos com a interpolação por krigagem considerando pontos mais distantes na malha original e o método utilizado para o cálculo destes volumes.

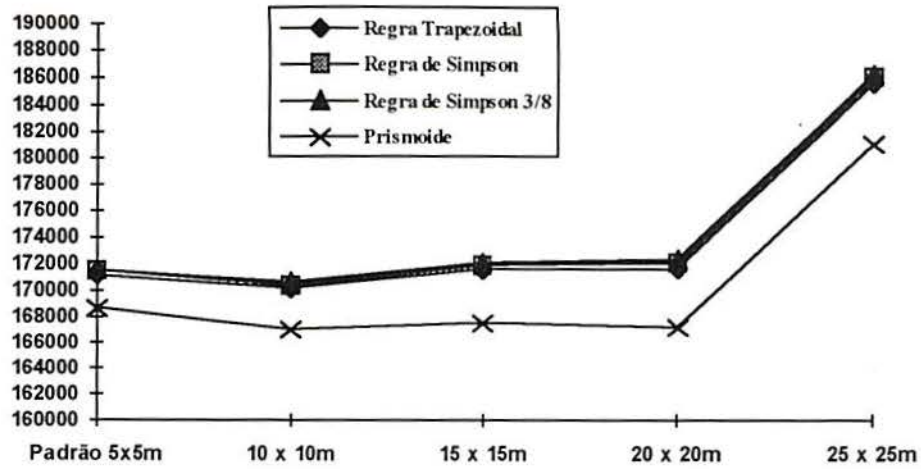


Figura 6.1 - Oscilação das diferenças relativas entre os volumes calculados a partir de valores interpolados por *point kriging* e o volume calculado com os dados originais.

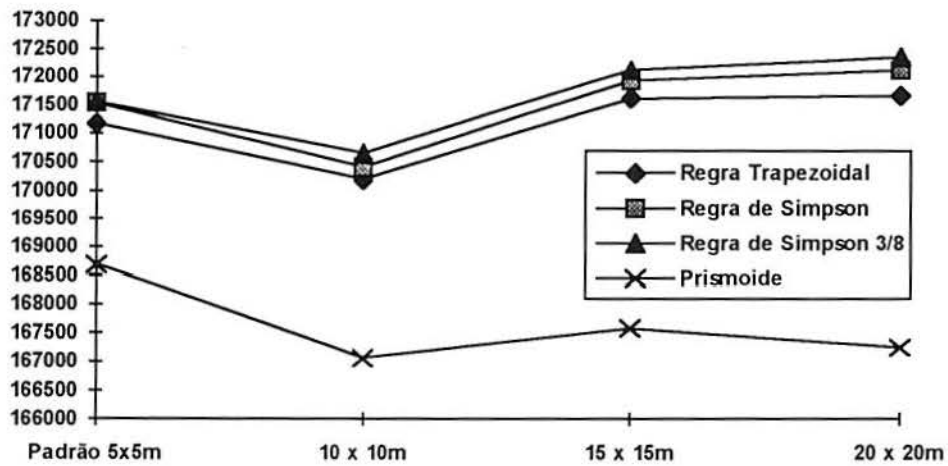


Figura 6.2 - Oscilação das diferenças relativas entre os volumes calculados a partir de valores interpolados por *point kriging* e pelos valores originais, excluindo o volume produzido pela malha de 25x25m.

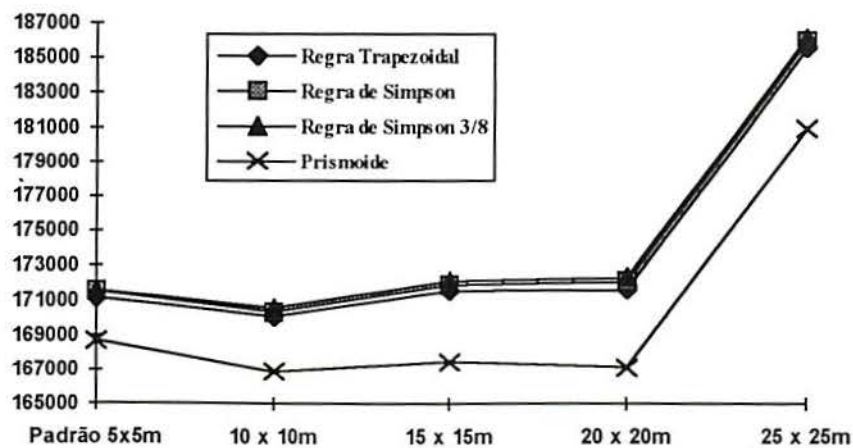


Figura 6.3 - Oscilação das diferenças relativas entre os volumes calculados a partir de pontos interpolados por *block kriging* e a partir dos dados originais.

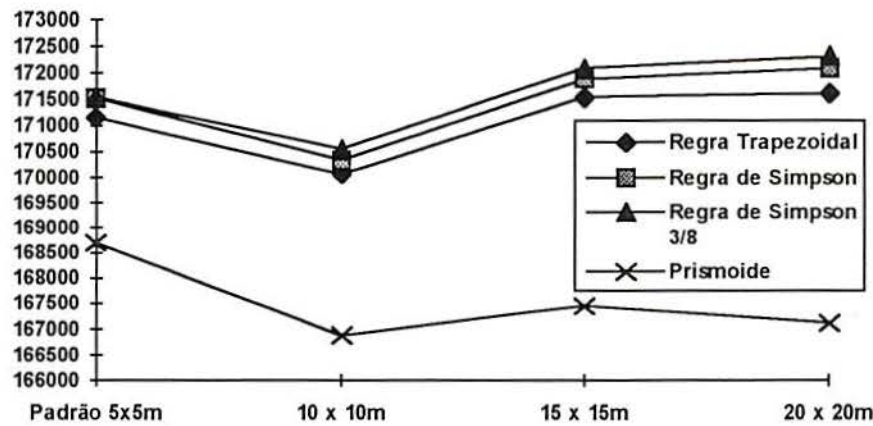


Figura 6.4 - Oscilação das diferenças relativas entre os volumes calculados por pontos interpolados por *block kriging* e pelo dados originais, excluindo aqueles produzidos pela malha de 25x25m.

Observa-se que, no volume calculado por métodos numéricos (algoritmo do *Surfer*) utilizando pontos originais ou krigados por *point* ou *block kriging* a partir de diferentes espaçamentos inter-amostrais, ocorre uma superestimação em relação ao volume calculado por prismóides utilizando os mesmos conjuntos de dados. A diferença percentual do volume calculado com dados originais e por valores interpolados dentro de cada método é mostrada nos quadros 6.1 e 6.2.

Ao tomarmos como volume padrão aquele obtido pelo método do prismóide a partir dos dados originais distribuídos em uma malha amostral de 5x5m que é de 168.695 m^3 , a diferença percentual média entre os volumes calculados pelos métodos numéricos a partir dos dados originais (malha 5x5m) e o volume padrão é, em média, de 1,6114% maior. Quando são comparados os volumes calculados através dos métodos numéricos a partir dos pontos interpolados por *point kriging* e *block kriging*, desconsiderando a malha de 25x25m, a diferença percentual média em relação ao volume tomado como padrão (168.695 m^3) é de 1,6130% maior.

Nota-se que existe uma constância nesta diferença entre os volumes calculados a partir dos dados originais e a partir dos dados interpolados com relação ao volume padrão. Isto no entanto, ocorre para as características de rugosidade do terreno na área teste, não significando que a diferença seja sempre para maior em terrenos com características topográficas diferenciadas. Os procedimentos devem ser testados em áreas com grandes contrastes topográficos.

Quando comparamos a diferença percentual produzida pela estimação do volume com os valores interpolados por *point kriging* (quadro 6.3) e por *block kriging* (quadro 6.4) em

relação ao volume padrão, observa-se que, para os métodos numéricos, as diferenças percentuais aumentam com o aumento da malha amostral, sendo que para a área de estudo, estas diferenças foram positivas.

Com relação ao método do prismóide, as diferenças percentuais entre os volumes calculados a partir dos valores interpolados são sempre negativas, com excessão dos valores interpolados a partir da malha de 25x25m, ou seja, os volumes calculados foram sempre menores que o volume tomado como padrão.

Quadro 6.3 - Diferenças percentuais entre os volumes calculados a partir de valores de cotas interpolados por *point kriging*, aplicando métodos numéricos e geométrico e o volume padrão calculado por prismóides a partir dos dados originais em malha 5x5m.

MÉTODO/GRID	10x10m	15x15m	20x20m	25x25m
Regra Trapezoidal	0,8915	1,7345	1,7641	10,0264
Regra de Simpson	1,0178	1,9266	2,0356	10,2836
Regra de Simpson 3/8	1,1577	2,0421	2,1749	10,3963
Prismóide	-0,9651	-0,6592	-0,8595	7,3043

Quadro 6.4 - Diferenças percentuais entre os volumes calculados a partir de valores de cotas interpolados por *block kriging*, aplicando métodos numéricos e geométrico e o volume padrão calculado por prismóides a partir dos dados originais em malha 5x5m.

MÉTODO/GRID	10x10m	15x15m	20x20m	25x25m
Regra Trapezoidal	0,8121	1,6788	1,7167	9,9754
Regra de Simpson	0,9734	1,8827	1,9959	10,2309
Regra de Simpson 3/8	1,0967	2,0042	2,1287	10,3328
Prismóide	-1,0777	-0,7309	-0,9301	7,2379

Conforme já foi citado, a redução do número de amostras na expansão da malha de pontos originais de 5x5m para 25x25m, não permitiu que no estudo da continuidade espacial, os pares formados para a construção do variograma experimental fossem suficientes para representar com confiabilidade a estruturação da variável cota na área teste. Este fato, aliado ao que se observa com relação aos volumes obtidos pelos dados interpolados serem sempre menores do que o volume calculado pelos pontos originais (padrão 5x5m), indicam a sensibilidade do método na avaliação do volume de *overburden* para as características da área teste.

Os valores obtidos para o volume de *overburden* na área teste, calculado através dos métodos numéricos e pelo método do prismóide, foram comparados ao volume calculado por seções paralelas.

Observa-se no resultado do quadro 5.6, que o volume calculado pelo método das seções paralelas separadas por distâncias de 10m é 0,8457% maior em relação ao volume calculado pelo mesmo método utilizando seções espaçadas de 20m. Esta diferença positiva não está relacionada com o aumento na precisão do método através da aproximação das seções consideradas, mas está relacionada com as características da área teste. Observa-se também, que o espaçamento entre as seções próximas à extremidade leste da área foram reduzidas para 5m obtendo-se uma acuracidade maior na avaliação do volume.

A comparação entre os valores para os volumes totais obtidos pela aplicação do método das seções paralelas (quadros 5.5 e 5.6) e o volume tomado como padrão, mostra que, para a área de estudo, o método das seções paralelas espaçadas de 20m produz um resultado para o volume calculado muito próximo do volume considerado como padrão, calculado pelo método do prismóide com área de 25m^2 para a base dos prismas.

A proximidade dos volumes obtidos pelo método das seções e por prismóides, porém, é mero acaso, pois o volume padrão total considerado foi obtido calculando o volume de prismas com 5m de lado (área da base 25m^2) e somando-se o volume de todos os prismas dentro dos limites da área estudada, enquanto o método das seções por outro lado, avalia o volume de um bloco limitado por duas seções paralelas espaçadas de 20m, que seccionam lateralmente a área de um extremo ao outro (N-S) por distâncias em torno de 100m.

A aproximação das seções produz o aumento do volume indicando que o volume obtido através das seções espaçadas de 20m não pode ser considerado mais preciso por estar próximo do volume padrão, já que o aumento do número de seções e a redução do espaçamento entre estas fornece ao método, um aumento na precisão.

A diferença percentual do volume calculado pelo método das seções paralelas distanciadas de 20m é de 0,0022% menor que o volume tomado como padrão calculado por prismóides de 25m^2 de base, enquanto que o volume calculado por seções paralelas espaçadas de 10m é de 0,8435% maior em relação ao padrão. Nota-se que essas diferenças não mostram uma linearidade, significando que estão relacionadas às características topográficas (rugosidade do terreno) da área podendo apresentar um comportamento diferenciado se os métodos forem aplicados e comparados em áreas com características topográficas diferentes.

A redução da distância de 20m entre as seções para 10m, ainda não alcança a precisão na avaliação do volume que pode ser obtida geometricamente através da soma do volume de prismas obtidos a partir de uma malha regular quadrada de 5x5m de pontos, distribuídos sobre a superfície do terreno e sobre a camada superior de carvão, de forma que, cada um destes pontos seja o centro de um prisma com 25 m² de área da base, e cuja diferença de cotas da superfície e da camada de carvão, na mesma posição, corresponda a altura do prisma.

Com relação aos métodos numéricos, considerando que quanto menor for o erro relativo (E_r), dado pela diferença entre o maior e o menor valor do volume estimado dividido pela média dos valores obtidos das três regras de aplicação da quadratura ($E_r = 0.0022$ para os volumes mostrados na primeira coluna do quadro 5.3), maior o grau de acuracidade na estimação do volume (*Surfer Manual*, 1991), observa-se que, para o algoritmo de cálculo utilizado pelo *Surfer*, os valores obtidos apresentam alto grau de acuracidade, porém estão super-estimados em 1,6114% em relação ao volume padrão.

Para generalizar a tendência de super-estimação no cálculo de volumes de *overburden* pelo método de seções paralelas e pela aplicação da quadratura pelo *Surfer*, é necessário repetir-se o procedimento utilizado neste trabalho em várias áreas com diferentes características topográficas. Caso os valores obtidos nos cálculos dos volumes confirmem uma tendência de super-estimação, então será possível afirmar que o método das seções paralelas fornece como resultado, volumes maiores do que os volumes reais.

Pode-se afirmar, no entanto, que os métodos propostos neste trabalho apresentam uma maior precisão no cálculo do volume de *overburden*, comparados ao método das seções paralelas espaçadas de 20m atualmente utilizado pela Copelmi Mineração Ltda.. O método do prismóide, juntamente com os procedimentos de interpolação empregando a técnica de krigagem são capazes de fornecer valores para volumes com maior nível de confiabilidade na avaliação do volume de cortes em minas a céu aberto, desde que o estudo da continuidade espacial da variável cota na área seja representada por um modelo variográfico bem ajustado.

6.2. Análise Estatística Básica dos valores Interpolados

Para o entendimento das possíveis implicações do comportamento da distribuição dos valores nos volumes finais, foi feito o tratamento estatístico descritivo dos valores originais e dos valores estimados através das técnicas de krigagem, apresentando os histogramas de frequência (Anderson & Sclove, 1978) para os pontos estimados por krigagem pontual, representando a distribuição dos pontos estimados em comparação com os valores originais.

A grandeza das diferenças nos volumes calculados pelos diferentes métodos, não está relacionada com possíveis discrepâncias nos parâmetros estatísticos referentes a cada conjunto de valores krigados, como pode ser visto na análise estatística básica dos valores interpolados por *point kriging* (quadro 6.5) e por *block kriging* (quadro 6.6), referentes às diferentes bases de dados, porém, provavelmente, ao algoritmo numérico utilizado na estimação dos volumes pelo *Surfer*.

Nesta análise é possível observar as características de rugosidade do terreno através do desvio padrão dos valores amostrados.

- Estatística Descritiva

Quadro 6.5 - Estatística descritiva dos pontos originais em malha de 5x5m (padrão) e os pontos interpolados por *point kriging* cota do terreno natural.

COTA DA SUPERFÍCIE	N	MÉDIA	MEDIANA	MÍNIMO	MÁXIMO	VARIÂNCIA	DESVIO PADRÃO	ERRO PADRÃO	ASSIMETRIA	CURTOSE
Padrão	795	59.089	59.493	52.711	61.348	3.473	1.864	.066	-1.271	1.1814
10 x 10	795	59.076	59.480	52.711	61.303	3.404	1.845	.065	-1.258	1.099
15 x 15	795	59.101	59.529	53.212	61.303	3.394	1.842	.065	-1.215	.912
20 x 20	795	59.070	59.492	52.711	61.387	3.434	1.853	.066	-1.206	.968
25 x 25	795	59.078	59.530	53.104	61.288	3.475	1.864	.066	-1.228	.957

Quadro 6.6 - Estatística descritiva dos pontos originais medidos em malha 5x5m (padrão) os pontos interpolados por *block kriging* para cota da camada superior de carvão.

COTA DO CARVÃO	N	MÉDIA	MEDIANA	MÍNIMO	MÁXIMO	VARIÂNCIA	DESVIO PADRÃO	ERRO PADRÃO	ASSIMETRIA	CURTOSE
Padrão	795	50.427	49.287	42.820	61.192	20.198	4.494	.159	.723	-.448
10 x 10	795	50.460	49.431	43.026	60.717	18.143	4.260	.151	.683	-.482
15 x 15	795	50.371	49.466	43.254	60.717	14.971	3.869	.137	.554	-.502
20 x 20	795	50.319	49.854	43.059	60.525	12.194	3.492	.124	.306	-.547
25 x 25	795	49.601	48.622	42.949	60.490	15.844	3.981	.141	.598	-.329

As Figs. 6.5 e 6.8 do anexo B apresentam os histogramas de frequência dos dados originais medidos em campo na superfície do terreno natural e sobre a camada superior de carvão em malha de 5x5m. As Figs. 6.6, 6.7, 6.9 e 6.10, do mesmo anexo, mostram os histogramas de frequência dos pontos interpolados por krigagem pontual a partir das malhas

de pontos originais separados por distâncias de 10, 15, 20, 25 metros para as cotas da superfície do terreno natural e cotas de topo da camada superior de carvão.

Conforme pode ser observado na análise estatística básica dos valores estimados por krigagem relativos à cada conjunto de dados, não se verificam diferenças expressivas em relação à média entre os dados originais (padrão) e relativamente aos parâmetros de variabilidade (variância e desvio padrão), que estão muito próximos.

Da mesma forma, a distribuição dos dados e a geometria desta distribuição identificadas nos histogramas de frequência, apresentam-se muito semelhantes o que significa que no geral, os valores estimados em cada conjunto de pontos com espaçamento respectivo, não diferem significativamente.

7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

De acordo com os objetivos propostos, este trabalho foi desenvolvido em etapas buscando otimizar os procedimentos para cálculo dos volumes na Copelmi Mineração Ltda., através da utilização de métodos computacionais capazes de proporcionar maior agilidade, rapidez e precisão nos resultados.

O estudo da aplicabilidade da krigagem como método de interpolação, mostrou-se extremamente favorável quanto à acuracidade na estimativa final de volumes, possibilitando obter uma maior agilidade na coleta de dados, pois com menor número de pontos coletados obtém-se, através da interpolação, dados suficientes para avaliar-se o volume de *overburden* resultando valores muito próximos daqueles que seriam obtidos com pontos medidos no terreno.

A utilização de estação total e coletor eletrônico de dados, reduz a interferência humana no processo, o que implica um menor risco de propagação de erros nas medidas e acrescenta maior velocidade na coleta e transferência dos dados para posterior tratamento, de acordo com os procedimentos descritos neste trabalho.

A metodologia empregada com o desenvolvimento de uma malha padrão de 5x5m e a estimação do volume de *overburden* utilizando dados reais medidos em campo, possibilitou avaliar as diferenças produzidas por volumes calculados através de diferentes métodos de cálculo, utilizando bases de dados interpolados a partir de malhas com pontos espaçados de distâncias distintas, porém, abrangendo a mesma área teste total.

A estimação de volumes utilizando o modelo digital do terreno, gerado pela aplicação da quadratura (regra trapezoidal, regra de Simpson, regra de Simpson 3/8) através do *Surfer* utilizando os dados originais (malha 5x5m) gerou uma diferença percentual média em relação ao volume padrão (168.695 m³) calculado com dados originais através do método do prisma, de 1,6114%.

A diferença média do volume de *overburden* calculado pelos métodos numéricos utilizados pelo *surfer* (regra trapezoidal, regra de Simpson e regra de Simpson 3/8), utilizando dados interpolados em malha de 5x5m por krigagem puntual (*point kriging*) ou krigagem por blocos (*block kriging*), de valores de cotas com pontos espaçados de até 20m, em comparação com o volume padrão, foi de 1,6130%.

A diferença média entre os volumes resultantes do cálculo com o *Surfer* utilizando dados interpolados por *point kriging* e o padrão foi de 1,6383%, enquanto a diferença obtida

pelo mesmo procedimento utilizando dados interpolados por *block kriging* com 16 pontos por bloco foi de 1,5877, representando uma diferença de 0,0506% menor na diferença produzido pela krigagem por blocos em relação ao padrão de comparação.

Quando o método de cálculo utilizado foi o método do prismóide, a diferença média em relação ao padrão para os pontos interpolados por *point kriging* foi de 0,8279% menor que o padrão e utilizando pontos interpolados por *block kriging* com 16 pontos por bloco foi de 0,9129%, também menor que o padrão, representando uma diferença de 0,0850% menor em relação ao erro produzido pelo cálculo do volume utilizando dados interpolados por *point kriging*.

Observa-se que todas as diferenças apresentadas em relação aos volumes calculados por pontos interpolados, excluem a malha de 25x25m em razão das discrepâncias apresentadas no resultados da avaliação dos volumes, às quais são devidas aos erros de krigagem em função de não ter sido possível definir com grau de confiabilidade suficiente os parâmetros variográficos, pelo pequeno número de amostras restantes na expansão da malha de 5x5m para 25x25m.

O tipo de krigagem aplicada, tem uma influência pequena no resultado final do volume, sendo que, para os métodos numéricos, a diferença média entre os volumes calculados a partir de dados interpolados por *point kriging* é de 0,0506% menor do que os volumes calculados a partir de pontos interpolados por *block kriging*. Para o método do prismóide, esta diferença é 0,0850% menor para o volume calculado a partir de pontos interpolados por *point kriging*. Este resultado indica a sensibilidade do método do prismóide em relação aos demais, e resulta das características topográficas da área, podendo ser diferente para áreas com maior rugosidade.

Observa-se no resultado do quadro 5.6 que, para a área do estudo, o volume de *overburden* calculado por seções paralelas separadas por distâncias de 10m é 0,8457% maior em relação ao volume calculado pelo mesmo método utilizando seções espaçadas de 20m. Considerando-se o volume padrão, este resultado apresenta uma incoerência pois à medida que se aumenta a precisão do método, o resultado do volume afasta-se do valor do volume padrão, significando que o valor do volume de *overburden* calculado por seções paralelas distanciadas de 20m aproxima-se do volume padrão (168.695m^3), apenas por coincidência, não representando de forma alguma que seja um método preciso.

