

ERNESTO GOLDFARB FIGUEIRA

MODELAGEM GEOESTATÍSTICA DA MINA SAIVÁ
RIO BRANCO DO SUL - PR

Dissertação apresentada como requisito parcial à
obtenção do grau de Mestre. Curso de Pós
Graduação em Geologia Exploratória, Setor de
Tecnologia, Universidade Federal do Paraná

Orientador Principal:
Prof. Dr. Sidnei Pires Rostirolla

Co-orientadores:
Prof. Dr. João Carlos Biondi
Prof. Dr. Paulo Cesar Soares

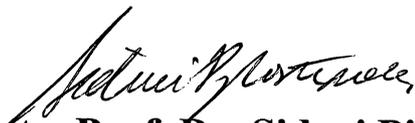
CURITIBA
1999

TERMO DE APROVAÇÃO

ERNESTO GOLDFARB FIGUEIRA

**Modelagem Geoestatística da Mina Saivá – Rio Branco do Sul -
PR**

**Dissertação de Mestrado aprovada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em
Geologia, com área de concentração em Geologia Exploratória,
da Universidade Federal do Paraná, pela comissão formada
pelos Professores:**


Presidente: Prof. Dr. Sidnei Pires Rostirolla


Prof. Dr. Jorge Kazuo Yamamoto


Prof. Dr. Paulo Milton Barbosa Landim

Curitiba, agosto de 1999

DEDICO ESTE TRABALHO AOS MEUS PAIS, PEDRO E FANI, PRINCIPALMENTE AO EXEMPLO DADO POR UMA VIDA FEITA COM MUITA GARRA E MUITO AMOR. A ELES DEVO TUDO E APENAS UMA DEDICATÓRIA É MUITO POUCO PARA DIZER O QUANTO EU OS AMO.

E COM AMOR A MINHA COMPANHEIRA E AMIGA, ISABELLA, PRESENTE EM CADA PALAVRA DESTE TRABALHO E QUE TEM SIDO A RAZÃO DOS MEUS ATOS.

AGRADECIMENTOS

São muitas as atividades envolvidas em uma pesquisa científica, e muitas delas somente foram realizadas com a colaboração de diversas pessoas, as quais gostaria de manifestar meus agradecimentos.

Inicialmente aos meus familiares, Milena, Luis, André, Henrique, Dilmar e Nilce, pelos incentivos e compreensão.

Durante a realização desta dissertação, tive a oportunidade de conviver com muitas pessoas do meio docente; dentre as quais gostaria de agradecer em especial ao meu amigo e Orientador, Prof. Dr. Sidnei Pires Rostirolla, pela motivação e pelo apoio incansável, pelas críticas, pelas dicas, pelas contribuições, enfim, por tudo, a uma pessoa fora de série, dedicada no exercício de sua atribuição como professor e especialmente importante para o estágio de qualificação que se encontra hoje o Departamento e a Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Paraná.

Ao co-orientador Paulo César Soares, a quem devo agradecer pela viabilização do convênio que culminou nesta dissertação, assim como pelas sugestões e críticas. Uma pessoa admirável, de um conhecimento técnico e científico inigualáveis. Atualmente um dos geólogos mais preocupado com o ensino e com a metodologia científica no Brasil.

Ao co-orientador João Carlos Biondi, a quem devo a motivação inicial que me levou a trabalhar com geoestatística. Agradeço também suas sugestões e críticas, fundamentais nas tomadas de decisões, principalmente na etapa inicial.

Agradeço a CIA DE CIMENTOS PORTLAND RIO BRANCO - VOTORANTIN pela confiança depositada neste estudo, pela cessão dos dados exploratórios do Depósito da Mina Saivá, bem como pelo apoio financeiro referente ao primeiro ano deste projeto.

A todo o apoio dado pelo Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná, sem o qual seria impossível a elaboração deste trabalho. Em especial, agradeço os funcionários Edson, Neimar, Rosalda, Max e Valdir.

Ao professor e amigo Mauro Monastier, pelas discussões, dicas, empréstimos dos mapas e principalmente pelo apoio dado desde a graduação.

A Universidade Federal do Rio Grande dos Sul - Laboratório de Planejamento e Pesquisa Mineral (LPM), em especial ao Prof. João Felipe Costa e aos pós-graduandos

Gustavo G. Pilger e Rodrigo de Lemos Peroni, pelo apoio fundamental na utilização da GSLIB para a variografia 3D e krigagem.

Ao Prof. Dr. Armando Zaupa Remacre, do IG - UNICAMP. Pelas sugestões e pela ajuda de grande valia na parte inicial do trabalho.

Enfim, como infelizmente não posso citar a todos, manifesto meus mais sinceros agradecimentos a todos aqueles que, de uma forma ou de outra contribuíram e apoiaram a elaboração desta dissertação.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS E FOTOGRAFIA.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	xi
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
CAPÍTULO 1.....	01
1.1 - INTRODUÇÃO.....	01
1.2 - OBJETIVOS E METODOLOGIA.....	03
1.3 - LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO.....	06
CAPÍTULO 2.....	07
2.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	07
2.2 - EVOLUÇÃO DO CONHECIMENTO.....	08
2.3 - O CONJUNTO SAIVÁ.....	09
2.4 - CONSIDERAÇÕES ESTRUTURAIS.....	11
2.5 - GEOLOGIA DA ÁREA.....	12
2.6 - CARACTERIZAÇÃO DOS TIPOS LITOLÓGICOS.....	22
2.7 - ANÁLISE ESTRUTURAL.....	27
CAPÍTULO 3.....	34
3.1 - CONSIDERAÇÕES E PREPARAÇÃO DO BANCO DE DADOS.....	34
3.2 - DISTRIBUIÇÃO AMOSTRAL.....	37
3.3 - CODIFICAÇÃO DOS TIPOS LITOLÓGICOS.....	39
3.4 - REGIONALIZAÇÃO.....	40

CAPÍTULO 4	42
4.1 - ANÁLISE ESTATÍSTICA (ESTATÍSTICA DESCRITIVA).....	42
4.2 - ANÁLISE DESCRITIVA GERAL.....	43
4.3 - ANÁLISE DESCRITIVA ESPACIAL.....	52
CAPÍTULO 5	58
5.1 - CONSIDERAÇÕES SOBRE A GEOESTATÍSTICA.....	58
5.2 - VARIOGRAFIA.....	62
5.2.1 - VARIOGRAFIA EXAUSTIVA.....	65
5.2.2 - MODELAGEM VARIOGRÁFICA.....	71
CAPÍTULO 6	83
6.1 - KRIGAGEM ORDINÁRIA POR BLOCOS.....	83
6.2 - MODELOS DE BLOCOS.....	88
6.2.1 - PRIMEIRA ESTIMATIVA – MODELO DE 10X10X15M.....	90
6.2.2 - SEGUNDA ESTIMATIVA – MODELO DE 10X10X15M E 30X30X15.....	93
6.2.3 - TERCEIRA ESTIMATIVA – ESTIMATIVA GLOBAL.....	99
6.2.4 - QUARTA ESTIMATIVA – MODELO DE 10X10X15M.....	108
6.3 - ESTIMATIVAS DAS RESERVAS (CUBAGEM).....	117
CAPÍTULO 7	118
7.1 - DISCUSSÕES FINAIS.....	118
7.2 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	119
7.2.1 - PROPOSIÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	121
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	122

LISTA DE FIGURAS E FOTOGRAFIA

Fig. -1: Localização geográfica da mina Saivá e principais vias de acesso.....	06
Fig. -2: Unidades estratigráfica para a área em estudo.....	09
Fig. -3: Perfil Litoestratigráfico da Formação Votuverava.....	10
Fig. -4: Compartimentação tectônica do Grupo Açungui.....	13
Fig. -5: Mapa Geológico esquemático da Mina Saivá.....	14
Fig. -6: Principais dobras do Sistema de Dobramentos Apiaí.....	17
Fig. -7: Estereograma de fratura (roseta) para todas as atitudes.....	28
Fig. -8: Estereograma de contorno para os pontos (fraturas).....	28
Fig. -9: Estereograma dos pólos das fraturas.....	29
Fig. -10: Estereograma com os planos médios interpretados.....	30
Fig. -11: Estereograma da somatória de todos os dados (foliação S_1).....	32
Fig. -12: Estereograma regional da Sinforme do Rio Abaixo.....	32
Fig. -13: Seção geológica da Sinforme do Rio Abaixo.....	33
Fig. -14: Fluxograma das etapas desenvolvidas para obtenção do modelo geoestatístico.....	36
Fig. -15: Distribuição espacial dos furos de sondagem.....	38
Fig. -16: Comparação entre histogramas para o óxido de Si.....	44
Fig. -17: Histogramas do SiO_2 para o compartimento CD1.....	46
Fig. -18: Histograma do CaO para o compartimento CM2.....	47
Fig. -19: Histograma do MgO para o compartimento CD1.....	47
Fig. -20: Histograma dos óxidos de Fe, Ca, e Mg para o compartimento CD4.....	48
Fig. -21: Histograma do óxido de K para o compartimento CD4.....	49
Fig. -22: Comparação de histogramas com valores brutos e logarítmicos, para os óxidos de Si e Fe, para o compartimento CM1.....	49

Fig. -23: Gráfico de Probabilidade Normal.....	51
Fig. -24: Gráfico tipo “Caixa” de óxido de Si para o compartimento CM2.....	51
Fig. -25: Gráficos de correlação entre óxidos para o compartimento CM2.....	51
Fig. -26: Gráfico de Box Plot do compartimento CD1, para os óxidos de Si e Mg.....	55
Fig. -27: Gráfico de Box Plot do compartimento CM2, para os óxidos de Si e Mg.....	55
Fig. -28: Gráfico de dispersão (<i>Scatterplot</i>) para o compartimento CM2, referente ao óxido de sílica.....	56
Fig. -29: Direções e ângulos de tolerância da variografia exploratória.....	66
Fig. -30: Variografia omnidirecional no plano xz, para todos os óxidos.....	67
Fig. -31: Bloco diagrama mostrando a direção principal das sondagens e as principais direções de variografia realizadas em relação às camadas geológicas.....	68
Fig. -32: Variografia exaustiva para o óxido de Si, do compartimento CD1.....	70
Fig. -33: Representação gráfica do suporte para a construção do banco de dados.....	71
Fig. -34: Variogramas para diferentes <i>lags</i>	72
Fig. -35: Variogramas direcionais para CD1. <i>Lag</i> de 2m e número de <i>lags</i> igual a 20m.....	73
Fig. -36: Variogramas direcionais para CM2. <i>Lag</i> de 2m e número de <i>lags</i> igual a 20m.....	74
Fig. -37: Variogramas direcionais para CD1. <i>Lag</i> de 10m e número de <i>lags</i> igual a 15m.....	75
Fig. -38: Variogramas direcionais para CM2. <i>Lag</i> de 10m e número de <i>lags</i> igual a 15m.....	76
Fig. -39: Direções e ângulos de tolerância da variografia exploratória realizada com a <i>GSLIB</i>	80
Fig. -40: Variogramas modelados ao longo da direção das sondagens, para os óxidos de Si e Mg, nos compartimentos CD1 e CM2.....	82
Fig. -41: Krigagem por blocos.....	87
Fig. -42: Mapas krigados e seus respectivos mapas de erro de estimação, para os óxidos de	

Si e Mg do compartimento CD1. Blocos de 10x10x15 / Nível-945 / Plano xy.....	91
Fig. -43: Mapas krigados e seus respectivos mapas de erro de estimação, para os óxidos de Si e Mg do compartimento CM2. Blocos de 10x10x15 / Nível-945 / Plano xy.....	92
Fig. -44: Mapas krigados e seus respectivos mapas de erro de estimação, para os óxidos de Si e Mg do compartimento CD1. Blocos de 30x30x15 / Nível-945 / Plano xy.....	95
Fig. -45: Mapas krigados e seus respectivos mapas de erro de estimação, para os óxidos de Si e Mg do compartimento CM2. Blocos de 30x30x15 / Nível-945 / Plano xy.....	96
Fig. -46: Mapas krigados e seus respectivos mapas de erro de estimação, para os óxidos de Si e Mg do compartimento CD1. Blocos de 10x10x15 / Nível-945 / Plano xy.....	97
Fig. -47: Mapas krigados e seus respectivos mapas de erro de estimação, para os óxidos de Si e Mg do compartimento CM2. Blocos de 10x10x15 / Nível-945 / Plano xy.....	98
Fig. -48: Variogramas para os óxidos de Si e Mg, utilizados como parâmetro para a krigagem global.....	100
Fig. -49: Mapas krigados para o óxido de Si, por níveis para o plano xy (Blocos de 10x10x15).....	101
Fig. -50: Mapas dos erros de estimação para o óxido de Si, por níveis para o plano xy (Blocos de 10x10x15).....	102
Fig. -51: Mapas krigados para o óxido de Mg, por níveis para o plano xy (Blocos de 10x10x15).....	103
Fig. -52: Mapas dos erros de estimação para o óxido de Mg, por níveis para o plano xy (Blocos de 10x10x15).....	104
Fig. -53: Mapas krigados para o óxido de Si, por níveis para o plano xz (Blocos de 10x10x15).....	106
Fig. -54: Mapas krigados para o óxido de Mg, por níveis para o plano xz (Blocos de 10x10x15).....	107
Fig. -55: Mapas krigados para o óxido de Si, por níveis para o plano xy (Blocos de 10x10x15).....	111
Fig. -56: Mapas dos erros de estimação para o óxido de Si, por níveis para o plano xy (Blocos de 10x10x15).....	112
Fig. -57: Mapas krigados para o óxido de Mg, por níveis para o plano xy (Blocos de	

10x10x15).....	113
Fig. -58: Mapas dos erros de estimação para o óxido de Mg, por níveis para o plano xy (Blocos de 10x10x15).....	114
Fig. -59: Modelo 3D, com blocos de 50x50x15, para óxido de Mg.....	116
Fig. -60: Modelo 3D, com blocos de 50x50x15, para óxido de Si.....	116
FOTO 01: Dique de diabásio visualizado nas bancadas da mina Saivá.....	20

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Estrutura e significado dos campos do banco de dados.....	35
Tabela 2: Principais litologias do depósito de Saivá, seus significados e os teores correspondentes.....	39
Tabela 3: Resultados da análise descritiva para o conjunto numérico do banco de dados.....	43
Tabela 4: Resultados da análise estatística do compartimento CD1.....	43
Tabela 5: Resultados da análise estatística do compartimento CD3.....	43
Tabela 6: Resultados da análise estatística do compartimento CD4.....	44
Tabela 7: Resultados da análise estatística do compartimento CM1.....	44
Tabela 8: Resultados da análise estatística do compartimento CM2.....	44
Tabela 9: Resultados do coeficiente de variação para todos os compartimentos.....	46
Tabela 10: Resumo das transformações logarítmicas, por compartimento.....	50
Tabela 11: Quadro comparativo entre os métodos convencionais de estimativa.....	61
Tabela 12: Parâmetros dos variogramas para o compartimento CD1, com $lag=2m$ e número de $lags=20m$	77
Tabela 13: Parâmetros dos variogramas para o compartimento CM2, com $lag=2m$ e número de $lags=20m$	77
Tabela 14: Parâmetros dos variogramas para o compartimento CD1, com $lag=10$ e número de $lags=15$	77
Tabela 15: Parâmetros dos variogramas para o compartimento CM2, com $lag=10m$ e número de $lags=15$	78
Tabela 16: Parâmetros dos variogramas utilizados para as estimativas, referentes aos compartimentos CD1 e CM2.....	81
Tabela 17: Resultados obtidos da validação cruzada para a primeira estimativa.....	93
Tabela 18: Resultados obtidos da validação cruzada para a segunda estimativa.....	99

Tabela 19: Resultados obtidos da validação cruzada para a terceira estimativa.....	108
Tabela 20: Resultados obtidos da validação cruzada para a quarta estimativa.....	115
Tabela 21: Resultado da tonelagem de minério, discretizadas por teores de SiO e MgO, com base no terceiro modelo de estimativa.....	117

RESUMO

O presente trabalho consiste na aplicação e discussão de técnicas geoestatísticas para o entendimento da variabilidade espacial dos tipos de minério constituintes da mina Saivá. Este depósito localiza-se no município de Rio Branco do Sul, no Estado do Paraná - Brasil, e pertence à Cia de Cimento Portland Rio Branco - VOTORANTIN. Constitui-se de uma sequência de rochas do proterozóico médio a superior, pertencentes ao Grupo Açungui, Formação Votuverava.

Os principais litotipos são metacalcários, metadolomitos, metamargas e filitos, representativos de uma sequência plataformal carbonática, metamorfizados em baixo grau.

Os dados utilizados para esta análise são resultantes de uma campanha de prospecção realizada na década de 70, cujos testemunhos de sondagens foram analisados quimicamente para diversos óxidos, a saber: Si, Al, Fe, Ca, Mg e K. Pela forma sistemática como foi feita a pesquisa, estas amostras têm uma posição espacial conhecida dentro do corpo de minério.

A análise estatística descritiva para estas variáveis mostra que, embora algumas distribuições sejam levemente assimétricas, o coeficiente de variação é baixo, indicando dados com valores pouco erráticos. As condições de estacionariedade evidenciam que os dados são homogêneos, ora na média ora na variância.

A variografia exploratória, realizada em duas e três dimensões, mostra que, devido a uma forte heterogeneidade na amostragem, somente os variogramas direcionais ao longo dos furos de sondagem evidenciam uma estrutura de covariância espacial. A modelagem dos variogramas indica que há dois comportamentos de variabilidade espacial: o primeiro evidenciado nos variogramas construídos com *lags* menores, cujos alcances estão em torno de 10-20 metros, associados a uma variabilidade litológica de menor escala e um segundo para *lags* maiores, com alcances em torno de 40-60 metros, que representam a variabilidade espacial em maior escala. Alguns variogramas sugerem a presença de uma segunda estrutura, cujos alcances atingem em média 60-100 metros.

As estimativas realizadas por krigagem ordinária foram efetuadas para blocos de vários tamanhos, com o intuito de verificar as diferenças das médias dos valores estimados, bem como o ganho operacional e visual para cada modelo. O modelo de bloco de dimensão 10x10x15m foi o que se mostrou mais adequado para a representação espacial da variáveis, que, além de mostrar um erro de estimativa aceitável, é o modelo que mais se aproxima da unidade de lavra utilizada atualmente na mina Saivá.

Os resultados obtidos das krigagens 3D evidenciam dois controles na variação dos teores: 1) em maior escala, provavelmente um controle litológico - sedimentar, que teria condicionado a individualização de grandes faixas NE, com alto e baixo MgO, respectivamente, nas quais o SiO apresenta uma distribuição mais constante; 2) em menor escala, provavelmente um controle litológico - metamórfico, que estaria representado pela repetição de pequenas faixas ou ciclos em torno de 30 a 40 metros, observados em um trend N30-40E com caimento para NW; tal variação de teores está refletida tanto no Mg quanto na Si, mas principalmente na Si, por esta apresentar a característica de maior mobilidade durante processos de metamorfismo.

ABSTRACT

Geoestatistical techniques are applied and discusses in the study of limestone ore of the Saivá mine. The Cia de Cimento Portland Rio Branco - VOTORANTIN is the owner of the mine, which is located in Rio Branco do Sul, State of Paraná, Brazil. The ore rocks have intermediate to upper proterozoic ages and belong to Votuverava Formation, Açungui Group. The main lithologies are metalimestones, metadolomites, metamarbles and phyllites, representative of a platformal sequence of low-grade greenschist facies metamorphism.

The data used for the geoestatistical analysis are from an exploration project carried out in 70 S, whose drill cores were analyzed chemically for several oxides, including: Si, Al, Fe, Ca, Mg and K. Due to the systematic research, the samples have a known position inside the ore body.

Descriptive statistical analysis for these oxides shows that, despite a small skewness in the frequency distributions, the coefficient of variation is low, indicating that the data set can be geoestatistically analyzed. The stationarity conditions show that the data are homogeneous in relation to the mean or to the variance.

2D and 3D exploratory variography shows that, because of a strong heterogeneity in the sampling, only the directional variograms along the drill holes evidence a well behaved spatial covariance. The modeled variograms suggest that there are two types of spatial variability: the first one evidenced in the smaller lags variograms, whose ranges are about 10-20 meters, related to a lithologic variability of smaller scale and the second one for larger lags, with ranges reaching 40-60 meters, representing the larger scale variability. Some other variograms suggest the presence of a second structure, whose ranges reach 60-100 meters.

The estimate was done by ordinary kriging, for blocks of several sizes, with the objective of verifying the differences of the averages of the estimated values, as well as the operational and visual advantages of each model. The model of 10x10x15m block dimension presents the better result for spatial representation of the oxides distribution, whose estimates present acceptable variance. Besides, it is a block size close to the mined unit size in the Saivá mine.

Results in the 3D kriging evidence two controls in the grade variation: 1) in a larger scale, probably a lithologic-sedimentary one, which controlled the individualization of NE belts, with high and low MgO, respectively, in which SiO presents a more constant distribution; 2) in a smaller scale, probably a metamorphic-lithologic control, associated with repetitive small trends or cycles around 30 to 40 meters, striking N30-40E and dip to NW; such variation of grades is seen both Mg and Si, but mainly in Si, because of its of larger mobility during metamorphism.

CAPÍTULO 1

1.1 - INTRODUÇÃO

A estrutura de variabilidade espacial de um determinado atributo como, por exemplo, o teor de minério em uma determinada região, sempre motivou pesquisadores, a desenvolver e aprimorar técnicas estatísticas que fossem capazes de traduzir esta informação de extrema importância e valia, principalmente na área da mineração.

Motivados pelo surgimento de novos materiais, a busca pela competitividade no mercado, a necessidade de otimização e utilização de recursos naturais, induziram as empresas do setor mineral a buscar novas técnicas que possam auxiliar na previsão da qualidade e quantificação dos recursos que exploram.

Assim surgiu a Geoestatística, inicialmente desenvolvida na África do Sul, e que mais tarde foi aprimorada na França, sob a orientação de G. Matheron, dando origem à teoria das Variáveis Regionalizadas, a qual foi então definida pelo referido autor como sendo “a aplicação do formalismo de funções aleatórias ao reconhecimento e estimação de fenômenos naturais” (Matheron, G. F. 1963).

A definição de um modelo geológico e numérico robusto para um depósito mineral, traduz-se em uma ferramenta poderosa para análise da qualidade do material *in situ* e no cálculo de tonelagens com respectivos teores a movimentar. O conhecimento das reservas bem como do material presente em um painel de avanço projetado, permitem uma avaliação e planejamento coerente a partir de valores estimados, sua

variabilidade e até mesmo a incerteza associada a esses utilizando técnicas geoestatísticas. (Matheron, 1971, David, 1977, Journel e Huijbregts, 1978)

Considerando que as variáveis representativas de fenômenos naturais possuem referencial de posição no espaço, seria possível construir mapas que exibissem a distribuição de minério, fazer estimativas de reservas, obter parâmetros para verificar a variabilidade espacial e orientar estratégias de prospecção.

Seguindo tais premissas o presente trabalho pretende mostrar os principais resultados obtidos a partir da aplicação das técnicas geoestatísticas para determinados atributos químicos de um depósito calcário em lavra, chamado Mina Saivá, localizado no município de Rio Branco do Sul, Paraná, para a produção de cimento.

Cabe ressaltar que parte deste trabalho é o resultado de um convênio de cooperação técnico-científica entre a **CIA. de Cimentos Portland Rio Branco (GRUPO VOTORANTIN)**, detentora dos direitos minerais e operadora da mina, e a **Universidade Federal do Paraná (UFPR)**, através da FUNPAR.

Os dados utilizados neste estudo provêm de uma campanha de pesquisa, realizada pela própria empresa, onde foram feitos diversos furos de sondagens, cujas amostras foram analisadas quimicamente para diversos óxidos (Si, Al, Fe, Ca, Mg e K), de reconhecida importância para o fabrico de cimento.

A pesquisa da jazida apresenta resultados de teores, provenientes da análise de testemunhos de sondagens. Estas amostras têm uma posição espacial conhecida dentro do corpo de minério, referenciada a um sistema de coordenadas, e pela forma sistemática como foi feita a pesquisa, conservou as propriedades do material analisado.

Uma característica marcante desta amostragem, e que pode ser vista como um problema evidente para a aplicação das técnicas geoestatísticas, é sua forte heterogeneidade.

Ao longo do furo de sondagem a amostragem é contínua (1 em 1 metro), já ao longo das direções transversais aos planos de sondagens, a amostragem não é regular e há uma densidade muito baixa, que varia aproximadamente de 50 a 100 metros, dependendo da direção estudada.

Os resultados das análises químicas encontram-se sob a forma de um banco de dados, a partir do qual foram feitos todos os estudos que integram este trabalho.

Assim, este trabalho foi desenvolvido em duas etapas básicas. A primeira foi marcada pelo estudo do depósito, além da revisão e preparação dos dados a serem utilizados, enquanto a segunda envolveu a análise exploratória dos dados (estatística básica) e a geoestatística propriamente dita, quando foram feitas as estimativas por krigagem.

1.2 - OBJETIVOS E METODOLOGIA

O objetivo principal do presente trabalho consiste na compreensão da estrutura espacial de variação dos óxidos no depósito. O estudo focalizou a regionalização e a anisotropia das variáveis com a aplicação das técnicas geoestatísticas, a fim de substanciar a estimativa por meio de krigagem.

Os resultados permitiram estabelecer parâmetros geoestatísticos para a lavra, tais como variar a dimensão de blocos modelados com o intuito de verificar o erro da estimativa e a distribuição espacial dos teores dos óxidos, que poderão ser utilizados na otimização de lavra.

Tais resultados poderão subsidiar a tomada de decisões, permitindo que se faça uma lavra mais seletiva, visando, desta forma uma redução significativa na variabilidade dos teores de minério que fazem parte da matéria prima do cimento, reduzindo assim a

pilha de homogeneização, o que significaria um ganho considerável em agilidade na produção e conseqüentemente um menor capital empregado, na forma de minério já lavrado, em pilhas maiores do que seriam realmente necessárias.

Visando atingir o objetivo proposto, esta pesquisa buscou a todo momento estabelecer relações entre os dados de superfície, subsuperfície, aqueles obtidos a partir de acervo bibliográfico, bem como aqueles oriundos de testes e estudos de caracterização do comportamento dos teores do minério de calcário.

De maneira geral, a execução dos trabalhos se deu de acordo com a seguinte ordem:

- Pesquisa bibliográfica sobre a região estudada, bem como sobre as técnicas a serem empregadas, discussões com orientadores e técnicos da CCPRB (Cia de Cimentos Portland Rio Branco), para a determinação do melhor modo de abordagem do problema.
- Obtenção de material cartográfico, a saber: mapas topográficos, geológicos e topogeológicos de detalhe (escala 1:1000 - CCPRB), além de seções geológicas com os furos de sondagens projetados e projeto de bancadas, de 30 em 30 metros (escala 1:1000 – CCPRB).
- Levantamento de campo, onde procurou-se verificar as principais feições aflorantes, a posição da malha de sondagem, os tipos de minério, relações de contato, tipo de lavra (inclinação das bancadas, tamanho dos blocos, plano de detonação, tonelagem de minério, processo de produção), bem como a obtenção de dados para a análise estrutural. Nesta etapa procurou-se obter também os resultados das análises químicas do pó dos furos para detonação, pois esta informação adicional poderia minimizar os erros de estimação por krigagem, além de permitir a definição de modelos para bancadas de lavra, com

a finalidade de um planejamento para médio prazo. Entretanto estes dados não estão organizados em um banco de dados e muitas das informações já perderam o seu referencial de posição.

- Análise das atitudes de estruturas planares e lineares obtidas na fase anterior, juntamente com dados fornecidos pela empresa. O *software* utilizado nesta etapa foi o *stereonet* (*Geological Software*, 1995), o qual possibilita a construção de diagramas de rosetas e projeção de *Shimidt Lambert*.
- Preparação do banco de dados, contendo os resultados das análises químicas feitas a partir dos testemunhos de sondagens.
- Definição dos corpos de minério com características físicas (espessura, atitude) e químicas semelhantes, afim de fazer a regionalização, ou seja, compartimentar o depósito em domínios correlacionáveis com o intuito de não realizar análises para diferentes unidades.
- Estatística descritiva com os dados das análises químicas, feita para todo o conjunto de dados, bem como para cada compartimento definido na etapa anterior.
- Com base nas informações obtidas nas etapas anteriores, determinação do suporte geométrico a ser utilizado, ou seja, o volume sobre o qual a variável regionalizada foi definida.
- Variografia – realizada para todas as dimensões para cada compartimento definido, bem como ao longo dos furos de sondagens.