As diferenças percentuais entre o volume calculado por seções paralelas espaçadas de 20m em relação aos volumes calculados pelos demais métodos empregados, (quadro 5.3) são mostradas abaixo, comparativamente com o método utilizado:

Quadro 7.1 - Diferenças percentuais do volume de *overburden* calculado pelo método das seções e o volume padrão conforme quadro 5.3.

MÉTODO	SEÇÕES - 10m	SEÇÕES - 20m
Regra trapezoidal	- 0,6117%	-1,4452%
Regra de Simpson	- 0,8209%	-1,6526%
Regra de Simpson 3/8	- 0,8342%	-1,6658%
Método do prismóide	0,8435%	- 0,0022%

A comparação entre os valores dos volumes totais (quadros 5.5 e 5.6) calculados por seções paralelas, e o volume tomado como padrão calculado por prismóides a partir de dados medidos em malha de 5x5m, permite concluir que, considerando a área de estudo, o método das seções paralelas tende a superestimar os volumes calculados. O fato de que, o aumento da precisão do método das seções (aumento do número de seções paralelas) deveria produzir um volume mais próximo do real não se verifica (quadro 5.6), indicando que o método pode produzir resultados muito diferenciados de acordo com as características do terreno, podendo o volume final estar mais próximo ou mais afastado do volume real, mesmo aumentando o número de seções.

Para os volumes obtidos a partir de malhas interpoladas por krigagem, com espaçamento menor do que 20m (10 e 15 metros), o resultado obtido ficou mais próximo do padrão. No entanto, a magnitude dos erros obtidos para a interpolação dos pontos originais a partir da malha amostral de 20x20m aumenta significativamente. Os procedimentos que resultaram nas menores diferenças, foram obtidos com o cálculo do volume pelo método do prismóide com dados interpolados por *point kriging* a partir de uma malha de 15x15 (-0,6592%) e com dados interpolados por *block kriging* (-0,7309), também a partir de uma malha de 15x15m.

Nos procedimentos utilizados, utilizou-se sempre uma malha regular quadrada de pontos para que pudessem ser feitas comparações com padrões definidos. Em campo, porém, a operacionalização do sistema não precisa necessariamente obedecer a uma distribuição regular de pontos, pois a aplicação da krigagem permitirá regularizar a malha durante o processo de interpolação.

Recomenda-se a utilização das malhas de 15x15m ou 20x20m, como referência para o trabalho de campo, o que operacionalmente é mais vantajoso e não compromete significativamente o resultado da avaliação.

A confiabilidade no resultado dos volumes, dependerá de um criterioso estudo da continuidade espacial da área a ser avaliada, ao qual estão relacionados os parâmetros variográficos que serão posteriormente utilizados na krigagem.

Para generalizar a tendência de superestimação no cálculo de volumes de *overburden* pelo método de seções paralelas, é necessário repetir-se o procedimento utilizado neste trabalho em várias áreas com diferentes características topográficas. Caso os valores obtidos nos cálculos dos volumes confirmem uma tendência de superestimação, então será possível afirmar que o método das seções paralelas fornece como resultado, volumes superiores aos reais.

A metodologia aqui apresentada, comparada ao método das seções paralelas empregado atualmente pela Copelmi, apresenta uma significativa vantagem com relação a vários aspectos, tais como:

- Agilidade na coleta de dados;
- Menor interferência humana no processo;
- Maior precisão no cálculo final do volume de descobertura.

Uma dificuldade encontrada na aplicação do método no interior de um corte descoberto, está relacionado à existência dos taludes, que contribuem para o aumento da variância dos dados, produzindo modelos variográficos evidenciando certo grau de anisotropias zonais que podem gerar o ajuste de modelos inadequados. Esta particularidade pode ser solucionada, aumentando o número de pontos medidos próximos e ao longo dos taludes.

Através deste estudo conclui-se que o método das seções paralelas apresenta um baixo grau de precisão na avaliação de volumes sendo que a precisão do método varia com as características topográficas do terreno e com o nível de rugosidade deste.

O método do prismóide apresenta um grau de precisão superior e independente do tipo de terreno, pois com uma malha de 5x5m, a superfície fica muito bem definida. A operacionalidade do método, depende da aplicação de um interpolador não tendencioso que a krigagem. Com uma boa representação da continuidade espacial, identificando anisotropias, efeito pepita dos dados e os parâmetros geométricos da elipse de busca, pode-se obter excelentes resultados na avaliação de volumes de *overburden* em cortes de mineração a céu aberto, economizando-se em tempo, mão de obra e ganhando precisão em relação ao método das seções paralelas utilizado atualmente nas minas da Copelmi Mineração Ltda. e por outras empresas de mineração.

Acredita-se que este trabalho pode contribuir de alguma forma para aumentar a qualidade dos serviços mineiros, principalmente com relação à avaliação de volumes além de consolidar a utilização de técnicas de geoestatística em topografia, bem como servir de parâmetro para o desenvolvimento de novas tecnologias aplicadas a estimativa de volumes de cortes, tanto na indústria mineira quanto na indústria da construção civil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ANNELS, A.E. **Mineral deposit evaluation - a practical approach**. London: Chapman & Hall, 1991. 340p.
- 2 BLACHUT, T. J.; CHRZANOWSKI, A.; SAASTAMOINEN, J. H. **Urban surveying and mapping**. New York: Springer, 1979. 373p.
- 3 CLARK, I. **Practical geostatistics**. London: Applied Science Publishers, 1979. 129p.
- 4 COSTA, J. F. C. L.; SOUZA, L. E.; CARVALHO Jr., J. A. Métodos gráficos alternativos para cálculo de volume de escavações a céu-aberto. In: CONGRESSO IBERO-LATINO AMERICANO SOBRE MÉTODOS COMPUTACIONAIS PARA ENGENHARIA, 13., 1992, Porto Alegre, **Anais...** Porto Alegre, 1992. 2v. v.1, p. 601-608.
- 5 CUNHA, C. **Métodos numéricos para as engenharias e ciências aplicadas**. Campinas: Editora da Unicamp, 1993. 265p.
- 6 ENGLUND, E.; SPARKS, A. **Geo-Eas (Geo-statistical Environmental Assessment Software) user's guide**. Nevada:U. S. Environmental Protection Agency, 1988.
- 7 DAVID, M. **Handbook of applied advanced geostatistical ore reserve estimation**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V., 1988. 216p.
- 8 DOUBEK, A. **CG-160 levantamentos eletrônicos**. 2ª parte. Curitiba: Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, 1974.
- 9 ESPARTEL, L. **Curso de topografia**. 2.ed. Porto Alegre: Globo, 1982. 655p.
- 10 FERGUSON, J. **Mathematics in geology** London: Allen & Unwin, 1988. 299p.
- 11 GARCIA, J. G.; PIEDADE, G. C. R. **Topografia aplicada às ciências agrárias**. São Paulo: Nobel, 1978.
- 12 GOLDEN SOFTWARE. **Surfer reference manual**. Golden.,1991.
- 13 GRIPP Jr., J. Calibração de distanciômetros eletrônicos com medidas de campo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 13., 1987, Brasília. **Anais...** Brasília: SBCGFSR, 1987. p. 276-287.

- 14 GROSSI SAD, J. H. **Fundamentos sobre a variabilidade de depósitos minerais.** Rio de Janeiro: DNPM/CPRM - GEOSOL, 1986. 141p.
- 15 GUERRA, P.A.G. **Geoestatística operacional.** Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, 1988. 145p.
- 16 GUIBAL, D. **Operational geostatistics for gold deposits (Workshop course notes).** Glenside: Australian Mineral Foundation, 1989. 208p.
- 17 HARBAUGH, J. W., MERRIAN D. F. **Computer applications in stratigraphic analysis.** New York: John Wiley, 1968.
- 18 HENLEY, S. **Nonparametric geostatistics.** Leighton Buzzard: Applied Science Publishers, 1986. 145p.
- 19 HOHN, M. E. **Geostatistics and petroleum geology.** New York: Van Nostrand Reinhold, 1988. 264p.
- 20 ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics.** New York: Oxford University Press, 1989.
- 21 MARANHÃO, R. J. L. **Introdução à pesquisa mineral.** 3. ed. Fortaleza: BNB, 1985.
- 22 MATHERON, G. **The theory of regionalized variables and its application.** Paris: Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1971. (Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau).
- 23 MEDEIROS, R. A.; THOMAZ FILHO, A. **Fácies e ambientes deposicionais da formação Rio Bonito.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 27., 1973, Aracaju. **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1973.
- 24 PRESS, H. W. et al. **Numerical recipes.** New York: Cambridge University, 1986. 818p.
- 25 RENDU, J. M. **An introduction to geostatistical methods of mineral evaluation.** 2. ed. Johannesburg: South African Institute of Mining and Metallurgy, 1981. 84p.
- 26 SCLOVE, L. S.; ANDERSON, T. W. **An introduction to statistical analysis of data.** Boston: Houghton Mifflin Company, 1978. 704p.

- 27 SCHNEIDER, R. L. et al. Revisão estratigráfica da bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., 1974, Porto Alegre. **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1974. v.1, p.41-65.
- 28 SOUZA, R. P. et al. Relatório de pesquisa mina Butiá-Leste. Butiá. Butiá: GGP, 1988. Inédito.

ANEXO A

A seguir são apresentados os variogramas onidirecionais e direcionais (Figs. 5.9 a 5.33), referentes ao estudo da continuidade espacial de cada um dos conjuntos de dados (superfície e carvão).

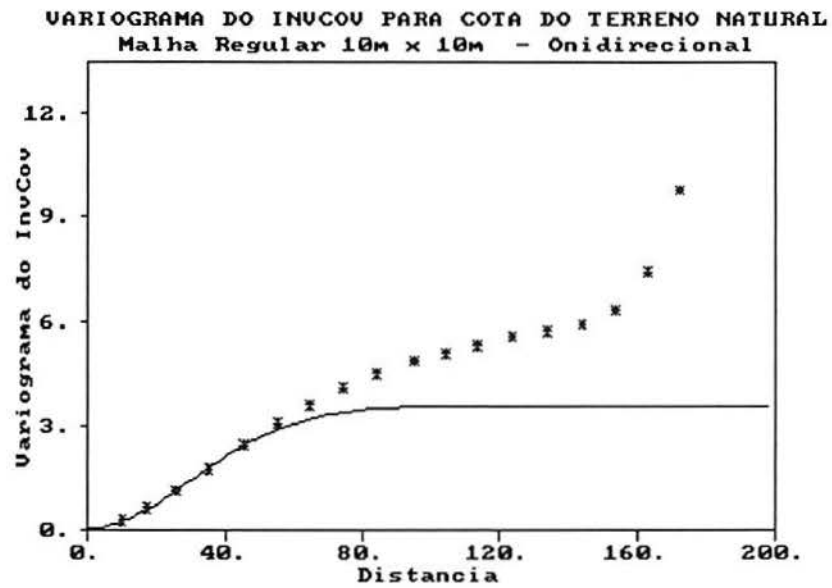


Figura 5.9 - Variograma onidirecional para cota do terreno natural - malha 10x10m.

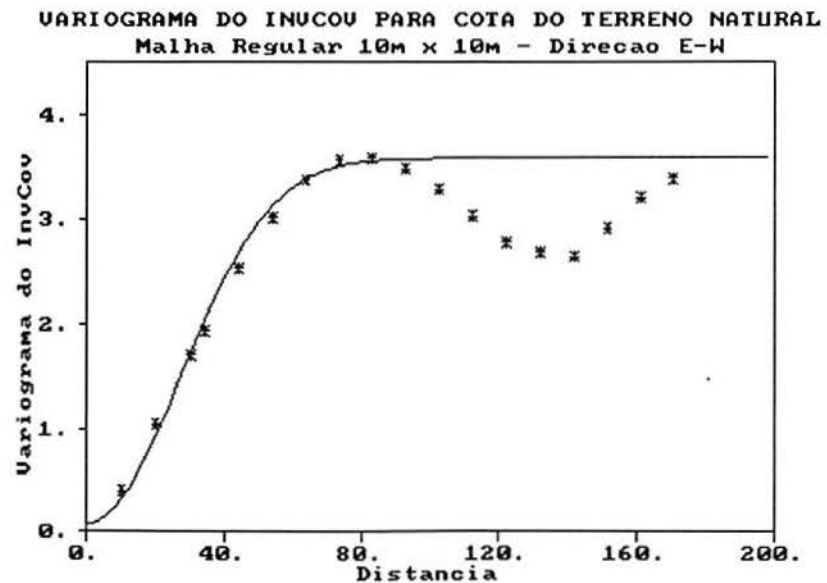
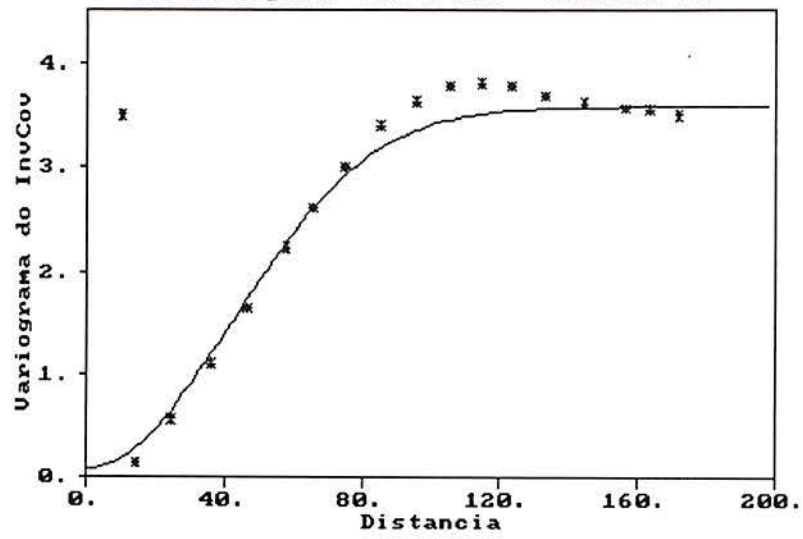


Figura 5.10 - Variograma para cota do terreno natural, malha 10x10m na direção E-W.

VARIOGRAMA DO INUCOV PARA COTA DO TERRENO NATURAL
Malha Regular 10m x 10m - Direcao NE



VARIOGRAMA DO INUCOV PARA COTA DO TERRENO NATURAL
Malha Regular 10m x 10m - Direcao N-S

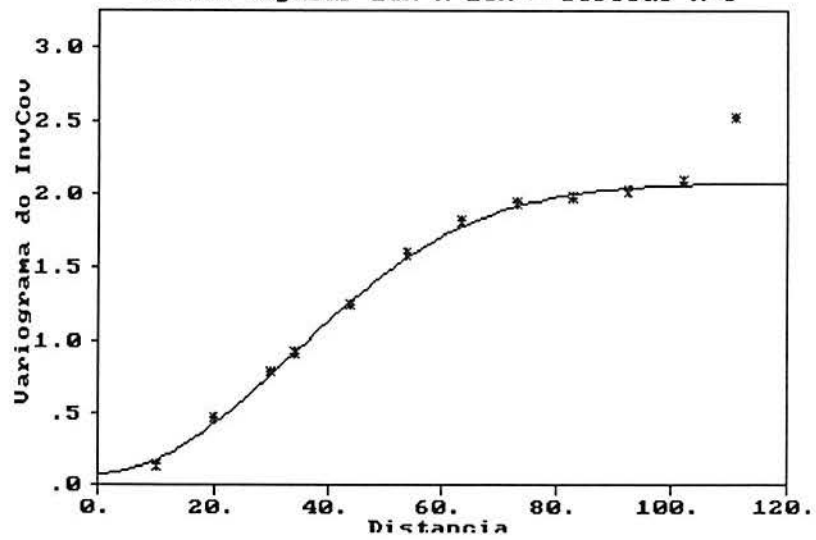


Figura 5.11 - Variogramas para cota do terreno natural em malha 10x10m nas
direções NE e N-S.

VARIOGRAMA DO INUCOV PARA COTA DO TERRENO NATURAL
Malha Regular 10m x 10m - Direcao NO

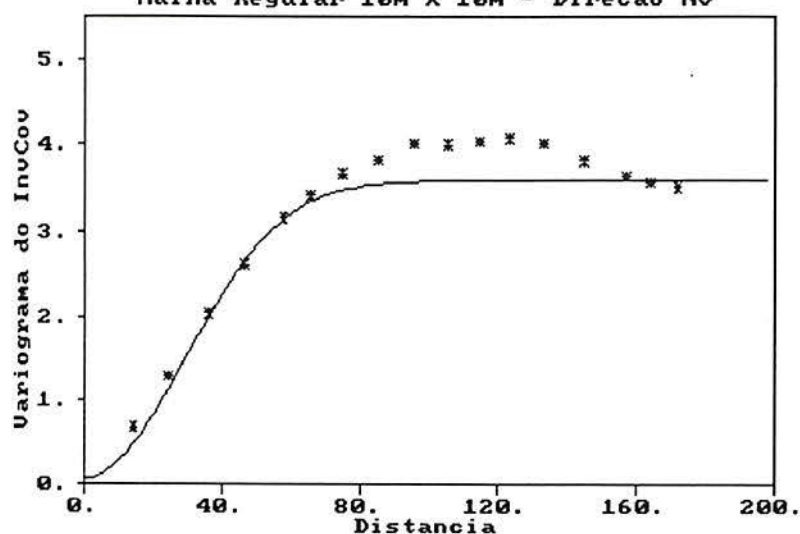
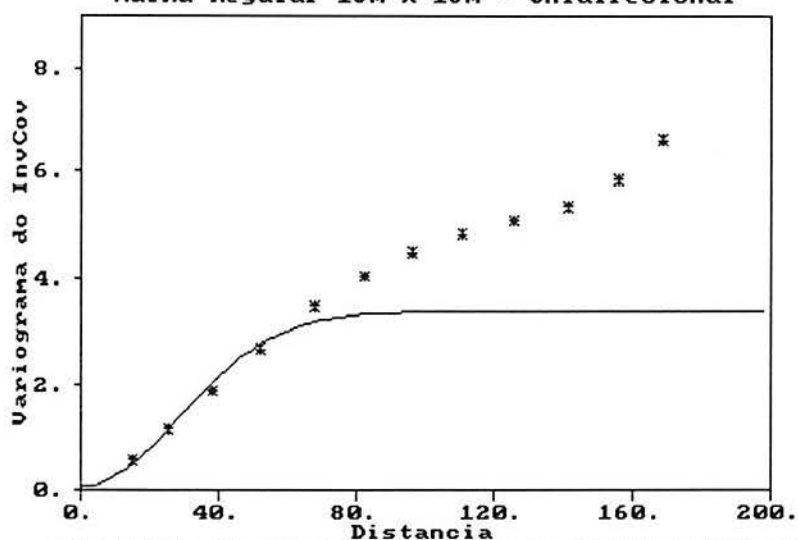


Figura 5.12 - Variograma referente à malha de pontos espaçados de 10m para cota do terreno natural na direção NO.

VARIOGRAMA DO INUCOV PARA COTA DO TERRENO NATURAL
Malha Regular 15m x 15m - Onidirecional



VARIOGRAMA DO INUCOV PARA COTA DO TERRENO NATURAL
Malha Regular 15m x 15m - Direcao E-W

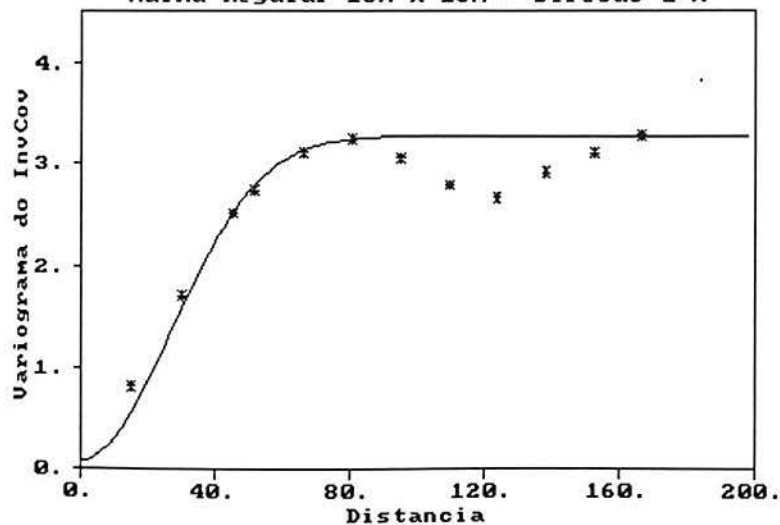
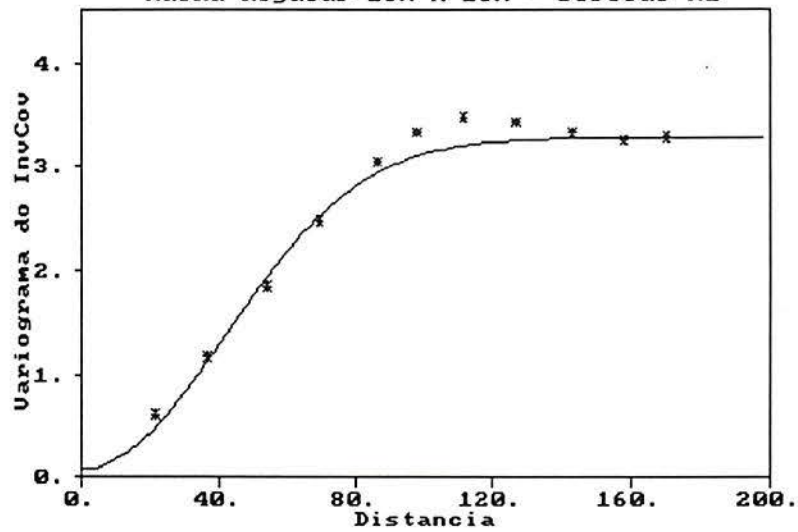
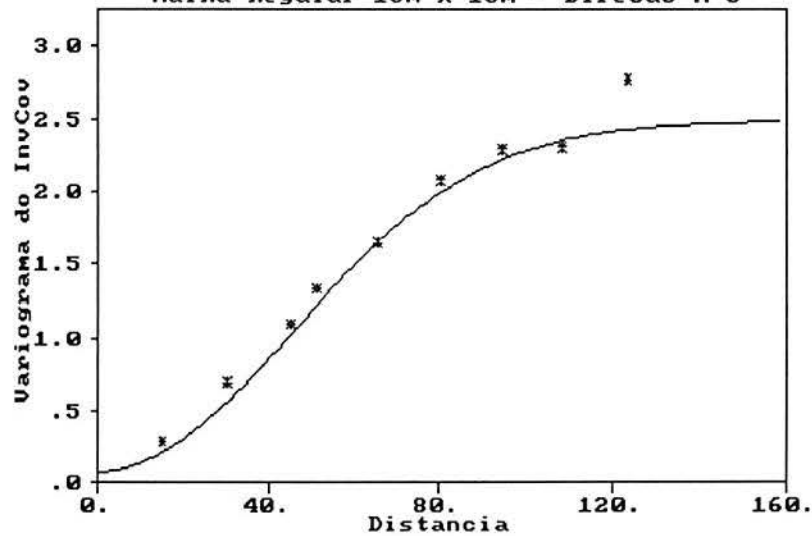


Figura 5.13 - Variogramas onidirecional e na E-W para cota do terreno natural-malha 15x15m.

VARIOGRAMA DO INUCOV PARA COTA DO TERRENO NATURAL
Malha Regular 15m x 15m - Direcao NE



VARIOGRAMA DO INUCOV PARA COTA DO TERRENO NATURAL
Malha Regular 15m x 15m - Direcao N-S



VARIOGRAMA DO INUCOV PARA COTA DO TERRENO NATURAL
Malha Regular 15m x 15m - Direcao NO

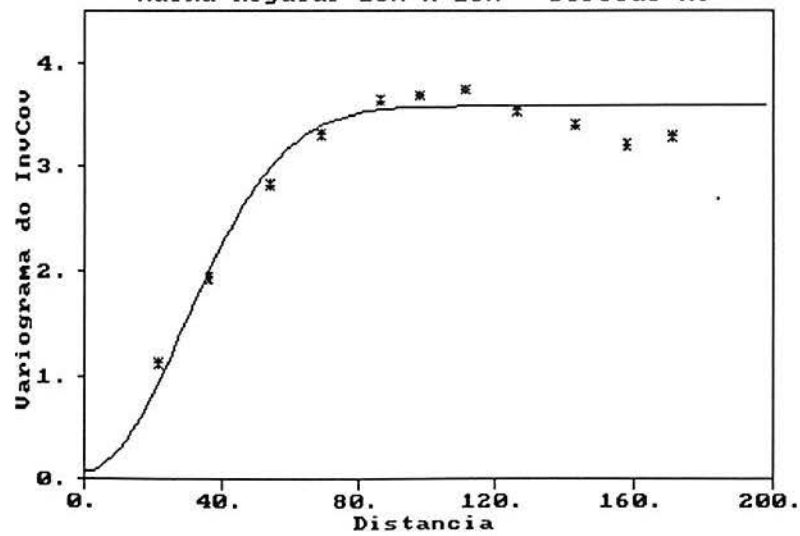


Figura 5.14 - Variograma direcionais para cotas do terreno natural espaçadas de 15m, nas direções NE, N-S e NO.

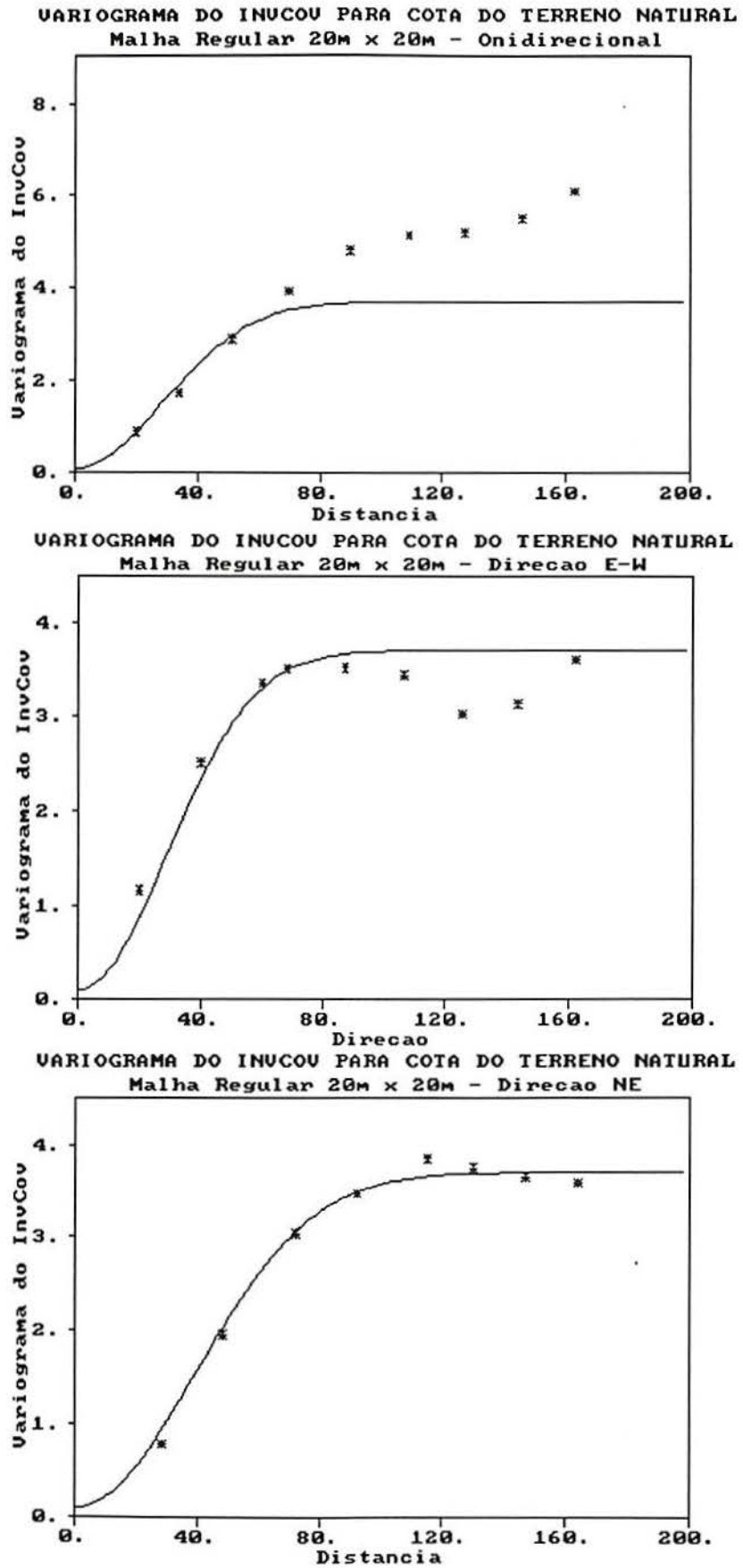


Figura 5.15 - Variogramas onidirecional e nas direções E-W e NE, para cota do terreno natural em malha 20x20m.

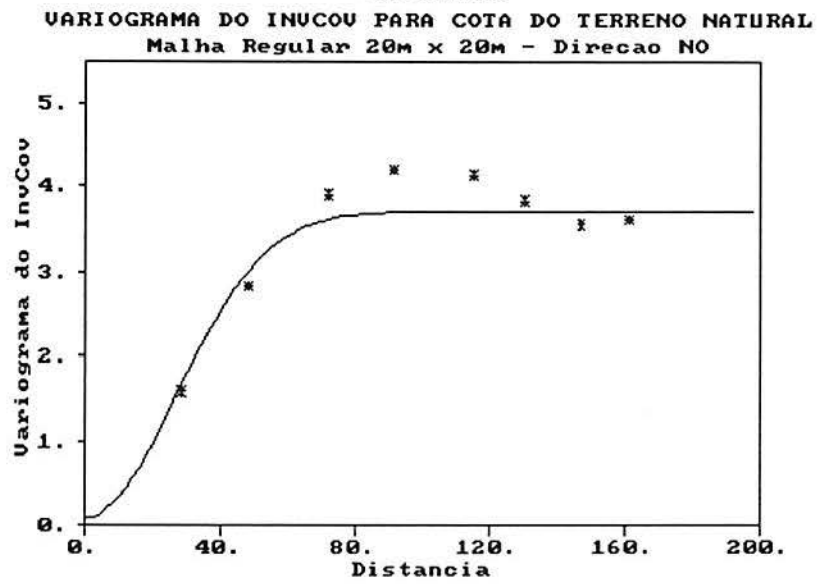
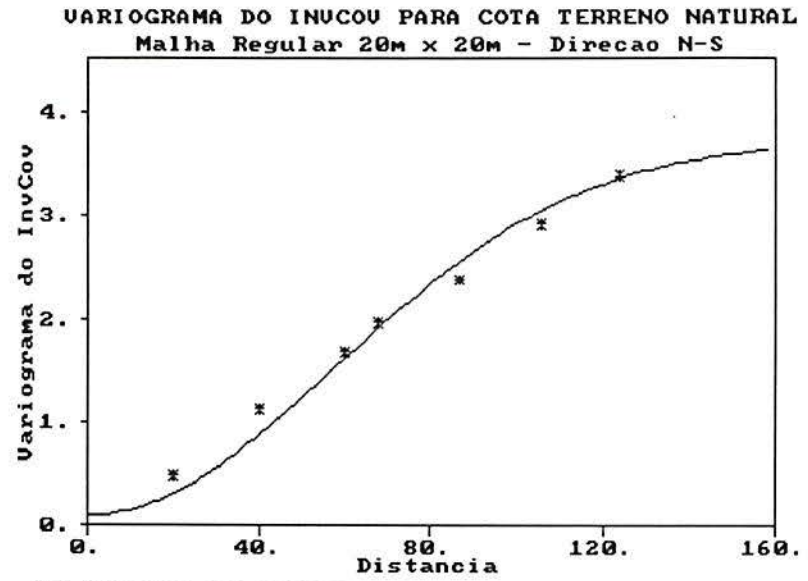


Figura 5.16 - Variogramas nas direções N-S e NO cota do terreno natural espaçadas de 20m.

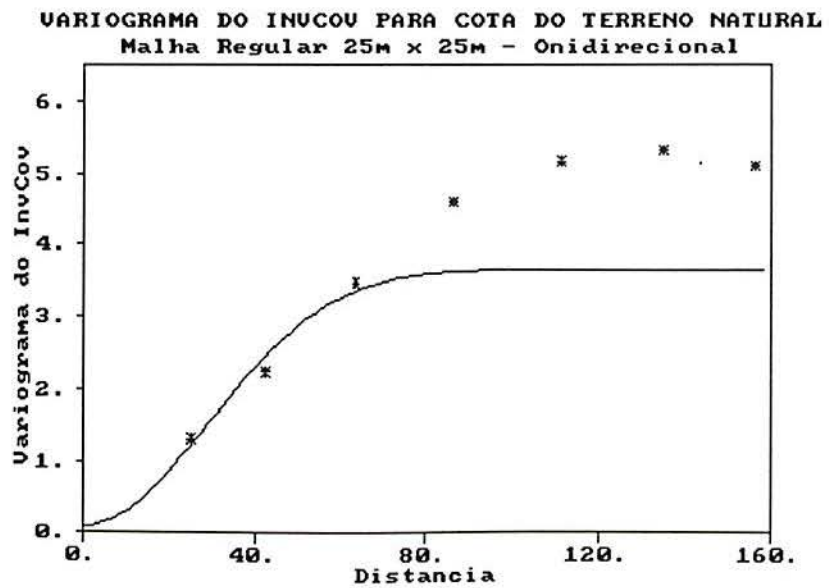
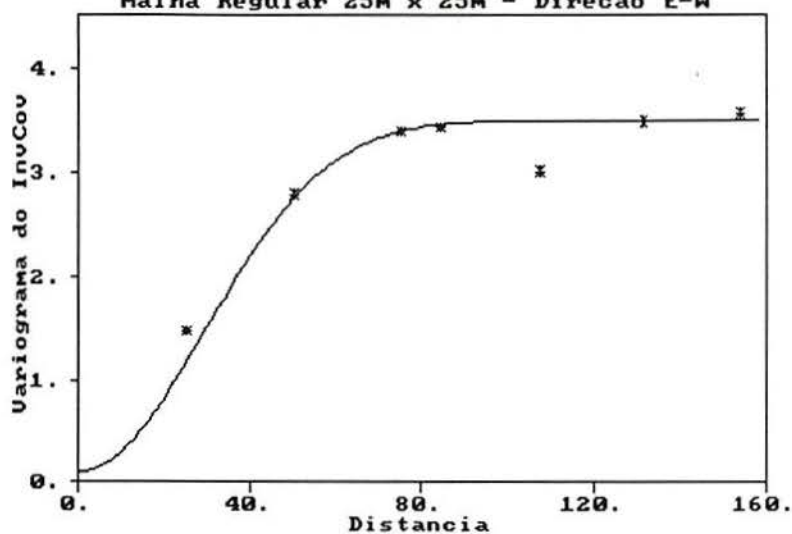
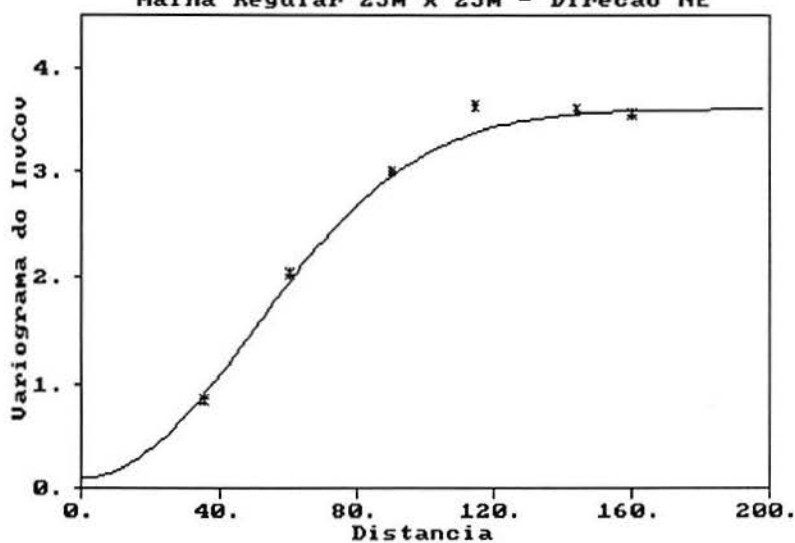


Figura 5.17 - Variograma onidirecional para cota do terreno natural em malha 25x25m.

VARIOGRAMA DO INUCOV PARA COTA DO TERRENO NATURAL
Malha Regular 25m x 25m - Direcao E-W



VARIOGRAMA DO INUCOV PARA COTA DO TERRENO NATURAL
Malha Regular 25m x 25m - Direcao NE



VARIOGRAMA DO INUCOV PARA COTA DO TERRENO NATURAL
Malha Regular 25m x 25m - Direcao N-S

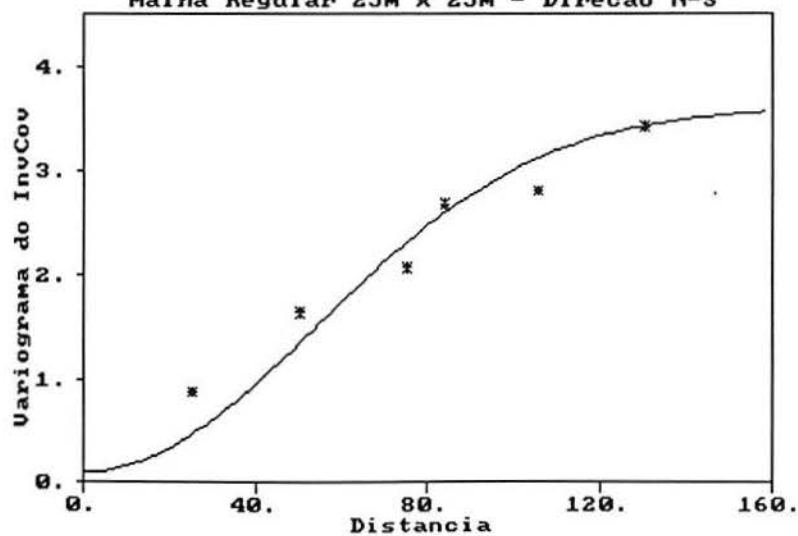


Figura 5.18 - Variograma nas direções E-W, NE, N-S para cota do terreno natural malha de 25x25m.

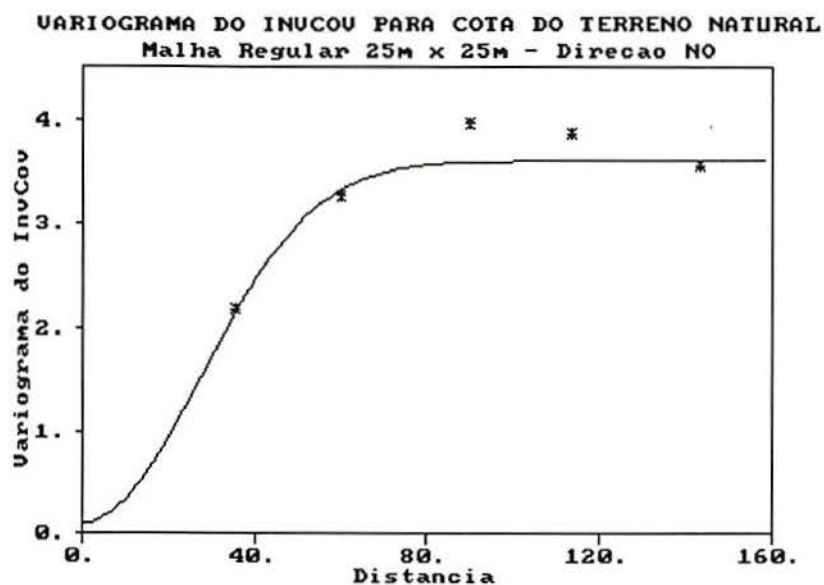


Figura 5.19 - Variograma na direção NO, para cota do terreno natural em malha 25x25m.

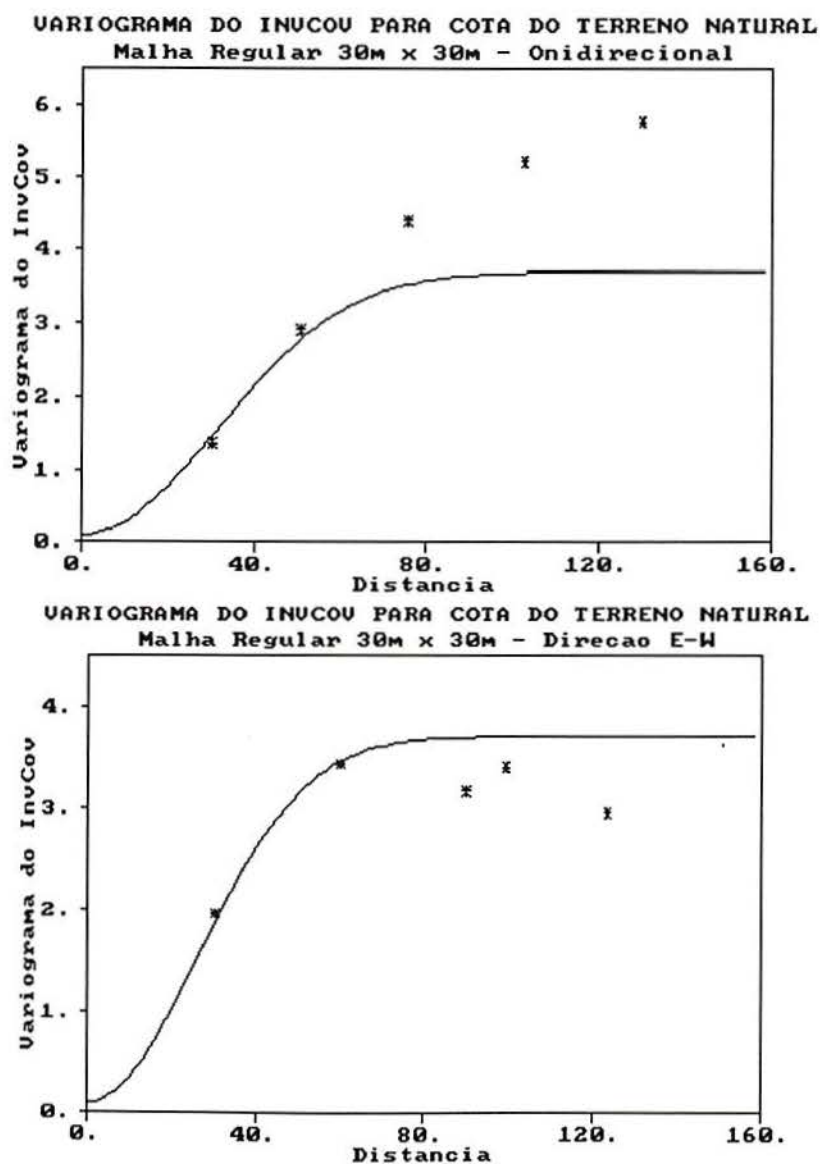
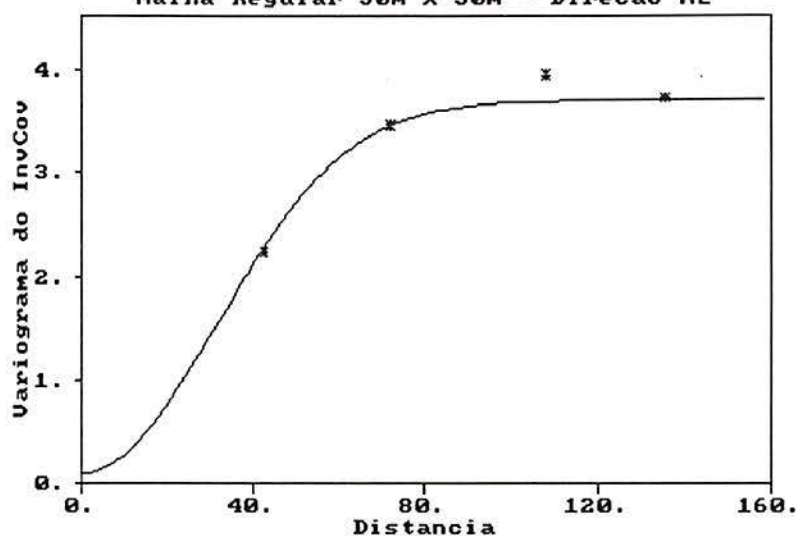
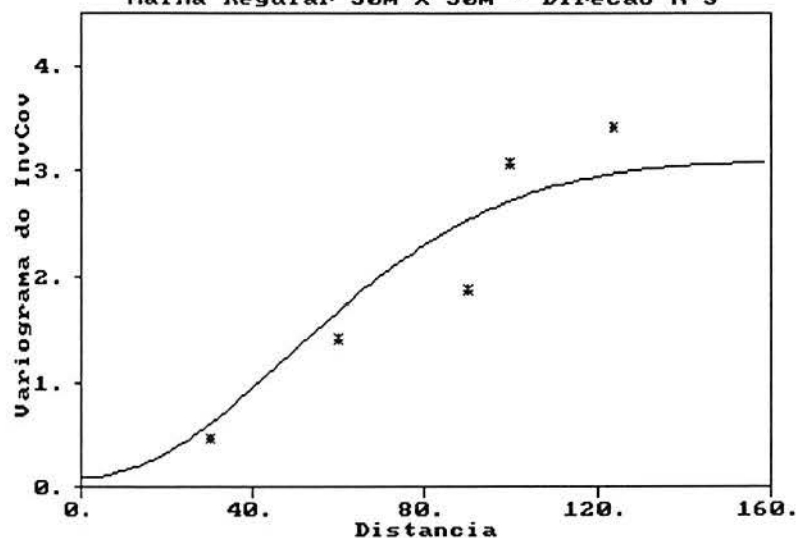


Figura 5.20 - Variogramas onidirecional e na direção E-W para cota do terreno natural em malha de 30x30m.