A variografia inicialmente foi realizada utilizando-se o *software Variowin* (Pannatier, 1996) e posteriormente, após serem resolvidas as dificuldades com a compilação, foram utilizados os módulos *Gamv* da **GSLIB** (*Deutsch and Journal*, 1996) e o *software Varfit* (Valim, 1998) para modelagem.

- Krigagem, feita para os compartimentos de maior interesse para a lavra, com o intuito de entender a distribuição dos teores na jazida. Utilizado o *software GSLIB*, módulo *Kt3D*.

1.3 - LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

A Miná Saivá está localizada a nordeste da cidade de Rio Branco do Sul e dista aproximadamente 4 km do centro da cidade. O acesso, a partir de Curitiba, dá-se pela rodovia dos minérios – PR-092 (Fig. - 1). Já a ligação entre a sede da empresa (Votorantin) e a mina é feita por uma estrada secundária, dentro da própria empresa. A Votorantin é facilmente visualizada de qualquer ponto da cidade, devido ao tamanho considerável de seus fornos de cimento (clínquer). A figura abaixo mostra as vias de acesso e a posição geográfica da área.

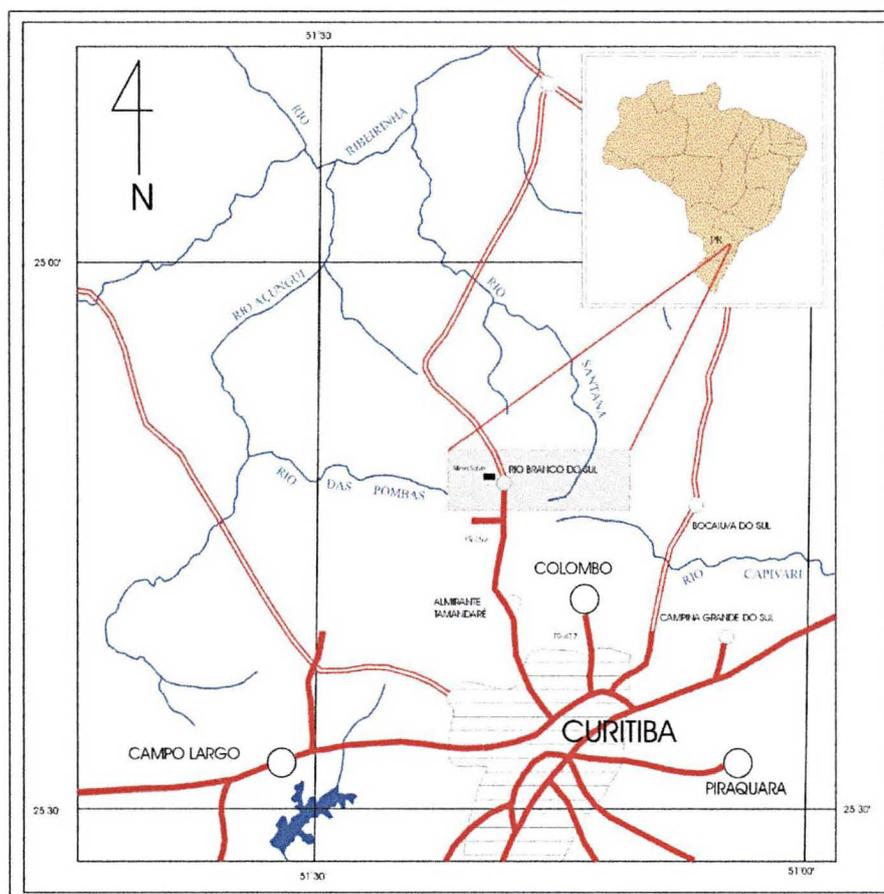


Fig - 1: Localização geográfica da mina Saivá e principais vias de acesso.

CAPÍTULO 2

GEOLOGIA

2.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

As rochas aflorantes na mina Saivá, estratigraficamente, pertencem ao Pré Cambriano paranaense, mais especificamente ao Grupo Açungui, Formação Votuverava.

Considerando a importância do modelo geológico no entendimento dos controles da mineralização e conseqüentemente, na avaliação das anisotropias e estrutura espacial do depósito, este capítulo procura fazer uma rápida revisão e mostrar o estado da arte acerca das publicações de cunho regional disponíveis. Além disso, destacam-se alguns dados obtidos sobre a geologia da área propriamente dita e as considerações a respeito das principais estruturas tectônicas encontradas.

Desde o século passado, as rochas do Pré-Cambriano Paranaense, que abrangem a área em questão, têm sido objeto de estudos científicos nas mais diversas áreas (estratigrafia, estrutural, econômica, petrografia, etc.), motivados principalmente pelo potencial econômico para minerais metálicos (Pb, Zn, Ag, Au, Cu), e não metálicos, tais como mármore, barita, talco, etc.

Estes estudos produziram numerosas designações, propostas por diversos autores, na tentativa de solucionar problemas referentes as correlações das formações e ao

posicionamento estratigráfico dentro das unidades. A quantidade de propostas científicas reflete o grau de complexidade estrutural, metamórfica e tectônica.

2.2 - EVOLUÇÃO DO CONHECIMENTO

Evidente que o número de trabalhos acerca da geologia do pré-cambriano é muito maior do que será visto a seguir, entretanto procurou-se dar maior ênfase à aqueles cujo conteúdo está relacionado com a unidade estratigráfica, Formação Votuverava, que contém o depósito da mina Saivá.

Em 1967 Bigarella e outros mencionam a presença de um pacote de rochas relativamente espesso, composto principalmente por filitos, contendo calcários calcíticos, quartzitos e conglomerados, sobrepostos, sem discordância aparente, às rochas da Formação Capirú. Esta unidade foi designada pelos autores de Formação Votuverava.

Em 1967, Bigarella e Salamuni julgaram impróprio o termo “Série Açungui” para englobar as unidades supracitadas, propondo então a denominação de Grupo Açungui.

Cordeiro *et al.* (1981) admitiram para a Formação Votuverava uma subdivisão das seguintes fácies, da base para o topo: pelito-clástica, carbonática e clástica superior.

Fiori (1990) definiu três sistemas deformacionais principais que afetaram as rochas do Grupo Açungui: Sistema de Cavalgamento Açungui, que seria o primeiro evento de deformação responsável pela geração de três foliações bem evidenciadas; o Sistema de Dobramento Apiaí que teria gerado dobramentos isoclinais e uma foliação S3 plano axial das foliações anteriores; o Sistema de Transcorrência Lancinha, que seria o último evento deformacional e teria gerado marcante bandamento tectônico (clivagem de fratura), dobras escalonadas e falhas de empurrão.

Fiori (1992) propôs que o Sistema de Cavalgamento Açungui é responsável pela atual organização estratigráfica do Grupo Açungui, que é resultado do empilhamento aleatório de fatias de rochas, limitadas acima e abaixo por falhas de cavalgamento.

Em termos estratigráficos, Fiori (1993) concluiu que o Grupo Açungui é constituído pelas Formações Capirú (Conjuntos Juruqui, Rio Branco, Morro Grande e Bocaina), Votuverava (Conjuntos Bromado, Coloninha e Saivá) e Antinha (Conjuntos Tacaniça, Capivara e Voturuvu). Como os conjuntos situam-se dentro de fatias tectônicas, removidas de suas posições iniciais, resulta que a atual estratigrafia do Grupo Açungui não é original, refletindo empilhamentos diferentes de acordo com o local.

Desta forma, a coluna estratigráfica adotada mais aceita para a área em estudo é a proposta por Fiori (1992), e que pode ser vista de maneira simplificada na figura 2.

		CONJUNTOS LITOLÓGICOS	
PROTEROZOICO MÉDIO A SUPERIOR	GRUPO AÇUNGUI	FORMAÇÃO ANTINHA	<i>VOTURUVU</i>
			<i>CAPIVARA</i>
			<i>TACANIÇA</i>
		FORMAÇÃO VOTUVERAVA	<i>SAIVA</i>
			<i>COLONINHA</i>
			<i>BROMADO</i>
		FORMAÇÃO CAPIRÚ	<i>BOCAINA</i>
			<i>MORRO GRANDE</i>
			<i>RIO BRANCO</i>
<i>JURIQUI</i>			

Fig. - 2: Unidades estratigráficas para a área em estudo. Fonte: Modificado de Fiori (1992).

2.3 - O CONJUNTO LITOLÓGICO SAIVÁ

O Conjunto Saivá é composto essencialmente por filitos, metarritimitos, mármore e metamargas.

O perfil litoestratigráfico esquemático (Fig - 3), realizado a noroeste da cidade de Rio Branco do Sul, nas proximidades da mina Saivá, permite verificar o empilhamento das rochas da Formação Votuverava e o Conjunto litológico Saivá individualizado.

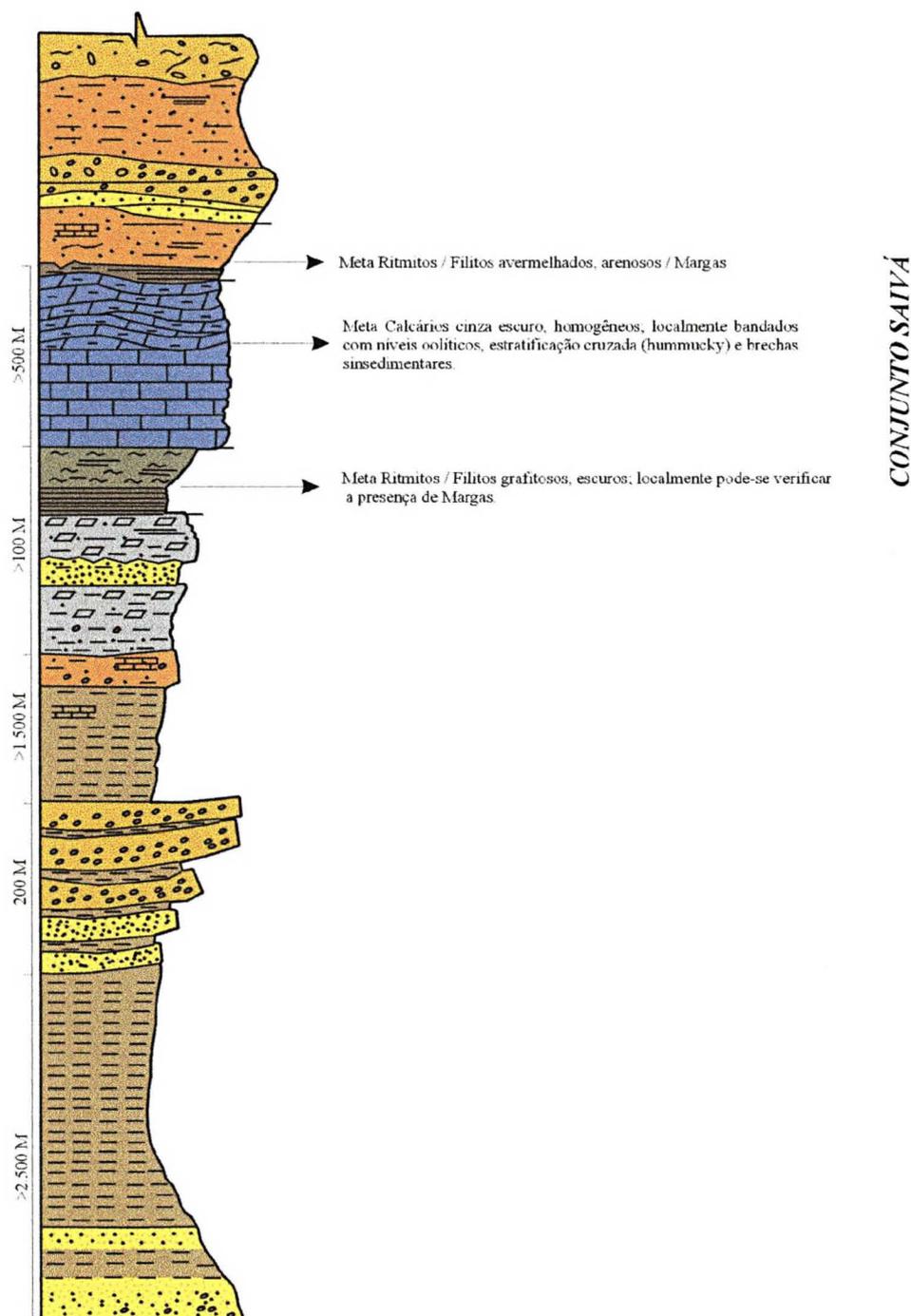


Fig. - 3: Perfil Litoestratigráfico esquemático da Formação Votuverava na região a NW de Rio Branco do Sul, nas proximidades da mina Saivá.

Inicialmente o ambiente de sedimentação descrito para o conjunto Saivá, segundo Sholl (1981), era representativo de um ambiente plataformal carbonático sob condições de águas calmas, com os carbonatos indicando ambiente restrito, passando a euxínico.

A laminação plano-paralela e a escassez de estruturas sedimentares levou o referido autor a supor que a deposição ocorria abaixo do nível das ondas (60-80 m).

Entretanto, em um estudo mais detalhado, Fiori (1990) descreve o empilhamento estratigráfico desta unidade da seguinte maneira: inicia-se na base com filito marrom escuro, apresentando elevado teor de matéria carbonosa (filitos grafitoso) e intercalações de metamargas, sucedido por um banco de mármore cinza, relativamente homogêneo.

Localmente o referido autor pôde reconhecer um bandamento de origem sedimentar, e inclusive com algumas estruturas primárias, como estratificação cruzada (*hummocky cross stratification*), granodecrescência, níveis oolíticos e brechas sinsedimentares, evidenciando deposição clástica destes carbonatos e atestando intenso retrabalhamento.

Sobre o mármore aparece um pacote de filito vermelho, homogêneo, que grada para metarritimitos, com alternância nítida de níveis de 2 a 3 cm de filito vermelho escuro, com níveis de 0,5 cm de filito arenoso vermelho claro (fração areia fina dispersa). Esta é a litologia predominante do conjunto Saivá, e localmente pode-se verificar a intercalação de metabasitos muito alterados.

2.4 - CONSIDERAÇÕES ESTRUTURAIIS

Considerando que a variação espacial dos teores no depósito pode estar relacionada e condicionada a grande complexidade estrutural verificada no Pré Cambriano da região, procurou-se fazer também, além da análise estrutural a partir dos dados de campo, uma breve síntese dos trabalhos que enfatizam este tema na área em estudo.

Diversos autores, por vezes, tratam das faixas metamórficas como blocos tectônicos individualizados, limitados por grandes falhas. Desta forma Fiori (1992), compartimenta o Grupo Açungui (Fig - 4), em blocos limitados por falhas de cavalgamento ou transcorrentes, baseado no reconhecimento da superposição de três eventos (sistemas) principais de deformação.

O mais antigo, denominado de Sistema de Cavalgamento Açungui, está realcionado a uma tectônica de cavalgamento, que causou generalizada aloctonia do grupo e gerou uma série de estruturas geneticamente associadas, como falhas de cavalgamento, dobras-falha, foliações S_1 (ou C), S e S_2 , e lineações dos tipos “a” e “b”. O segundo, denominado de Sistema de Dobramento Apiaí, inclui dobras de estilos e escalas variadas, delineadas por estruturas anteriormente formadas, enquanto o terceiro, denominado de Sistema de Transcorrência Lancinha, inclui, os principais lineamentos estudados em todo o Grupo Açungui.

2.5 - GEOLOGIA DA ÁREA

O Bloco Saivá (Fig - 4) é constituído por uma seqüência de rochas carbonáticas, intercaladas e encaixadas por metamargas, que por sua vez acham-se delimitadas por metassiltitos e filitos na sua porção noroeste.

A distribuição em planta das principais litologias, perfis e furos de sondagens podem ser vistos na figura 5.

O contato com a encaixante à sudoeste da seqüência carbonática não foi atingido pelos furos de sondagens (furo – 94, furo mais distante da linha base SE).

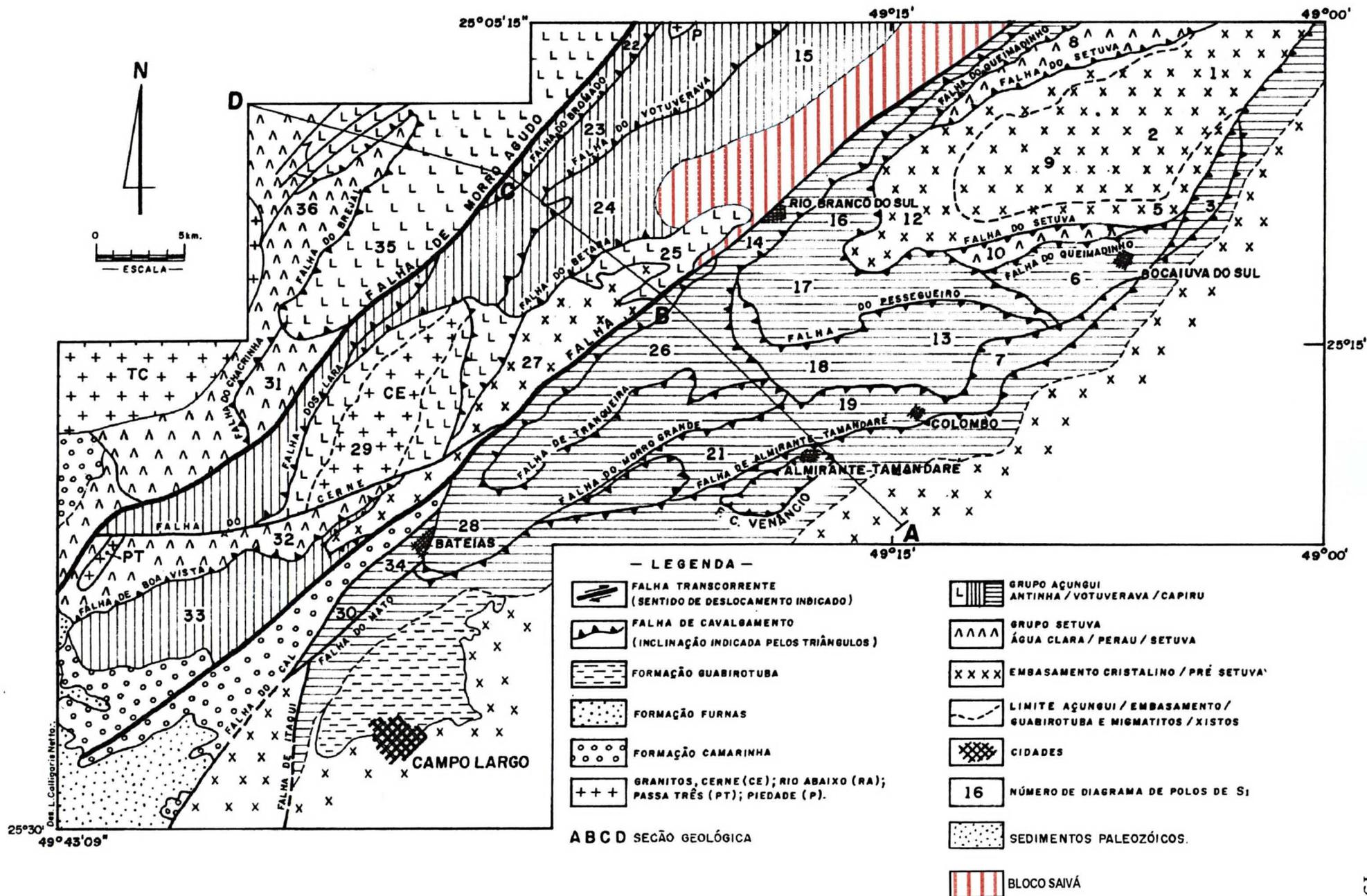


Fig - 4: Compartimentação tectônica do Grupo Açungui. Blocos devido a falhas de cavalgamento ou transcorrentes. (Fonte: Fiori, 1992)

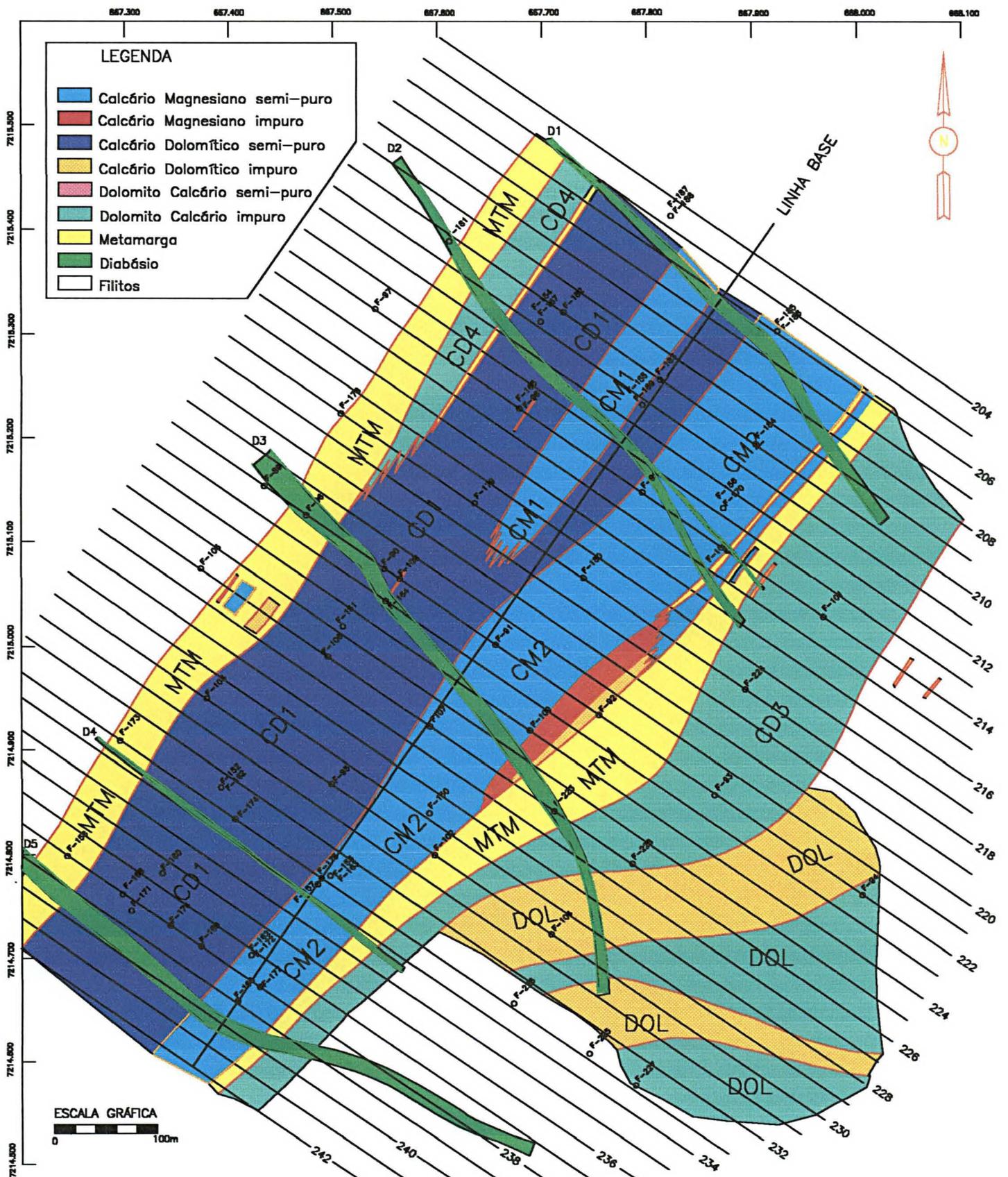


Fig - 5: Mapa geológico simplificado da Mina Saivá, mostrando os principais corpos de minério, a malha de pesquisa, bem como os furos de sondagem. MTM; CD1; CD3; CD4; CM1; CM2; DOL - COMPARTIMENTOS GEOLÓGICOS. (Fonte: Modificado de Gomes, 1989)

O metamorfismo identificado nestas rochas atingiu o grau do fácies xisto verde, zona da clorita, ou seja um metamorfismo de baixo grau, permitindo a conservação de características texturais e estruturais, de tal forma que a designação mais apropriada para estas rochas de metacalcário. O termo calcário será usado neste trabalho em função do grau de conservação das características sedimentares e por ser uma designação consagrada para os metacalcários aflorantes nesta região, o corpo técnico da empresa também se refere a estas rochas como calcários.

De maneira geral, todos os furos de sondagens atingiram a cota 760, porém foi feita uma extensão da interpretação geológica até o nível 730, ou seja abaixo do último nível proposto para a lavra na cota 760.

Todas as lentes com mais de um metro foram mapeadas na escala adotada (1:1000), as demais intercalações, com espessuras inferiores, apenas encontram-se descritas no perfil de sondagem (Gomes, 1989).

Segundo Gomes (op. Cit.), a identificação dos diferentes tipos de calcário muitas vezes é de difícil visualização, como se pode comprovar em campo. No entanto, no item caracterização dos tipos litológicos, são ressaltadas algumas diferenças, relacionadas principalmente à sua composição química.

Os principais corpos de minério da mina Saivá, compreendidos entre as faixas de metamargas (Fig - 5), apresentam uma orientação espacial com duas direções preferencias, a saber: N30 à 50E, com mergulhos que variam em média de 70°NW até a vertical. Na porção noroeste, a lente de calcário, em profundidade, apresenta um leve mergulho para SE, que sugere um possível sinclinório.

A sudeste desta seqüência, pode-se notar a ocorrência de rochas carbonáticas predominantemente dolomíticas, que ostentam direções em torno de EW, com mergulhos médios de 75° para o norte, até a vertical. O limite sudeste das metamargas, em profundidade, indica uma provável interface destas duas orientações diferenciais.

A orientação deste conjunto de rochas carbonáticas sugere ainda uma continuidade na orientação nordeste do prolongamento da mina Saivá (áreas da Cia de Cimento Portland Paraná e Mina Itacuri – bloco norte) e um estrangulamento à sudoeste (possível zona apical do sinclínio) (Fig. - 6).

A partir dos furos de sondagens e análises químicas, a faixa de calcários compreendida entre as lentes de metamargas, foi a que se mostrou mais favorável ao fabrico de cimento. Esta faixa apresenta uma espessura média de 600 m e inclui duas grandes lentes interdigitadas: uma à NW, constituída predominantemente por calcários dolomíticos semi-puros (CD1), com uma espessura média de 400 m e outra à SE, com uma espessura média de 200 m, constituída predominantemente por calcários magnesianos semi-puros (CM2). No extremo NE da jazida esta última lente apresenta uma espessura maior (em torno de 400 m) e interdigita-se com a lente de calcário dolomítico à nordeste.

A empresa designa informalmente estas duas lentes de “Alto MgO” para a lente de calcário dolomítico semi-puro, e “Baixo MgO” para a lente de calcário magnesiano semi-puro. Nota-se que nesta seqüência de rochas carbonáticas, delimitada por metamargas, por vezes acham-se intercaladas camadas descontínuas, lenticulares e de pequena espessura, constituídas por: calcário dolomítico impuro, calcário magnesiano impuro e metamarga. Esta classificação foi proposta por Bigarella e Salamuni (1956) e será vista em maior detalhe a seguir.