VARIOGRAMA DO INUCOU PARA COTA DO TERRENO NATURAL
Malha Regular 30m x 30m - Direcao NE



VARIOGRAMA DO INUCOU PARA COTA DO TERRENO NATURAL
Malha Regular 30m x 30m - Direcao N-S



VARIOGRAMA DO INUCOU PARA COTA DO TERRENO NATURAL
Malha Regular 30m x 30m - Direcao NO

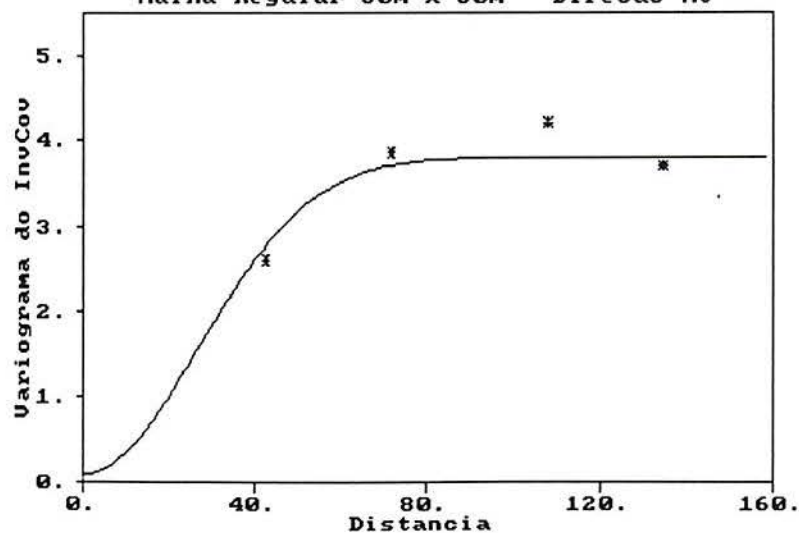
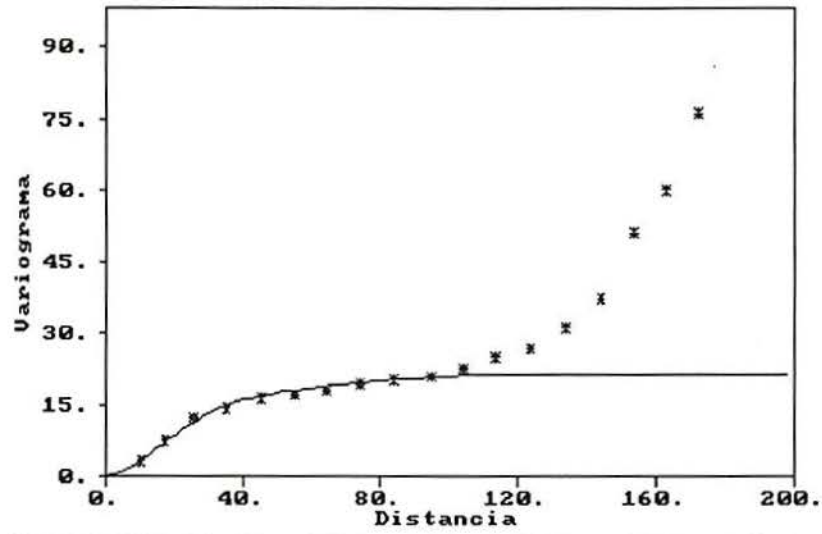
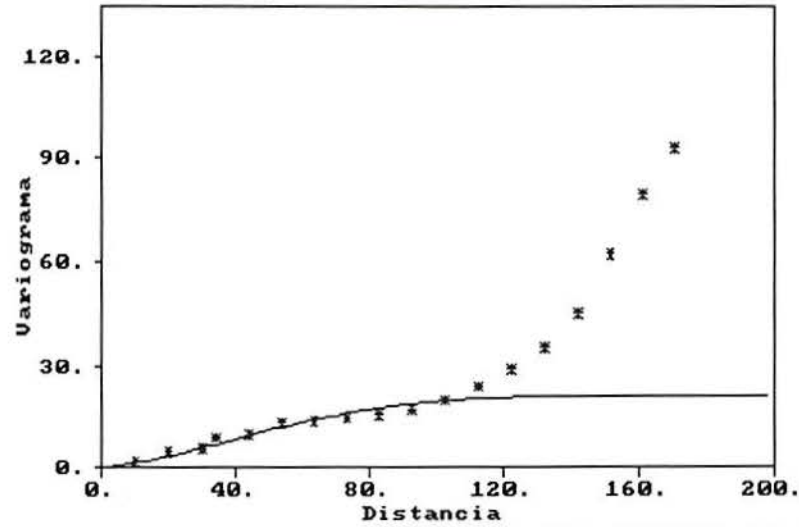


Figura 5.21 Variogramas nas direções NE, N-S e NO para cota do terreno natural espaçadas de 30 m.

VARIOGRAMA PARA COTA DE TOPO DA CAMADA SUPERIOR DE CARVAO
Malha Regular 10m x 10m - Onidirecional



VARIOGRAMA DA COTA DE TOPO DA CAMADA SUPERIOR DE CARVAO
Malha Regular 10m x 10m - Direcao E-W



VARIOGRAMA PARA COTA DE TOPO DA CAMADA SUPERIOR DE CARVAO
Malha Regular 10m x 10m - Direcao NE

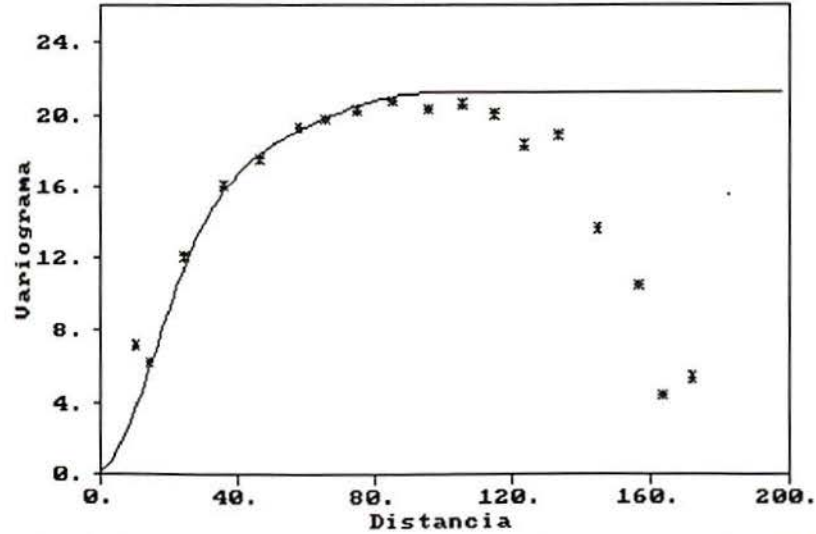
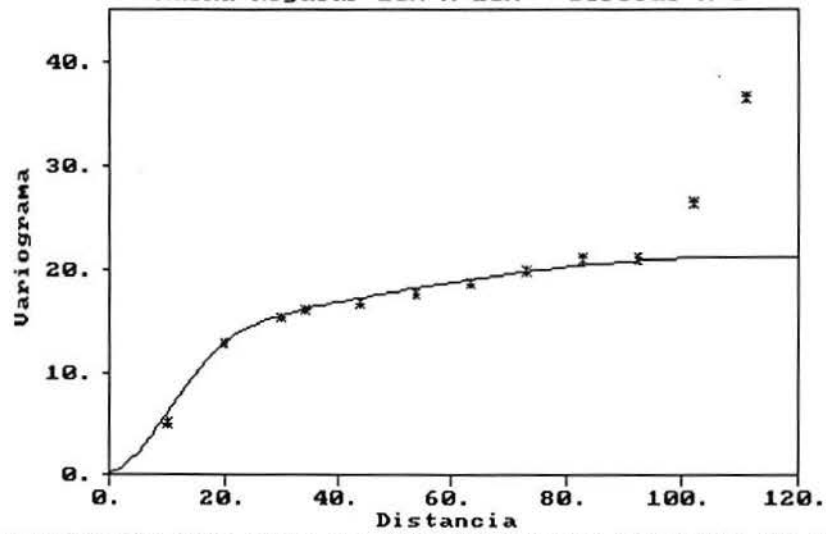


Figura 5.22 - Variogramas onidirecional e nas direções E-W e NE para cota do carvão em malha 10x10m.

VARIOGRAMA PARA COTA DE TOPO DA CAMADA SUPERIOR DE CARVÃO
Malha Regular 10m x 10m - Direcao N-S



VARIOGRAMA PARA COTA DE TOPO DA CAMADA SUPERIOR DE CARVÃO
Malha Regular 10m x 10m - Direcao NO

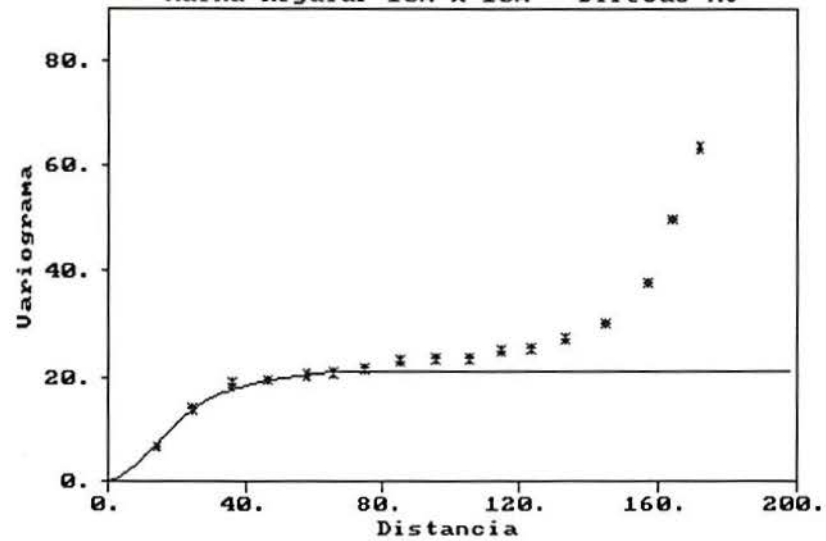


Figura 5.23 - Variogramas direções N-S e NO para cota de topo da camada superior de carvão espaçadas de 10 m.

VARIOGRAMA PARA COTA DE TOPO DA CAMADA SUPERIOR DE CARVÃO
Malha Regular 15m x 15m - Onidirecional

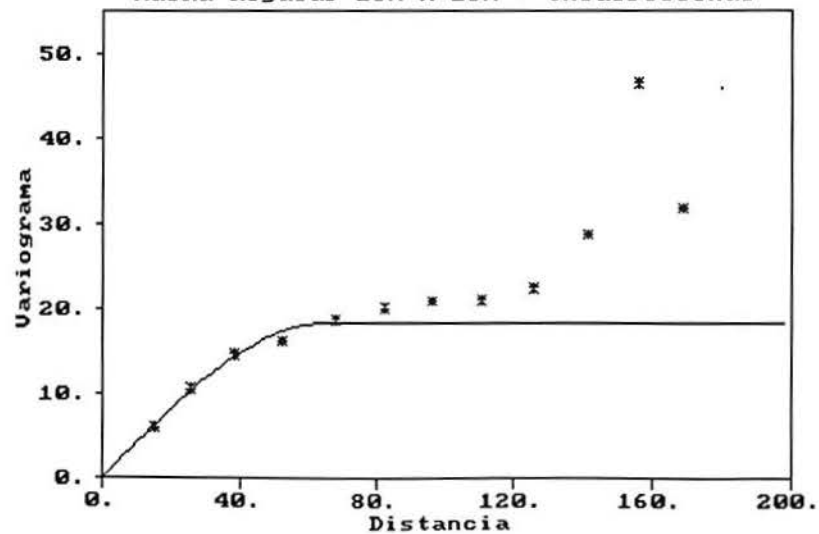
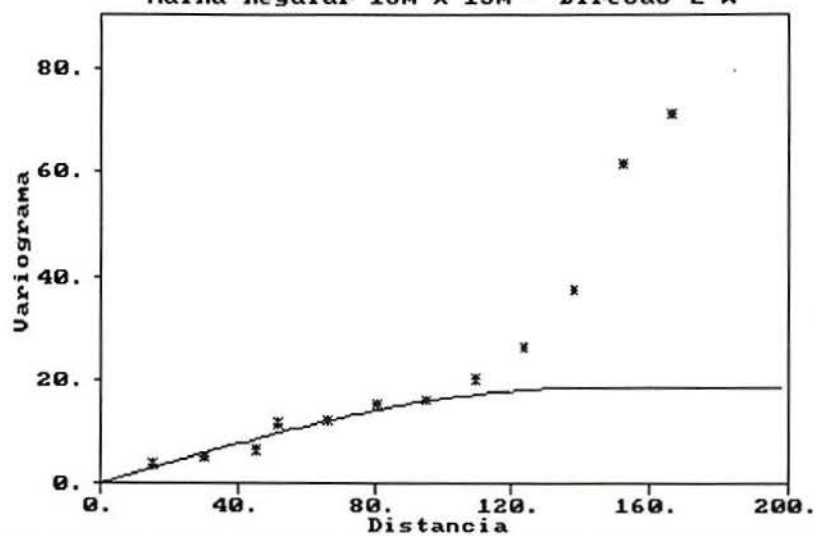
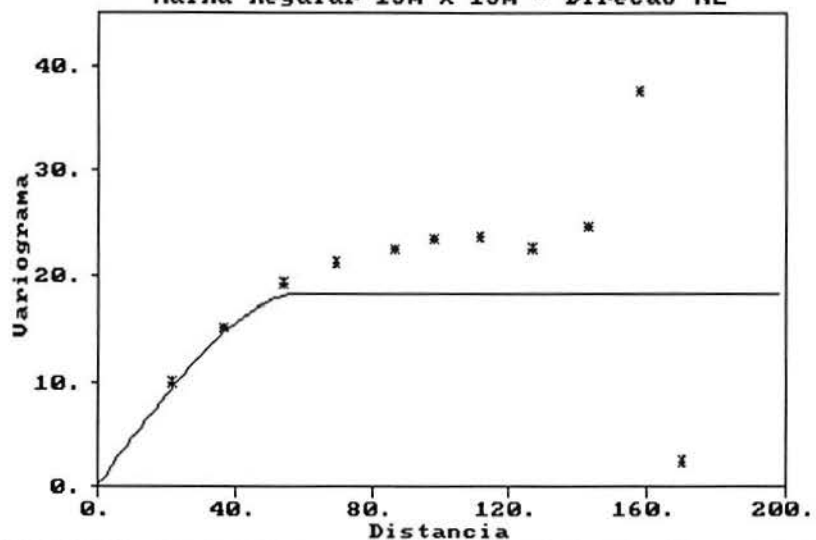


Figura 5.24 - Variograma onidirecional para cota do carvão em malha 15x15m.

VARIOGRAMA DA COTA DE TOPO DA CAMADA SUPERIOR DE CARVÃO
Malha Regular 15m x 15m - Direção E-W



VARIOGRAMA PARA COTA DE TOPO DA CAMADA SUPERIOR DE CARVÃO
Malha Regular 15m x 15m - Direção NE



VARIOGRAMA PARA COTA DE TOPO DA CAMADA SUPERIOR DE CARVÃO
Malha Regular 15m x 15m - Direção N-S

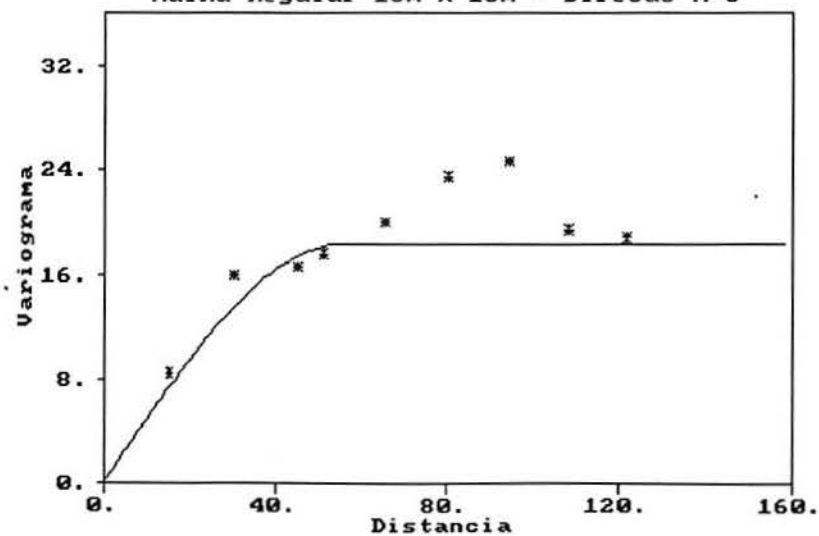


Figura 5.25-Variogramas nas direções E-W, NE e N-S para cota do carvão em malha 15x15m.

VARIOGRAMA PARA COTA DE TOPO DA CAMADA SUPERIOR DE CARVÃO
Malha Regular 15m x 15m - Direcao NO

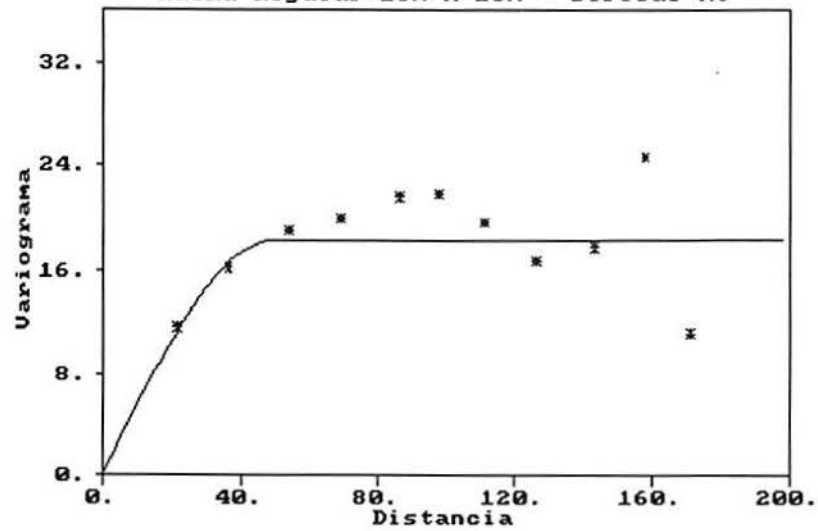
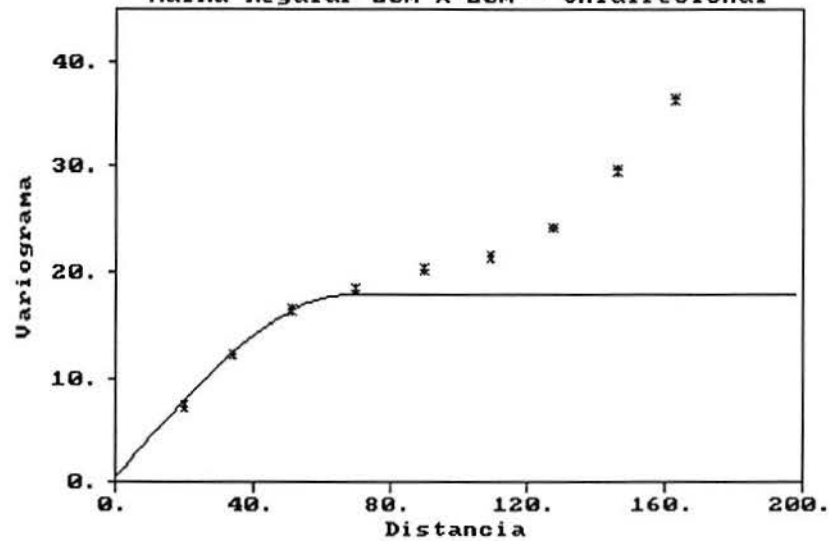


Figura 5.26 - Variograma na direção NO para cota de topo do carvão em malha de 15x15m.

VARIOGRAMA PARA COTA DE TOPO DA CAMADA SUPERIOR DE CARVÃO
Malha Regular 20m x 20m - Onidirecional



VARIOGRAMA PARA COTA DE TOPO DA CAMADA SUPERIOR DE CARVÃO
Malha Regular 20m x 20m - Direcao E-W

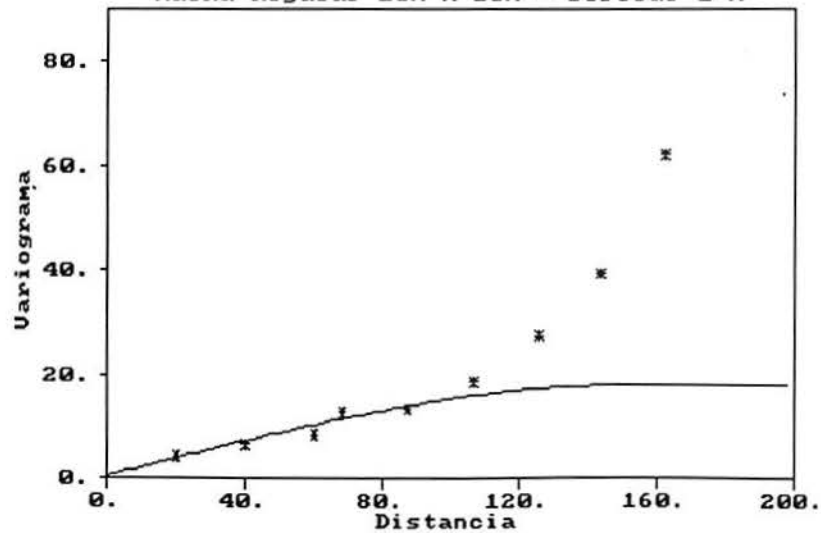
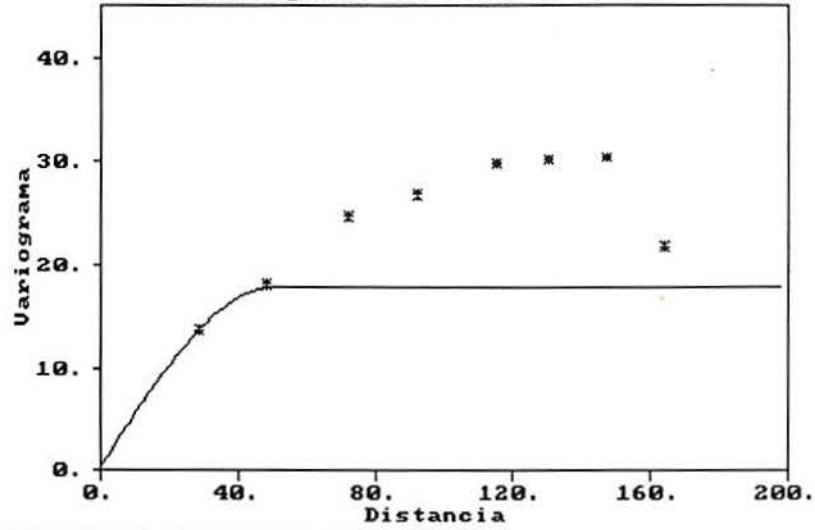
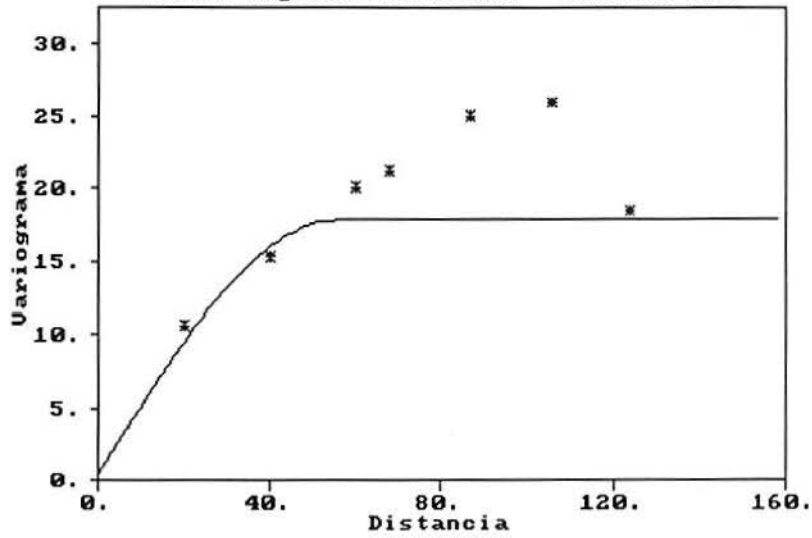


Figura 5.27-Variogramas onidirecional e na direção E-W para cota do carvão, 20x20m.

VARIOGRAMA PARA COTA DE TOPO DA CAMADA SUPERIOR DE CARVÃO
Malha Regular 20m x 20m - Direcao NE



VARIOGRAMA PARA COTA DE TOPO DA CAMADA SUPERIOR DE CARVÃO
Malha Regular 20m x 20m - Direcao N-S



VARIOGRAMA PARA COTA DE TOPO DA CAMADA SUPERIOR DE CARVÃO
Malha Regular 20m x 20m - Direcao NO

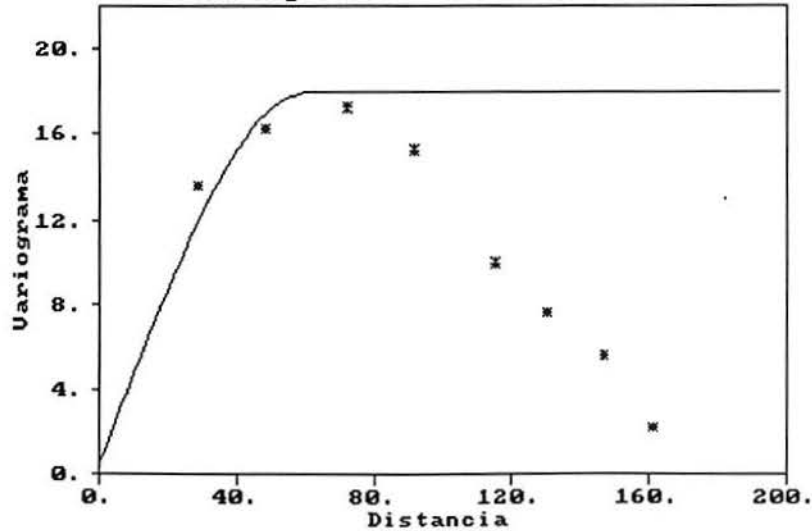
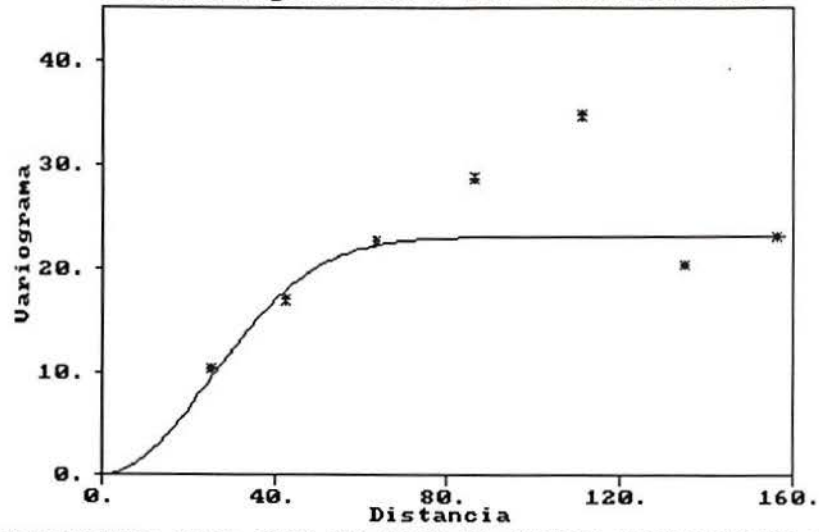
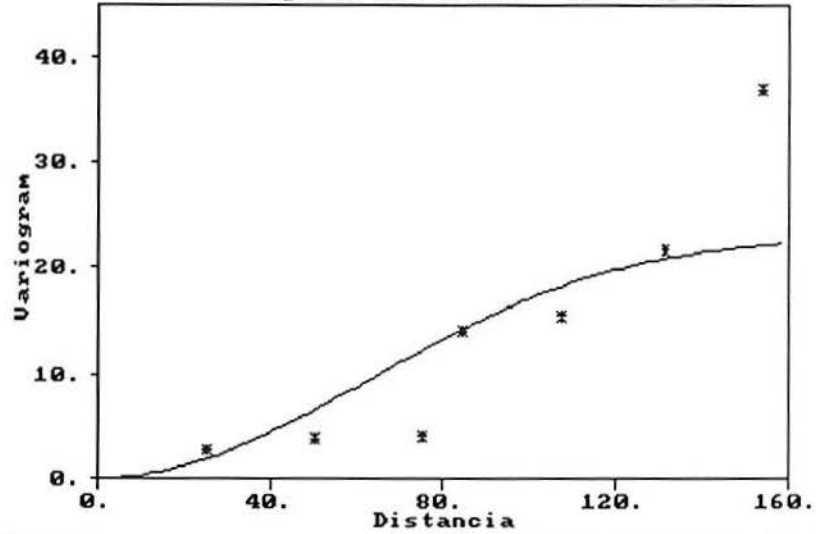


Figura 5.28 - Variogramas nas direções NE, N-S e NO para cota de topo da camada superior de carvão espaçadas de 20 m.

VARIOGRAMA PARA COTA DE TOPO DA CAMADA SUPERIOR DE CARVAO
Malha Regular 25m x 25m - Onidirecional



VARIOGRAMA PARA COTA DE TOPO DA CAMADA SUPERIOR DE CARVAO
Malha Regular 25m x 25m - Direcao E-W



VARIOGRAMA PARA COTA DE TOPO DA CAMADA SUPERIOR DE CARVAO
Malha Regular 25m x 25m - Direcao NE

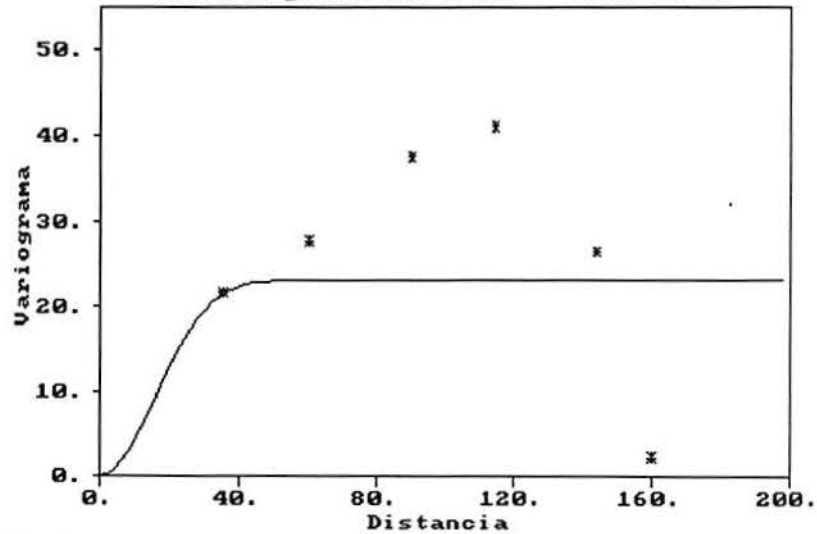
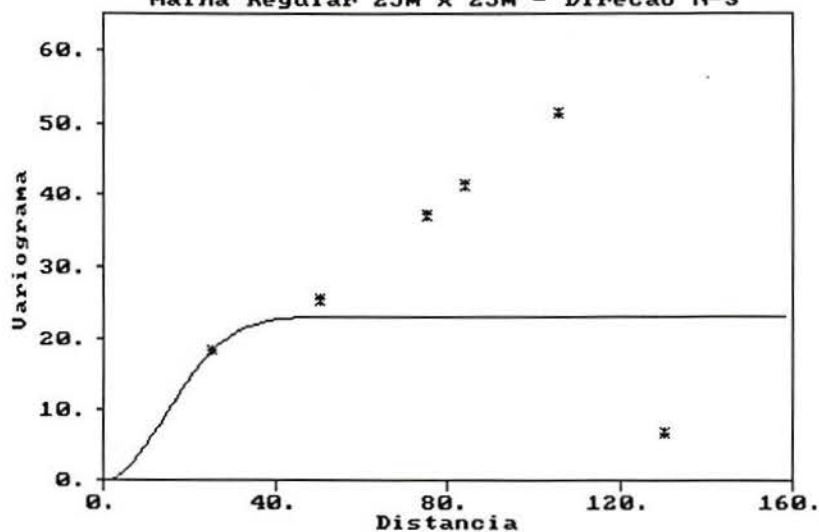


Figura 5.29 - Variogramas onidirecional e nas direções E-W e NE para cota do carvão malha 25x25m.

VARIOGRAMA PARA COTA DE TOPO DA CAMADA SUPERIOR DE CARVÃO
Malha Regular 25m x 25m - Direcao N-S



VARIOGRAMA PARA COTA DE TOPO DA CAMADA SUPERIOR DE CARVÃO
Malha Regular 25m x 25m - Direcao NO

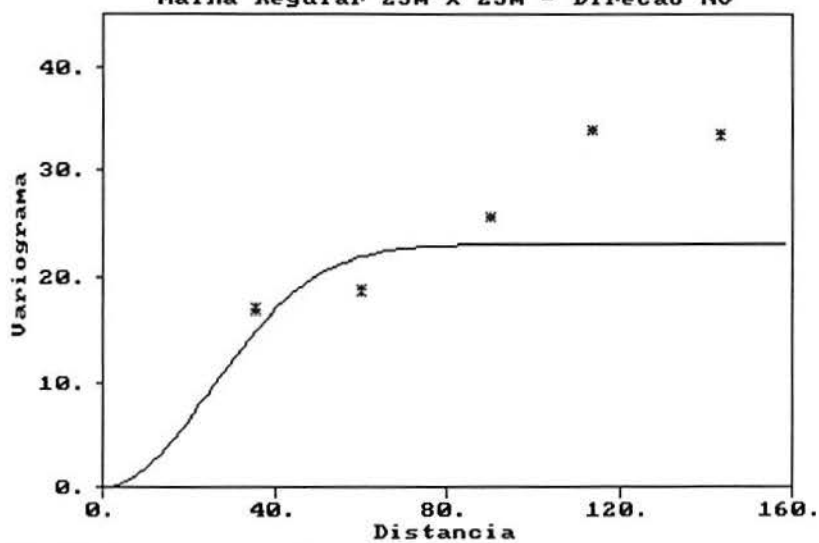


Figura 5.30 - Variogramas nas direções N-S e NO das cotas de topo da camada superior de carvão espaçadas de 25 m.

VARIOGRAMA PARA COTA DE TOPO DA CAMADA SUPERIOR DE CARVÃO
Malha Regular 30m x 30m - Onidirecional

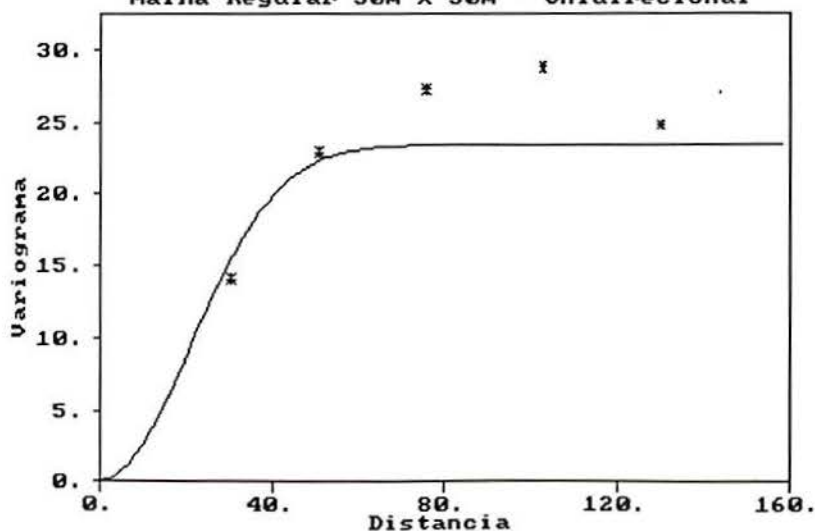
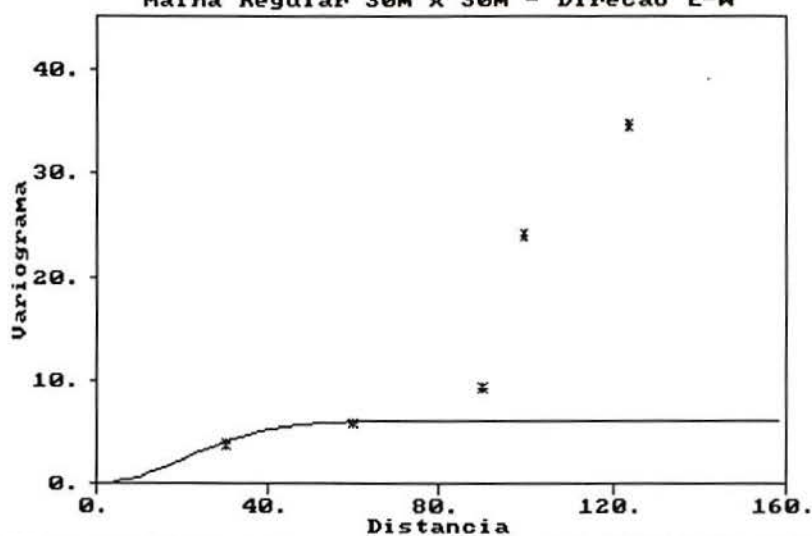
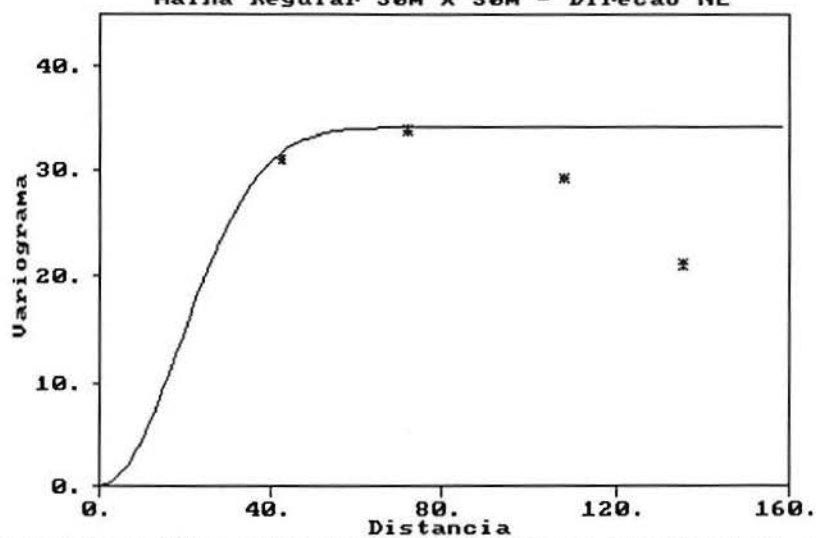


Figura 5.31 - Variograma onidirecional para cota do carvão, malha 30x30m.

VARIOGRAMA PARA COTA DE TOPO DA CAMADA SUPERIOR DE CARVÃO
Malha Regular 30m x 30m - Direção E-W



VARIOGRAMA PARA COTA DE TOPO DA CAMADA SUPERIOR DE CARVÃO
Malha Regular 30m x 30m - Direção NE



VARIOGRAMA PARA COTA DE TOPO DA CAMADA SUPERIOR DE CARVÃO
Malha Regular 30m x 30m - Direção N-S

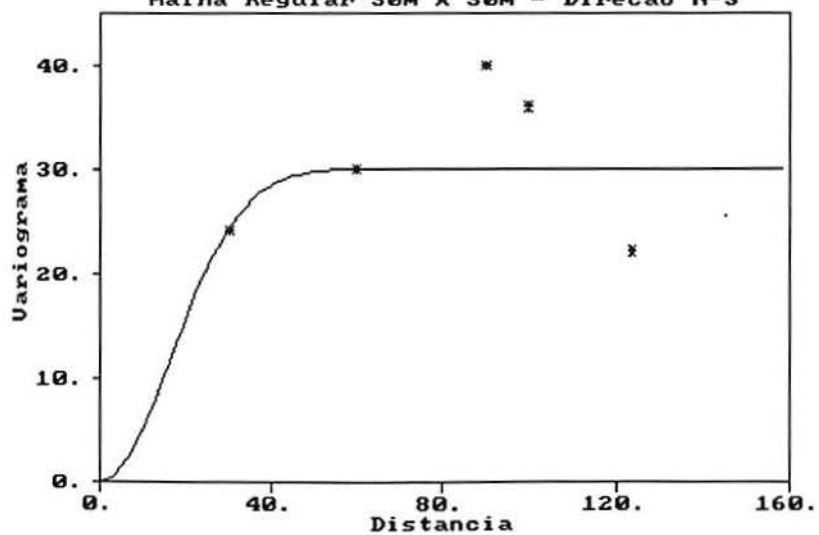


Figura 5.32 - Variogramas nas direções E-W, NE e N-S, para cota do carvão em malha de 30x30m.

UARIOGRAMA PARA COTA DE TOPO DA CAMADA SUPERIOR DE CARVAO
Malha Regular 30m x 30m - Direcao NO

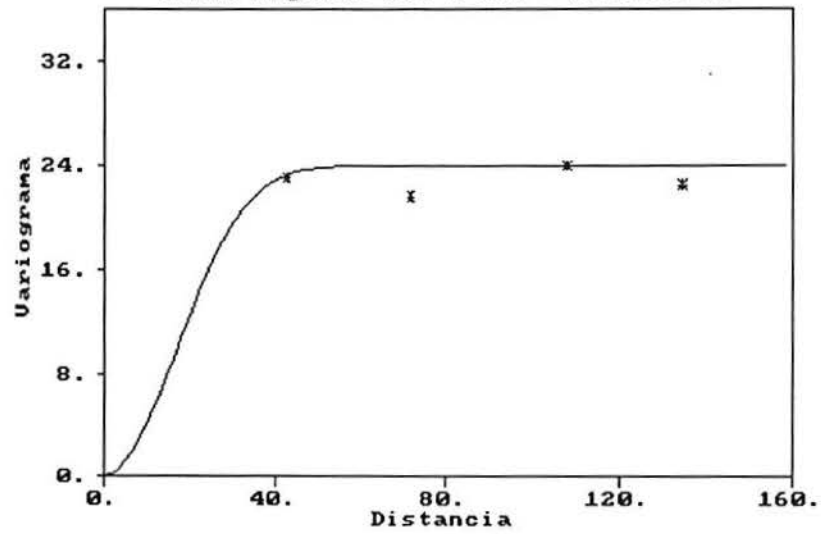


Figura 5.33 - Variograma na direção NO para cota de topo da camada superior de carvão espaçadas de 30 m.