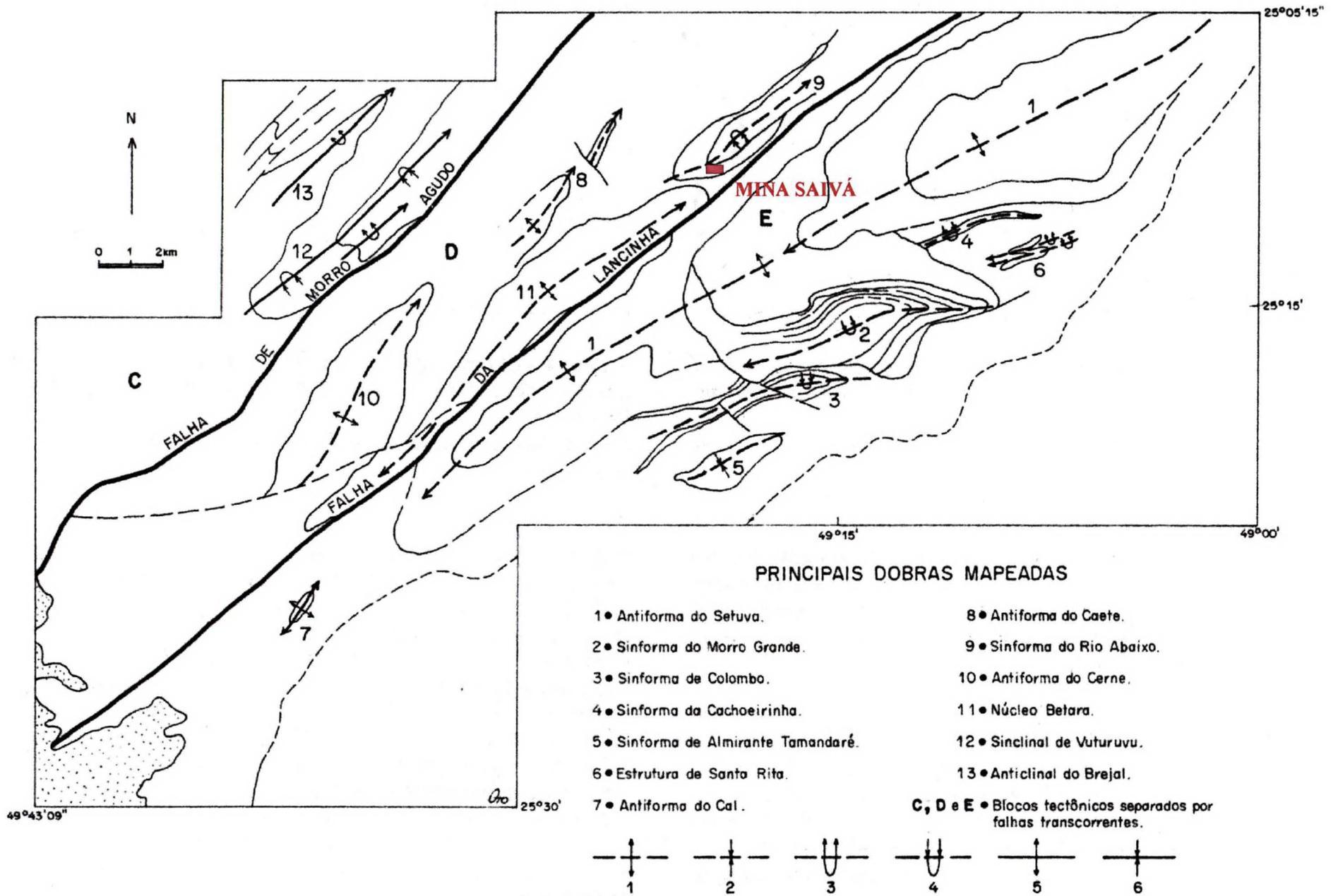


Fig. - 6: Principais dobras regionais do Sistema de Dobramentos Apiaí em relação a área da Mina Saiva. (Fonte: Fiori, 1993)

Algumas destas intercalações foram individualizadas. Ocorrem ainda nesta seqüência carbonática pequenas lentes irregulares e descontínuas de brechas intra-formacionais, não mapeáveis na escala do mapa apresentado.

Cabe ressaltar que a faixa que limita os calcários na porção NW foi denominada informalmente de metamarga, porém na realidade trata-se de uma alternância de camadas de pouca espessura, constituídas por diversos tipos de calcários, intercalados por finas camadas de metamarga. Este conjunto de diferentes camadas é caracterizado no perfil 226, onde pode-se observar, através da análise das seções geológicas e da descrição dos furos de sondagens (Winters, 1978), que tais litologias são atravessadas pelo furo 105 (Fig. - 5).

Segundo relatório interno da empresa, as rochas carbonáticas situadas à SE da lente de metamarga constituem uma seqüência altamente magnésiana, detectada através de sondagens e análise química nos perfis 218, 222 e 226. O perfil 222 foi o primeiro perfil a ser pesquisado no bloco Saivá, objetivando a localização de lentes de calcário de baixo MgO.

Esta seqüência altamente magnésiana é composta pelas seguintes litologias: calcário dolomítico semi puro, calcário dolomítico impuro, além de pequenas intercalações de metamarga e brechas intra-formacionais, todas altamente magnésianas.

Os dolomitos e calcários desta região apresentam um complexo padrão estrutural, muitas vezes caracterizado por atitudes bastante distintas (EW) do padrão regional, que exhibe uma orientação preferencial em torno de N45E. Estas variações acentuadas de atitudes são típicas dos blocos tectônicos limitados por falhas do grupo Açungui. A descrição e análise das principais estruturas encontradas na área da mina são discutidas no capítulo seguinte.

Nos furos 105, 073, 176 e 178 (perfis 226, 233, 238 e 218, respectivamente), foi verificada a ocorrência de rochas graníticas. Tratam-se de pequenas apófises desta litologia, oriundas do Granito Rio Abaixo, intrudido nas proximidades do bloco Saivá.

Todos as litologias aflorantes na mina Saivá são cortadas por diques de diabásio, identificados inicialmente através de prospeção geofísica (método magnetométrico) e posteriormente confirmadas através dos furos de sondagens. Atualmente, a visualização destes corpos básicos é feita com certa facilidade em campo (foto1). É importante salientar que tanto o mapa geológico quanto os perfis geofísicos mostram diversas ocorrências de diabásio, que não foram interceptadas pelos furos de sondagens.

Com relação à determinação do local de ocorrência destes diques, bem como da espessura dos mesmos, há uma divergência dos resultados obtidos através das técnicas de exploração geofísica e dos resultados das sondagens. Isto pode ser explicado pela presença em superfície de uma maior concentração no solo de minerais magnéticos (principalmente Magnetita), proveniente do transporte do solo originado pela decomposição do diabásio, ou ainda proveniente de depósitos de talus e colúvios.



Foto1: Dique de diabásio, com aproximadamente 13m de espessura, facilmente visualizado nas bancadas da mina Saivá.

A campanha de sondagens realizada pela empresa permitiu o mapeamento de cinco diques de diabásio, que cortam perpendicularmente todas as rochas do bloco Saivá com uma direção média de N40W, com mergulhos verticais a sub-verticais tanto para o quadrante SW como para o NE.

Após as últimas atualizações de lavra, foi identificado (entre os perfis 235 e 236) uma ramificação do dique que aflora sobre o perfil 234. Esta ramificação apresenta uma espessura pouco representativa, em torno de três metros de espessura. Segundo relatório interno, a ocorrência deste dique sobre o perfil 234 motivou o deslocamento do perfil geológico a ser sondado, para o perfil 233.

O dique de maior porte (D3) localiza-se próximo ao perfil 222, com orientação N35W e mergulho de 75° para NE. Sua espessura, em média, é superior a 25 metros.

O dique que aflora próximo ao perfil 212 (D2) apresenta a mesma direção e ângulo de mergulho do anterior, porém o quadrante do mergulho é para SW. Este dique caracteriza-se também por uma ramificação, localizada no extremo SE, com uma espessura média de 10 metros.

Sobre o perfil 238, no extremo SW da mina Siavá, ocorre um dique de diabásio (D5) com aproximadamente 20 metros de espessura e uma direção média de N45W e mergulhos em torno de 70° para NE. A principal característica deste dique é a evidência nítida de metamorfismo de contato com as encaixantes carbonáticas.

Este metamorfismo de contato caracteriza-se por uma mudança na coloração nas rochas encaixantes (tornam-se mais claras), pelo aumento na granulação dos minerais carbonatados, tornando a rocha mais resistente às ações de perfuração e desmonte, além de variações pouco significativas nos teores dos óxidos estudados. De qualquer maneira, estas variações nos teores foram exaustivamente verificadas, procurando sempre subdividir, ou até mesmo eliminar as áreas próximas as zonas de metamorfismo de contato, com o intuito de não prejudicar a análise geoestatística.

Com base nos dados de sondagem e nos mapeamentos da frente de lavra verificou-se que o manto regolítico que capeia o relevo cárstico dos calcários do bloco Saivá apresenta uma espessura de 15 metros em média.

A ocorrência de fendas preenchidas ou não por argilas podem ocorrer aleatoriamente em qualquer um dos tipos litológicos carbonatados. A maior fenda atravessada pelos furos de sondagem foi verificada no furo 159 (perfil 238), onde foram perdidas 11 hastes de perfuração em queda livre, sem possibilidade de recuperação. Desta forma, estimou-se que esta caverna apresenta aproximadamente 33 metros de extensão, que é o total da 11 hastes.

Esta fenda localiza-se entre os níveis 800 e 775, bem abaixo da cota do córrego Rio Abaixo (835 m).

2.6 - CARACTERIZAÇÃO DOS TIPOS LITOLÓGICOS

A caracterização das rochas carbonáticas que afloram no bloco Saivá, é baseada na classificação proposta por Bigarella e Salamuni (1956). Embora trate-se de uma classificação somente para rochas carbonáticas sedimentares (calcários), tal classificação foi mantida para os meta-calcários em estudo, pois além de ser uma nomenclatura consagrada regionalmente para estas rochas, foi a classificação usada pela equipe de geologia da Cia de Cimentos Portland Rio Branco, baseada principalmente em resultados das análises químicas (Winters, 1978).

Assim, as litologias que constituem a mina Saivá são as que seguem:

- Calcários e Dolomitos

Tratam-se de rochas maciças, às vezes levemente orientadas, com textura granoblástica. A coloração destes calcários é cinza médio. Os calcários magnesianos semi puros apresentam intercalações milimétricas e sub-milimétricas de grãos líticos, arredondados de quartzo e agregados, também líticos, arredondados e ovalados de dolomita, numa massa micrítica, constituída essencialmente por calcita. A proporção entre os agregados e a matriz é da ordem de 5-10%, sendo a distribuição dos agregados heterogênea na rocha. Quando há o predomínio de agregados de dolomito com forma ovalada, estas ocorrem de maneira sub-paralela no seu alongamento, impondo uma certa orientação à rocha.

Normalmente ocorrem nestas rochas, pequenos níveis de distribuição irregular (S_1) constituído por leitos milimétricos e centimétricos de metamarga e/ou filito, de textura lepidoblástica, normalmente piritosas, Outra ocorrência comum é a presença de filmes milimétricos a sub-milimétricos de material micáceo, também com distribuição irregular na rocha com pirita associada. Quando ocorrem as intercalações acima descritas, fica evidenciado o acamamento da rocha. É relativamente rara a ocorrência de pequenos cristais euhédricos de pirita, isolados, nos termos de calcário não contaminado por impurezas.

O calcário magnesiano semi puro apresenta trechos de pouca espessura, corrugados e/ou brechados, normalmente com presenças de metamargas piritosas e calcita branca. São raras as vênulas de calcita branca, que recortam a rocha de maneira heterogênea, o grau de fraturamento destas rochas é incipiente, preenchido ou não por calcita branca.

Vale ressaltar que em termos macroscópicos, principalmente em frentes de lavra e rochas desmontadas, não se distingue os diversos tipos de calcários acima descritos, no que diz respeito ao conteúdo de agregados líticos de dolomito e conseqüentemente o seu teor em MgO. Nos testemunhos de sondagem e afloramentos naturais de superfície intemperizada consegue-se distinguir a ocorrência destes agregados, sendo difícil estimar a sua proporção na rocha que justifique uma classificação correta. Portanto, a classificação destas rochas está fundamentalmente associada a sua composição química. Com relação aos contatos e intercalações apresentados entre os diversos tipos litológicos acima descritos, estes, normalmente se fazem por transição.

- *Metamarga*

São rochas fortemente orientadas, de granulação fina, coloração cinza médio a escura. Estas rochas apresentam uma alternância rítmica de leitos compostos quase que exclusivamente por clorita e/ou sericita (textura lepidoblástica) e leitos de material carbonático (textura granoblástica), caracterizando uma foliação (S_1) paralela a sub-paralela ao acamamento (S_0). A espessura destes leitos é de ordem milimétrica, podendo, em intervalos distintos, haver maior espessura dos leitos de material micáceo em relação aos leitos de material carbonático e vice-versa. Esta alternância rítmica, dos leitos de composição distinta, evidencia nitidamente o acamamento sedimentar, já que os contatos entre os níveis é normalmente bem marcado, caracterizado por transposição da foliação. Nos níveis mais micáceos é comum a ocorrência de cristais euhédricos de pirita. A metamarga pode apresentar pequenos intervalos corrugados e/ou brechados. O grau de fraturamento é mediano, e este normalmente se faz ao longo dos planos de acamamento sendo raro seu preenchimento por calcita branca. O contato destas rochas com os calcários, metassiltitos e filitos, normalmente são de transição (gradacionais).

- **Brecha Intraformacional*

Estas rochas são compostas por seixos angulosos e alongados, de formatos irregulares, provenientes das metamargas, filitos e até mesmo dos calcários. Apresentam tamanhos que chegam a atingir até 20 cm de em seu eixo maior. Estes seixos encontram-se em meio a uma matriz carbonática e apresentam uma orientação paralela a subparalela, caracterizando um provável acamamento sedimentar. Por vezes este acamamento apresenta-se levemente corrugado.

A distribuição destes seixos na matriz é irregular, podendo haver pequenos intervalos onde ocorre a predominância de qualquer um dos componentes, mas de modo geral a proporção de seixos em relação a matriz é da ordem de 50%. A ocorrência de pirita é comum nos seixos de metamarga e filito. Estas brechas estão com um grau de fraturamento mediano, preenchidas ou não por calcita branca. As características da matriz carbonática são semelhantes aos calcários anteriormente descritos, sendo sua composição variável conforme a percentagem de material micáceo e agregados de dolomito.

*A ocorrência desta litologia é restrita a pequenas áreas na mina Saivá.

- *Filitos e Metassiltitos - Mts + Fi*

Tratam-se de rochas orientadas, de granulação fina, coloração esverdeada quando não alteradas. São rochas quase que exclusivamente compostas por material micáceo, representadas por clorita e/ou sericita, esta última, em menor proporção.

Apresentam uma forte orientação denotada pela textura lepidoblástica, sendo classificados como filitos. Os metassiltitos apresentam alternância rítmica de níveis com espessuras milimétricas composto por material micáceo e níveis com espessuras semelhantes composto por material quartzo-feldspático, às vezes com baixo teor em carbonatos e normalmente apresentando coloração cinza esbranquiçado. A granulação dos níveis quartzo-feldspáticos é um pouco mais grossa que os níveis dos leitos micáceos, granulação esta enquadrada na fração silte-argila, daí a classificação destas como metassiltitos. A alternância rítmica nos metassiltitos evidencia o acamamento. A presença de pirita é comum nestas rochas, geralmente associadas às partes micáceas. O grau de fraturamento apresentado por estas rochas é mediano, normalmente sem preenchimento. O contato destas rochas com as metamarga é gradacional.

- Diabásio - Db

Tratam-se de rochas maciças, raras vezes amigdaloidais, de coloração preta a cinza escuro. Quanto ao grau de cristalização, apresentam-se hipocristalinas a hipovítreas, normalmente afaníticas nas regiões de contato a halocristalinas nas partes centrais das intrusões, apresentando, neste caso, granulação média. O diabásio é composto por plagioclásio, piroxênio, e magnetita. Nos termos amigdaloidais, as vesículas acham-se preenchidas por clorita ou calcita branca. Presença de pirita é comum. O grau de fraturamento é mediano, preenchido ou não por calcita branca e/ou clorita.

Normalmente as intrusões de diabásio provocam metamorfismo de contato em suas encaixantes carbonáticas, com a perda, por parte destas, de matéria orgânica com a consequente mudança de coloração para cinza esbranquiçado. Ocorre ainda o aumento da granulação, provocada pela recristalização dos calcários, na região de contato.

- Granito

São rochas de estrutura porfiróide, com megacristais de microclina, com coloração levemente avermelhada e com tamanho que chegam até 5mm, em meio a uma matriz acizentada de granulação média. A textura é inequigranular. Os granitos são compostos essencialmente por megacristais de microclina, quartzo, oligoclásio e grande quantidade de biotita. O grau de fraturamento é mediano, às vezes preenchido por calcita branca. Em termos gerais, nos níveis em que foram feitas as sondagens, este granito apresenta-se moderadamente alterado a decomposto.

2.7 ANÁLISE ESTRUTURAL

O entendimento do arcabouço estrutural e da posição espacial das camadas que contêm os principais corpos de minérios na mina Saivá, bem como suas direções e mergulhos, foram considerados de fundamental importância para a análise geoestatística e conseqüente estimação espacial de teores e volumes. Considerando que, ao contrário das técnicas geométricas e as de ponderação de distâncias, a determinação da variação espacial do fenômeno estudado tem uma relevância ainda maior, pois cada observação não é descrita apenas pelo seu valor, mas também por informações de sua posição, expressa por um sistema de coordenadas.

Dessa forma procurou-se fazer uma revisão detalhada dos relatórios que continham informações acerca dos aspectos estruturais da mina Saivá, visando correlacionar as principais atitudes com as descrições de afloramentos. Seguindo esta linha de raciocínio, realizou-se a análise descritiva das estruturas tectônicas, tais como sua posição espacial, forma (geometria), a relação entre os elementos estruturais, além de procurar entender quais os tipos de movimentos e de esforços atuantes envolvidos na deformação destas rochas e compartimentação dos corpos de minério.

Os dados utilizados nesta análise são provenientes do somatório das etapas de campo realizadas, bem como de uma campanha prévia executada pela empresa (Fiori, 1996), que tinha como principal meta o estudo e caracterização das principais juntas, dobras e planos de foliações.

Visto que o objetivo deste trabalho é analisar o conjunto de estruturas observadas na área da mina, a discussão será feita apenas baseada naqueles estereogramas onde foram somadas todas as medidas estruturais,

A seguir (Figuras - 7; 8 e 9), pode-se verificar os estereogramas compostos pela somatória de todos os dados, para fraturas (diagrama de rosetas, contornos e pólos).

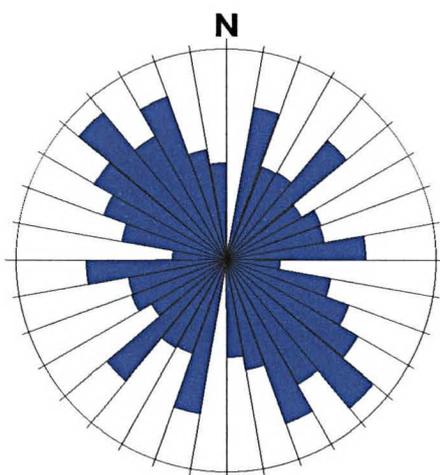


Fig. - 7: Estereograma de fratura (roseta) para todas as atitudes.

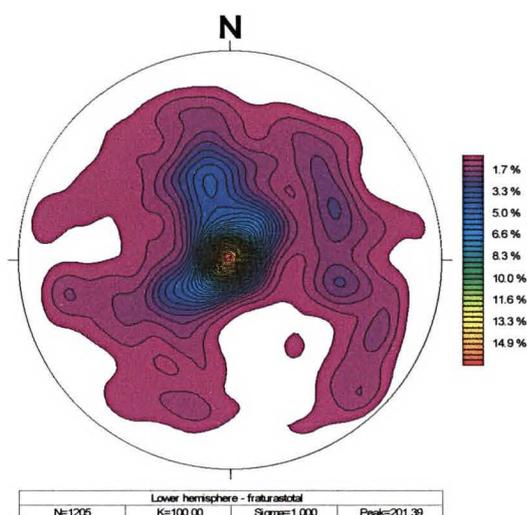


Fig. - 8: Estereograma de contorno dos vetores de mergulho para os pontos (fraturas) no hemisfério inferior.

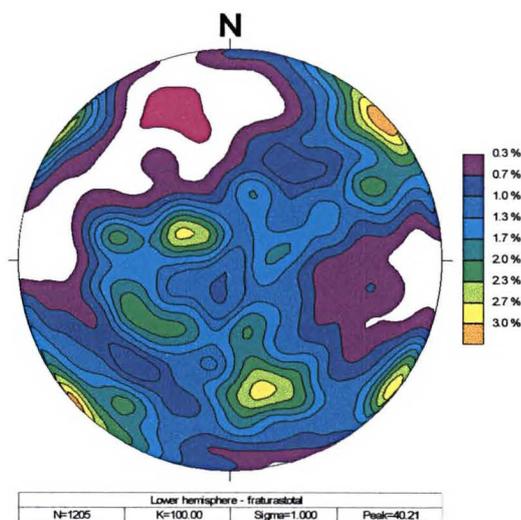


Fig. – 9: Estereograma dos pólos das fraturas.

A análise destes estereogramas de fraturas, permite notar que:

a) Há duas concentrações marcantes, com direção tanto para NE como para NW e mergulhos acentuados, em torno de 75° ou superiores, que poderiam estar relacionadas à juntas transversais geradas por dobramentos regionais (Fig. - 6), muito provavelmente sobrepostas por um evento posterior, relacionado ao Arqueamento de Ponta Grossa, cujas juntas comumente são preenchidas por rochas intrusivas (diques), como pode ser verificado em campo e através de sondagens, pois os diques de diabásio que cortam as litologias descritas na mina, apresentam orientação média de N40-50W, com mergulhos próximos da vertical.

b) Uma dispersão marcante de juntas, com direções tanto NW quanto para NE, com mergulhos que variam da vertical até $35-30^\circ$, que supomos serem juntas diagonais.

É importante enfatizar que esta dispersão é o somatório destas juntas com as anteriormente descritas, sugerindo que há uma superposição de eventos responsáveis pela deformação estrutural observada na mina Saivá.

Em descrição de campo, geralmente estas juntas não são preenchidas, sendo descritas como “juntas rocha-rocha”, embora eventualmente encontre-se estas juntas preenchidas por calcita, apresentando um padrão regular de espaçamento.

O estereograma abaixo (Fig - 10), simplifica a dispersão das atitudes apresentadas para estas juntas, onde se pode visualizar os planos médios interpretados.

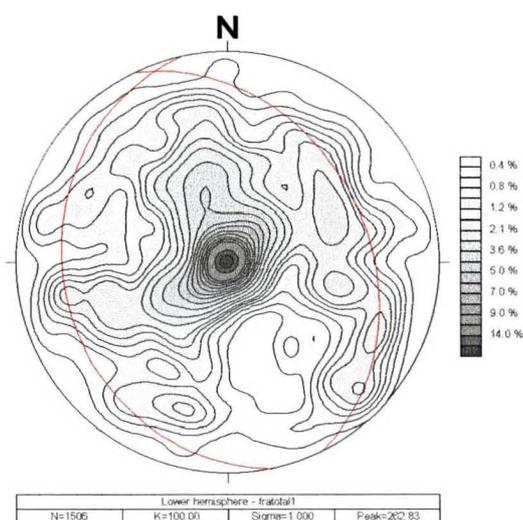


Fig. - 10: Estereograma com os planos médios interpretados, mostrando a dispersão das atitudes das juntas.

c) Evidencia a dispersão de duas concentrações, com atitudes para NE e NW com mergulhos para SE e SW, respectivamente, e que podem estar ainda associadas as dobras regionais, as quais poderiam ser interpretadas como sendo juntas sub-paralelas a foliação, embora estes tipos de juntas sejam consideradas raras.

Outra hipótese considerada como a responsável pela geração destas juntas, seria a Falha da Lancinha, muito embora tal interpretação gere diversos questionamentos, pois

nem sempre as juntas estão associadas às principais estruturas geradas em um sistema de transcorrência, tais como as falhas sintéticas, antitéticas, normais, etc., e sim, podem estar associadas a estruturas secundárias.

Outro fato importante a se considerar no estudo destas estruturas, é que sabe-se que há pelo menos três grandes eventos tectônicos que afetaram o Grupo Açungui, de maneira que a superimposição destes eventos se torna um fator complicador no entendimento de qual o principal evento gerador destas estruturas.

De todo modo, procurou-se fazer uma análise muito mais descritiva destes sistemas de fraturamentos, identificando as juntas, veios, fraturas abertas ou preenchidas, etc., com o objetivo de verificar se estas estruturas controlavam a distribuição espacial dos teores.

As fraturas NW, preenchidas por diques de diabásio, localmente geram um metamorfismo de contato nas encaixantes carbonáticas, as demais estruturas são de pequeno porte e não chegam a ser uma condicionante importante na distribuição dos teores, que a princípio está relacionada muito mais diretamente aos eventos de deposição (sedimentar).

A figura seguinte (Fig. - 11), mostra o estereograma composto pela somatória de todos os dados para a foliação S1.

Descritivamente esta foliação é penetrativa, paralela a subparalela ao acamamento sedimentar.

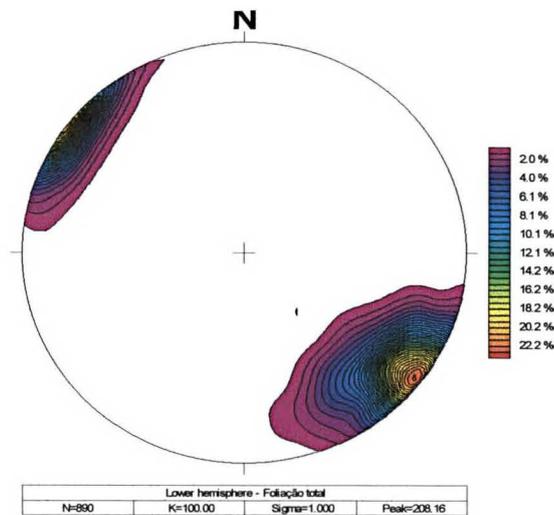


Fig. - 11: Estereograma composto pela somatória de todos os dados, para foliação S_1 (diagramas de contorno para polos)

- estereograma geral para foliação S_1 , mostra atitudes predominantes para a direção NE-SW, com alto ângulo de mergulho e que não evidenciam dobramentos, visto que regionalmente a mina Saivá localiza-se apenas no flanco de uma dobra regional (Sinforme Rio Abaixo), que pode ser visualizada no estereograma abaixo (Fig. - 12).

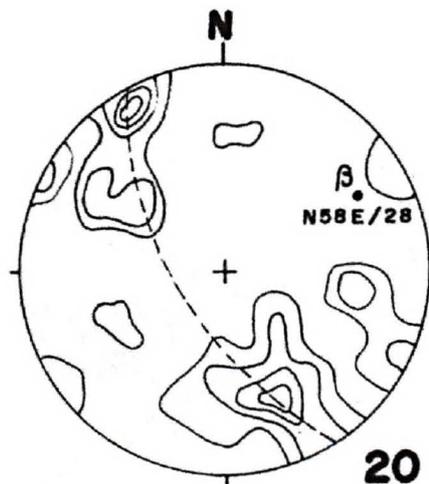


Fig. - 12: Estereograma regional, da Sinforme do Rio abaixo (Fonte: Fiori, 1992)

A Sinforme do Rio Abaixo (Fig. - 6) foi descrita inicialmente por Shöll (1981), à qual atribuiu a denominação de Sinclinório Rio Abaixo.

A figura 13 procura mostrar uma seção esquemática desta sinforme nas proximidades da mina Saivá.

Segundo Fiori (1990), esta estrutura apresenta traço axial irregular, com direção geral em torno de N50E, sendo facilmente reconhecida pela forma característica do mármore do Saivá, uma lente em forma de crescente com terminação voltada para o sudoeste.

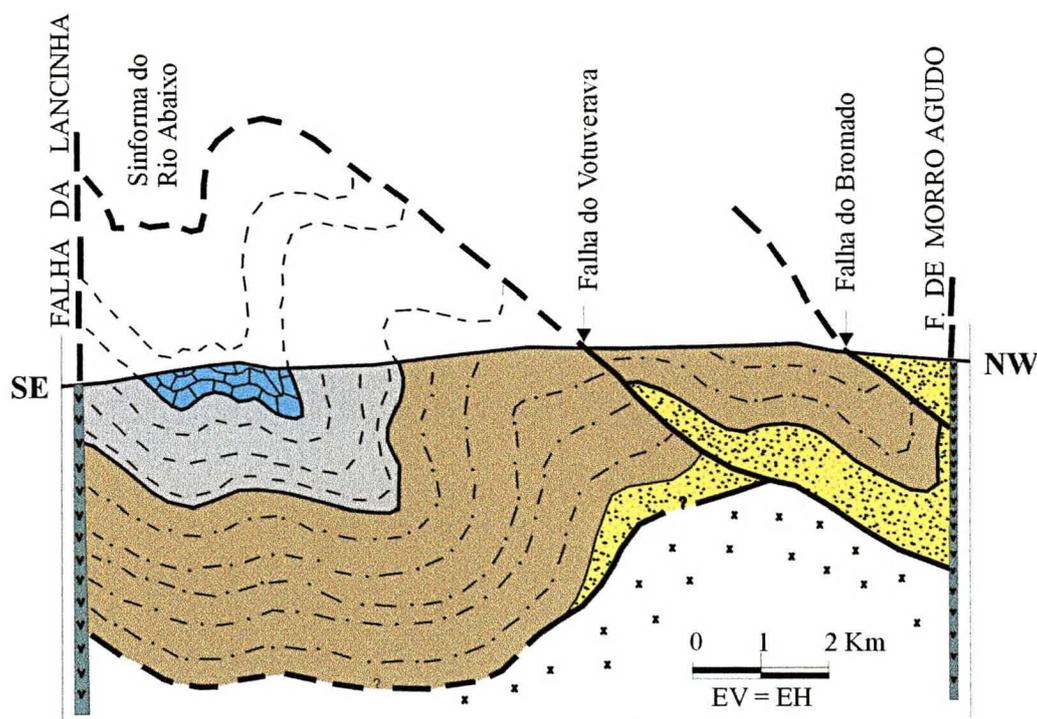


Fig - 13: Seção geológica esquemática de uma porção da Sinforme do Rio Abaixo nas proximidades da mina Saivá.

CAPÍTULO 3

3.1 - CONSIDERAÇÕES E PREPARAÇÃO DO BANCO DE DADOS

A pesquisa da jazida apresenta resultados de teores em óxidos, provenientes da análise química de testemunhos de sondagens. A posição espacial destas amostras é conhecida dentro do corpo de minério, pois está amarrada ao sistema de coordenadas UTM, de maneira que cada testemunho de sondagem analisado tem suas coordenadas x, y e z, sendo esta última a cota altimétrica correspondente ao topo e à base de cada amostra. Este é um fato bastante relevante na amostragem, pois foi feito de maneira sistemática, conservando assim as propriedades do material analisado.

Esta amostragem ao longo dos furos de sondagens, embora seja relativamente densa para depósitos de calcários, apresenta uma forte heterogeneidade, que pode ser vista como um problema evidente para a aplicação das técnicas geoestatísticas. Ao longo do furo de sondagem a amostragem é contínua (1 em 1 metro), já ao longo dos perfis há uma densidade muito baixa na amostragem, que varia aproximadamente de 50 a 100 metros, dependendo da direção estudada.

Cabe ressaltar que a amostragem realizada ao longo da sondagem, de um em um metro, é o resultado da análise química do testemunho de sondagem referente a esta medida, cujo valor de referência para suas coordenadas é o ponto médio do testemunho para este intervalo. Ou seja, para exemplificar podemos dizer que se uma amostragem foi

iniciada em 80m e finalizada em 81m, o valor para os óxidos analisados, bem como as coordenadas x, y, e z, são referentes a 80,5m.

Os resultados destas análises foram armazenados em um banco de dados na forma de planilhas (Asc.II, Excell, etc.), a partir das quais foram feitas todos os estudos que integram este trabalho. A estrutura deste banco de dados, seus principais campos, bem como o significado de cada campo estão resumidos na tabela 1.

BHID	X	Y	Z	LENGTH	A0	B0	FROM	TO	SiO2	Al2O3	FE2O3	CAO	MGO	K2O	PF	FSC	LITO	REGI
Nº do furo	Coordenada x (Sistema de coordenadas)	Coordenada y (Sistema de coordenadas)	Coordenada z (Cotas altimétricas)	Comprimento da amostra	Azimute inicial do furo de sondagem	Ângulo inicial do furo de sondagem	Início do intervalo amostrado	Fim do intervalo amostrado	Oxido de sílica	Oxido de alumínio	Oxido de ferro	Oxido de cálcio	Oxido de magnésio	Oxido de potássio	Ponto de fusão	Fator de saturação do cálcio	Litologia (codificada em números)	Regionalização (divisão do principais corpos de minérios em compartimentos)

Tabela 1: Estrutura e significado dos campos do banco de dados.

A compreensão e todas as operações realizadas com este banco de dados, bem como suas relações com o contexto geológico da área, visando a obtenção de um modelo geoestatístico referente a mina Saivá, estão representadas no fluxograma da figura 14.

Inicialmente foi feita uma revisão bibliográfica acerca do depósito. Nesta revisão foram analisados diversos mapas geológicos, tanto de superfície quanto por níveis, além da análise detalhada das seções geológicas e dos relatórios disponíveis na empresa. É importante salientar que, assim como esta etapa, muitas outras fases deste trabalho não se tratam de um procedimento estanque, ou seja, é necessária uma contínua revisão dos passos

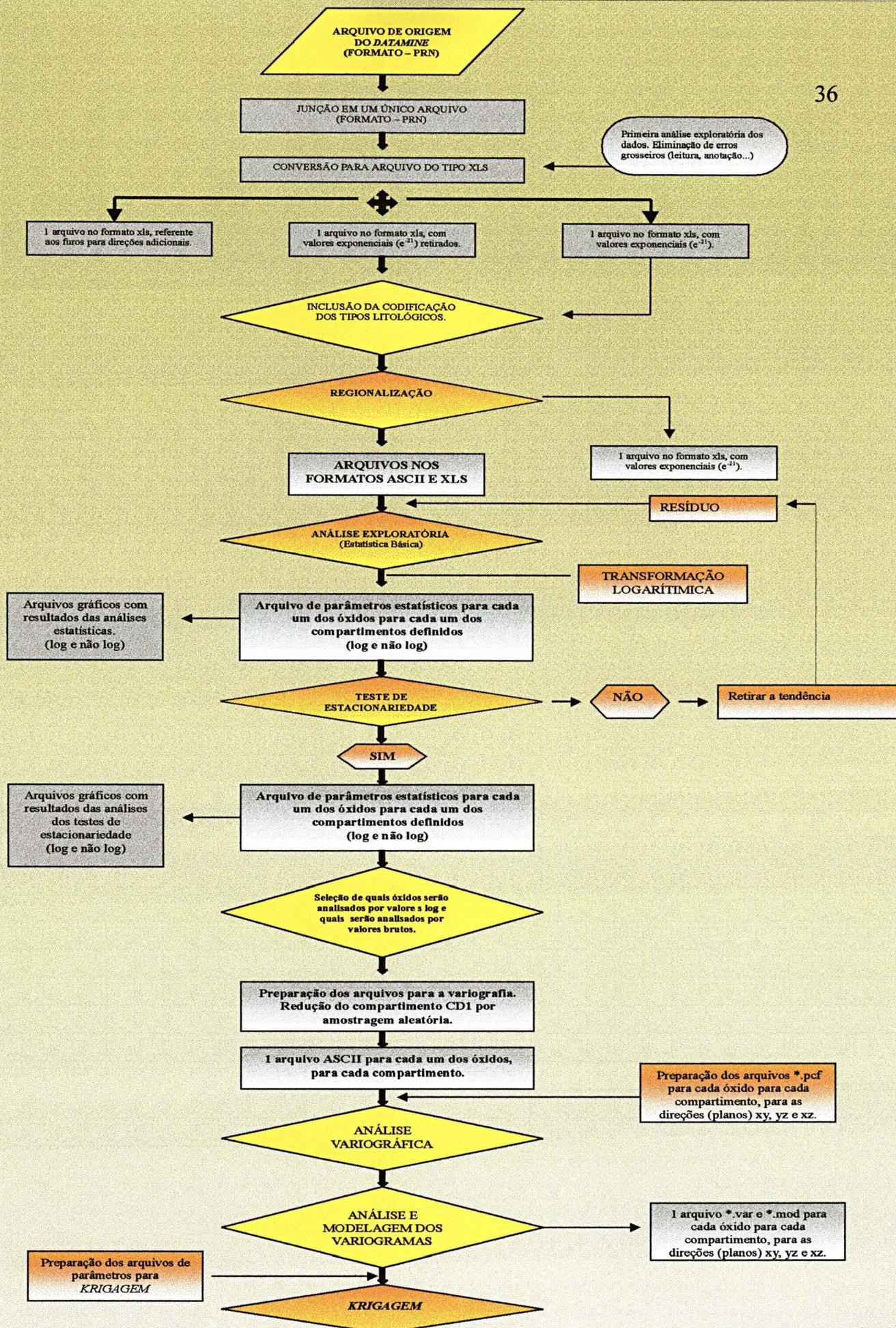


Fig. -14: Fluxograma das principais etapas desenvolvidas para a obtenção de um modelo geoestatístico da Mina Saivá.

tomados, muitas vezes refazendo a análise e comparando seus resultados, antes de qualquer decisão definitiva.

Posteriormente foi feita uma subdivisão do banco de dados, que contém os resultados das análises químicas para os diferentes óxidos estudados, em 3 arquivos distintos. Tal subdivisão foi realizada na própria empresa, com o auxílio do *software Datamine* e o principal objetivo desta subdivisão foi diminuir o tamanho do arquivo, de maneira que fosse possível fazer cópias em disquetes para posterior análise na UFPR, visto que seria necessário a utilização de outros *softwares*.

O passo seguinte consistiu em unir estes arquivos em um só, a partir do qual foi feita uma conversão para o formato *xls*, visto que o formato original do arquivo exportado pelo *Datamine* era *prn*. Durante este passo, foram retirados dos arquivos originais o cabeçalho e os campos não amostrados, pois para estes campos o programa cria, automaticamente, um valor exponencial (e^{-21}), referente a ausência de amostragem, os quais, nas análises subsequentes geram diversos problemas. O objetivo principal desta transformação era, além de fazer uma análise inicial dos dados, dispor de um arquivo em um formato bastante versátil, de maneira que permitisse ser lido por diversos *softwares*, principalmente o *Statistica*® e *GSLIB*, usados intensamente na análise exploratória dos dados.

3.2 - DISTRIBUIÇÃO AMOSTRAL

Um elemento relevante nesse estudo é a dependência do atributo de qualidade em relação à locação dos pontos no espaço. O conhecimento da distribuição espacial dos pontos possibilita a inferência a respeito das possíveis relações de uma amostra locada em um determinado ponto x com as amostras que a circundam. Ferramentas muito utilizadas

para observar a relação entre amostras, são os mapas de locação das amostras e mapas de contorno e superfície. Eles proporcionam a visualização de pontos discrepantes (plotados de maneira incorreta, por erros de digitação), ou mesmo revelam certas tendências a partir dos dados em determinada área.

O modo como os dados estão distribuídos e suas características de localização têm importância fundamental no estudo do comportamento dos fenômenos a serem estudados. Uma amostragem tendenciosa, privilegiando determinadas áreas dentro da jazida, ou mesmo alongamento da malha amostral em uma determinada direção podem inserir falsa impressão a respeito do comportamento do corpo mineral.

A figura 15 mostra a distribuição espacial das furos de sondagens na área da mina Saivá.

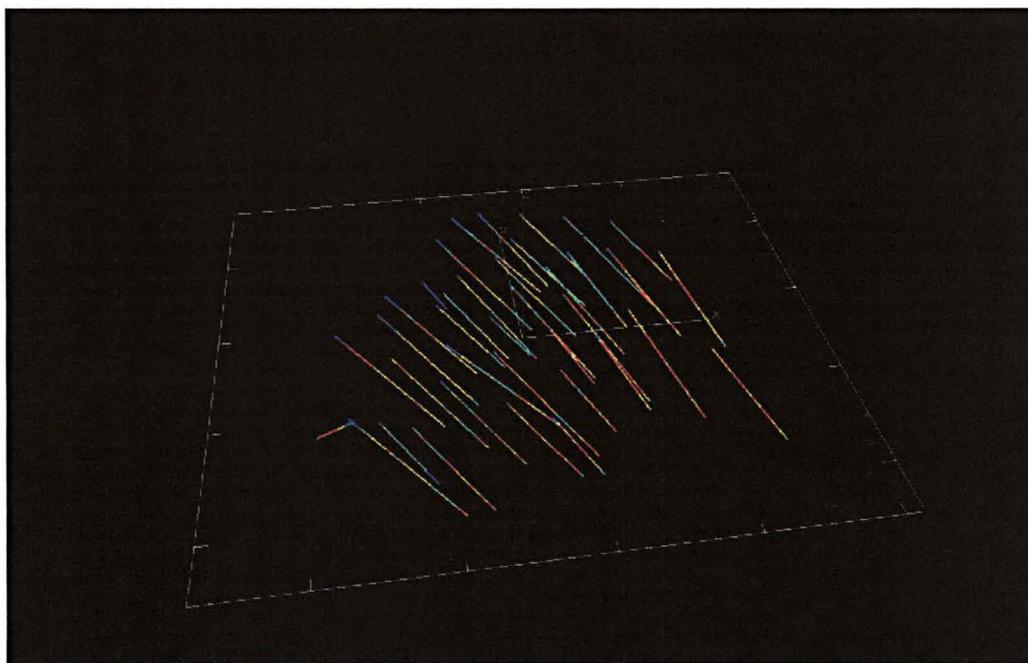


Fig - 15: Distribuição espacial dos furos de sondagens na área da mina Saiva. Pode-se notar também a variação dos óxidos no depósito, representadas pelas diferenças de cores.

3.3 - CODIFICAÇÃO DOS TIPOS LITÓLOGICOS

Após as conversões, procurou-se fazer uma varredura preliminar do banco de dados, visando eliminar possíveis erros grosseiros, tais como erros de anotação, leitura ou mesmo erros gerados nas modificações realizadas. Durante este passo, foi feita a inclusão de um campo, codificado por números, referente à classificação dos tipos de calcários aflorantes na área em questão.

Como já referido, esta caracterização para as rochas carbonáticas que afloram no bloco Saivá é baseada na classificação proposta por Bigarella e Salamuni (1956), e a nomenclatura para os principais corpos de minério é uma subdivisão feita em função da variação dos teores de magnésio e de sílica.

Desta forma a tabela 2 abaixo resume as principais litologias constituintes do bloco, seu significado, bem como os teores de SiO₂ e MgO correspondentes, obtidos através de análises químicas.

NOMENCLATURA	LITOLOGIA	VARIAÇÃO NO TEOR DE MGO	VARIAÇÃO NO TEOR DE SIO2
CAL DOL SP	Calcário dolomítico semi puro	MgO entre 4% e 10%	SiO ₂ < 10,0%
CAL DOL I	Calcário dolomítico impuro	MgO entre 4% e 10%	SiO ₂ > 10,0%
CAL MAG SP	Calcário magnesiano semi puro	MgO < 4,0%	SiO ₂ < 10,0%
CAL MAG I	Calcário magnesiano impuro	MgO < 4,0%	SiO ₂ > 10,0%
DOL CAL SP	Dolomito calcário semi puro	MgO > 10,0%	SiO ₂ < 10,0%
DOL CAL I	Dolomito calcário impuro	MgO > 10,0%	SiO ₂ > 10,0%
DB	Diabásio		
MTM	Metamarga	P.F. < 30%	SiO ₂ > 10,0
MTS+FILITO	Metassiltito e Filito		

Tabela - 2: Principais litologias constituintes do depósito de Saivá, seus significados e os teores de SiO₂ e MgO correspondentes.

3.4 - REGIONALIZAÇÃO

A definição de um modelo geológico e numérico robusto para um depósito mineral traduz-se em uma ferramenta poderosa para análise da qualidade do material *in situ* e no cálculo de tonelagens com respectivos teores a movimentar.

O conhecimento das reservas, bem como do material presente em um painel de avanço projetado, permitem uma avaliação e planejamento coerente a partir de valores estimados, sua variabilidade e até mesmo a incerteza associada a esses utilizando técnicas geoestatísticas. (Matheron, 1971, David, 1977, Journel & Huijbregts, 1978)

Com base na classificação dos tipos litológicos aflorantes, anteriormente descritos, foi feita uma subdivisão em grandes compartimentos litológicos, com características químicas e físicas semelhantes, referentes aos principais tipos de minérios constituintes da mina Saivá.

Os limites entre os diferentes minérios já haviam sido definidos anteriormente, como pode ser verificado em Soares (1985). Naquele trabalho os limites foram definidos com base na variação dos teores, tendo sido discriminados 6 corpos de minério na jazida, sendo três de calcário dolomítico semi-puro (CD1, CD2, e CD3) e três de calcário magnesiano (CM1, CM2, e CM3).

No presente trabalho, o critério para subdivisão dos principais corpos de minério foi mantido, embora o número de compartimentos tenha sido parcialmente modificado, pois não se verificou a existência de variações marcantes nos teores, ou variações significativas nos litotipos, que justificassem a criação dos compartimentos CD2 e CM3.

Desta forma, a nomenclatura utilizada foi mantida, excluindo-se os compartimentos citados e incluindo-se o compartimento CD4, visto que, além de representar uma variação

nos teores, esta sub-área é um corpo litológico distinto, definido em mapa geológico e relatório interno da empresa (Gomes, 1989). Além deste último compartimento, ainda foram criados mais dois, que são os corpos predominantemente dolomíticos (DOL) e os corpos de metamarga (MTM), que embora não sejam considerados pela empresa como minério, foram separados em arquivos distintos.

Assim como a inclusão dos demais compartimentos, toda a análise exploratória (estatística básica) já foi realizada, de maneira que, se porventura a empresa alterar o valor do teor de corte, estes compartimentos podem ser facilmente analisados pelas técnicas geoestatísticas em um futuro trabalho.

Outro fato que motivou a análise destes compartimentos era a preocupação de que a subdivisão realizada para a regionalização fosse coerente com as variações geológicas apresentadas pelo depósito. Para tanto foram analisados diversos histogramas a fim de garantir que, tanto estes compartimentos quanto os que contêm os corpos de minério propriamente ditos, não apresentassem mais de uma população, ou seja, que fossem constituídos de litotipos distintos, evitando assim comprometer as análises geoestatísticas subsequentes.

Esta subdivisão em compartimentos permitiu verificar a condição de estacionariedade dos teores, ou seja, a distribuição estatística das diferenças das realizações entre amostras pontuais que, deve seguir a mesma lei de distribuição em toda a área estudada, ou dentro de subáreas. Esta distribuição depende da distância e da orientação dos pares de amostras.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE EXPLORATÓRIA

4.1 - ANÁLISE ESTATÍSTICA (ESTATÍSTICA DESCRITIVA)

Assim como outras etapas deste trabalho, a análise descritiva ou a exploração dos dados permearam todas as demais fases, de maneira que não foram utilizadas apenas como preparação para a análise geoestatística propriamente dita, sendo, muitas vezes necessário retornar a esta etapa e refazer, parcial ou totalmente os processos estatísticos

O objetivo da análise estatística é a identificação inicial do comportamento dos dados, com o intuito de auxiliar na decisão das hipóteses e orientar a escolha dos métodos a serem desenvolvidos. Nesta fase foram estimados diversos parâmetros estatísticos descritivos, como por exemplo a média, a mediana, o desvio padrão, etc., permitindo uma primeira visão dos aspectos gerais, além da identificação sobre a forma de distribuição, número de populações e indicação de dados atípicos (*outliers*), que devem ser analisados de forma cuidadosa.

Cabe salientar que nos casos de identificação de dados atípicos, deve-se levar em consideração a sua localização, pois quando ocorrem de forma concentrada, podem indicar sub-regiões com comportamento diferenciado do restante da área, por outro lado, quando ocorrem de maneira dispersa, podem indicar que o fenômeno tem alta variabilidade, ou que houve erro de anotação ou leitura da variável estudada.

Este tipo de análise, portanto, foi o ponto de partida na manipulação dos dados, sendo dividida em duas etapas:

- 1) **descrição geral**, que não considera a posição espacial das amostras.

- 2) **Descrição espacial**, considera, ainda que muitas vezes relacionada a uma única coordenada, a posição das amostras.

4.2 - ANÁLISE DESCRITIVA GERAL

Iniciou-se a análise descritiva com o cálculo dos valores de estatísticas que resumem o comportamento dos dados. Esta análise foi feita tanto para o conjunto total de amostras como para cada um dos compartimentos geológicos estabelecidos.

O resumo das principais análises realizadas pode ser visto nas tabelas 3 à 8, a seguir:

ÓXIDO	MÉDIA	MEDIANA	MÍNIMO	MÁXIMO	VARIÂNCIA	DESVIO PADRÃO
SiO ₂	10,38188	7,210000	0,900000	62,05000	74,69099	8,642395
Al ₂ O ₃	1,497800	0,790000	0,040000	15,73000	3,728121	1,930834
Fe ₂ O ₃	0,819875	0,520000	,120000	16,95000	1,349658	1,161748
CaO	41,74668	44,20000	1,100000	58,20000	60,77980	7,796140
MgO	6,146619	5,640000	0,250000	19,15000	7,046121	2,654453
K ₂ O	0,421752	0,240000	0,010000	6,260000	0,245893	0,495876

Tabela - 3: Resultados da análise descritiva para todo o conjunto numérico do banco de dados.

ÓXIDO	MÉDIA	MEDIANA	MÍNIMO	MÁXIMO	VARIÂNCIA	DESVIO PADRÃO
SiO ₂	7,007325	5,930000	0,900000	39,57000	13,96225	3,736610
Al ₂ O ₃	0,882012	0,620000	0,040000	8,740000	0,645963	0,803718
Fe ₂ O ₃	0,510941	0,440000	0,170000	4,570000	0,068004	0,260775
CaO	44,73067	45,40000	10,10000	57,40000	11,99572	3,463484
MgO	5,469643	5,410000	0,250000	12,70000	1,343618	1,159146
K ₂ O	0,259930	0,180000	0,010000	2,350000	0,048550	0,220341

Tabela - 4: Resultados da análise estatística descritiva o conjunto numérico do compartimento CD1.

ÓXIDO	MÉDIA	MEDIANA	MÍNIMO	MÁXIMO	VARIÂNCIA	DESVIO PADRÃO
SiO ₂	10,22896	8,755000	3,400000	43,47000	27,42155	5,236559
Al ₂ O ₃	1,306876	0,880000	0,070000	9,330000	1,202901	1,096768
Fe ₂ O ₃	0,698082	0,590000	0,250000	11,30000	0,215937	0,464691
CaO	39,90662	41,09500	2,400000	51,00000	23,88230	4,886952
MgO	7,967748	7,940000	1,230000	14,44000	3,607337	1,899299
K ₂ O	0,398533	0,290000	0,010000	2,430000	0,091936	0,303209

Tabela - 5: Resultados da análise estatística descritiva o conjunto numérico do compartimento CD3.

ÓXIDO	MÉDIA	MEDIANA	MÍNIMO	MÁXIMO	VARIÂNCIA	DESVIO PADRÃO
SiO ₂	12,17203	11,14000	5,300000	31,29000	23,98968	4,897927
Al ₂ O ₃	1,338261	0,910000	0,210000	6,530000	1,571038	1,253411
Fe ₂ O ₃	0,842174	0,710000	0,360000	3,260000	0,255147	0,505120
CaO	42,31884	43,20000	26,70000	49,50000	21,32655	4,618068
MgO	5,827971	5,420000	3,700000	11,05000	2,487163	1,577074
K ₂ O	0,415217	0,250000	0,140000	2,070000	0,140528	0,374871

Tabela - 6: Resultados da análise estatística descritiva para o conjunto numérico do compartimento CD4.

ÓXIDO	MÉDIA	MEDIANA	MÍNIMO	MÁXIMO	VARIÂNCIA	DESVIO PADRÃO
SiO ₂	6,622786	5,400000	3,200000	51,40000	21,40927	4,627015
Al ₂ O ₃	887711	0,620000	0,110000	6,250000	0,712481	0,844086
Fe ₂ O ₃	0,445920	0,380000	0,260000	1,640000	0,041442	0,203574
CaO	46,53333	47,50000	29,00000	49,90000	9,794833	3,129670
MgO	3,939353	3,810000	2,670000	8,210000	0,508102	0,712813
K ₂ O	0,223781	0,140000	0,050000	1,290000	0,036896	0,192082

Tabela - 7: Resultados da análise estatística descritiva para o conjunto numérico do compartimento CM1.

ÓXIDO	MÉDIA	MEDIANA	MÍNIMO	MÁXIMO	VARIÂNCIA	DESVIO PADRÃO
SiO ₂	7,038371	5,620000	1,800000	37,68000	20,79284	4,559917
Al ₂ O ₃	1,036838	0,720000	0,040000	8,410000	1,090478	1,044259
Fe ₂ O ₃	0,524259	0,400000	0,120000	3,380000	0,129917	0,360441
CaO	47,13108	48,17000	21,90000	58,20000	13,79310	3,713906
MgO	3,369748	3,280000	0,880000	9,390000	0,890644	0,943739
K ₂ O	0,300951	0,180000	0,050000	2,220000	0,093109	0,305138

Tabela - 8: Resultados da análise estatística descritiva para o conjunto numérico do compartimento CM2.

De modo geral pode-se notar que os dados possuem um comportamento de uma distribuição assimétrica, conforme pode ser notado na figura 16, que mostra que um mesmo óxido, seja ele analisado por um compartimento específico (a) ou mesmo no conjunto total de amostras para todo o depósito (b), apresenta distribuição assimétrica.

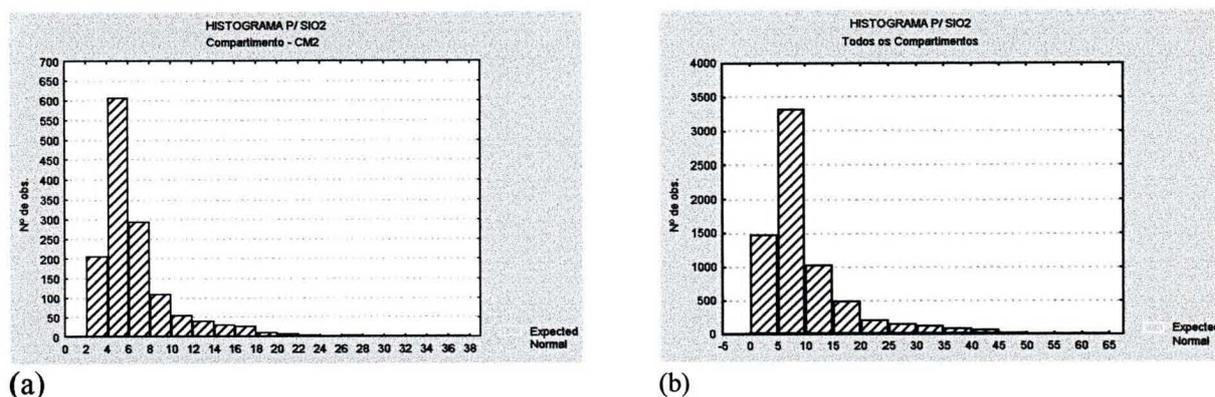


Fig. - 16: Comparação entre histogramas feitos para o óxido de Si, mostrando claramente que tanto um compartimento isolado (a), como o conjunto total dos dados (b) apresentam uma distribuição fortemente assimétrica

Muitos fenômenos naturais geram variáveis que possuem distribuições fortemente assimétricas, como por exemplo teores de minerais (Clark, 1979; Journel & Huijbregts, 1978) e níveis de poluentes (Journel, 1988). Em situações deste tipo a distribuição lognormal tem sido utilizada.

Embora a análise geoestatística de um determinado atributo requeira condições matemáticas restritivas, entre as quais inclui-se não trabalhar com dados que apresentem forte distribuição assimétrica, Isaaks & Srivastava (1989), sugerem uma alternativa para este tipo de problema, baseada na verificação conjunta do coeficiente de variação e do tipo de distribuição dos dados e seus parâmetros estatísticos.