A seguir são apresentados os gráficos relativos à validação cruzada dos modelos definidos de acordo com cada malha regular de pontos em relação à superfície do terreno natural e à cota de topo da camada superior de carvão:

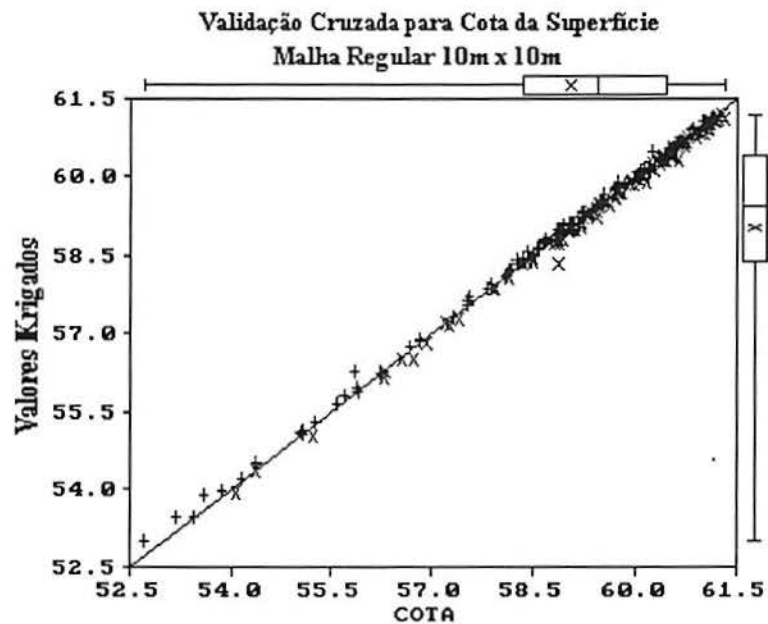


Figura 5.34 - Relação entre os pontos medidos e os pontos estimados, resultante da validação cruzada do modelo de variograma para cota do terreno natural em malha 10x10m.

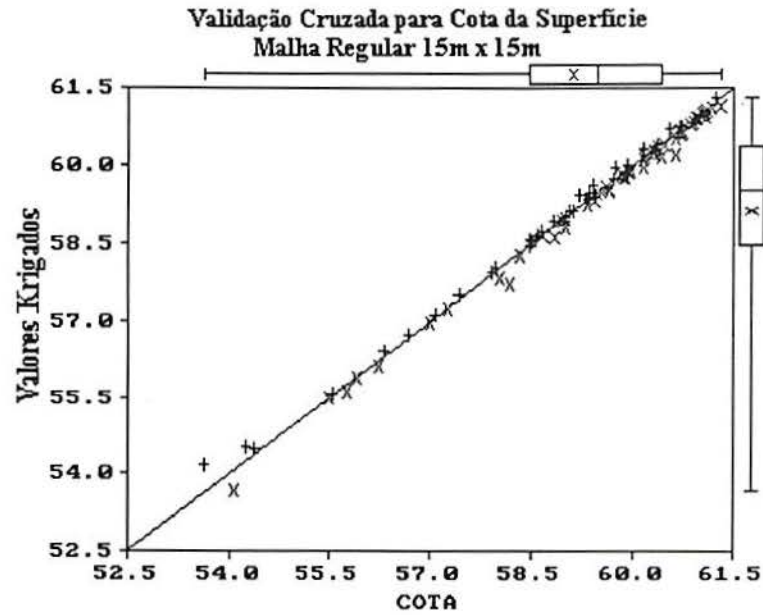


Figura 5.35 - Relação entre os pontos medidos e estimados, resultante da validação cruzada do modelo de variograma para cota do terreno natural em malha de 15x15m.

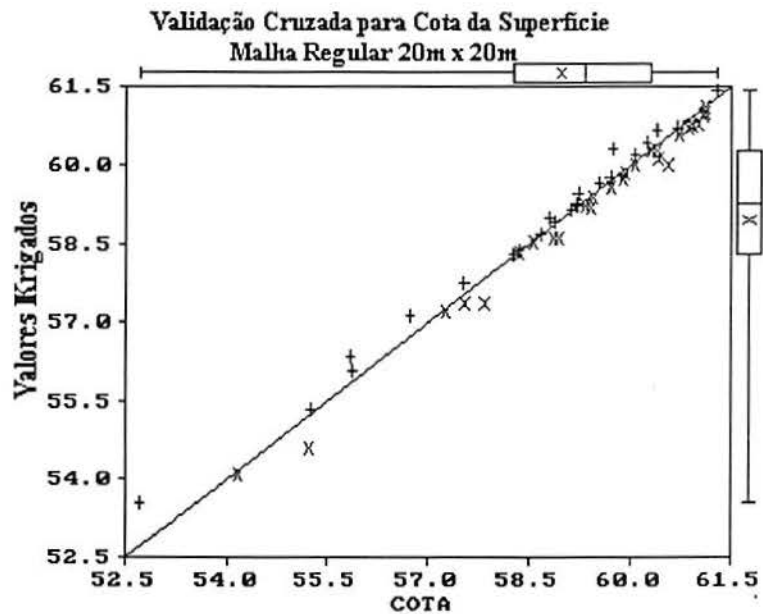


Figura 5.36 - Relação entre os pontos medidos e estimados, resultante da validação cruzada do modelo de variograma para cota do terreno natural em malha de 20x20m.

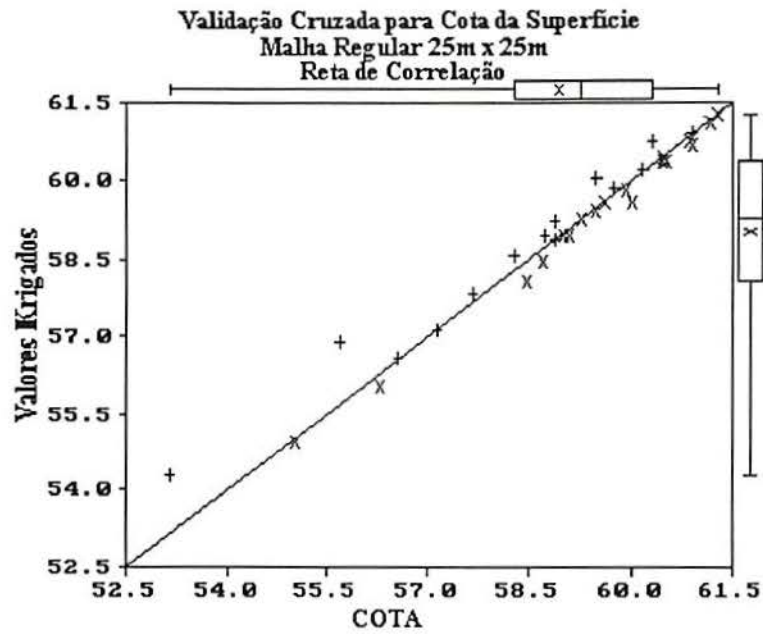


Figura 5.37 - Relação entre os pontos medidos e estimados, resultante da validação cruzada do modelo de variograma para cota do terreno natural em malha 25x25m.

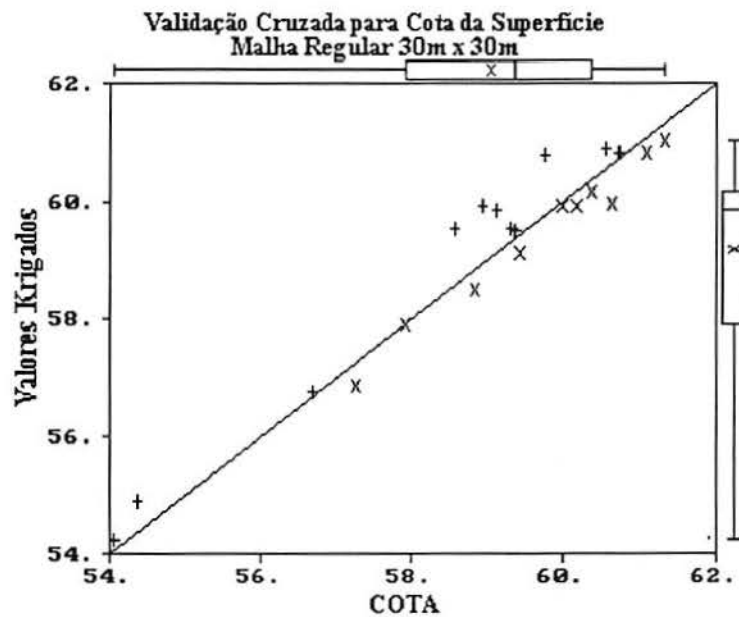


Figura 5.38 - Validação cruzada do modelo ajustado para pontos da superfície natural espaçados de 30 m.

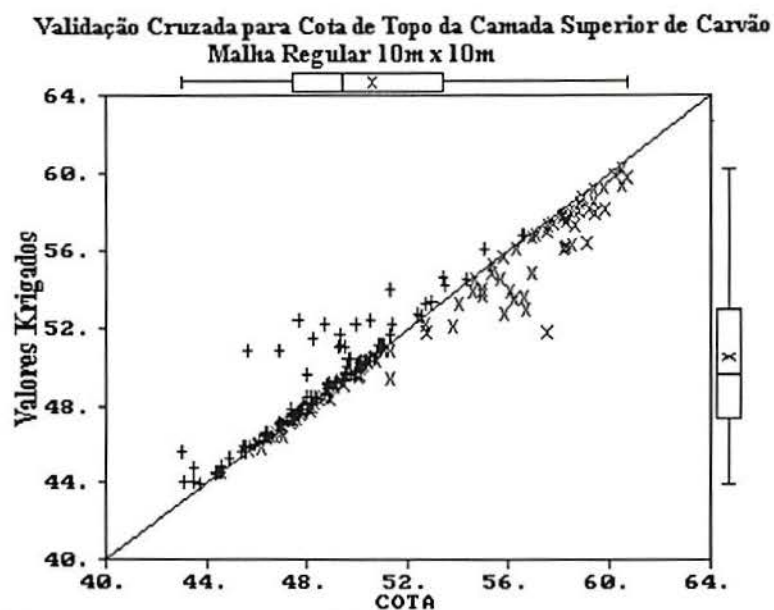


Figura 5.39 - Relação entre os valores medidos e estimados para cota do carvão resultante da validação cruzada do modelo de variograma para malha de 10x10m.

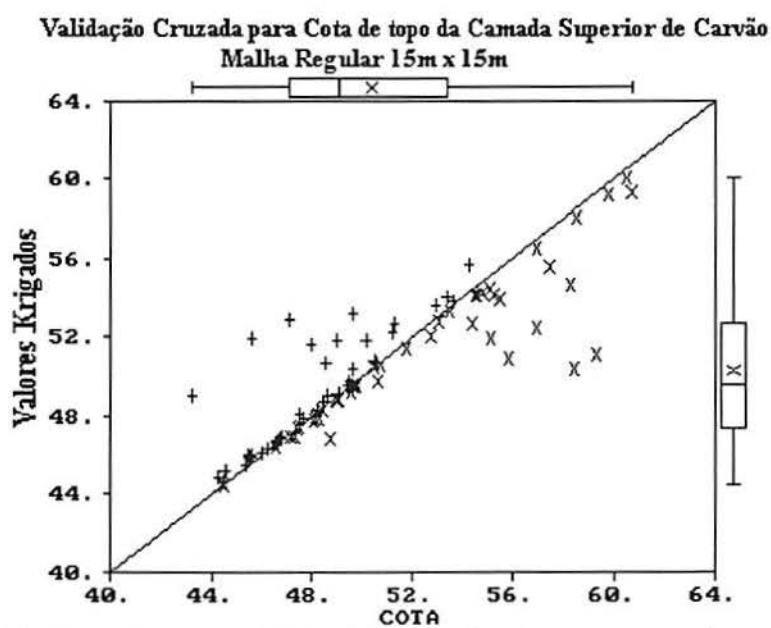


Figura 5.40 - Relação entre os pontos medidos e estimados para cota do carvão, resultante da validação cruzada do modelo de variograma para a malha de 15x15m.

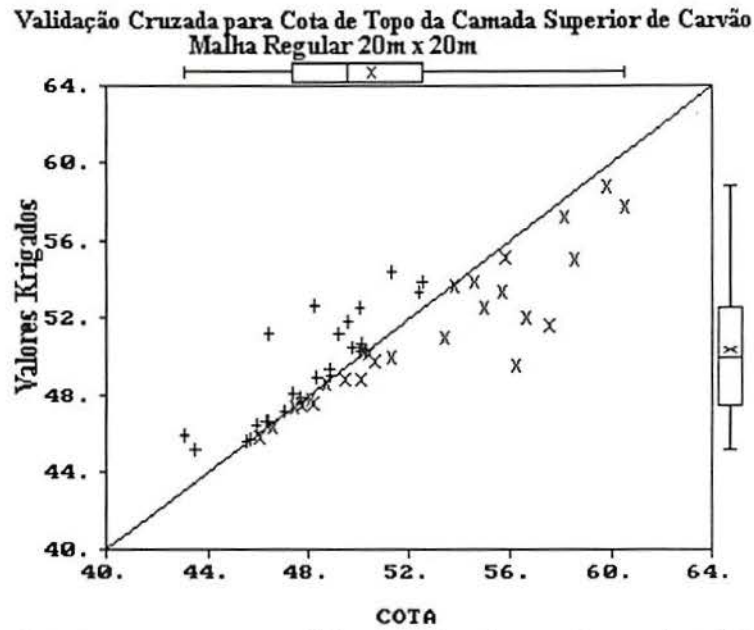


Figura 5.41 - Relação entre os pontos medidos e estimados, referente à validação cruzada do modelo de variograma para cota da camada de carvão em malha 20x20m.

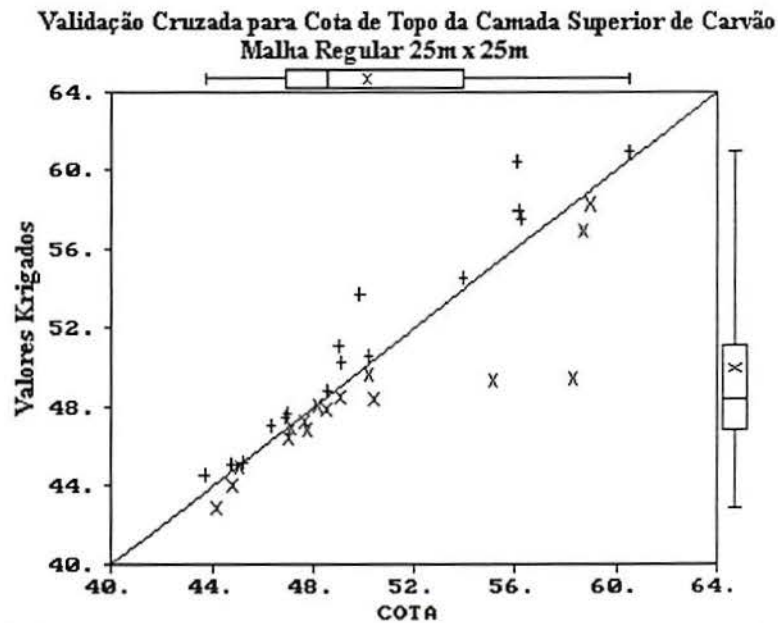


Figura 5.42 - Relação entre os valores medidos e estimados referente à validação cruzada do modelo de variograma para cotas de topo da camada superior de carvão espaçadas de 25m.

ANEXO 2

A seguir são apresentados os histogramas relativos à análise estatística básica realizada com os valores originais e os valores interpolados por krigagem em malha de 5x5m.

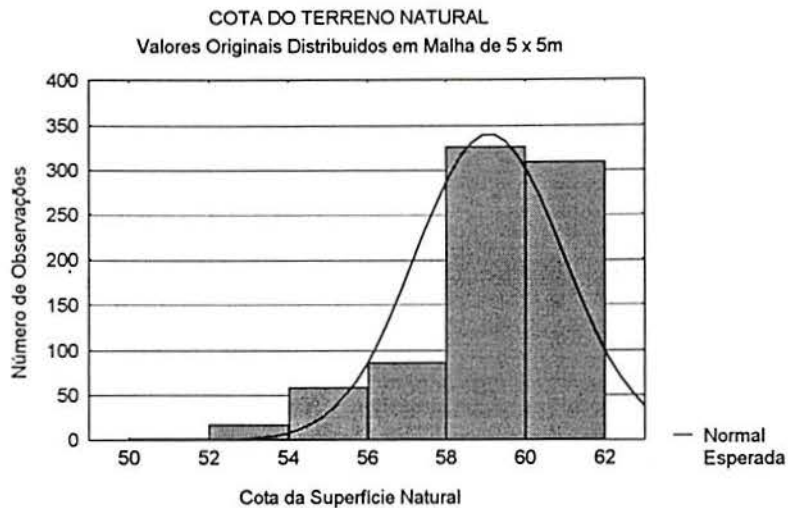


Figura 6.5 - Histograma da distribuição dos pontos originais medidos sobre a superfície natural do terreno.

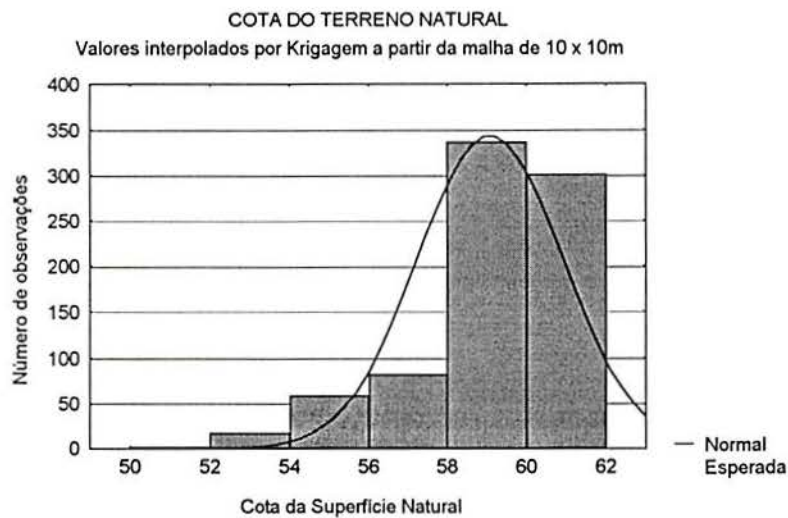


Figura 6.6 - Histograma da distribuição dos pontos interpolados por point kriging a partir da malha 10x10m das cotas do terreno natural.

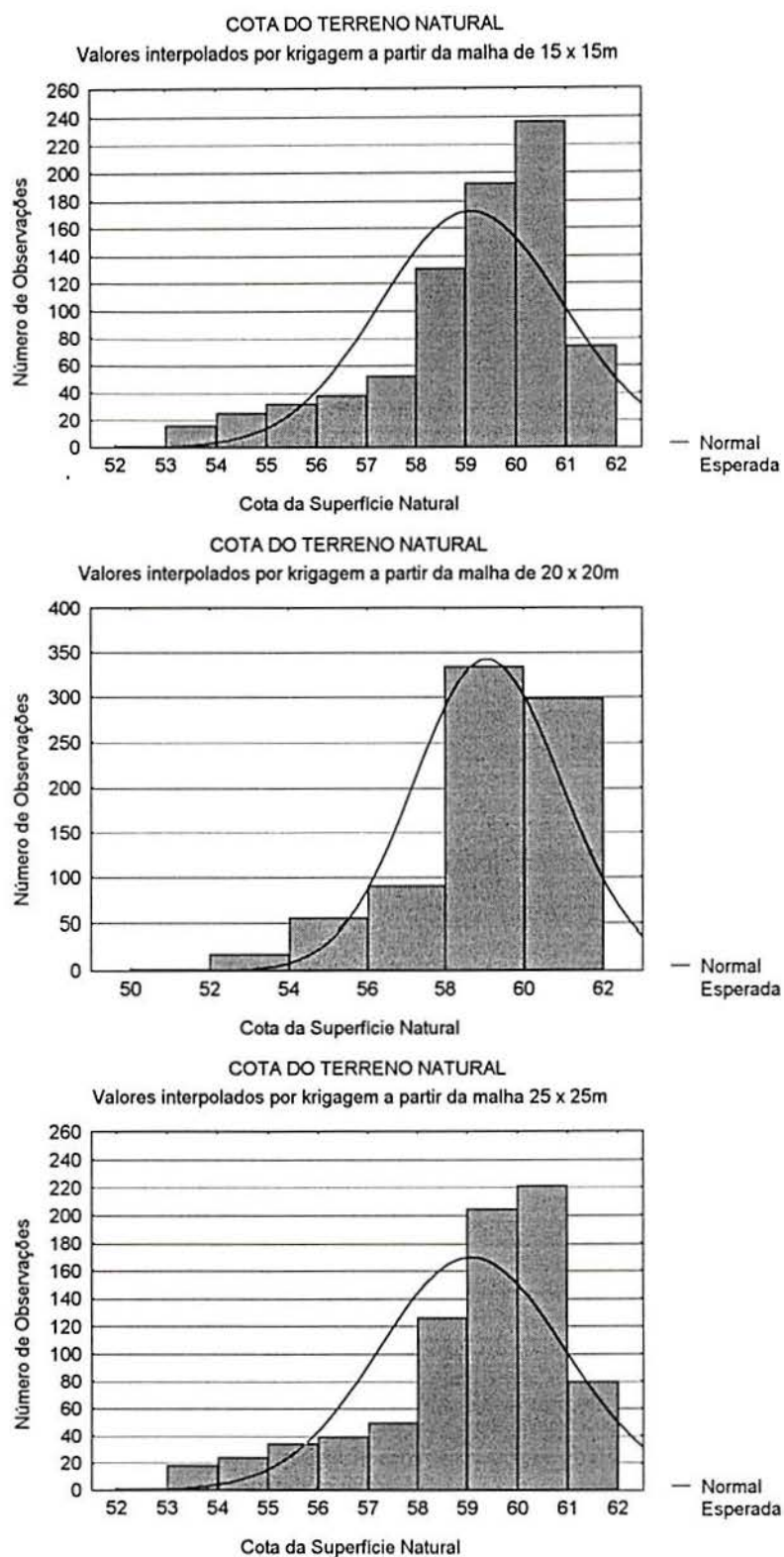


Figura 6.7 - Histograma da distribuição dos pontos interpolados por point kriging a partir das malhas de 15x15m, 20x20m e 25x25m das cotas do terreno natural.

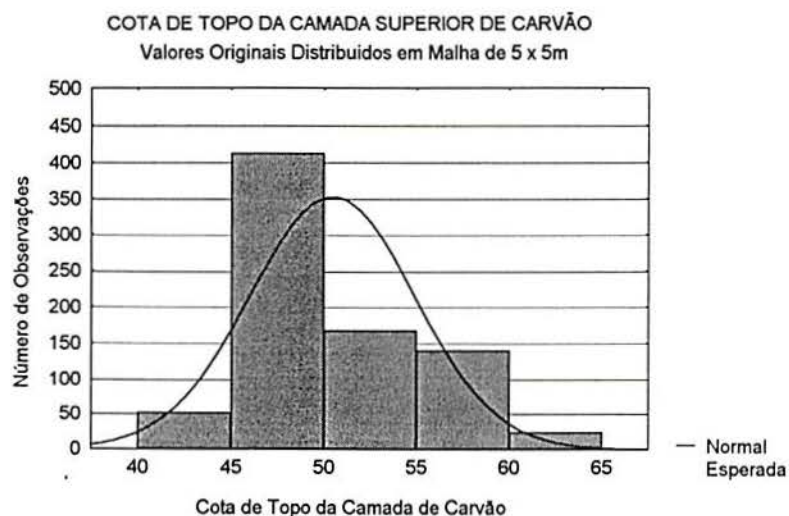


Figura 6.8 - Histograma da distribuição das cotas originais medidas sobre a camada superior de carvão.