O coeficiente de variação (CV) é um parâmetro estatístico sempre usado como uma alternativa para descrever a forma de uma distribuição assimétrica. É usado principalmente para distribuições cujos valores são todos positivos e onde a assimetria também é positiva. Embora também possa ser calculado para outros tipos de distribuições. É intensamente utilizado como um indexador para distribuições que apresentam uma forma questionável (Isaaks & Srivastava, 1989).

O CV é definido como a divisão do desvio padrão (σ) pela média (m):

$$CV = \frac{\sigma}{m} \quad (1)$$

Segundo os autores citados acima, uma distribuição que apresente valores do CV maiores que um indicam a presença de alguns dados altamente erráticos, que podem ter um impacto significativo na estimativa final.

Caso contrário, ou seja, quando os valores de CV são inferiores a um, é possível trabalhar com o conjunto de dados originais, mesmo que apresentem distribuições assimétricas, pois significa não utilizar técnicas mais complexas (*Log-normal Kriging* ou outras) que, em função de necessitarem diversas transformações e de possuírem algoritmos mais complexos podem gerar erros não esperados.

Entretanto, a fim de não fazer uma análise descritiva tendenciosa, procurou-se, além da obtenção do *CV* (Tabela - 9), verificar exhaustivamente os tipos de distribuições, utilizando principalmente os histogramas.

ÓXIDO	Total	CD1	CD3	CD4	CM1	CM2
SiO ₂	0.83	0.53	0.51	0.40	0.69	0.64
Al ₂ O ₃	1.28	0.91	0.84	0.93	0.95	1.00
Fe ₂ O ₃	1.41	0.51	0.66	0.59	0.45	0.68
CaO	0.18	0.07	0.12	0.10	0.06	0.07
MgO	0.43	0.21	0.24	0.27	0.18	0.28
K ₂ O	1.17	0.84	0.76	0.90	0.85	1.01

Tabela 9: Resultados do CV (coeficiente de variação) para todos os compartimentos.

Desta forma, muitas das distribuições assimétricas encontradas, que como já foi dito anteriormente, são muito comuns para dados geológicos, foram transformadas em *log* (Fig. - 17), com o intuito de verificar qual o tipo exato de distribuição, número de populações e parâmetros estatísticos básicos.

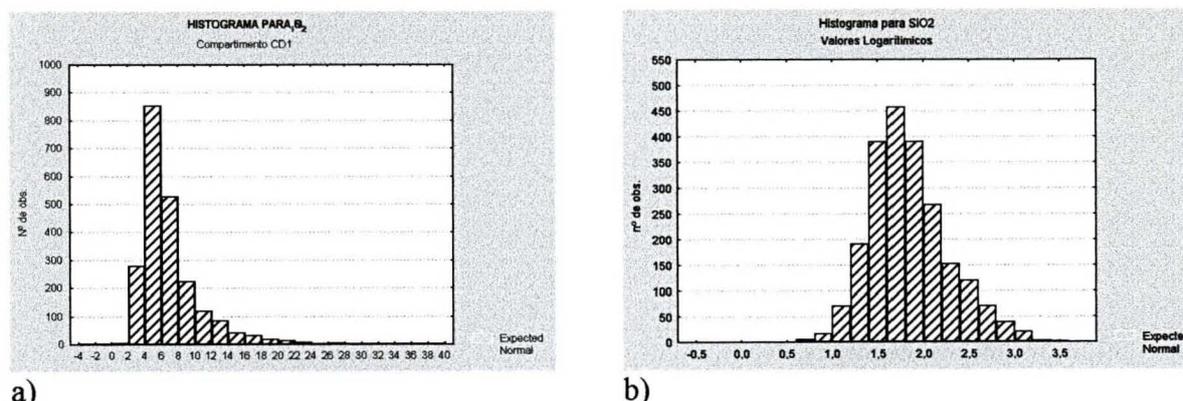


Fig. - 17: Histogramas para SiO₂ para o compartimento CD1, (a) valores brutos e (b) com valores logarítmicos, exemplificando uma suavização da distribuição dos dados brutos.

As exceções ficaram por conta dos óxidos de CaO e MgO, que no geral possuem um comportamento muito próximo de uma distribuição normal, como pode ser verificado na figura 18, que mostra o comportamento do óxido de CaO para o compartimento CM2 e na figura 19, que mostra o comportamento do MgO para o compartimento CD1.

Estas observações, através de gráficos histogramas, foram feitas tanto para cada uma dos compartimentos estabelecidos como para o conjunto total de amostras de um mesmo óxido, procurando sempre verificar o tipo de distribuição: assimétrica à esquerda ou à direita; normal, log-

normal ou triparamétrica, além, evidentemente, da verificação do número de populações apresentado por cada compartimento.

O total de gráficos histogramas realizados nesta etapa foi de 72, referente a todos os compartimentos estabelecidos, para todos os óxidos analisados (*log* e não *log*).

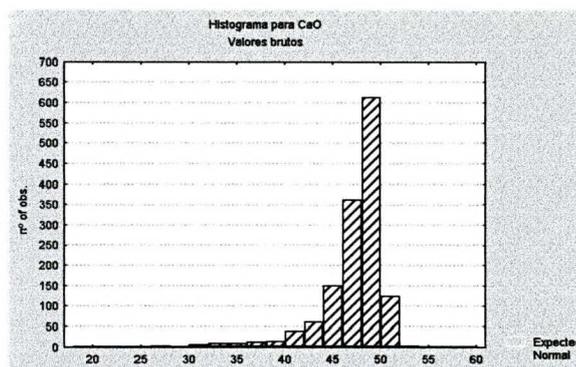


Fig. - 18: Histograma para CaO, para o compartimento CM2 com valores brutos.

Cabe ressaltar que o óxido de Ca, como pode ser visto acima, quase sempre mostra uma distribuição levemente assimétrica, conhecida também por “normal truncada”. Esta característica não deve ser interpretada como uma distribuição assimétrica típica, pois deve-se ao fato de que a percentagem total de CaO, assim como outros óxidos em uma rocha, jamais chega perto dos 100%, girando em torno 60 a 70%, de forma que analiticamente se padroniza estes valores como sendo 100%.

A verificação de tal característica deve ser feita analisando-se cuidadosamente os resultados da média, mediana, valor mínimo e máximo, entre outros, afim de verificar exatamente se é o caso de uma distribuição assimétrica ou não.

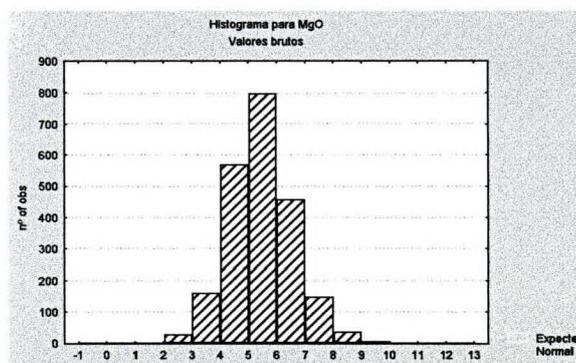


Fig. - 19: Histograma para MgO, para o compartimento CD1 com valores brutos.

Pequenas variações nos tipos de distribuição foram identificadas nesta análise, tal como no compartimento CD4, onde verificou-se, através da análise dos histogramas, que os óxidos de Fe, Ca e Mg (Fig. - 20) sugerem a presença de mais de uma população.

Isaaks & Srivastava (1989) alertam para o fato de que "picos" nos histogramas, não necessariamente indicam múltiplas populações, eles podem apenas representar mudanças nas características das frequências acumuladas para diferentes intervalos.

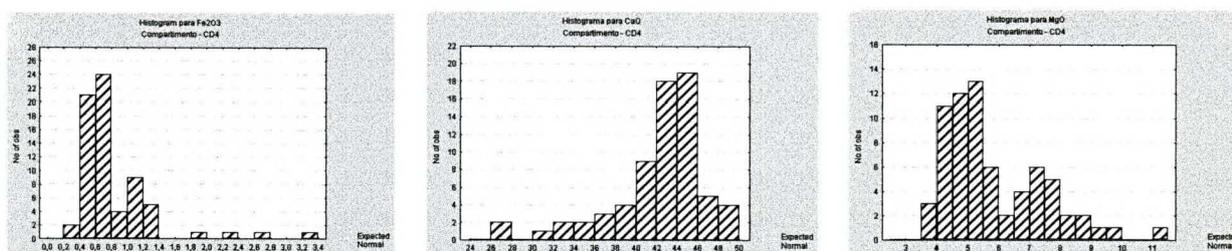


Fig. - 20 : Histogramas para os óxidos de Fe, Ca e Mg, para o compartimento CD4, mostrando a ocorrência de mais de uma população na distribuição dos dados.

Sabe-se que neste tipo de situação, o correto é identificar e eliminar estas populações, revendo principalmente a regionalização, que pode ter sido feita de maneira equivocada, englobando unidades litológicas diferentes, a fim de que a análise dos dados seja a mais confiável possível, e que não se esteja analisando informações distintas ou tendenciosas. Porém, tal fato foi atribuído ao reduzido número de amostras deste compartimento, e sua forte variação composicional, de maneira que se fosse feita uma subdivisão com o objetivo de sanar este problema, a análise geoestatística deste compartimento tornar-se-ia inviável, pois as amostras restantes não seriam em número suficiente para gerar variogramas robustos.

Verificou-se também que o óxido de K, mostra um comportamento levemente assimétrico para este compartimento. Porém, com a transformação logarítmica, esta assimetria reduziu-se consideravelmente, embora seja possível verificar a presença de mais de uma população em ambos histogramas (Fig. - 21). Este fato foi atribuído às características mencionadas acima para este compartimento.

O compartimento CD4, embora apresente certas condições restritivas para a utilização da geoestatística, não chega a se configurar um problema, pois é um compartimento muito pequeno, caracterizado apenas por uma variação composicional pouco significativa.

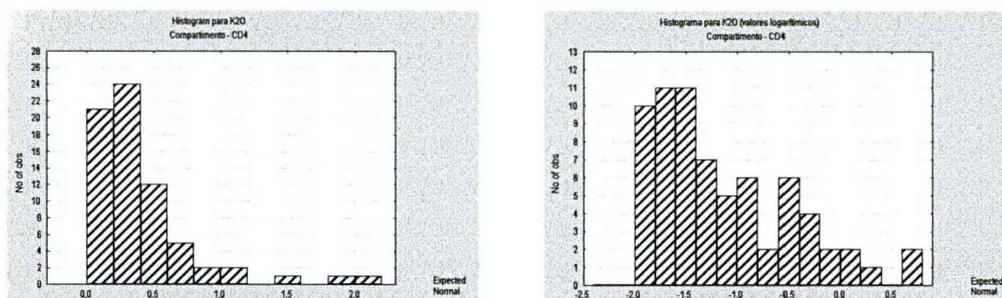


Fig. – 21: Histogramas para o óxido de K, para o compartimento CD4, onde é possível verificar que uma distribuição fortemente assimétrica torna-se mais suave (*log-normal*) com a transformação logarítmica, embora seja possível verificar ainda a presença de mais de uma população.

Da mesma forma que descrito para o compartimento CD4, no compartimento CM1 os óxidos de Si e Fe apresentam uma distribuição levemente assimétrica, que ficou sensivelmente reduzida com a transformação logarítmica (Fig - 22).

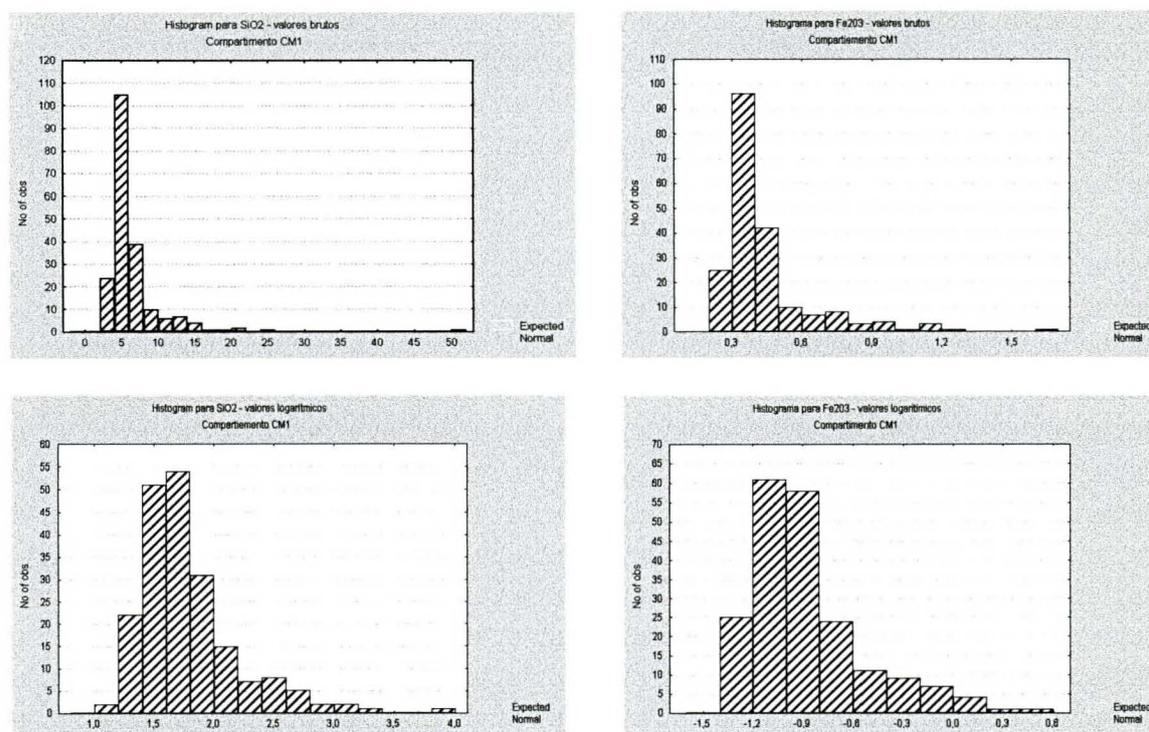


Fig. – 22: Comparação de histogramas feitos com valores brutos e valores logarítmicos, para os óxidos de Si e Fe, para o compartimento CM1. Notar que, com a transformação *log*, a distribuição dos dados torna-se menos assimétrica.

A tabela abaixo resume em quais compartimentos foram feitas as transformações logarítmicas e em quais não foram feitas nenhuma transformação, mantendo-se desta maneira os valores brutos.

Oxido/compartimento	CD1	CD3	CD4	CM1	CM2
SiO2	LOG	LOG	LOG	LOG*	LOG
Al2O3	LOG	LOG	LOG	LOG	LOG
Fe2O3	LOG	LOG	LOG*	LOG*	LOG
CaO	Ñ LOG	Ñ LOG	Ñ LOG*	Ñ LOG	Ñ LOG
MgO	Ñ LOG	Ñ LOG	Ñ LOG*	Ñ LOG*	Ñ LOG
K2O	LOG	LOG	LOG*	LOG*	LOG

*SiO2 - CM1: Assimétrica para valores log e ñ log, porém os valores log são menos assimétricos.
 *Fe2O3 - CM1: Assimétrica para valores log e ñ log, porém os valores log são menos assimétricos
 *MgO - CM1: Assimétrica para valores log e ñ log, porém os valores log são menos assimétricos
 *Fe2O3 - CD4: Aparentemente mais de uma população (poucos dados)
 *CaO - CD4: Aparentemente mais de uma população (poucos dados)
 *MgO - CD4: Aparentemente mais de uma população (se possível separar).
 *K2O - CD4: Assimétrico tanto para valor log. quanto para valor bruto. (No histograma para valores log é possível identificar mais de uma população – poucos dados)

Tabela 10: Resumo das transformações logarítmicas, por compartimento.

Durante a análise descritiva ainda foram feitos gráficos de probabilidade da normal (Fig - 23), que auxiliam na determinação do tipo de distribuição da população estudada, além de gráficos para determinação de valores atípicos (Fig - 24).

Após serem cuidadosamente analisados, verificou-se que algumas distribuições continham valores atípicos ou também chamados de valores erráticos, entretanto estes dados foram mantidos no conjunto amostrado, visto que as variâncias estimadas não se reduzem e o aspecto do gráfico variograma praticamente permaneceu inalterado, não prejudicando as análises geoestatísticas.

Foram realizadas ainda outras análises exploratórias para quantificar o comportamento de uma amostra em relação a outra, tais como os gráficos de correlação, como podem ser vistos na figura 25.

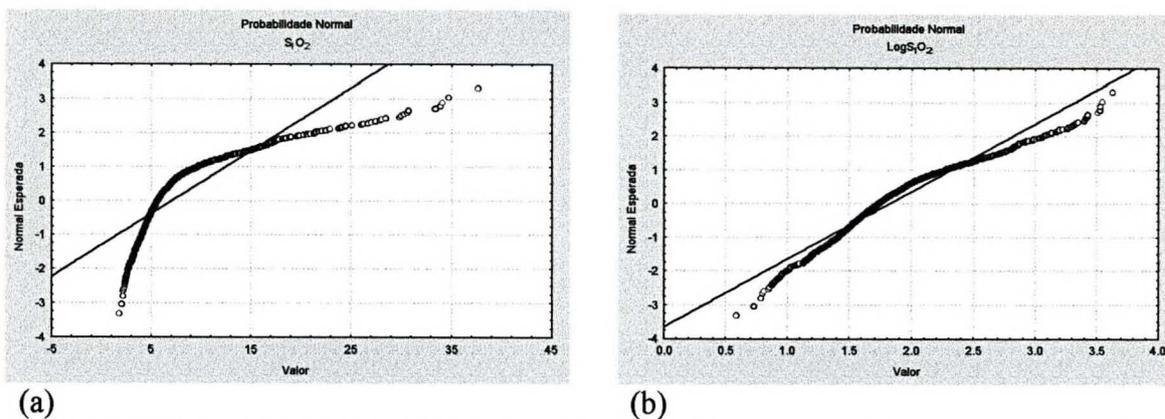


Fig. – 23: Gráfico de Probabilidade Normal, que assim como os histogramas auxiliam na determinação do tipo de distribuição estudada. O exemplo mostra uma distribuição assimétrica (a) para o óxido de Si do compartimento CM2, que foi suavizada com a transformação logarítmica (b).

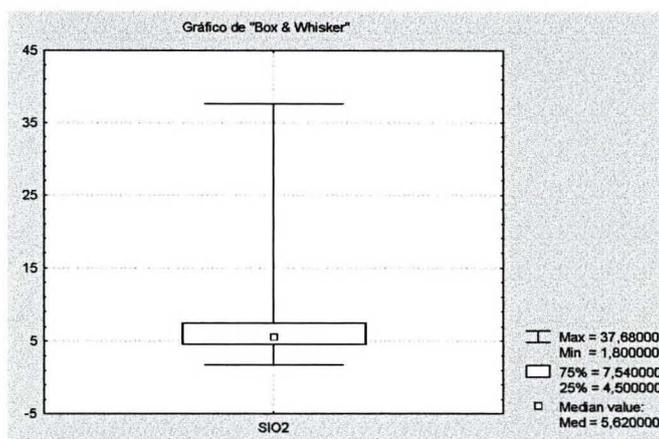


Fig. – 24: Gráfico tipo “Caixa”, utilizado para verificação de valores atípicos. O exemplo refere-se ao óxido de Si para o compartimento CM2 (valores brutos).

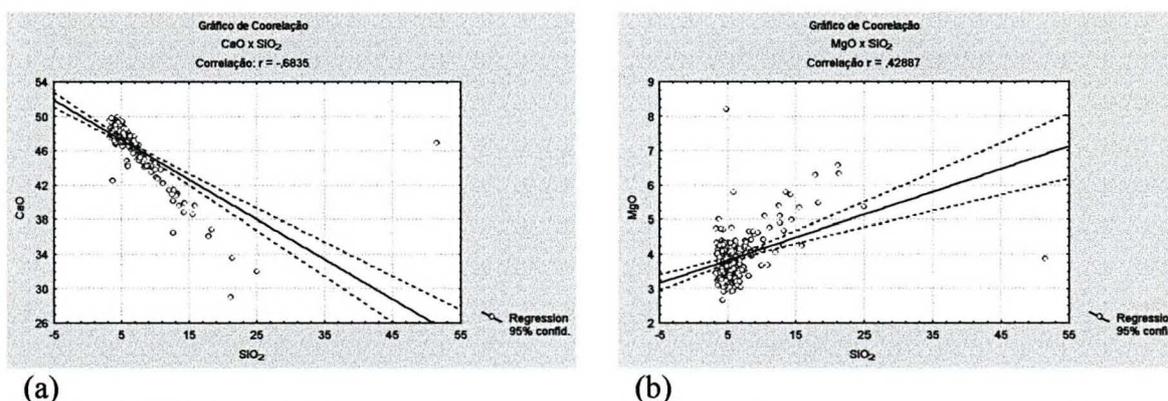


Fig. – 25: Gráficos de Correlação, que permitem visualizar o comportamento de uma amostra em relação à outra. Em (a) pode-se ver a correlação do óxido de Si com Ca e em (b) a correlação da Si com Mg, ambos para o compartimento CM2.

4.3 - ANÁLISE DESCRITIVA ESPACIAL

O objetivo principal desta análise, assim como a análise descritiva geral, é obter um indicativo do comportamento dos dados, porém podemos dizer que é um estudo mais detalhado, uma vez que leva em consideração de alguma forma a posição das amostras, permitindo avaliar o critério de estacionariedade.

A decisão de estacionariedade é fundamental na geoestatística. A análise exploratória pode auxiliar na decisão do tipo de estacionariedade que pode ser assumida. Mapas de contorno e tridimensionais, perfis e estatísticas baseadas em janelas móveis, gráficos de média por variância são alguns dos instrumentos sugeridos por Journel, 1988. Outros autores também sugerem técnicas para tal análise (Cressie, 1991; Isaaks & Srivastava, 1989; Samper & Ramirez, 1990). É importante notar que as técnicas sugeridas pelos autores não necessariamente são as mesmas, embora sejam muito semelhantes.

De qualquer modo a estacionariedade é considerada como mais uma condição restritiva à continuidade da análise geoestatística, permitindo novamente orientar a escolha dos métodos de análise dos dados.

Também chamada de “hipóteses restritivas”, o conceito geral de estacionariedade pode ser resumido da seguinte maneira:

1) Estacionariedade de primeira ordem – Quando a média e a variância do conjunto de dados amostrados apresenta um comportamento estacionário.

É considerada como a condição ótima para se trabalhar com as técnicas geoestatísticas.

2) Estacionariedade de segunda ordem - Quando só a variância apresenta um comportamento estacionário.

3) Estacionariedade de terceira ordem - Quando só a média apresenta um comportamento estacionário.

Em estatística, é comum assumir que uma variável seja estacionária; isto é, sua distribuição é constante sob translação. Da mesma maneira, uma função randômica é homogênea e auto-repetitiva no espaço; isto torna a inferência estatística possível. Portanto, a condição de estacionaridade requer que todos os momentos sejam invariantes, mas considerando que isto não pode ser verificado a partir de dados amostrais restritos, é assumida uma estacionaridade de segunda ordem, onde somente os dois primeiros momentos de ordem (média e covariância) são tidos como constantes.

Assume-se então:

$$E(Z(x)) = m(x) = m \quad 2$$

onde:

E - esperança matemática

m - média

O valor esperado (média) da função $Z(x)$ é constante para todos os pontos x .

$$E[Z(x)Z(x+h)] - m^2 = C(h) \quad 3$$

onde:

C(h) - covariância no ponto h

A função covariância entre dois pontos x e $x+h$ é independente do ponto x , a qual depende somente do vetor h .

Na prática é rara a satisfação de todas essas condições considerando um extenso campo amostral, devendo ser inseridas outras condições de atenuação para essas restrições. Para tanto é assumida uma hipótese de estacionaridade local, denominada hipótese intrínseca, o que significa dizer que a média e a variância dos incrementos $Z(x+h) - Z(x)$ existem e são independentes do ponto x , também conhecida como condição de quasi-estacionaridade (Hipótese intrínseca com média igual a zero).

$$E[Z(x+h) - Z(x)] = 0 \quad 4$$

$$\text{Var}[Z(x+h) - Z(x)] = 2\gamma(h) \quad 5$$

onde:

$\text{Var}[Z(x+h)-Z(x)]$ - variância do ponto Z na posição x+h, em relação ao ponto Z na posição x.

$2\gamma(h)$ - variograma no ponto h.

Considerando então que uma variável regionalizada seja estacionária, existe uma equivalência entre o variograma $2\gamma(h)$ e a covariância $C(h)$.

$$\gamma(h) = \tilde{\sigma}^2 - \tilde{C}(h) \quad 6$$

onde:

$\tilde{\sigma}^2$ - variância da estimativa

$C(h)$: covariância da estimativa no ponto h

Em contraste com a situação de estacionaridade, quando trabalhamos com variáveis intrínsecas, as operações são definidas somente para incrementos de distância de separação entre amostras. Em situações práticas esse limite incremental pode ser estabelecido pela abrangência de uma zona homogênea dentro de um depósito mineral e pela distribuição dos pontos amostrais no espaço, ou seja, a atribuição de quasi-estacionaridade está diretamente relacionada com a escala de homogeneidade do fenômeno e com a densidade amostral.

A principal técnica utilizada na análise dos dados para identificação da estacionariedade foram os gráficos de “*box plot*” (Fig - 26 e 27), onde as amostras são representadas no ponto onde foram coletadas, localizada por suas coordenadas. Como, neste trabalho as dimensões estudadas foram divididas em 3, como já foi citado anteriormente, a identificação da estacionariedade através

deste gráficos foi feita tanto para as direções xy e yz quanto para xz, de maneira toda área estudada foi coberta por esta análise. Neste caso, usou-se as medidas de média, desvio padrão, valor máximo e valor mínimo.

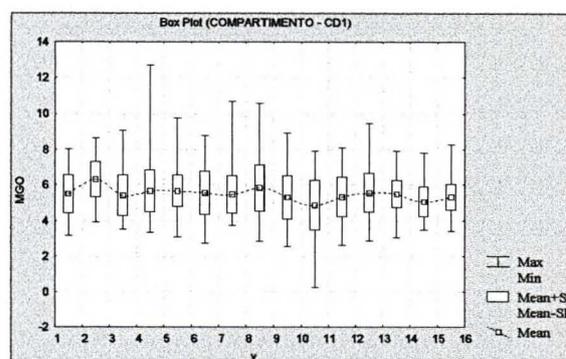
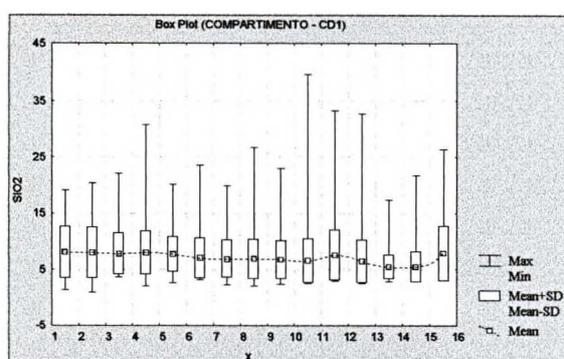


Fig. – 26: Gráfico de Box Plot do compartimento CD1, para os óxidos de Si e MG, respectivamente.

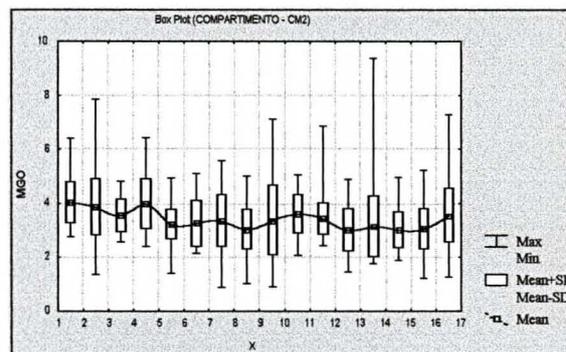
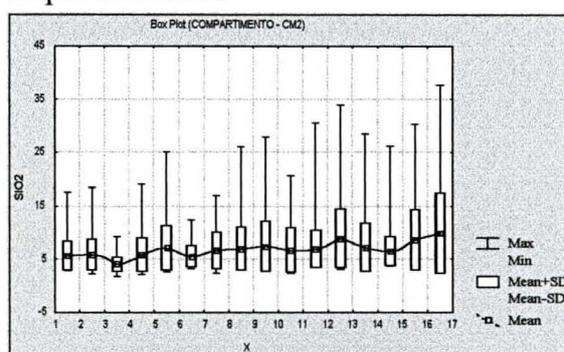


Fig. – 27: Gráfico de Box Plot do compartimento CM2, para os óxidos de Si e MG, respectivamente.

Os resultados das análises destes gráficos mostrou que os óxidos de sílica e magnésio (elementos que definem o tipo de minério), para os compartimentos mais importantes (CD1 e CM2), do ponto de vista de aproveitamento da jazida para preparação da matéria prima do cimento, são estacionários tanto na média quanto na variância, embora tenha se observado que os óxidos de Fe e Al apresentem pequenas variações, que foram interpretadas como sendo o resultado de concentrações anômalas devido à alteração superficial.

Outro fato interessante a ser observado, é uma leve variação cíclica nos valores da média e do desvio padrão (Fig. - 27), que devem estar relacionados as variações faciológicas dentro dos corpos de minério.

Os compartimentos CD3 e CM1, apresentaram uma variação maior na média, para todos os óxidos, de maneira que foram considerados estacionários de segunda ordem, ou seja, estacionariedade na variância mas não na média.

Já o compartimento CD4, mostrou uma variação significativa, ora na média, ora na variância. Este fato foi atribuído, mais uma vez, ao reduzido número de amostras. De qualquer maneira considerou-se que o compartimento em questão era estacionário de segunda ordem também, de modo que foi dada continuidade em seu estudo e análise geoestatística, juntamente com os demais.

Além destes gráficos, foram feitas outras análises, baseadas em gráficos do tipo *scatterplots* (Fig. - 28), afim de obter informações sobre locação, escala e indicações preliminares sobre a forma de distribuição geral dos dados. Estas análises mostram o comportamento espacial das realizações obtidas do atributo em questão na região estudada. A partir destas informações pode-se ter uma idéia inicial sobre a continuidade do fenômeno, verificar se há regiões com concentração de valores altos ou baixos, os quais podem sugerir a partição de uma ou mais subáreas.

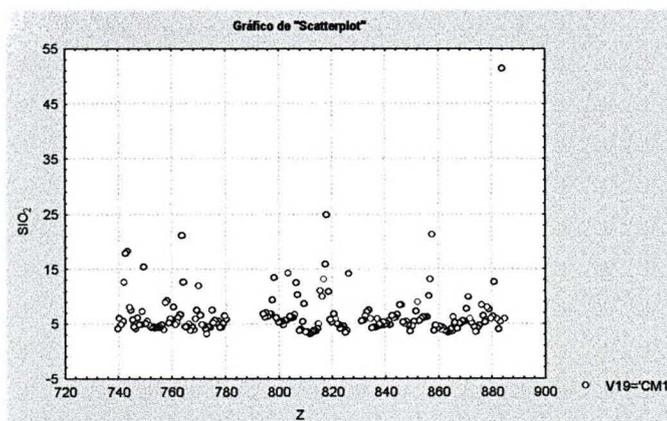


Fig. – 28: Gráfico de dispersão (*Scatterplot*) para o compartimento CM2, referente ao óxido de sílica.

Outra transformação importante, realizada nesta etapa, foi a redução do número de amostras do compartimento geológico CD1. Esta redução foi necessária visto que um dos *softwares* utilizados *Variowin*, (Pannatier, 1996) para geração dos arquivos de pares (PCF), para realização posterior dos variogramas, tem uma limitação de dados, que gira em torno de 2300, dependendo do número de casas depois da vírgula (precisão).

Para tanto utilizou-se o programa *Selcaso* (Soares, 1997), que faz uma amostragem aleatória do conjunto total de dados.

As técnicas utilizadas nestas etapas não abrangem todas as possíveis opções de descrição espacial, e desta forma também não são excludentes. A somatória de todas elas é que explicitará a forma de manifestação do fenômeno estudado.

CAPÍTULO 5

CONTINUIDADE ESPACIAL

5.1 - CONSIDERAÇÕES SOBRE A GEOESTATÍSTICA

No capítulo anterior desenvolveu-se a análise estatística básica, que embora seja de fundamental importância para todo e qualquer trabalho de análise geoestatística, no máximo permite fazer uma aproximação do comportamento de uma observação em relação ao total das observações, pois não considera sua posição dentro da área estudada.

O termo geoestatística é utilizado para denominar um conjunto de técnicas estatísticas empregadas na análise descritiva, modelagem e estimação de variáveis que se apresentem distribuídas continuamente no espaço. Como exemplo, pode-se citar os teores de elemento em uma rocha, as propriedades físicas e químicas do solo em uma área, ou ainda, níveis de poluente em uma região. Tais variáveis são denominadas variáveis regionalizadas, ou seja, são valores de uma determinada observação que variam de um lugar a outro no espaço, mantendo uma relação entre si. De modo mais simples pode-se afirmar que são variáveis cujos valores são relacionados de algum modo com a posição espacial que ocupam.

Dessa forma, a geoestatística nada mais é do que a aplicação de técnicas estatísticas a fim de resolver problemas relacionados às “Variáveis Regionalizadas”, e não deve ser vista como um tipo especial ou alternativo de estatística, o fato é que cada

observação é descrita não apenas pelo seu valor, mas também por informações de sua posição, expressa por um sistema de coordenadas.

Cabe ao engenheiro de minas D. Krige, o título de pai da geoestatística, que motivado por problemas relacionados à mineração, desenvolveu uma série de equações matemáticas que possibilitaram o entendimento da estrutura de variabilidade espacial de um determinado atributo (Teoria das Variáveis Regionalizadas), de maneira que fosse possível criar interpolações que resultassem em uma boa estimativa de um certo tipo de minério, em pontos não amostrados. Assim, além de obter mapas que exibissem a distribuição do minério na região estudada, seria possível fazer estimativas de reserva, orientar estratégias de prospecção e parâmetros numéricos para permitir a viabilidade de um depósito.

Entretanto, cabe aqui a pergunta – porque a escolha das técnicas geoestatísticas e não a utilização de técnicas tradicionais, amplamente utilizadas na mineração por muitas décadas? De maneira resumida, pode-se dizer que as técnicas geoestatísticas, apresentam para todos os tipos de jazimentos, entre outras, as seguintes soluções:

-Estimador global:

teores x volume com distribuição do erro associado.

-Estimadores locais:

Krigagem por blocos, com variância mínima.

Define o erro associado a cada bloco.

Considera a anisotropia.

Otimiza de forma não viciada a ponderação.

Faz o melhor uso de toda a informação disponível.

Permite simulação e previsão de flutuação.

Dimensiona o ganho de precisão com adensamento e orientação da amostragem.

Pondera os teores já lavrados na estimação local.

A tabela 11, apresenta uma comparação, com vantagens e desvantagens entre os principais métodos convencionais utilizados na mineração para estimação de reservas.

Antes de iniciar a discussão da variografia propriamente dita, há certas características das variáveis regionalizadas que precisam ser mencionadas. São chamadas “características qualitativas das variáveis regionalizadas”, e embora de fácil entendimento, e muitas vezes consideradas como óbvias para muitos pesquisadores, é importante que elas sejam mencionadas e que seu entendimento no problema estudado fique bastante claro.

A) Suporte

Os valores da variável regionalizada somente são importantes no campo geométrico onde a mesma foi definida, ou seja, em um espaço determinado onde a variável pode assumir valores definidos e no interior do qual será estudada sua variação. Este campo geométrico pode ser uma parte ou todo o depósito mineral. É de extrema importância conhecer o valor médio da variável no interior de um pequeno campo, quer seja ele uma amostra de calha, um testemunho de sondagem, etc. Este valor médio é chamado de **suporte geométrico**, e corresponde aos volumes sobre o qual a variável regionalizada foi definida e calculada. É importante dizer que quando se pretende fazer estimações sobre a relação entre tonelagem total e teores por blocos, para o teor do minério, este será o volume da amostra obtida.

Tal subdivisão não deve nem pode ser aleatória. Ela deve ser feita de tal maneira que respeite certas condições de homogeneidade física.

B) Continuidade

É um conceito que por si só está diretamente relacionado ao entendimento do que é uma variável regionalizada, ou seja amostras que tenham uma variação mais ou menos

MÉTODOS CONVENCIONAIS – QUADRO COMPARATIVO

NOME	FORMA DE OPERAR	APLICAÇÕES	VANTAGENS	DESVANTAGENS
SEÇÕES TRANSVERSAIS	Divide-se o corpo em blocos, por meio de seções geológicas, em intervalos constantes ou não. As seções podem ser verticais, inclinadas, preferencialmente paralelas entre si.	<ul style="list-style-type: none"> c) Grandes corpos, bem definidos, com espessuras e teores regulares. d) O método deve ser usado com reservas em corpo irregulares ou onde os valores tendem a concentrar-se em certas zonas. 	Retrata a geologia e forma de jazida.	<ul style="list-style-type: none"> c) Conhece-se bem o que ocorre em duas faces do bloco, porém não se conhece o que ocorre dentro do mesmo. d) Para um cálculo com boa margem de segurança deve ser construído um grande número de seções, o que pode ser muito trabalhoso.
TRIÂNGULOS	Construção de um número máximo de triângulos através de união dos pontos de informação (p.ex. sondagens), por linhas retas que não podem inter cruzar-se.	<ul style="list-style-type: none"> c) Grandes depósitos sedimentares. d) Corpos regulares explorados com malha regular. 		<ul style="list-style-type: none"> f) O método não leva em conta considerações geológicas ou minerais. g) Não retrata a forma de jazida. h) Pode englobar valores que não pertençam ao corpo mineralizado e vice-versa deixar de fora valores pertencentes ao corpo mineral. i) Requer um grande n.º de triângulos e blocos. j) Não deve ser usado em correntiformes.
POLÍGONOS	Divide-se o corpo mineral por uma série de prismas poligonais. Cada polígono de base representa a área de influência de um trabalho (p.ex. sondagens) e cada prisma assume o teor médio, espessura e densidade dada por este trabalho. Os polígonos são construídos em ordem, p.ex., no sentido dos ponteiros do relógio e da periferia para o centro.	<ul style="list-style-type: none"> d) Depósitos onde haja grande número de trabalhos. e) Depósito trabalhado com malha regular. f) Corpos tabulares (camadas, depósito de cobertura e veios finos), grandes lentes e Stocks. 	<ul style="list-style-type: none"> d) Representa pobremente a forma do depósito. e) Permite, às vezes, avaliar blocos individuais, separando partes ricas e pobres. f) Permite computar novas reservas à medida que novos dados vão surgindo sem necessitar recalcular toda a reserva, visto que a reserva total é a soma das reservas dos “n” blocos. 	<ul style="list-style-type: none"> e) O método baseia-se mais em suposições teóricas que considerações geológicas. f) Requer grande número de polígonos e blocos. g) Construção das áreas de influência requer muita experiência mas só há um meio de obter a configuração final e a mesma não depende de julgamento pessoal. h) Pode englobar valores que não pertencem ao corpo mineralizado e vice-versa deixa de fora valores pertencentes ao corpo mineralizado.
ISOLINHAS	Construção de curvas que passam por pontos de igual valor. Os pontos de igual valor são intercalados de pontos de valores conhecidos.	<ul style="list-style-type: none"> c) Em todos os tipos de depósitos. d) Tem melhor resultado quando as variáveis (teor, espessura, etc.) decrescem de centro para a periferia. 	<ul style="list-style-type: none"> e) Muito descritivo. f) Retrata a forma da jazida. g) Permite avaliar blocos individuais, separando pontos ricos e pobres. h) Fácil de calcular para diferentes teores de corte. 	<ul style="list-style-type: none"> d) Requer boa quantidade de dados. e) Se, entretanto, o n.º de dados for muito grande é muito trabalhoso e, às vezes, impossível de ser usado por via manual. f) O traçado das linhas sofre influência pessoal.
INVERSO DA DISTÂNCIA	Divide-se o corpo em blocos de igual tamanho. O teor de cada bloco recebe o teor médio dos furos da vizinhança de acordo com a distância dos furos ao centro do bloco.	<ul style="list-style-type: none"> c) Em todos os tipos de depósitos. d) Tem melhor resultado quando a malha de sondagem é regular. 	<ul style="list-style-type: none"> c) Retrata a forma do depósito. d) Elimina os erros sistemáticos de sobre ou sub-estimativa de teores. 	<ul style="list-style-type: none"> d) Não leva em consideração a disposição dos furos entre si. e) Não leva em conta a forma e o tamanho do bloco a avaliar. f) Não leva em conta a variabilidade do depósito.

Tabela - 11: Quadro comparativo entre os métodos convencionais de estimativa. (Fonte: Guerra, 1988)

Obs: A maior desvantagem dos métodos convencionais é que nenhum deles é capaz de avaliar o erro cometido na estimativa de reservas.

contínua refletem um grau de dependência maior do que amostras onde a variação é muito instável, como é o caso de valores erráticos, neste caso o termo conhecido na geoestatística para designar esta situação é o **efeito pepita**. Este fenômeno acontece quando os valores observados não possuem nenhuma dependência entre si, ou seja, são totalmente independentes, expressando com isto uma disposição verdadeiramente ao acaso no depósito. Neste caso estaríamos trabalhando com uma variável aleatória, situação esta em que não se aplicam as técnicas geoestatísticas.

No caso em estudo, as amostras dos testemunhos de sondagens são variáveis regionalizadas. Nas direções com densidade de amostragem suficiente para representar a estrutura espacial dos dados foi observado que pouquíssimos variogramas apresentaram o efeito pepita puro.

C) A Anisotropia

Assim como as demais características das variáveis regionalizadas, a anisotropia é considerada essencial para o entendimento da estrutura espacial do fenômeno analisado e refere-se a uma condição em que os valores observados podem variar mais intensamente em uma direção do que em outra. Existem diversos tipos de anisotropias, que serão discutidos mais a frente. Esta característica pode ser também chamada de zonalidade.

5.2 - VARIOGRAFIA

Uma vez verificado as condições naturais dos dados, sua distribuição e condições restritivas (hipótese intrínseca), o próximo passo é a estimação da estrutura de dependência espacial através do semivariograma.

Esta é a etapa mais trabalhosa e pode-se até dizer a mais crítica, demanda muita paciência, diversas tentativas, análises e avaliações, que serão de certa forma

determinantes na qualidade final do trabalho, pois o modelo de variabilidade escolhido será utilizado nas previsões a serem feitas por meio da krigagem.

O semivariograma é a pedra fundamental da geoestatística (CRESSIE, 1989). A análise variográfica é uma arte no melhor senso do termo. Artes requerem bons instrumentos, como neste caso, um bom programa interativo; mas também a experiência e habilidade para sintetizar e, às vezes ir além dos dados (Journel, 1988).

O variograma ou o semivariograma, na prática, é a ferramenta estatística que permite mostrar o grau de dependência espacial entre amostras ao longo de um determinado suporte, que em nosso caso representa a variação nos teores dos óxidos analisados do calcário da mina Saivá.

Em uma análise geoestatística podem ser usados outros estimadores, tais como correlogramas, covariogramas, madogramas, entretanto, segundo Robinson, 1990, que discute esta questão mais detalhadamente em seu trabalho, estes estimadores são pouco utilizados.

Isaacks & Srivastava, 1989 discutem em seu trabalho que a escolha e a utilização de outros estimadores depende muito mais do tipo de distribuição dos dados, como é o caso do correlograma, que se mostra muito mais resistente a valores erráticos.

O que pode-se dizer com erta firmeza, é que tanto para os semivariogramas, como para os outros estimadores a precisão é função do número de dados, da variância destes dados, do grau de autocorrelação e do conhecimento de função de densidade envolvida, bem como da presença de dados atípicos (Li & Lake, 1994).

De todo modo, a principal ferramenta da geoestatística é o estimador “clássico”, também dito estimador de Matheron, que vem sendo largamente utilizado, e como já foi dito, é uma função derivada do estudo da variabilidade dos teores com o afastamento e

com a direção. Esta função se baseia em um princípio muito simples que diz que pontos mais próximos estarão normalmente mais correlacionados que os mais distantes.

Em geoestatística, se os pontos são muito correlacionados, a variância das diferenças será menor e vice-versa, sendo uma medida da influência de amostras em áreas da vizinhança no depósito. Esta variância quando representada graficamente em função da distância (h) demonstra a correlação espacial (covariância) para um fenômeno regionalizado e dá origem ao variograma.

A notação matemática para a função variograma é $2\gamma(h)$ e a função semivariograma é $\gamma(h)$, embora muitos autores denominem esta última simplesmente como função variograma (Clark, 1979).

A função variograma $2\gamma(h)$ é definida como a esperança matemática do quadrado da diferença entre valores de pontos no espaço, separados por uma distância h , conforme a seguinte equação.

$$2\gamma(h) = E\{[Z(x+h) - Z(x)]^2\} \quad 7$$

Que pode ser expressa por:

$$2\gamma(h) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z(x+h) - Z(x)]^2 \quad 8$$

Onde:

$2\gamma(h)$ é a função variograma;

n é o número de pares de pontos separados por uma distância h ;

$Z(x+h)$ é o valor da variável regionalizada no ponto $(x+h)$;

$Z(x)$ é o valor da variável regionalizada no ponto x .

A função variograma também pode ser expressa em termos da variância $C(0)$ e da covariância $C(h)$:

$$\gamma(h) = C(0) - C(h) \quad 9$$

Como a função variograma depende da distância h , e esta distância pode ser considerada como um vetor, o variograma deve ser construído segundo distintas direções no espaço, visando, desta maneira, evidenciar eventuais anisotropias que porventura existam no depósito.

5.2.1 - VARIOGRAFIA EXAUSTIVA

O conhecimento do tema e da área em estudo é fundamental na decisão de se modelar a anisotropia, pois muitas vezes significa considerar um maior número de parâmetros a serem estimados e, portanto, só deve ser feito quando isto mostrar um ganho significativo para melhor descrição do fenômeno (Ribeiro, 1985).

O primeiro passo foi realizar uma variografia inicial, chamada de variografia exploratória com objetivo de identificar anisotropias na distribuição dos valores dos óxidos para a mina, ou seja, definir os eixos de continuidade espacial (3D) das variáveis estudadas.

Os óxidos que definem os tipos de minério são somente a sílica e o magnésio e os compartimentos geológicos de maior interesse são o CD1 e o CM2, onde concentram-se as atuais frentes de lavra. No entanto, visando identificar a variabilidade espacial de todos os óxidos analisados e suas correlações, a variografia exploratória foi realizada, adicionalmente, para todos os elementos analisados, em cada um dos compartimentos definidos na regionalização, referentes às seguintes direções: omnidirecional, 0° , 45° , 90° e 135° , com uma tolerância angular de $22,5^\circ$ (Figs. - 29 e 30).

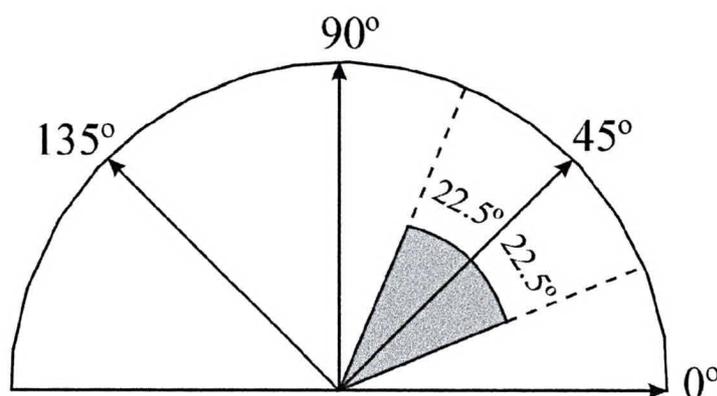


Fig. - 29: Direções e ângulos de tolerância da variografia exploratória realizada na primeira etapa.

É importante ressaltar que para os óxidos que apresentaram uma distribuição assimétrica, ou seja a Si, Al, Fe e K, foram feitos variogramas tanto para os valores brutos quanto para os logaritmos dos dados. Na figura 30 verifica-se que os variogramas para os valores brutos apresentam-se tão bem estruturados quanto aqueles feitos para os valores *log*.

Considerando que os compartimentos estabelecidos são cinco, à saber: CD1, CD3, CD4, CM1 E CM2 e que os óxidos perfazem um total de seis, à saber: SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO e K₂O, o total de variogramas realizados inicialmente foi de aproximadamente 250.

Nesta etapa inicial, além do número já elevado de variogramas, a impossibilidade de se realizar a variografia exaustiva tridimensional exigiu a divisão dos dados nos planos *xy*, *yz*, e *xz*, ao invés de trabalhar no espaço *xyz*, multiplicando desta maneira o número de variogramas para aproximadamente 750. O bloco diagrama (Fig - 31) mostra a posição dos furos de sondagens em relação aos planos definidos para a variografia exaustiva.

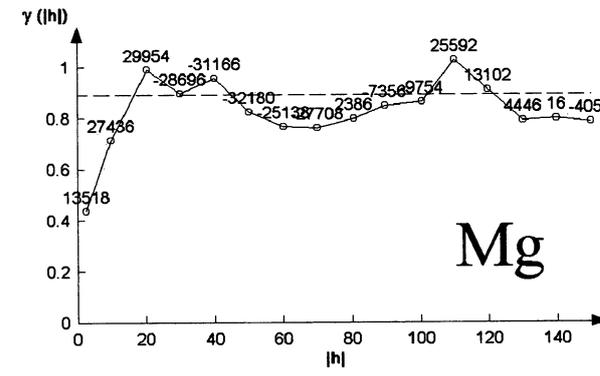
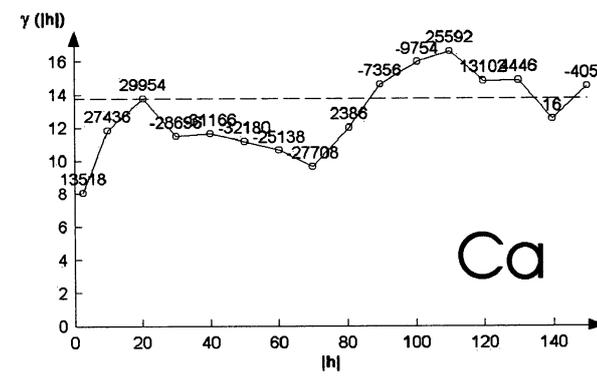
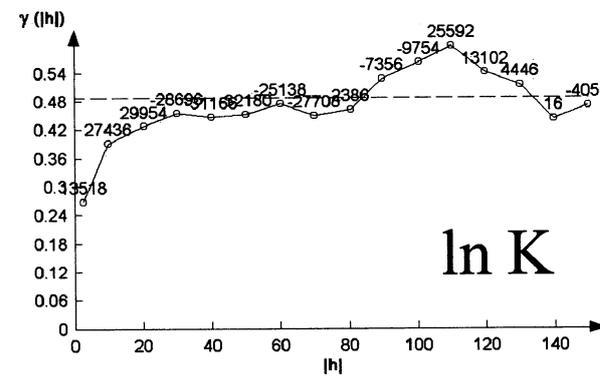
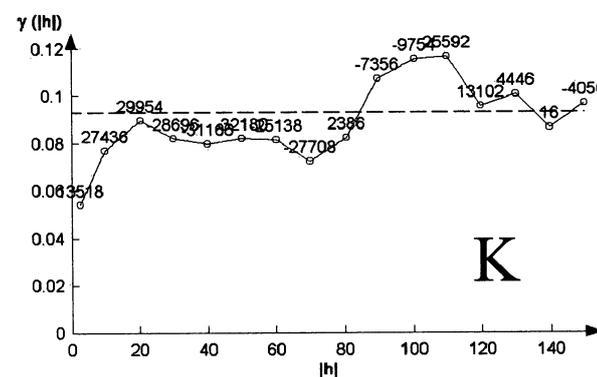
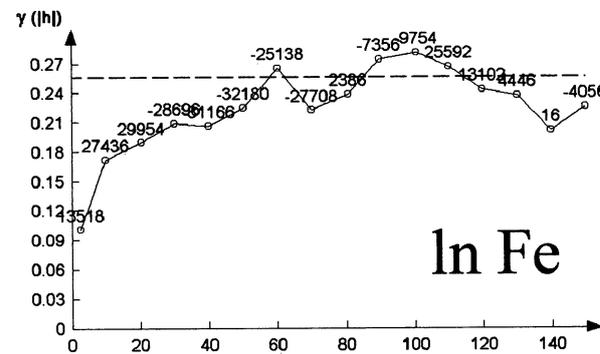
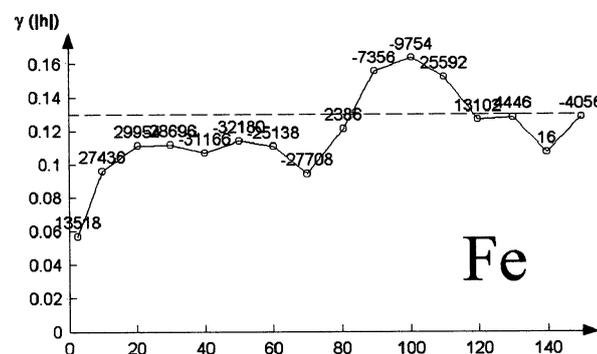
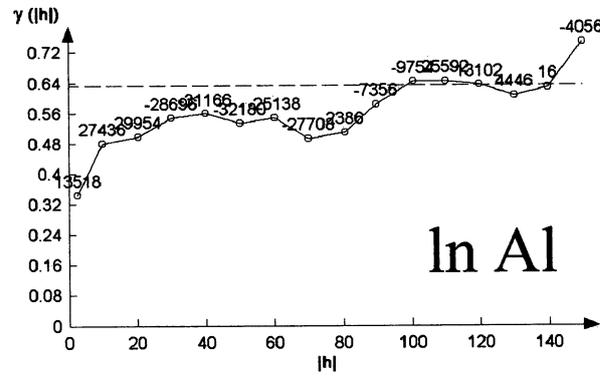
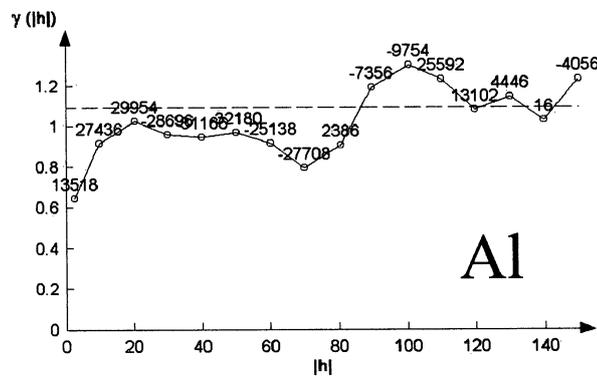
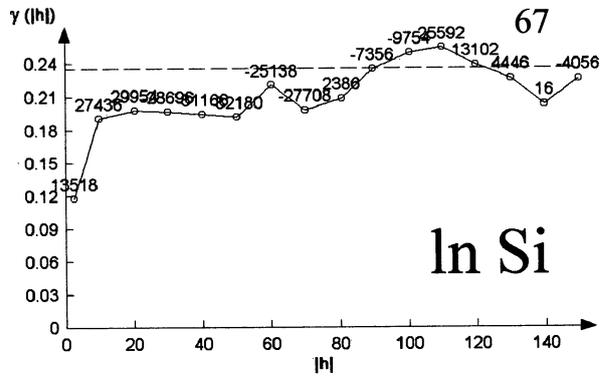
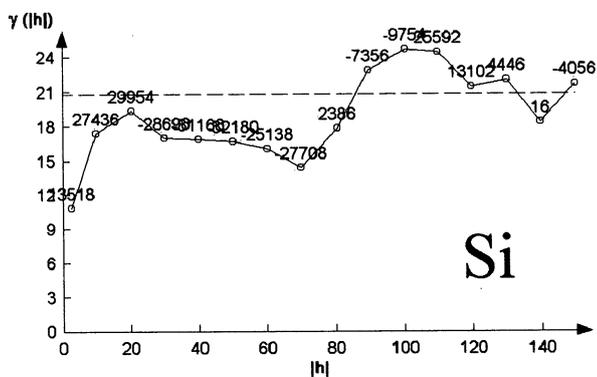


Fig. - 30: Varigrafia omnidirecional no plano xz, para todos os óxidos. Notar que para todos os elementos. Foram feitos também os variogramas para os dados *log*, exceto para o Ca e o Mg.