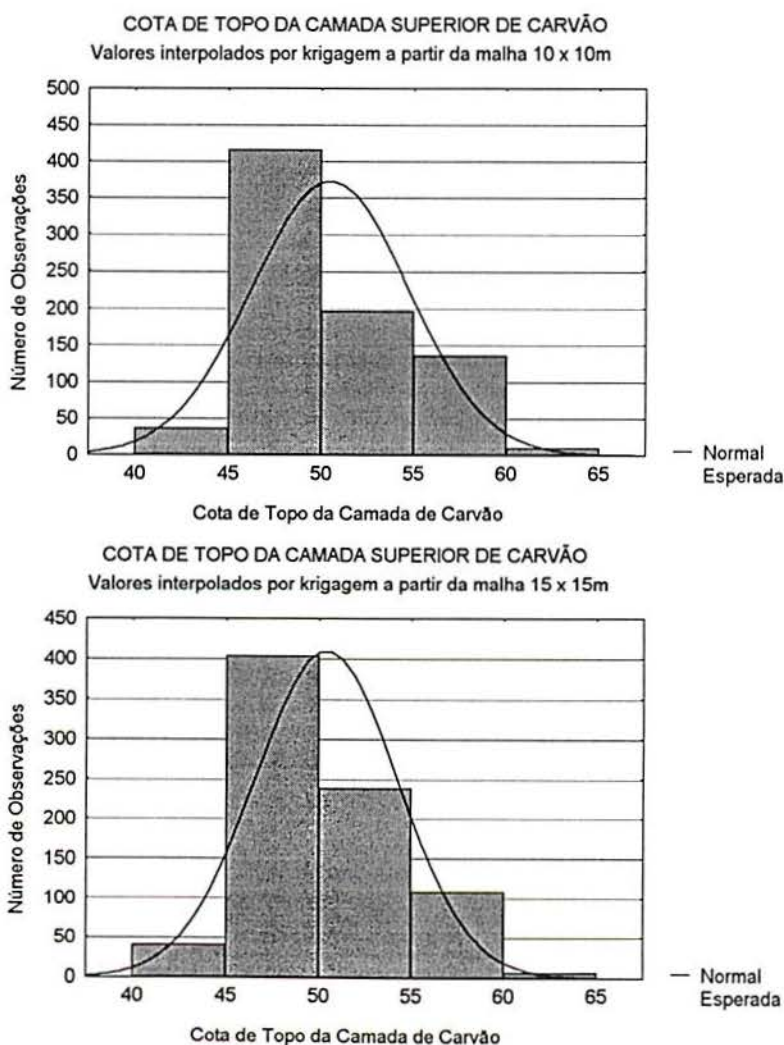


Figura 6.9 - Histogramas da distribuição dos pontos interpolados por *point kriging* a partir das malhas de 10x10m e 15x15m das cotas medidas sobre a camada superior de carvão.

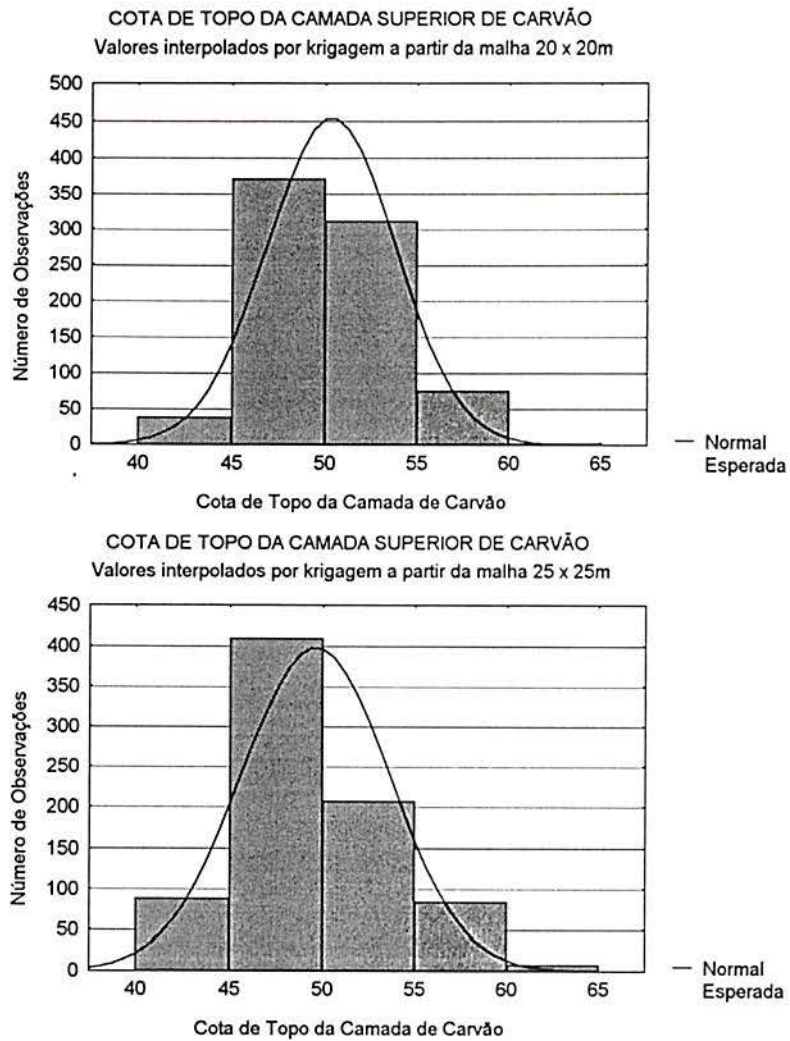


Figura 6.10 - Histogramas referentes a distribuição dos pontos obtidos pela interpolação por *point kriging* das cotas medidas sobre a camada superior de carvão nas malhas de 20x20m e 25x25m.

ANEXO 3

A tabela A3 apresenta as cotas originais da superfície e do topo da camada de carvão após ter sido feita a correspondência na posição de cada ponto.

Tabela A3 - Dados originais utilizados no trabalho.

Cotas Originais da Superfície Natural em malha 5x5m.			Cotas Originais do Topo da Camada Superior de Carvão em malha 5x5m		
413191	667961	57.18	413191	667961	45.181
413191	667966	56.725	413191	667966	45.544
413191	667971	56.231	413191	667971	46.021
413191	667976	55.685	413191	667976	46.335
413191	667981	55.17	413191	667981	46.984
413196	667941	58.059	413196	667941	44.108
413196	667946	57.93	413196	667946	44.108
413196	667951	57.752	413196	667951	44.082
413196	667956	57.646	413196	667956	44.537
413196	667961	57.402	413196	667961	44.991
413196	667966	56.971	413196	667966	45.58
413196	667971	56.422	413196	667971	46.041
413196	667976	55.95	413196	667976	46.632
413196	667981	55.428	413196	667981	47.114
413196	667986	54.96	413196	667986	47.457
413201	667926	58.423	413201	667926	55.014
413201	667931	58.553	413201	667931	51.744
413201	667936	58.424	413201	667936	47.957
413201	667941	58.251	413201	667941	42.983
413201	667946	58.163	413201	667946	43.477
413201	667951	57.988	413201	667951	43.927
413201	667956	57.939	413201	667956	44.598
413201	667961	57.654	413201	667961	45.12
413201	667966	57.21	413201	667966	45.647
413201	667971	56.692	413201	667971	46.04
413201	667976	56.224	413201	667976	46.751
413201	667981	55.688	413201	667981	47.181
413201	667986	55.265	413201	667986	47.417
413201	667991	54.775	413201	667991	47.808
413201	667996	54.363	413201	667996	48.089
413201	668001	53.031	413201	668001	48.255
413201	668006	53.458	413201	668006	48.332
413206	667926	58.663	413206	667926	55.252
413206	667931	58.808	413206	667931	52.624
413206	667936	58.668	413206	667936	49.302
413206	667941	58.471	413206	667941	43.254
413206	667946	58.371	413206	667946	43.526
413206	667951	58.303	413206	667951	43.881
413206	667956	58.178	413206	667956	44.513
413206	667961	57.937	413206	667961	45.141
413206	667966	57.531	413206	667966	45.653
413206	667971	57.001	413206	667971	46.25

413206	667976	56.482	413206	667976	46.817
413206	667981	55.987	413206	667981	47.115
413206	667986	55.538	413206	667986	47.433
413206	667991	55.072	413206	667991	47.733
413206	667996	54.681	413206	667996	47.939
413206	668001	54.247	413206	668001	48.213
413206	668006	53.79	413206	668006	48.52
413211	667926	58.812	413211	667926	55.807
413211	667931	58.94	413211	667931	53.01
413211	667936	58.88	413211	667936	50.011
413211	667941	58.645	413211	667941	43.36
413211	667946	58.555	413211	667946	43.516
413211	667951	58.478	413211	667951	43.998
413211	667956	58.503	413211	667956	44.589
413211	667961	58.185	413211	667961	45.129
413211	667966	57.837	413211	667966	45.677
413211	667971	57.332	413211	667971	46.267
413211	667976	56.815	413211	667976	46.843
413211	667981	56.35	413211	667981	47.176
413211	667986	55.871	413211	667986	47.4
413211	667991	55.484	413211	667991	47.62
413211	667996	55.035	413211	667996	47.829
413211	668001	54.598	413211	668001	48.012
413211	668006	54.154	413211	668006	48.297
413211	668011	53.631	413211	668011	48.408
413211	668016	53.193	413211	668016	49.116
413211	668021	52.871	413211	668021	48.984
413211	668026	52.711	413211	668026	51.305
413216	667926	58.886	413216	667926	56.136
413216	667931	59.01	413216	667931	53.633
413216	667936	58.951	413216	667936	50.56
413216	667941	58.775	413216	667941	48.854
413216	667946	58.866	413216	667946	43.672
413216	667951	58.718	413216	667951	44.141
413216	667956	58.588	413216	667956	44.505
413216	667961	58.424	413216	667961	45.159
413216	667966	58.118	413216	667966	45.919
413216	667971	57.665	413216	667971	46.42
413216	667976	57.138	413216	667976	46.997
413216	667981	56.712	413216	667981	47.276
413216	667986	56.305	413216	667986	47.399
413216	667991	55.876	413216	667991	47.649
413216	667996	55.453	413216	667996	47.871
413216	668001	55.021	413216	668001	48.124
413216	668006	54.561	413216	668006	48.471
413216	668011	54.133	413216	668011	49.089
413216	668016	53.711	413216	668016	49.319
413216	668021	53.489	413216	668021	49.282
413216	668026	53.163	413216	668026	49.094
413216	668031	52.938	413216	668031	48.971
413216	668036	52.832	413216	668036	52.006
413216	668041	52.975	413216	668041	53.172
413221	667926	58.94	413221	667926	56.962
413221	667931	59.056	413221	667931	54.228

413221	667936	59.046	413221	667936	51.056
413221	667941	59.012	413221	667941	48.721
413221	667946	59.027	413221	667946	43.707
413221	667951	58.936	413221	667951	44.097
413221	667956	58.843	413221	667956	44.474
413221	667961	58.723	413221	667961	45.236
413221	667966	58.87	413221	667966	46.156
413221	667971	58.032	413221	667971	46.554
413221	667976	57.566	413221	667976	46.876
413221	667981	57.137	413221	667981	47.142
413221	667986	56.681	413221	667986	47.485
413221	667991	56.262	413221	667991	47.872
413221	667996	55.89	413221	667996	48.032
413221	668001	55.498	413221	668001	48.179
413221	668006	55.08	413221	668006	48.644
413221	668011	54.69	413221	668011	48.783
413221	668016	54.379	413221	668016	49.07
413221	668021	54.111	413221	668021	49.503
413221	668026	53.859	413221	668026	49.599
413221	668031	53.629	413221	668031	48.56
413221	668036	53.607	413221	668036	49.239
413221	668041	53.755	413221	668041	51.1
413221	668046	54.067	413221	668046	52.751
413221	668051	54.392	413221	668051	54.224
413226	667926	59.055	413226	667926	57.598
413226	667931	59.183	413226	667931	54.626
413226	667936	59.221	413226	667936	51.325
413226	667941	59.283	413226	667941	47.527
413226	667946	59.238	413226	667946	43.117
413226	667951	59.103	413226	667951	43.885
413226	667956	58.988	413226	667956	44.454
413226	667961	58.802	413226	667961	45.127
413226	667966	58.617	413226	667966	46.049
413226	667971	58.272	413226	667971	46.536
413226	667976	57.896	413226	667976	46.848
413226	667981	57.397	413226	667981	47.263
413226	667986	56.998	413226	667986	47.618
413226	667991	56.664	413226	667991	47.969
413226	667996	56.264	413226	667996	48.172
413226	668001	55.925	413226	668001	48.235
413226	668006	55.565	413226	668006	48.591
413226	668011	55.186	413226	668011	48.844
413226	668016	54.859	413226	668016	49.119
413226	668021	54.654	413226	668021	49.382
413226	668026	54.601	413226	668026	49.804
413226	668031	54.401	413226	668031	50.112
413226	668036	54.385	413226	668036	49.194
413226	668041	54.479	413226	668041	49.827
413226	668046	54.664	413226	668046	52.328
413226	668051	54.82	413226	668051	54.742
413231	667926	59.234	413231	667926	58.146
413231	667931	59.315	413231	667931	55.926
413231	667936	59.472	413231	667936	52.698
413231	667941	59.44	413231	667941	48.646

413231	667946	59.43	413231	667946	43.059
413231	667951	59.388	413231	667951	43.672
413231	667956	59.237	413231	667956	44.368
413231	667961	59.067	413231	667961	45.064
413231	667966	58.856	413231	667966	46.052
413231	667971	58.621	413231	667971	46.546
413231	667976	58.258	413231	667976	46.938
413231	667981	57.864	413231	667981	47.501
413231	667986	57.543	413231	667986	47.688
413231	667991	57.147	413231	667991	47.913
413231	667996	56.833	413231	667996	48.146
413231	668001	56.503	413231	668001	48.309
413231	668006	55.835	413231	668006	48.698
413231	668011	55.711	413231	668011	49.096
413231	668016	55.587	413231	668016	49.372
413231	668021	55.393	413231	668021	49.608
413231	668026	55.243	413231	668026	50.062
413231	668031	55.092	413231	668031	50.477
413231	668036	55.065	413231	668036	50.74
413231	668041	55.166	413231	668041	50.73
413231	668046	55.225	413231	668046	52.514
413231	668051	55.396	413231	668051	55.281
413236	667926	59.369	413236	667926	58.561
413236	667931	59.469	413236	667931	55.854
413236	667936	59.585	413236	667936	53.595
413236	667941	59.667	413236	667941	49.632
413236	667946	59.703	413236	667946	42.82
413236	667951	59.628	413236	667951	43.54
413236	667956	59.482	413236	667956	44.282
413236	667961	59.338	413236	667961	45.025
413236	667966	59.18	413236	667966	46.128
413236	667971	59.011	413236	667971	46.58
413236	667976	58.709	413236	667976	47.04
413236	667981	58.376	413236	667981	47.546
413236	667986	57.978	413236	667986	47.513
413236	667991	58.23	413236	667991	47.827
413236	667996	57.331	413236	667996	48.133
413236	668001	57.073	413236	668001	48.408
413236	668006	56.787	413236	668006	48.813
413236	668011	56.476	413236	668011	49.152
413236	668016	56.304	413236	668016	49.544
413236	668021	56.159	413236	668021	49.738
413236	668026	56.007	413236	668026	50.104
413236	668031	55.897	413236	668031	50.625
413236	668036	55.724	413236	668036	51.046
413236	668041	55.65	413236	668041	51.46
413236	668046	55.749	413236	668046	52.95
413236	668051	55.88	413236	668051	55.764
413241	667926	59.495	413241	667926	58.983
413241	667931	59.604	413241	667931	56.171
413241	667936	59.833	413241	667936	54.02
413241	667941	59.944	413241	667941	50.618
413241	667946	60.007	413241	667946	43.026
413241	667951	60.018	413241	667951	43.68

413241	667956	59.822	413241	667956	44.39
413241	667961	59.669	413241	667961	45.151
413241	667966	59.495	413241	667966	45.924
413241	667971	59.297	413241	667971	46.753
413241	667976	59.095	413241	667976	46.963
413241	667981	58.807	413241	667981	47.234
413241	667986	58.502	413241	667986	47.594
413241	667991	58.193	413241	667991	47.98
413241	667996	57.889	413241	667996	48.29
413241	668001	57.671	413241	668001	48.503
413241	668006	57.402	413241	668006	48.845
413241	668011	57.114	413241	668011	49.042
413241	668016	56.928	413241	668016	49.36
413241	668021	56.731	413241	668021	49.735
413241	668026	56.563	413241	668026	50.201
413241	668031	56.425	413241	668031	50.845
413241	668036	56.301	413241	668036	51.304
413241	668041	56.269	413241	668041	51.488
413241	668046	56.286	413241	668046	52.967
413241	668051	56.285	413241	668051	56.092
413246	667926	59.617	413246	667926	59.347
413246	667931	59.798	413246	667931	56.959
413246	667936	59.975	413246	667936	54.256
413246	667941	60.176	413246	667941	51.112
413246	667946	60.327	413246	667946	43.462
413246	667951	60.421	413246	667951	43.808
413246	667956	60.302	413246	667956	44.457
413246	667961	60.149	413246	667961	45.23
413246	667966	59.796	413246	667966	46.021
413246	667971	59.6	413246	667971	46.737
413246	667976	59.431	413246	667976	47.071
413246	667981	59.172	413246	667981	47.535
413246	667986	58.935	413246	667986	47.66
413246	667991	58.654	413246	667991	47.945
413246	667996	58.426	413246	667996	48.155
413246	668001	58.169	413246	668001	48.458
413246	668006	57.93	413246	668006	48.839
413246	668011	57.705	413246	668011	49.074
413246	668016	57.492	413246	668016	49.369
413246	668021	57.296	413246	668021	49.687
413246	668026	57.143	413246	668026	50.103
413246	668031	56.985	413246	668031	50.721
413246	668036	56.86	413246	668036	51.095
413246	668041	56.754	413246	668041	51.255
413246	668046	56.686	413246	668046	53.807
413246	668051	56.682	413246	668051	56.616
413251	667926	59.752	413251	667926	59.816
413251	667931	60.017	413251	667931	57.593
413251	667936	60.218	413251	667936	54.371
413251	667941	60.379	413251	667941	51.752
413251	667946	60.561	413251	667946	47.028
413251	667951	60.719	413251	667951	44.021
413251	667956	60.626	413251	667956	44.542
413251	667961	60.354	413251	667961	45.269

413251	667966	60.069	413251	667966	45.942
413251	667971	59.934	413251	667971	46.756
413251	667976	59.728	413251	667976	47.296
413251	667981	59.556	413251	667981	47.575
413251	667986	59.323	413251	667986	47.631
413251	667991	59.066	413251	667991	47.82
413251	667996	58.886	413251	667996	48.1
413251	668001	58.572	413251	668001	48.452
413251	668006	58.355	413251	668006	48.834
413251	668011	58.121	413251	668011	49.128
413251	668016	57.92	413251	668016	49.41
413251	668021	57.84	413251	668021	49.771
413251	668026	57.543	413251	668026	50.059
413251	668031	57.43	413251	668031	50.597
413251	668036	57.325	413251	668036	50.883
413251	668041	57.242	413251	668041	51.021
413251	668046	57.256	413251	668046	54.598
413251	668051	57.164	413251	668051	57.267
413256	667926	59.965	413256	667926	59.915
413256	667931	60.186	413256	667931	58.055
413256	667936	60.327	413256	667936	54.874
413256	667941	60.544	413256	667941	52.108
413256	667946	60.694	413256	667946	47.588
413256	667951	60.78	413256	667951	44.283
413256	667956	60.624	413256	667956	44.638
413256	667961	60.517	413256	667961	45.306
413256	667966	60.34	413256	667966	45.989
413256	667971	60.434	413256	667971	46.72
413256	667976	60.046	413256	667976	47.384
413256	667981	59.821	413256	667981	47.553
413256	667986	59.666	413256	667986	47.682
413256	667991	59.463	413256	667991	47.857
413256	667996	59.197	413256	667996	48.123
413256	668001	58.984	413256	668001	48.586
413256	668006	58.764	413256	668006	48.666
413256	668011	58.513	413256	668011	49.045
413256	668016	58.312	413256	668016	49.294
413256	668021	58.107	413256	668021	49.796
413256	668026	57.949	413256	668026	50.266
413256	668031	57.873	413256	668031	50.512
413256	668036	57.788	413256	668036	50.788
413256	668041	57.729	413256	668041	51.231
413256	668046	57.678	413256	668046	55.143
413256	668051	57.648	413256	668051	57.698
413261	667926	60.167	413261	667926	60.226
413261	667931	60.3	413261	667931	58.297
413261	667936	60.547	413261	667936	55.384
413261	667941	60.629	413261	667941	52.603
413261	667946	60.76	413261	667946	48.784
413261	667951	60.827	413261	667951	44.297
413261	667956	60.766	413261	667956	44.905
413261	667961	60.654	413261	667961	45.469
413261	667966	60.539	413261	667966	46.041
413261	667971	60.367	413261	667971	46.773