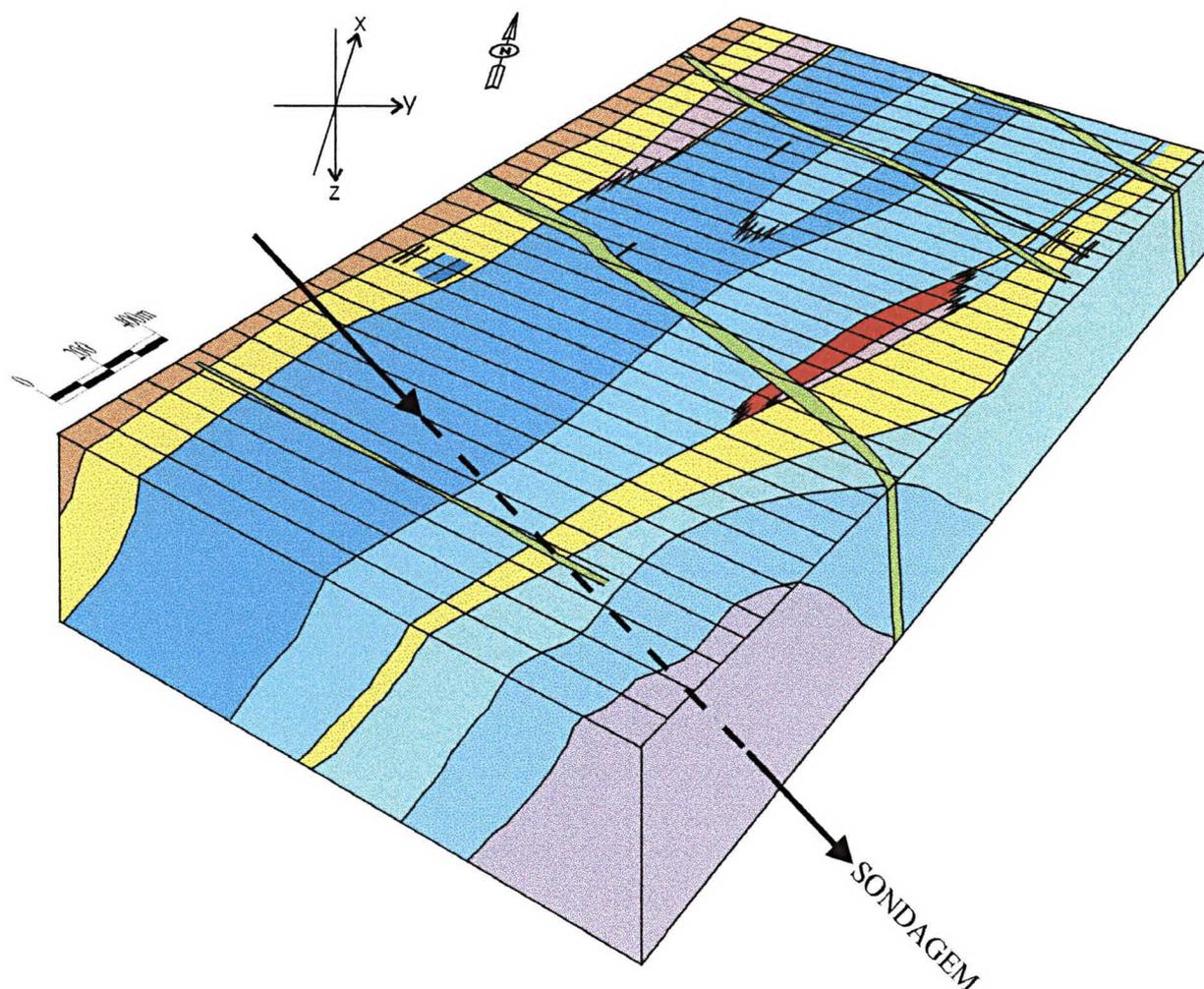


Fig. – 31: Bloco diagrama mostrando a direção principal das sondagens e as principais direções de variografia realizadas em relação às camadas geológicas.

Como já foi citado anteriormente, a malha de sondagem, além de não ser regular, mostra uma forte heterogeneidade, que em média apresenta as seguintes direções: 100 metros entre as linhas de pesquisa, 50-80 metros entre os furos e 1m ao longo da sondagem (direção z).

Este fato configura-se como um dos problemas mais sérios do ponto de vista da aplicação da geoestatística, pois na verdade a distribuição espacial das informações apresentam severas restrições para a construção de variogramas. Desta forma, o resultado da variografia exhaustiva mostrou que as únicas direções que apresentavam

uma estrutura de variograma aceitável eram aquelas que mais se aproximavam dos furos de sondagens.

Esta característica, que é função da amostragem, pode ser vista claramente na figura 32, na qual os variogramas para as direções 135° - plano xy , 45° - plano yz e 135° - plano xz , mostram uma boa estrutura de covariância dos dados, pois são aquelas que coincidem ou que estão muito próximos da direção das sondagens.

Cabe ressaltar também que os variogramas realizados no plano xz , para as direções 0° e 90° , também apresentam uma estrutura aceitável, corroborando as afirmações anteriores, pois são direções ao longo deste plano que se aproximam dos furos.

Como em ambientes naturais, principalmente em depósitos minerais, os fenômenos são anisotrópicos, ou seja, o padrão de estrutura da variabilidade espacial é diferente para certas direções, a princípio atribuiu-se às pequenas variações nas estruturas dos variogramas uma anisotropia. Entretanto, este fato reflete muito mais a heterogeneidade dos dados e da amostragem, pois na verdade, no momento da elaboração dos variogramas, o *software* não localiza realizações à distâncias que representem a variabilidade espacial dos elementos, exceto ao longo dos furos.

Para se determinar uma estrutura nestas direções o *lag* (passo) de busca do variograma deveria ter um passo igual ou superior a distância entre as sondagens. Porém esta solução, além de não resolver o fato de que realmente não há realizações à distâncias menores, os parâmetros variográficos definidos seriam tão altos, que a estimativa por *krigagem* provavelmente apresentaria resultados cujo erro seria tão ou mais elevado do que uma estimativa feita por métodos convencionais.

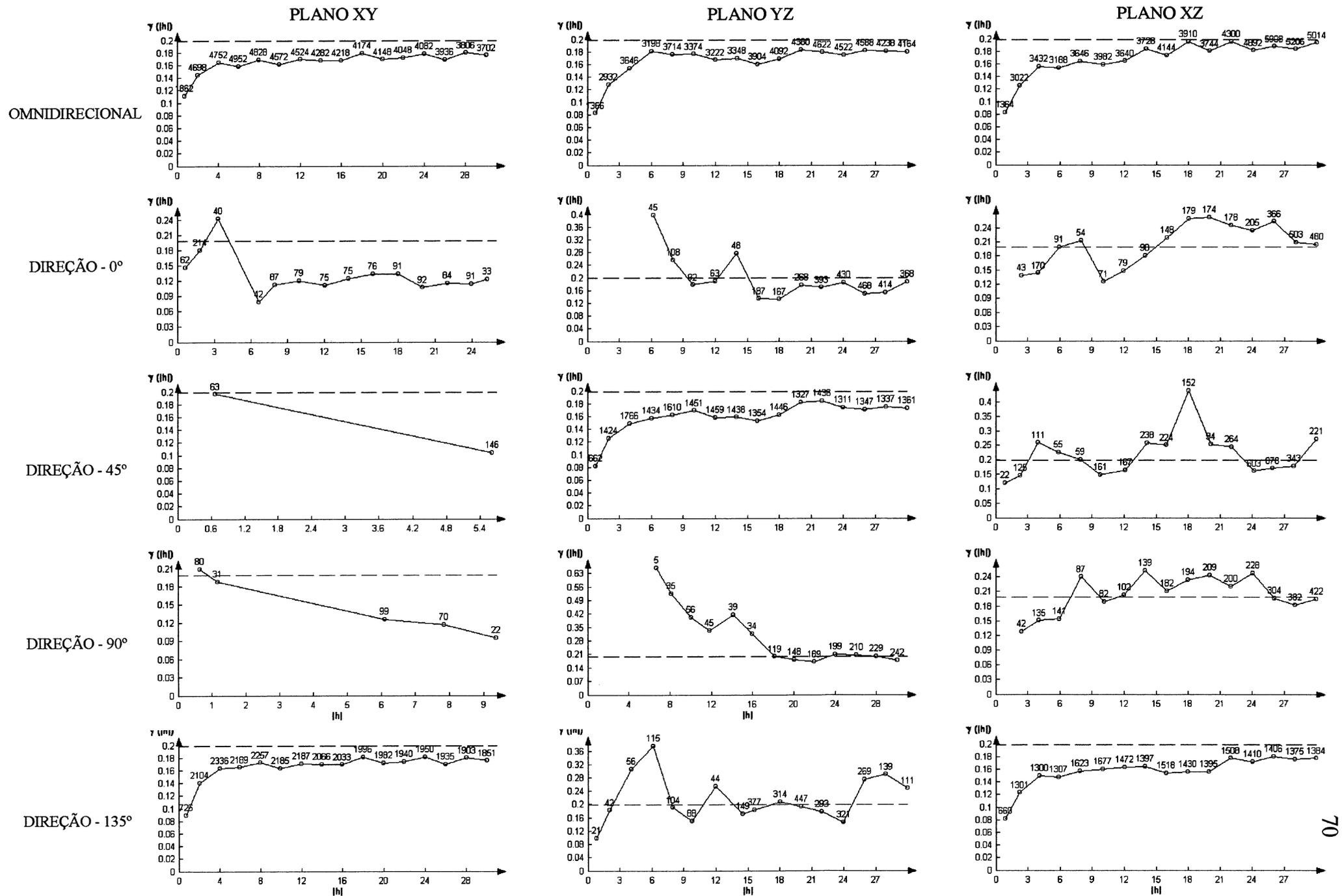


Fig. - 32: Variografia exhaustiva para o óxido de Si, referente ao compartimento CD1(lag=2; número de lags=12).

5.2.2 - MODELAGEM VARIOGRÁFICA

Com a finalidade de resolver os problemas oriundos da forte heterogeneidade amostral, o passo adotado foi fazer uma variografia ao longo dos furos de sondagem (*Down the Hole*).

Como a amostragem ao longo do furo apresenta pequenas variações, com média que gira em torno de um metro, o suporte geométrico é variável, correspondendo ao volume dos intervalos testemunhados ao longo de cada furo.

Dessa forma os valores das análises químicas para os óxidos, no banco de dados, correspondem aos valores dos pontos médios de cada intervalo testemunhado (Fig. - 33). O comprimento médio dos intervalos é de 1 metro.

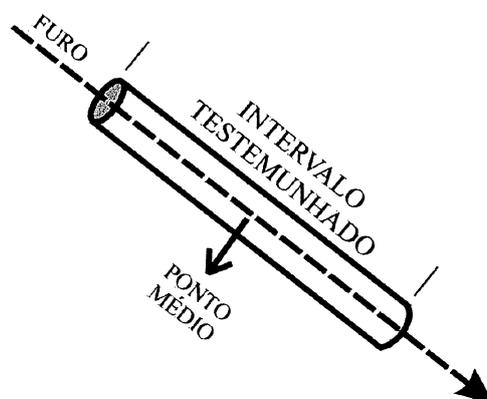


Fig. - 33: Representação gráfica esquemática do suporte para construção do banco de dados.

Dentre os vários testes feitos com *lags* (passo) diferentes (1 a 3m), para o mesmo suporte de 1 metro, os melhores resultados obtidos foram para o *lag* de 2 metros (Fig. - 34). Com o aumento do *lag* observou-se a diminuição de variabilidade dos valores $\gamma(h)$ resultantes, aumento no efeito pepita e suavização da curva do semivariograma.

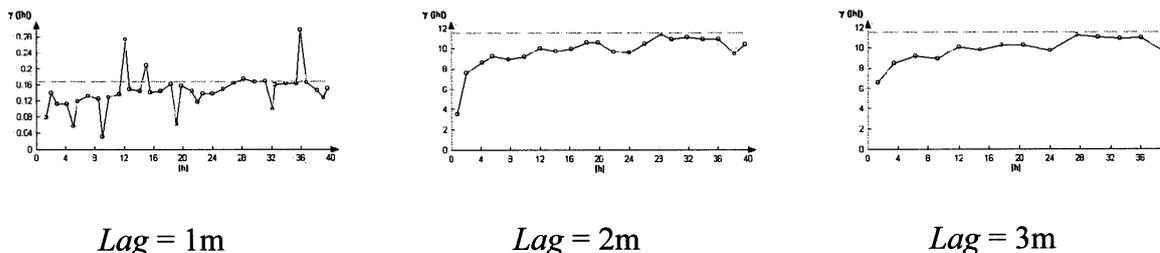


Fig. - 34: Variogramas para diferentes *lags*, onde pode-se verificar uma diminuição da variabilidade dos valores $\gamma(h)$, bem como uma suavização na curva do semivariograma e um aumento no efeito pepita.

Nesta etapa a variografia foi feita para todos os furos, para os compartimentos CD1, CD4, CM1 e CM2, para todos os óxidos do banco de dados. Entretanto, como nem todos os furos possuem um número de amostras suficiente para gerar variogramas robustos (o número de pares fica inferior a 40), só foram utilizados aqueles furos de sondagens, cuja amostragem permitissem determinar a estrutura de variabilidade dos óxidos estudados ao longo de sua direção. Desta forma os furos utilizados inicialmente para a modelagem variográfica foram: 95, 97, 103, 173, 174 e 183.

Assim como na variografia exaustiva por planos, ao longo dos furos também foram feitos alguns modelos de variogramas mudando-se o *lag*, afim de observar se haviam diferentes estruturas com o aumento da distância.

Estes modelos foram feitos para os compartimentos mais importantes (CD1 e CM2) para os óxidos de sílica e magnésio. Cabe ressaltar que para o óxido de sílica foram feitos também os variogramas para os valores logarítmicos.

As figuras 35 e 36 mostram os variogramas modelados para os compartimentos CD1 e CM2, referentes aos óxidos de Si e Mg para *lags* menores, enquanto que as figuras 37 e 38 mostram os variogramas modelados para os mesmos compartimentos e para os mesmos óxidos, porém com *lags* maiores.

COMPARTIMENTO CD-1

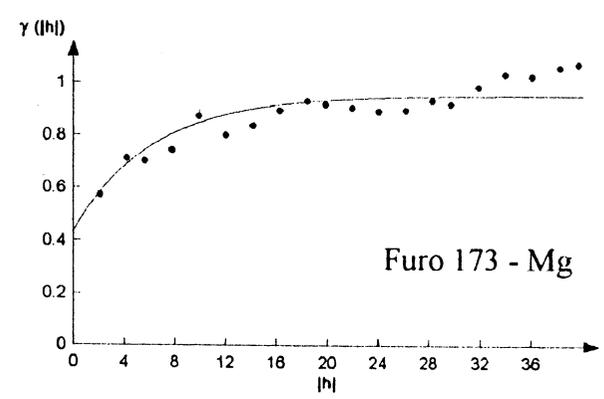
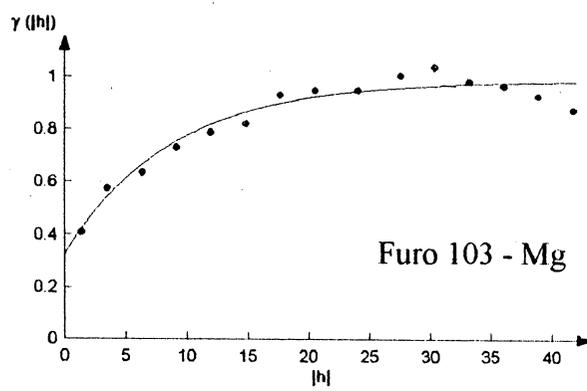
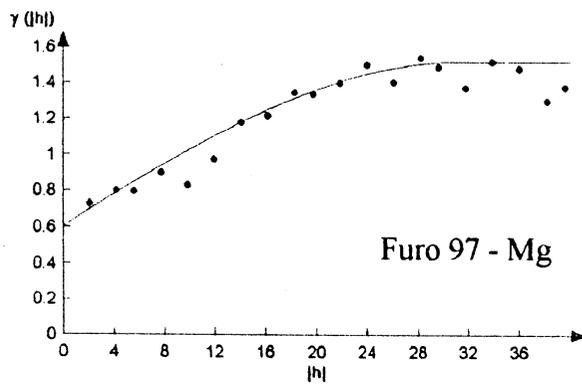
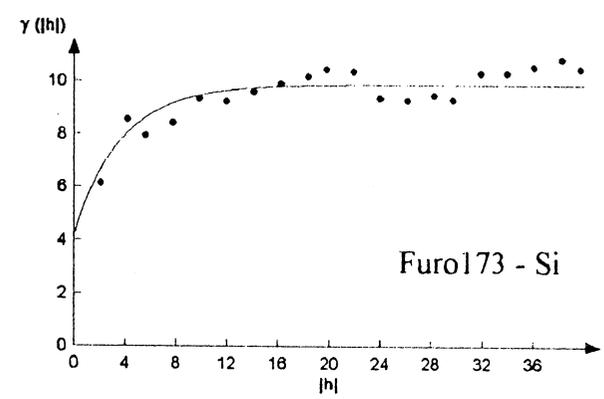
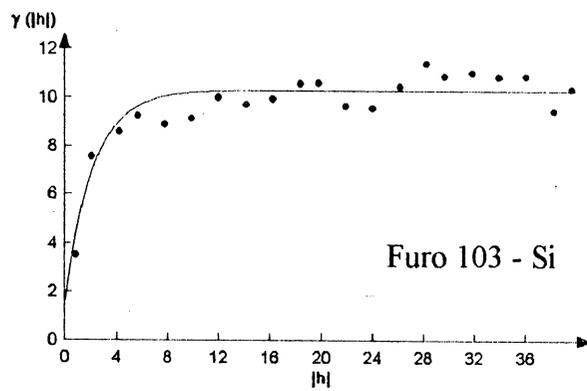
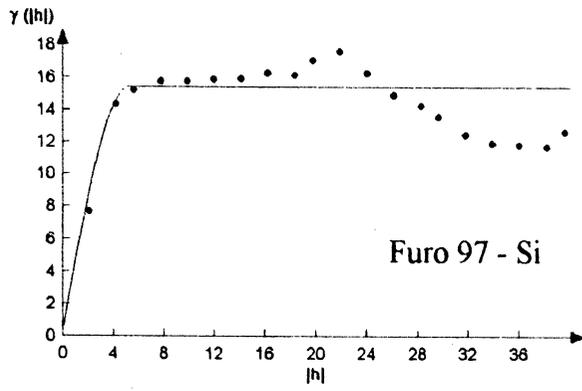
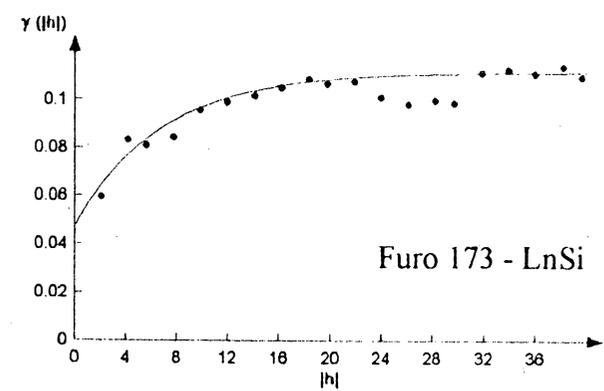
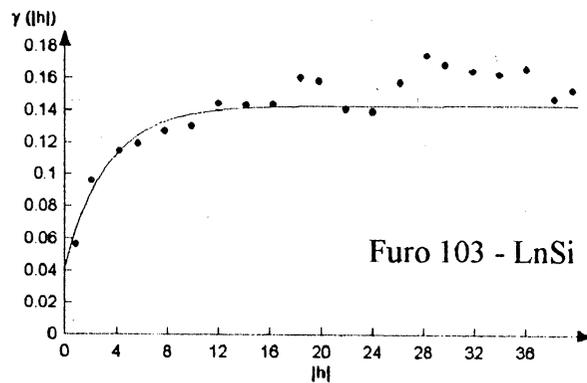
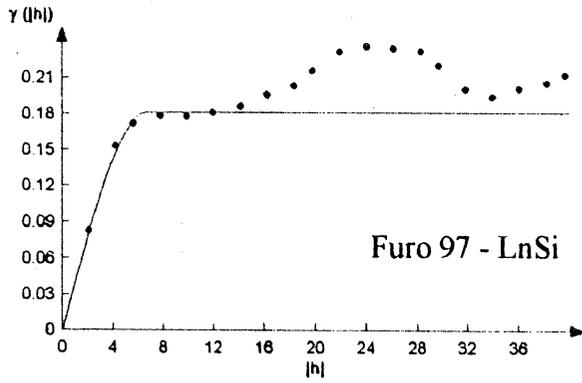


Fig. - 35: Variogramas direcionais ao longo dos furos de sondagem, com *lag* de 2m e número de *lags* igual a 20m.

COMPARTIMENTO CM-2

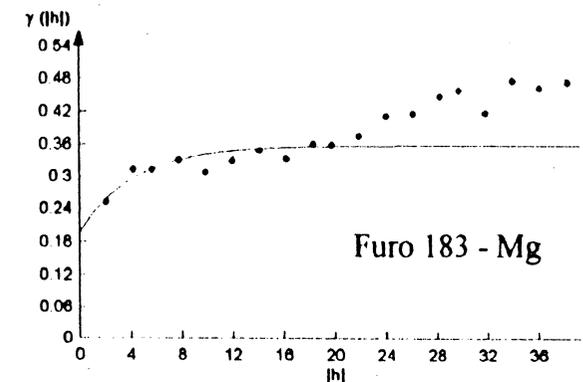
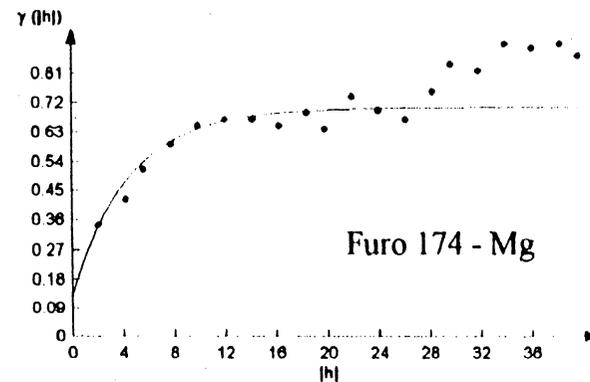
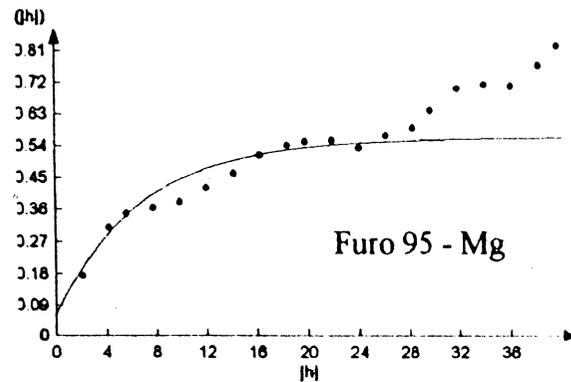
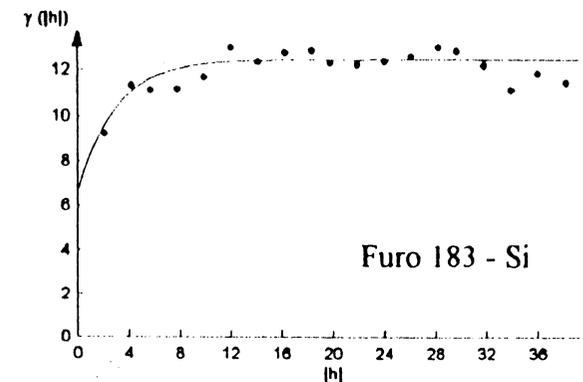
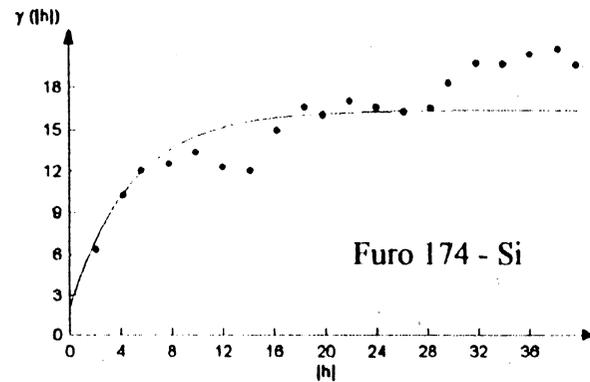
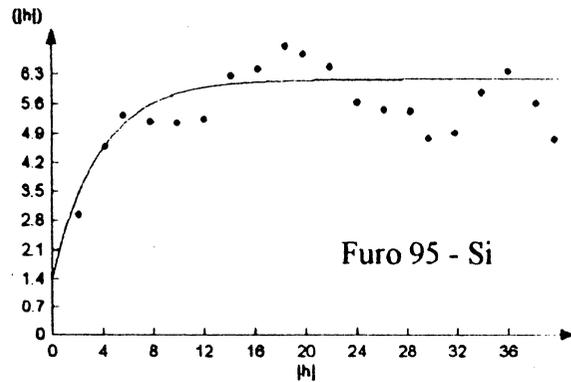
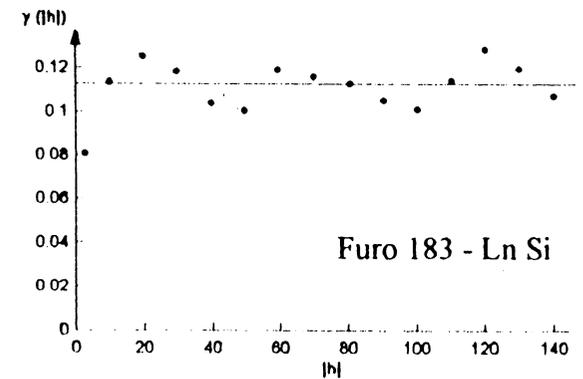
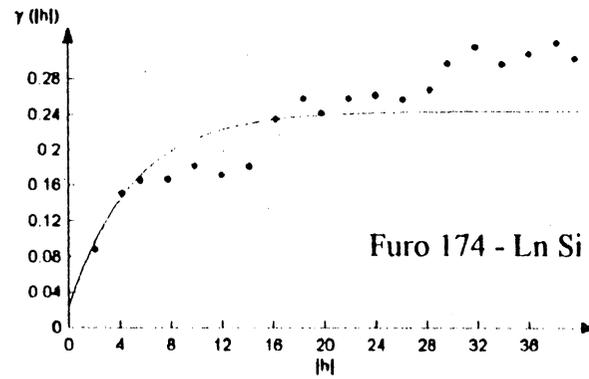
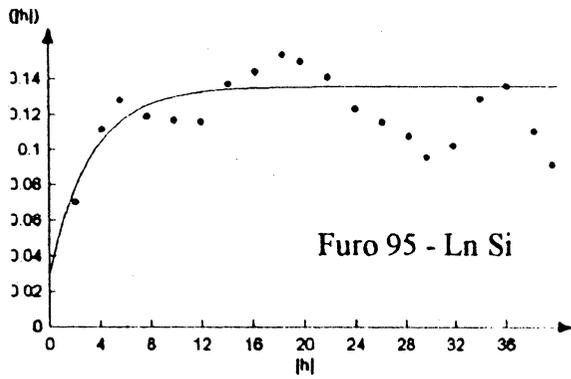


Fig. - 36: Variogramas direcionais ao longo dos furos de sondagem, com lag de 2m e número de lags igual a 20m.