413261	667976	60.255	413261	667976	47.387
413261	667981	60.092	413261	667981	47.529
413261	667986	59.927	413261	667986	47.74
413261	667991	59.195	413261	667991	47.869
413261	667996	59.543	413261	667996	48.159
413261	668001	59.3	413261	668001	48.627
413261	668006	59.083	413261	668006	48.789
413261	668011	58.845	413261	668011	49.104
413261	668016	58.659	413261	668016	49.446
413261	668021	58.498	413261	668021	49.857
413261	668026	58.37	413261	668026	50.234
413261	668031	58.254	413261	668031	50.444
413261	668036	58.191	413261	668036	50.839
413261	668041	58.173	413261	668041	51.29
413261	668046	58.156	413261	668046	55.345
413261	668051	58.113	413261	668051	58.107
413266	667926	60.313	413266	667926	60.49
413266	667931	60.445	413266	667931	58.627
413266	667936	60.601	413266	667936	55.756
413266	667941	60.749	413266	667941	53.049
413266	667946	60.878	413266	667946	49.467
413266	667951	60.905	413266	667951	44.779
413266	667956	60.856	413266	667956	45.363
413266	667961	60.806	413266	667961	45.858
413266	667966	60.714	413266	667966	46.611
413266	667971	60.626	413266	667971	47.306
413266	667976	60.461	413266	667976	47.713
413266	667981	60.353	413266	667981	48.094
413266	667986	60.16	413266	667986	48.273
413266	667991	59.984	413266	667991	48.492
413266	667996	59.801	413266	667996	48.836
413266	668001	59.61	413266	668001	49.042
413266	668006	59.417	413266	668006	49.297
413266	668011	59.229	413266	668011	49.278
413266	668016	59.058	413266	668016	49.623
413266	668021	58.892	413266	668021	49.798
413266	668026	58.746	413266	668026	50.18
413266	668031	58.647	413266	668031	50.519
413266	668036	58.591	413266	668036	50.869
413266	668041	58.509	413266	668041	51.325
413266	668046	58.488	413266	668046	55.491
413266	668051	58.485	413266	668051	58.678
413271	667926	60.399	413271	667926	60.525
413271	667931	60.415	413271	667931	58.916
413271	667936	60.686	413271	667936	56.307
413271	667941	60.803	413271	667941	53.597
413271	667946	60.919	413271	667946	50.053
413271	667951	60.958	413271	667951	44.843
413271	667956	61.085	413271	667956	45.35
413271	667961	60.931	413271	667961	45.96
413271	667966	60.86	413271	667966	46.575
413271	667971	60.737	413271	667971	47.137
413271	667976	60.67	413271	667976	47.597
413271	667981	60.487	413271	667981	47.867

413271	667986	60.399	413271	667986	48.158
413271	667991	60.196	413271	667991	48.624
413271	667996	60.096	413271	667996	48.876
413271	668001	59.894	413271	668001	49.022
413271	668006	59.703	413271	668006	49.441
413271	668011	59.611	413271	668011	49.449
413271	668016	59.454	413271	668016	49.891
413271	668021	59.3	413271	668021	50.064
413271	668026	59.206	413271	668026	50.264
413271	668031	59.094	413271	668031	50.638
413271	668036	59.029	413271	668036	51.008
413271	668041	59.012	413271	668041	51.179
413271	668046	58.946	413271	668046	55.693
413271	668051	58.985	413271	668051	58.904
413276	667926	60.449	413276	667926	60.611
413276	667931	60.661	413276	667931	59.106
413276	667936	60.708	413276	667936	56.643
413276	667941	60.832	413276	667941	53.757
413276	667946	60.934	413276	667946	50.219
413276	667951	61.007	413276	667951	44.906
413276	667956	61.01	413276	667956	45.53
413276	667961	61.079	413276	667961	46.171
413276	667966	60.943	413276	667966	46.7
413276	667971	60.927	413276	667971	47.139
413276	667976	60.793	413276	667976	47.451
413276	667981	60.713	413276	667981	47.741
413276	667986	60.592	413276	667986	48.181
413276	667991	60.452	413276	667991	48.353
413276	667996	60.319	413276	667996	48.672
413276	668001	60.168	413276	668001	49.061
413276	668006	60.035	413276	668006	49.403
413276	668011	59.976	413276	668011	49.554
413276	668016	59.888	413276	668016	49.848
413276	668021	59.775	413276	668021	50.097
413276	668026	59.596	413276	668026	50.419
413276	668031	59.5	413276	668031	50.666
413276	668036	59.404	413276	668036	50.861
413276	668041	59.335	413276	668041	51.187
413276	668046	59.243	413276	668046	51.343
413276	668051	59.218	413276	668051	56.314
413276	668056	59.134	413276	668056	59.104
413281	667926	60.551	413281	667926	60.717
413281	667931	60.662	413281	667931	59.681
413281	667936	60.808	413281	667936	57.136
413281	667941	60.91	413281	667941	53.635
413281	667946	61.021	413281	667946	50.032
413281	667951	61.01	413281	667951	45.056
413281	667956	61.071	413281	667956	45.559
413281	667961	61.056	413281	667961	46.274
413281	667966	61.044	413281	667966	46.709
413281	667971	60.929	413281	667971	47.134
413281	667976	60.868	413281	667976	47.403
413281	667981	60.787	413281	667981	47.811
413281	667986	60.7	413281	667986	48.121

413281	667991	60.637	413281	667991	48.391
413281	667996	60.51	413281	667996	48.642
413281	668001	60.364	413281	668001	49.044
413281	668006	60.253	413281	668006	49.425
413281	668011	60.225	413281	668011	49.287
413281	668016	60.166	413281	668016	49.686
413281	668021	60.003	413281	668021	49.943
413281	668026	59.809	413281	668026	50.308
413281	668031	59.726	413281	668031	50.715
413281	668036	59.627	413281	668036	50.989
413281	668041	59.549	413281	668041	51.346
413281	668046	59.433	413281	668046	53.481
413281	668051	59.314	413281	668051	56.508
413281	668056	59.218	413281	668056	59.202
413286	667926	60.568	413286	667926	60.696
413286	667931	60.692	413286	667931	59.971
413286	667936	60.867	413286	667936	57.52
413286	667941	60.968	413286	667941	54.085
413286	667946	61.025	413286	667946	49.23
413286	667951	61.094	413286	667951	44.712
413286	667956	61.106	413286	667956	45.432
413286	667961	61.075	413286	667961	45.951
413286	667966	61.098	413286	667966	46.273
413286	667971	61.001	413286	667971	46.585
413286	667976	60.91	413286	667976	46.777
413286	667981	60.791	413286	667981	47.135
413286	667986	60.753	413286	667986	47.379
413286	667991	60.673	413286	667991	47.645
413286	667996	60.557	413286	667996	48.083
413286	668001	60.413	413286	668001	48.452
413286	668006	60.331	413286	668006	48.817
413286	668011	60.231	413286	668011	49.133
413286	668016	60.157	413286	668016	49.549
413286	668021	60.032	413286	668021	49.88
413286	668026	59.89	413286	668026	50.211
413286	668031	59.789	413286	668031	50.754
413286	668036	59.679	413286	668036	51.049
413286	668041	59.528	413286	668041	51.231
413286	668046	59.412	413286	668046	51.562
413286	668051	59.3	413286	668051	56.082
413286	668056	59.166	413286	668056	59.312
413291	667931	60.751	413291	667931	60.345
413291	667936	60.894	413291	667936	57.791
413291	667941	61.037	413291	667941	54.364
413291	667946	61.103	413291	667946	49.742
413291	667951	61.161	413291	667951	44.76
413291	667956	61.176	413291	667956	45.543
413291	667961	61.087	413291	667961	46.028
413291	667966	61.069	413291	667966	46.289
413291	667971	60.978	413291	667971	46.657
413291	667976	60.889	413291	667976	46.859
413291	667981	60.768	413291	667981	47.149
413291	667986	60.704	413291	667986	47.378
413291	667991	60.696	413291	667991	47.64

413291	667996	60.5	413291	667996	48.001
413291	668001	60.472	413291	668001	48.483
413291	668006	60.316	413291	668006	48.812
413291	668011	60.203	413291	668011	49.282
413291	668016	60.142	413291	668016	49.473
413291	668021	60.046	413291	668021	49.911
413291	668026	59.923	413291	668026	50.368
413291	668031	59.812	413291	668031	50.685
413291	668036	59.698	413291	668036	51.049
413291	668041	59.549	413291	668041	51.325
413291	668046	59.447	413291	668046	52.407
413291	668051	59.274	413291	668051	56.247
413291	668056	59.214	413291	668056	59.399
413296	667931	60.782	413296	667931	60.852
413296	667936	60.94	413296	667936	57.975
413296	667941	61.067	413296	667941	54.791
413296	667946	61.131	413296	667946	50.294
413296	667951	61.15	413296	667951	44.903
413296	667956	61.088	413296	667956	45.491
413296	667961	61.1	413296	667961	45.843
413296	667966	61.071	413296	667966	46.169
413296	667971	60.963	413296	667971	46.689
413296	667976	60.913	413296	667976	46.982
413296	667981	60.781	413296	667981	47.272
413296	667986	60.716	413296	667986	47.522
413296	667991	60.632	413296	667991	48.068
413296	667996	60.556	413296	667996	48.328
413296	668001	60.469	413296	668001	48.626
413296	668006	60.387	413296	668006	49.1
413296	668011	60.321	413296	668011	49.483
413296	668016	60.19	413296	668016	49.499
413296	668021	60.134	413296	668021	49.835
413296	668026	60.023	413296	668026	50.189
413296	668031	59.887	413296	668031	50.465
413296	668036	59.718	413296	668036	50.531
413296	668041	59.568	413296	668041	50.909
413296	668046	59.425	413296	668046	51.225
413296	668051	59.274	413296	668051	55.783
413296	668056	59.169	413296	668056	59.045
413301	667931	60.854	413301	667931	60.885
413301	667936	60.995	413301	667936	58.293
413301	667941	61.102	413301	667941	54.766
413301	667946	61.101	413301	667946	50.426
413301	667951	61.102	413301	667951	44.966
413301	667956	61.14	413301	667956	45.483
413301	667961	61.069	413301	667961	45.83
413301	667966	61.045	413301	667966	46.357
413301	667971	60.928	413301	667971	46.669
413301	667976	60.846	413301	667976	47.007
413301	667981	60.793	413301	667981	47.402
413301	667986	60.662	413301	667986	47.762
413301	667991	60.565	413301	667991	48.242
413301	667996	60.498	413301	667996	48.442
413301	668001	60.485	413301	668001	48.725

413301	668006	60.372	413301	668006	49.054
413301	668011	60.219	413301	668011	49.498
413301	668016	60.042	413301	668016	49.761
413301	668021	59.97	413301	668021	49.888
413301	668026	59.782	413301	668026	50.119
413301	668031	59.597	413301	668031	50.441
413301	668036	59.493	413301	668036	50.739
413301	668041	59.303	413301	668041	51.065
413301	668046	59.166	413301	668046	51.387
413301	668051	59.07	413301	668051	54.983
413301	668056	58.933	413301	668056	58.801
413306	667931	61.161	413306	667931	61.025
413306	667936	61.237	413306	667936	58.393
413306	667941	61.302	413306	667941	54.967
413306	667946	61.327	413306	667946	50.577
413306	667951	61.348	413306	667951	44.899
413306	667956	61.308	413306	667956	45.368
413306	667961	61.248	413306	667961	45.717
413306	667966	61.271	413306	667966	46.301
413306	667971	61.16	413306	667971	46.702
413306	667976	61.091	413306	667976	46.996
413306	667981	60.96	413306	667981	47.449
413306	667986	60.811	413306	667986	47.905
413306	667991	60.792	413306	667991	48.299
413306	667996	60.729	413306	667996	48.529
413306	668001	60.499	413306	668001	48.771
413306	668006	60.347	413306	668006	49.049
413306	668011	60.205	413306	668011	49.623
413306	668016	60.059	413306	668016	49.791
413306	668021	59.99	413306	668021	50.046
413306	668026	59.822	413306	668026	50.257
413306	668031	59.672	413306	668031	50.51
413306	668036	59.515	413306	668036	50.554
413306	668041	59.481	413306	668041	50.822
413306	668046	59.154	413306	668046	51.391
413306	668051	58.926	413306	668051	54.055
413306	668056	58.963	413306	668056	58.041
413311	667931	61.128	413311	667931	61.038
413311	667936	61.226	413311	667936	58.223
413311	667941	61.218	413311	667941	55.111
413311	667946	61.273	413311	667946	50.606
413311	667951	60.738	413311	667951	45.064
413311	667956	61.303	413311	667956	45.436
413311	667961	61.273	413311	667961	45.807
413311	667966	61.109	413311	667966	46.356
413311	667971	61.024	413311	667971	46.65
413311	667976	60.964	413311	667976	47.049
413311	667981	60.877	413311	667981	47.58
413311	667986	60.719	413311	667986	48.036
413311	667991	60.496	413311	667991	48.493
413311	667996	60.381	413311	667996	48.746
413311	668001	60.169	413311	668001	48.959
413311	668006	60.082	413311	668006	49.184
413311	668011	60.002	413311	668011	49.628

413311	668016	59.98	413311	668016	49.791
413311	668021	59.822	413311	668021	49.911
413311	668026	59.724	413311	668026	50.03
413311	668031	59.643	413311	668031	50.14
413311	668036	59.457	413311	668036	50.472
413311	668041	59.327	413311	668041	50.949
413311	668046	59.119	413311	668046	51.266
413311	668051	59.048	413311	668051	53.578
413311	668056	58.749	413311	668056	57.587
413316	667931	61.137	413316	667931	61.046
413316	667936	61.171	413316	667936	58.607
413316	667941	61.267	413316	667941	55.257
413316	667946	61.25	413316	667946	50.391
413316	667951	61.271	413316	667951	45.03
413316	667956	61.318	413316	667956	45.507
413316	667961	61.141	413316	667961	45.86
413316	667966	60.979	413316	667966	46.281
413316	667971	60.988	413316	667971	46.773
413316	667976	60.854	413316	667976	47.086
413316	667981	60.647	413316	667981	47.474
413316	667986	60.489	413316	667986	47.971
413316	667991	60.218	413316	667991	48.329
413316	667996	60.254	413316	667996	48.55
413316	668001	60.171	413316	668001	48.958
413316	668006	60.162	413316	668006	49.284
413316	668011	60.003	413316	668011	49.633
413316	668016	59.848	413316	668016	49.647
413316	668021	59.631	413316	668021	49.712
413316	668026	59.473	413316	668026	49.815
413316	668031	59.422	413316	668031	50.107
413316	668036	59.289	413316	668036	50.494
413316	668041	59.16	413316	668041	50.844
413316	668046	59.027	413316	668046	51.131
413316	668051	58.89	413316	668051	53.986
413316	668056	58.575	413316	668056	56.963
413321	667931	61.172	413321	667931	61.192
413321	667936	61.188	413321	667936	58.395
413321	667941	61.243	413321	667941	55.01
413321	667946	61.181	413321	667946	50.133
413321	667951	61.245	413321	667951	45.136
413321	667956	61.086	413321	667956	45.552
413321	667961	61.026	413321	667961	45.884
413321	667966	60.904	413321	667966	46.322
413321	667971	60.824	413321	667971	46.717
413321	667976	60.634	413321	667976	47.154
413321	667981	60.588	413321	667981	47.511
413321	667986	60.462	413321	667986	47.972
413321	667991	60.296	413321	667991	48.388
413321	667996	60.122	413321	667996	48.72
413321	668001	59.993	413321	668001	48.906
413321	668006	59.779	413321	668006	49.333
413321	668011	59.681	413321	668011	49.385
413321	668016	59.58	413321	668016	49.47
413321	668021	59.462	413321	668021	49.785

413321	668026	59.319	413321	668026	49.912
413321	668031	59.207	413321	668031	50.152
413321	668036	59.071	413321	668036	50.498
413321	668041	58.743	413321	668041	50.929
413321	668046	58.676	413321	668046	51.279
413321	668051	58.598	413321	668051	51.57
413321	668056	58.505	413321	668056	56.647
413326	667931	61.169	413326	667931	61.142
413326	667936	61.185	413326	667936	58.651
413326	667941	61.172	413326	667941	54.517
413326	667946	61.203	413326	667946	49.983
413326	667951	61.065	413326	667951	45.162
413326	667956	61.081	413326	667956	45.587
413326	667961	60.821	413326	667961	45.86
413326	667966	60.788	413326	667966	46.319
413326	667971	60.702	413326	667971	46.796
413326	667976	60.455	413326	667976	47.222
413326	667981	60.555	413326	667981	47.618
413326	667986	60.314	413326	667986	47.994
413326	667991	60.08	413326	667991	48.485
413326	667996	59.948	413326	667996	48.889
413326	668001	59.858	413326	668001	49.022
413326	668006	59.682	413326	668006	49.27
413326	668011	59.487	413326	668011	49.48
413326	668016	59.333	413326	668016	49.639
413326	668021	59.201	413326	668021	49.96
413326	668026	58.936	413326	668026	50.039
413326	668031	58.836	413326	668031	53.381
413326	668036	58.714	413326	668036	54.768
413326	668041	58.608	413326	668041	54.266
413326	668046	58.505	413326	668046	54.385
413326	668051	58.389	413326	668051	54.291
413326	668056	58.317	413326	668056	56.614
413331	667931	61.035	413331	667931	61.069
413331	667936	61.041	413331	667936	58.607
413331	667941	61.028	413331	667941	54.372
413331	667946	61.006	413331	667946	49.53
413331	667951	60.744	413331	667951	45.125
413331	667956	60.628	413331	667956	45.547
413331	667961	60.249	413331	667961	46.021
413331	667966	60.244	413331	667966	46.42
413331	667971	60.312	413331	667971	47.024
413331	667976	60.26	413331	667976	47.499
413331	667981	60.022	413331	667981	47.95
413331	667986	59.885	413331	667986	48.195
413331	667991	59.757	413331	667991	48.461
413331	667996	59.539	413331	667996	48.674
413331	668001	59.353	413331	668001	54.658
413331	668006	59.221	413331	668006	53.815
413331	668011	59.086	413331	668011	52.908
413331	668016	59.08	413331	668016	52.696
413331	668021	58.952	413331	668021	55.024
413331	668026	58.669	413331	668026	55.007
413331	668031	58.687	413331	668031	54.879

413331	668036	58.512	413331	668036	54.679
413331	668041	58.415	413331	668041	54.636
413331	668046	58.265	413331	668046	56.628
413331	668051	58.189	413331	668051	56.494
413331	668056	58.111	413331	668056	56.58
413336	667931	61.094	413336	667931	61.191
413336	667936	61.079	413336	667936	58.86
413336	667941	60.937	413336	667941	54.057
413336	667946	60.906	413336	667946	49.388
413336	667951	60.468	413336	667951	45.128
413336	667956	60.419	413336	667956	45.607
413336	667961	60.395	413336	667961	46.146
413336	667966	60.306	413336	667966	46.843
413336	667971	60.153	413336	667971	47.302
413336	667976	60.01	413336	667976	47.629
413336	667981	60.01	413336	667981	48.12
413336	667986	59.596	413336	667986	48.222
413336	667991	59.425	413336	667991	55.324
413336	667996	59.294	413336	667996	54.658
413336	668001	59.173	413336	668001	55.445
413336	668006	59.01	413336	668006	55.191
413336	668011	58.974	413336	668011	55.191
413336	668016	58.834	413336	668016	55.092
413336	668021	58.718	413336	668021	54.969
413336	668026	58.483	413336	668026	54.857
413336	668031	58.521	413336	668031	56.682
413336	668036	58.388	413336	668036	56.682
413336	668041	58.335	413336	668041	56.706
413336	668046	58.212	413336	668046	56.627
413336	668051	57.984	413336	668051	57.985
413341	667931	61.091	413341	667931	60.961
413341	667936	60.857	413341	667936	58.867
413341	667941	60.683	413341	667941	54.278
413341	667946	60.601	413341	667946	49.28
413341	667951	60.502	413341	667951	45.196
413341	667956	60.363	413341	667956	45.603
413341	667961	60.27	413341	667961	46.58
413341	667966	60.12	413341	667966	46.871
413341	667971	59.956	413341	667971	47.087
413341	667976	59.758	413341	667976	47.629
413341	667981	59.62	413341	667981	48.17
413341	667986	59.376	413341	667986	55.864
413341	667991	59.216	413341	667991	55.99
413341	667996	59.055	413341	667996	56.07
413341	668001	59.001	413341	668001	55.134
413341	668006	58.853	413341	668006	55.073
413341	668011	58.717	413341	668011	55.073
413341	668016	58.583	413341	668016	56.952
413341	668021	58.456	413341	668021	56.873
413341	668026	58.284	413341	668026	58.286
413341	668031	58.328	413341	668031	58.291
413341	668036	58.084	413341	668036	58.231
413346	667931	60.824	413346	667931	60.732
413346	667936	60.856	413346	667936	59.031

413346	667941	60.595	413346	667941	54.585
413346	667946	60.52	413346	667946	50.037
413346	667951	60.386	413346	667951	45.334
413346	667956	60.307	413346	667956	45.469
413346	667961	60.065	413346	667961	46.307
413346	667966	59.918	413346	667966	56.345
413346	667971	59.779	413346	667971	56.089
413346	667976	59.464	413346	667976	56.216
413346	667981	59.298	413346	667981	55.866
413346	667986	59.203	413346	667986	56.204
413346	667991	59.024	413346	667991	57.219
413346	667996	58.843	413346	667996	57.178
413346	668001	58.701	413346	668001	57.028
413346	668006	58.624	413346	668006	55.171
413346	668011	58.566	413346	668011	58.506
413346	668016	58.379	413346	668016	58.489
413351	667931	60.845	413351	667931	60.774
413351	667936	60.678	413351	667936	59.419
413351	667941	60.514	413351	667941	55.549
413351	667946	60.416	413351	667946	53.409
413351	667951	60.257	413351	667951	56.78
413351	667956	60.05	413351	667956	56.7
413351	667961	59.865	413351	667961	56.395
413351	667966	59.531	413351	667966	56.256
413351	667971	59.493	413351	667971	57.842
413351	667976	59.299	413351	667976	57.54
413351	667981	59.122	413351	667981	57.606
413351	667986	58.897	413351	667986	57.549
413351	667991	58.771	413351	667991	58.723
413351	667996	58.604	413351	667996	58.663
413351	668001	58.394	413351	668001	58.578
413351	668006	58.345	413351	668006	58.515
413356	667931	60.708	413356	667931	60.678
413356	667936	60.582	413356	667936	60.615
413356	667941	60.418	413356	667941	57.468
413356	667946	60.304	413356	667946	57.031
413356	667951	59.98	413356	667951	57.008
413356	667956	59.832	413356	667956	58.443
413356	667961	59.638	413356	667961	58.081
413356	667966	59.429	413356	667966	57.847
413356	667971	59.225	413356	667971	59.313
413356	667976	59.011	413356	667976	59.176
413361	667931	60.599	413361	667931	60.581
413361	667936	60.523	413361	667936	60.495
413361	667941	60.359	413361	667941	58.604
413361	667946	60.124	413361	667946	59.117
413361	667951	59.891	413361	667951	59.915
413361	667956	59.678	413361	667956	59.838
413361	667961	59.437	413361	667961	59.637
413361	667966	59.217	413361	667966	59.449
413361	667971	58.929	413361	667971	59.313