COMPARTIMENTO CD-1

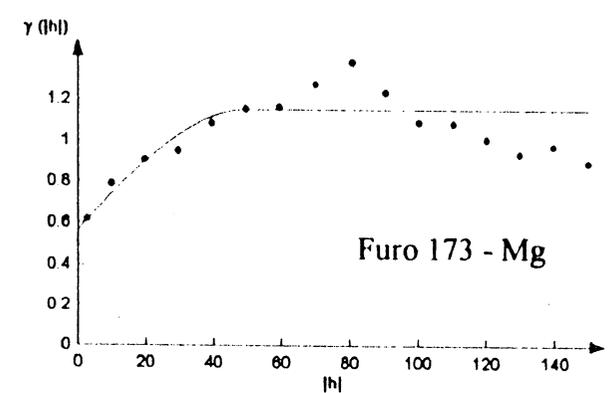
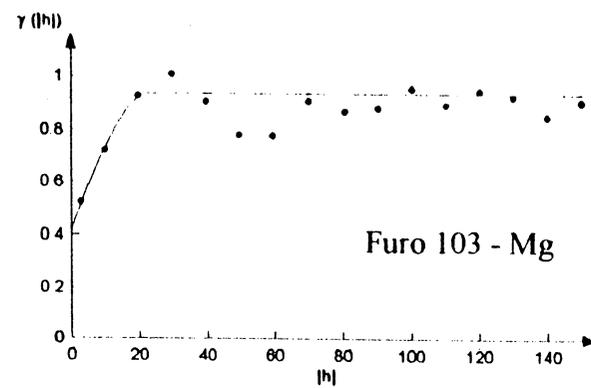
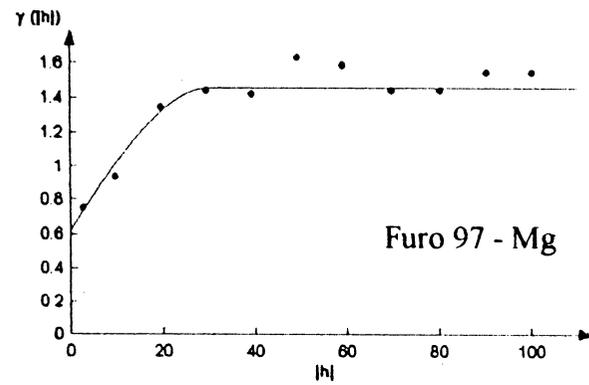
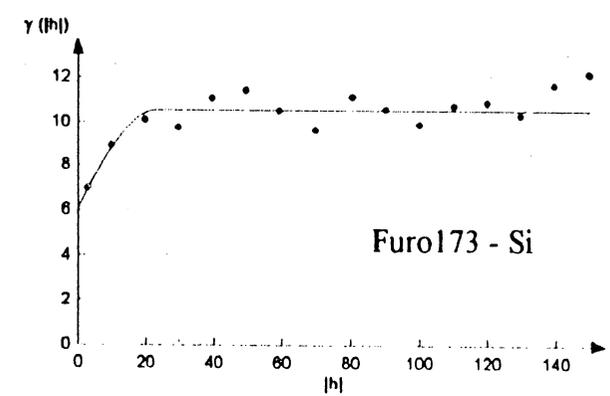
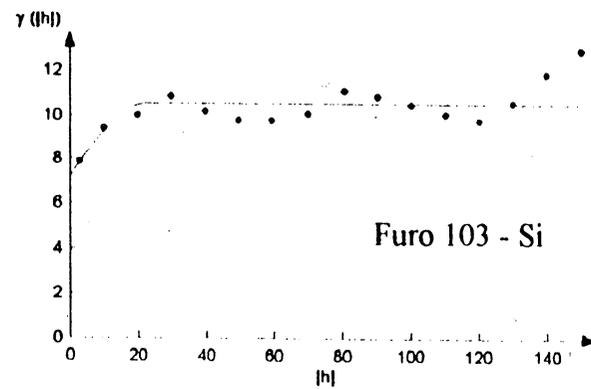
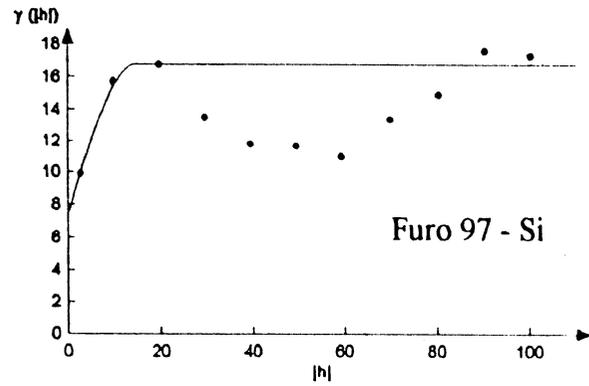
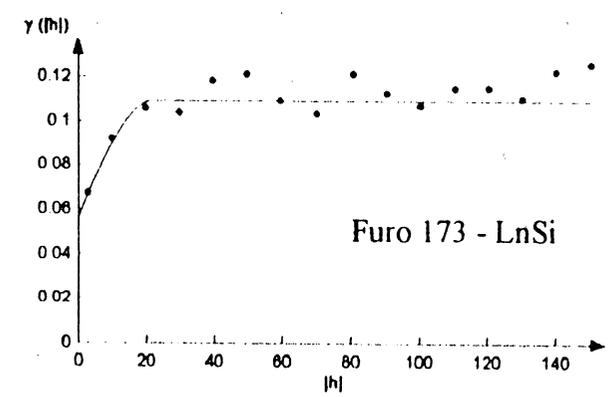
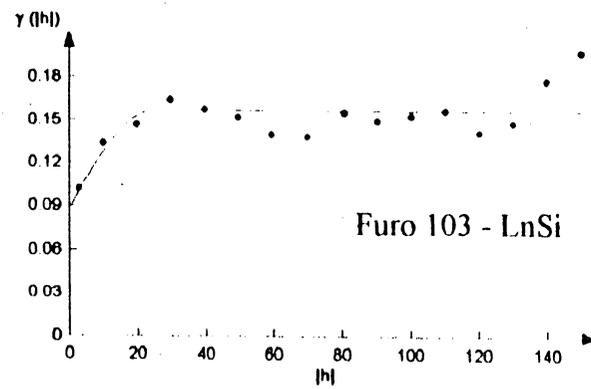
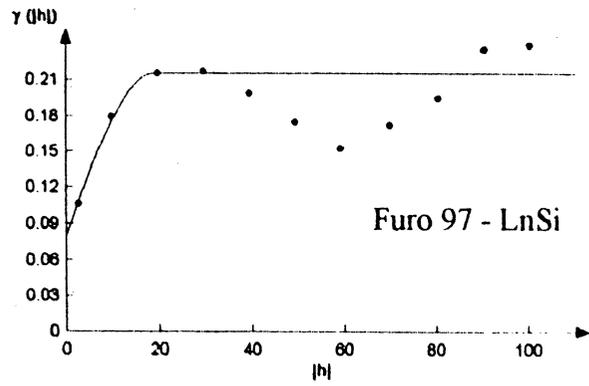


Fig. - 37: Variogramas direcionais ao longo dos furos de sondagem, com *lag* de 10m e número de *lags* igual a 15m.

COMPARTIMENTO CM-2

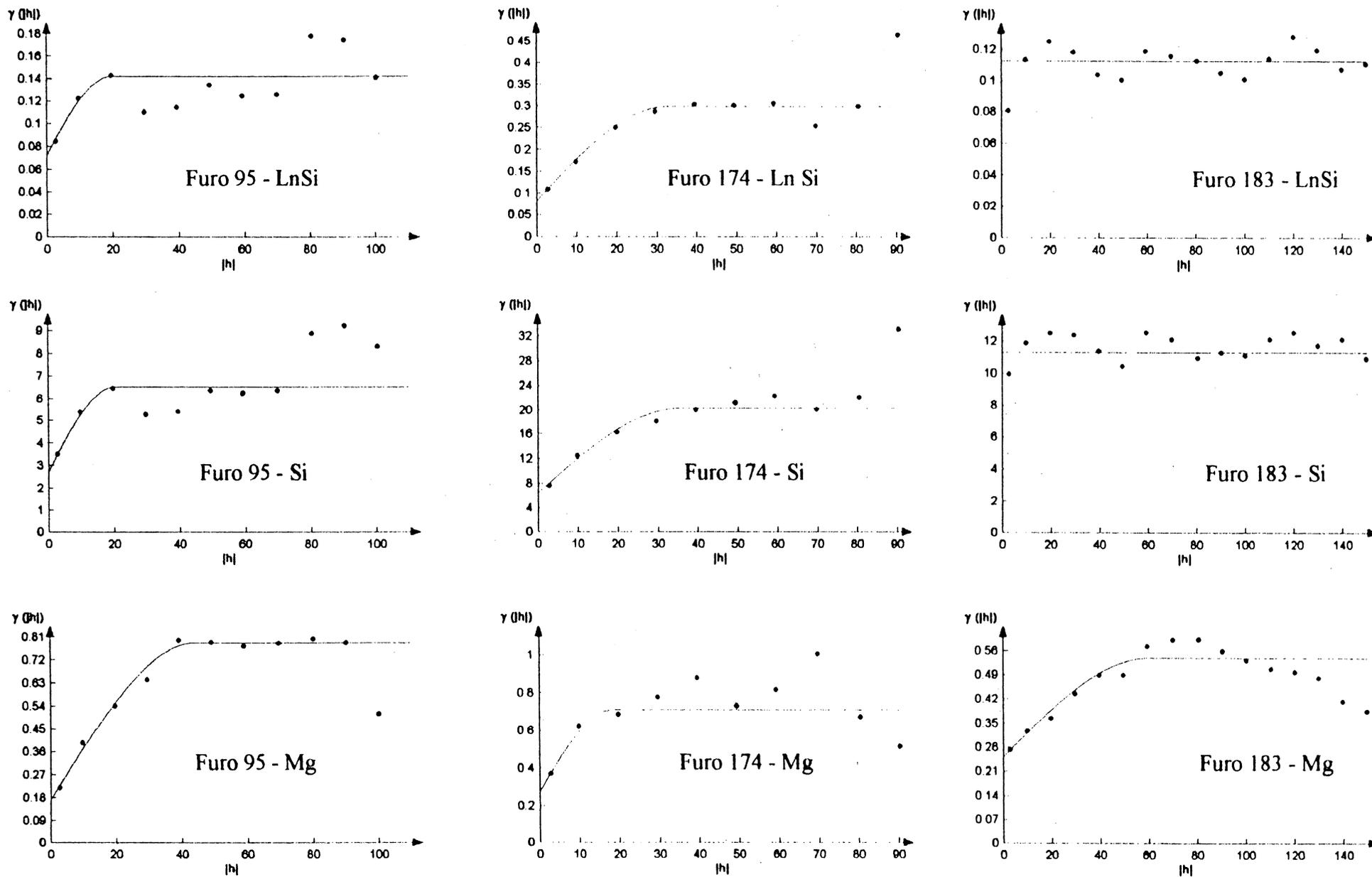


Fig. - 38: Variogramas direcionais ao longo dos furos de sondagem, com lag de 10m e número de lags igual a 15m.

Os parâmetros destes variogramas podem ser vistos nas tabelas abaixo.

FURO	ÓXIDO	MODELO	C0 (nugget)	ALCANCE (range)	PATAMAR (C + C0)
97	LnSi	Esférico	0.001	6.73	0.18
97	Si	Esférico	0.54	5.2	15.42
97	Mg	Esférico	0.61	31.26	1.52
103	LnSi	Exponencial	0.041	10.95	0.14
103	Si	Exponencial	1.56	6.55	10.32
103	Mg	Exponencial	0.33	26.40	0.99
173	LnSi	Exponencial	0.048	20.40	0.1
173	Si	Exponencial	4.29	11.13	9.9
173	Mg	Exponencial	0.44	18.79	0.95

Tabela - 12: Parâmetros dos variogramas para o compartimento CD1, com $lag=2m$ e número de $lags=20m$ (referente a figura - 35).

FURO	ÓXIDO	MODELO	C0 (nugget)	ALCANCE (range)	PATAMAR (C + C0)
95	LnSi	Exponencial	0.03	9.99	0.13
95	Si	Exponencial	1.44	11.19	6.19
95	Mg	Exponencial	0.07	20.79	0.56
174	LnSi	Exponencial	0.02	15.38	0.24
174	Si	Exponencial	2.18	14.58	16.46
174	Mg	Exponencial	0.13	13.69	0.70
183	LnSi		0.04	Efeito pepita puro	
183	Si	Exponencial	6.72	8.85	12.48
183	Mg	Exponencial	0.19	13.16	0.35

Tabela - 13: Parâmetros dos variogramas para o compartimento CM2, com $lag=2m$ e número de $lags=20m$ (referente a figura - 36).

FURO	ÓXIDO	MODELO	C0 (nugget)	ALCANCE (range)	PATAMAR (C + C0)
97	LnSi	Esférico	0.08	18.95	0.21
97	Si	Esférico	7.45	14.55	16.79
97	Mg	Esférico	0.63	30.29	1.45
103	LnSi	Esférico	0.08	24.34	0.14
103	Si	Esférico	7.28	22.38	10.58
103	Mg	Esférico	0.42	23.07	0.93
173	LnSi	Esférico	0.05	21.69	0.10
173	Si	Esférico	6.16	22.84	10.58
173	Mg	Esférico	0.57	49.38	1.15

Tabela - 14: Parâmetros dos variogramas para o compartimento CD1, com $lag=10m$ e número de $lags=15m$ (referente a figura - 37).

FURO	ÓXIDO	MODELO	C0 (<i>nugget</i>)	ALCANCE (<i>range</i>)	PATAMAR (C + C0)
95	LnSi	Esférico	0.07	19.71	0.13
95	Si	Esférico	2.77	20.22	6.53
95	Mg	Esférico	0.17	44.67	0.78
174	LnSi	Esférico	0.08	32.48	0.29
174	Si	Esférico	6.53	35.98	20.40
174	Mg	Esférico	0.28	18.26	0.71
183	LnSi		0.11	Efeito pepita puro	
183	Si		11.31	Efeito pepita puro	
183	Mg	Esférico	0.25	60.0	0.53

Tabela - 15: Parâmetros dos variogramas para o compartimento CM2, com $lag=10m$ e número de $lags=15m$ (referente a figura - 38).

Os principais resultados obtidos destes variogramas permitem notar que:

- As análises com suporte de 1 metro são caracterizadas por uma grande variabilidade nos teores, que pode ser identificada pelo fato de que ocorre um aumento no efeito pepita. Isto pode ser resolvido quando se aumenta o *lag* de 2 a 5 metros, reduzindo assim também o número de amostras e o erro de estimação.
- Para os variogramas com *lag* pequeno (2m), a zona de influência (alcance), para estes suportes, mostra que o óxido de sílica tem uma continuidade espacial inferior ao magnésio, que apresenta valores de alcance ligeiramente mais elevados.
- Variogramas locais mostram, heterogeneidades em menor escala na jazida, com maior variabilidade nos furos dos perfis 210 e 214. Este fato pode ser atribuído a maior heterogeneidade litológica e estrutural desta porção da área, pois como pode ser verificado no mapa geológico superficial da mina, há uma maior concentração de diques de diabásio nesta posição.
- Os variogramas para *lags* menores sugerem a presença de mais de um fenômeno de regionalização, que pode ser atribuído a variações geológicas de pequena escala (litologias). Esta heterogeneidade geológica pode ser atribuída

ao ambiente de sedimentação das rochas que compõe a sequência Saivá, ao qual é atribuída uma sedimentação marinha em plataformas carbonáticas rasas, abaixo do nível de ação das ondas, onde é comum a intercalação de cunhas pelíticas (terrígenos).

- Os variogramas direcionais realizados ao longo da direção das sondagens, com número de *lags* de 15m, permitem afirmar que há um comportamento mais homogêneo nesta direção, de tal forma que o alcance para estas direções só ocorre a distâncias maiores.
- Tanto os variogramas para *lag* pequeno (2m) quanto para os de *lag* maior (10m) sugerem a presença de uma pequena anisotropia zonal. Entretanto esta característica reflete variações ao longo da sondagem e não pode ser atribuída a diferenças no comportamento espacial de um determinado óxido para toda a área. Este fato deve-se a que um único variograma direcional não é representativo do depósito.
- Em ambos variogramas (*lags* menores e maiores), eventualmente pode ser notado a presença do "efeito buraco", que deve estar associado a uma ciclicidade no fenômeno geológico.

O último passo nesta etapa, foi realizar uma variografia exploratória tridimensional (3D) propriamente dita. Para tanto foi utilizado o *software GSLIB - Geostatistical Software Library* (Deutsch e Journel, 1996).

Esta variografia, assim como na etapa anterior foi realizada de maneira a cobrir todas as direções possíveis, entretanto aumentou-se o número de ângulos de tolerância, com o intuito obter informações de pares de amostras que por ventura estivessem na interface de um cone de busca. Desta forma houve a sobreposição de áreas de busca, cujos ângulos foram de 22.5°, com um tolerância angular de 22.5°.

A figura 39 mostra as direções de variografia realizada com a *Gslib*, que ao contrário do *software* utilizado na etapa anterior (*Variowin*), faz a varredura em busca de pares de amostras no sentido horário.

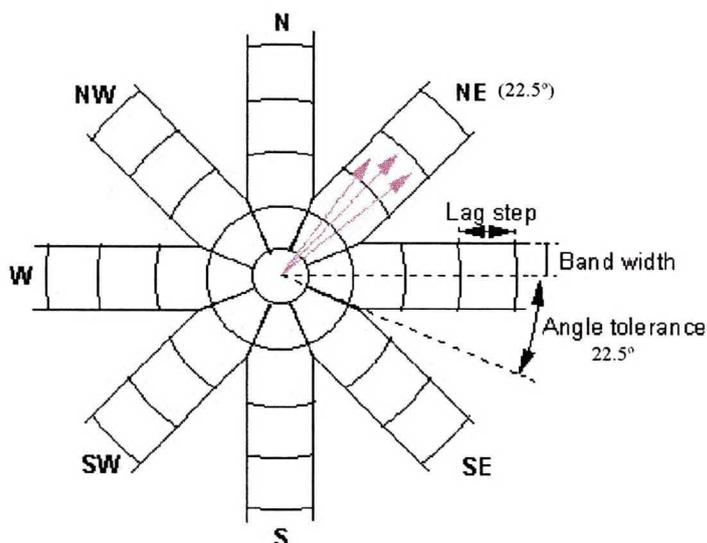


Fig. - 39: Direções e ângulos de tolerância da variografia exploratória realizada com a *GSLIB*

O resultado desta variografia, como já era esperado, evidenciou que apenas os variogramas com direções próximas as das sondagens apresentaram uma boa estrutura de covariância.

Entretanto, a fim de definir os parâmetros variográficos a serem utilizados na estimação por krigagem, foram feitos variogramas com todos os dados, ao longo das direções dos furos de sondagens (azimute 125° e mergulho 45°), referentes aos compartimentos CD1 e CM2, para os óxidos de Si e Mg (Fig. - 40).

Esta decisão foi tomada em virtude do que já foi visto anteriormente, que é o fato de que um único furo é menos representativo do comportamento espacial das variáveis ao longo de todo o depósito.

Os parâmetros destes variogramas podem ser vistos na tabela abaixo:

COMPARTIMENTO	ÓXIDO	MODELO	LAG	Nº LAG	C0 (nugget)	ALCANCE (range)	PATAMAR (C + C0)
CD1	Si	esférico	10	20	9.16	83.89	14.27
CD1	Mg	esférico	10	20	0.65	41.23	1.29
CM2	Si	esférico	10	20	9.46	42.46	19.22
CM2	Mg	esférico	10	20	0.37	38.97	0.99

Tabela 16: Parâmetros dos variogramas utilizados para as estimativas, referentes aos compartimentos CD1 e CM2.

Os resultados obtidos com as estimações por krigagem serão discutidos no capítulo seguinte.

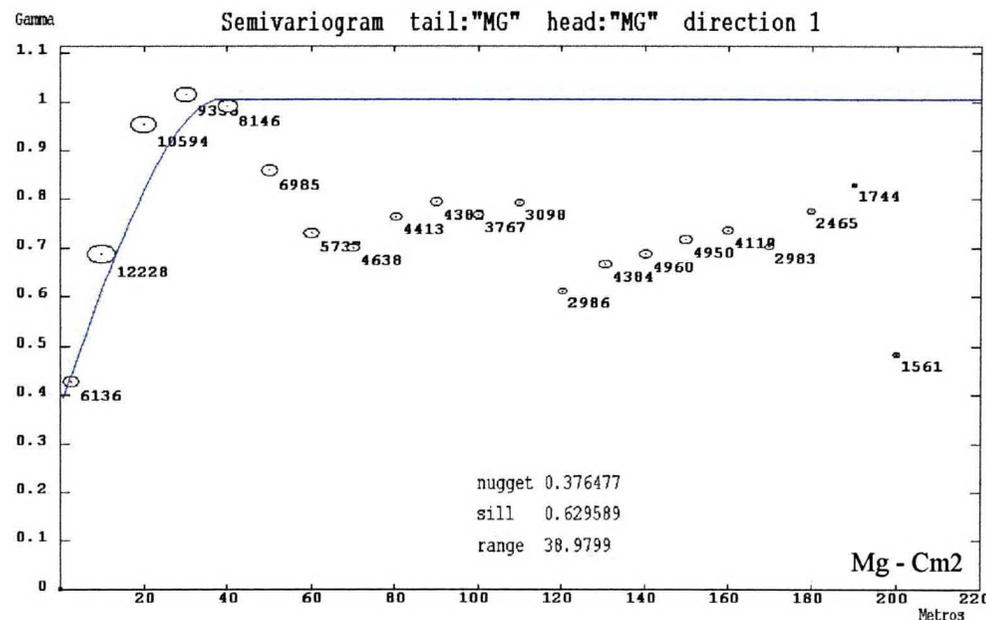
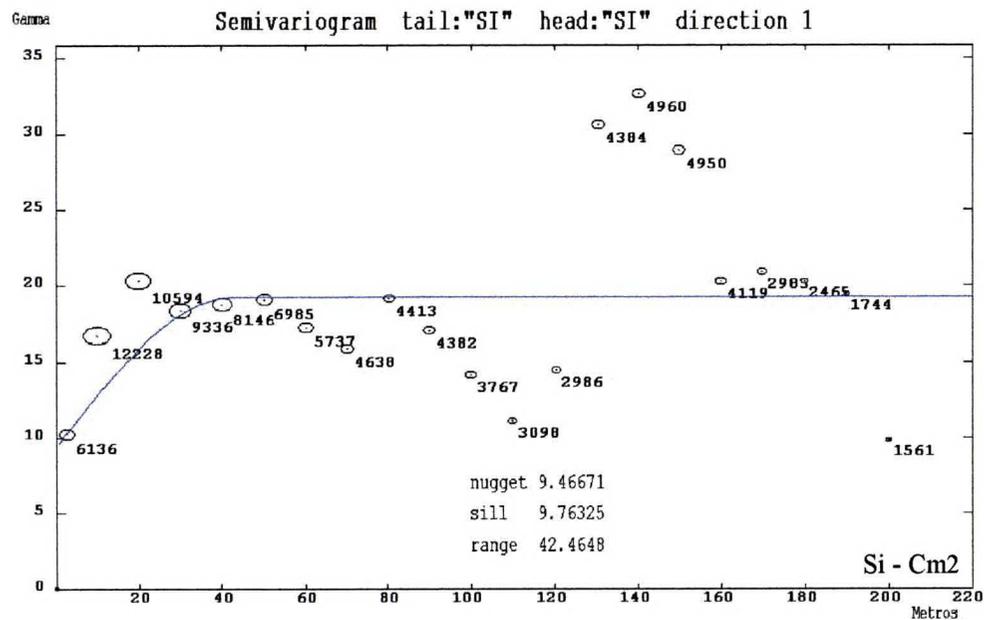
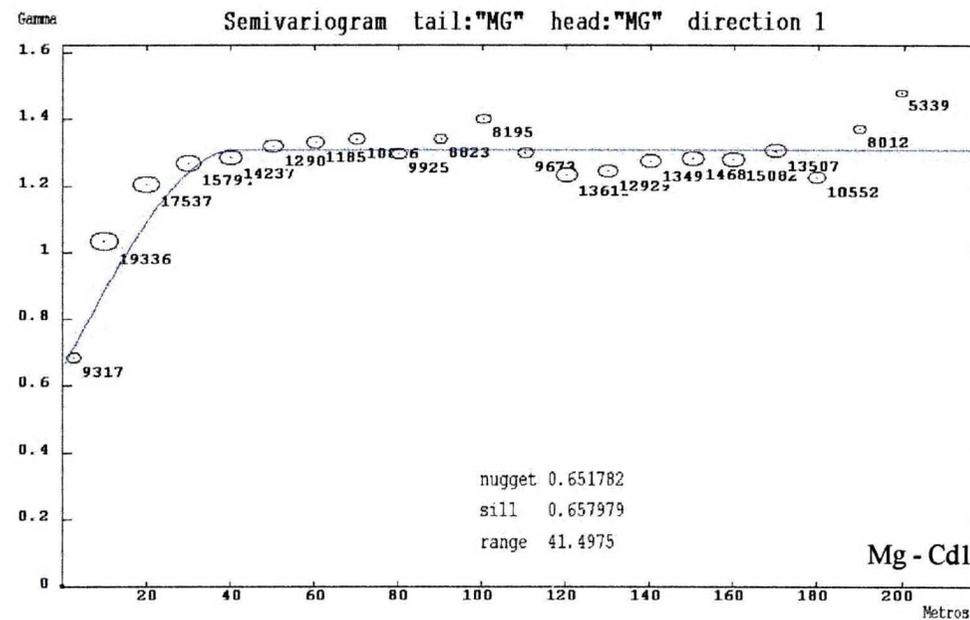
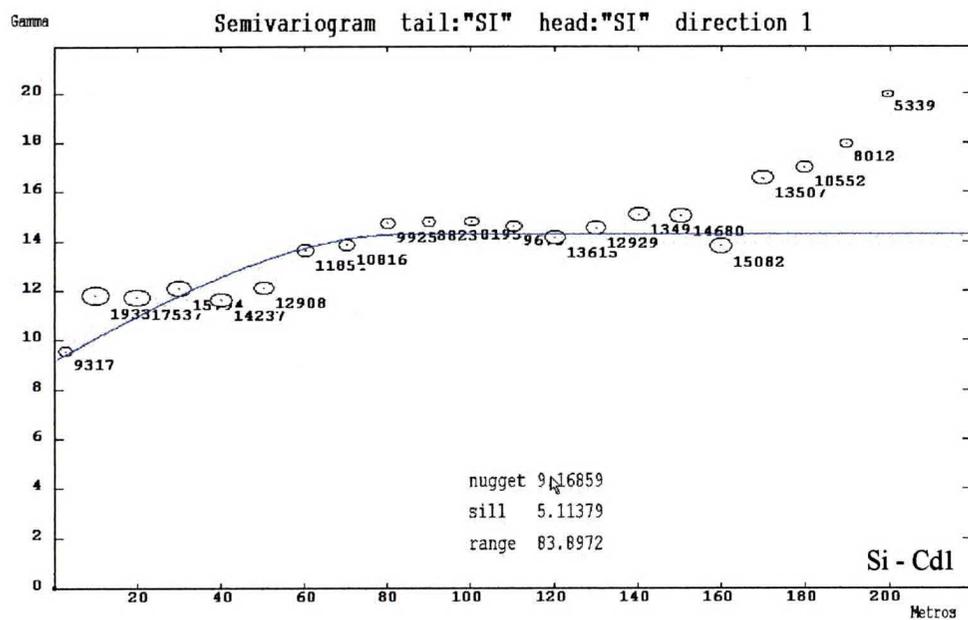


Fig. - 40: Variogramas modelados ao longo da direção das sondagens (variografia 3D, azimute 125° e mergulho 45°), para os óxidos de Si e Mg, nos compartimentos Cd1 e Cm2.

CAPÍTULO 6

MODELOS DE ESTIMATIVA

6.1 - KRIGAGEM ORDINÁRIA POR BLOCOS

Nesse estudo utilizou-se um método de estimativa denominado krigagem ordinária. A principal proposta desse método de estimativa é fornecer uma resposta não tendenciosa, obtida a partir da minimização da variância da estimativa, proporcionando um estimador otimizado. Ao método, está associado a sigla **BLUE**. (*Best Linear Unbiased Estimator*) traduzida por melhor estimador linear não tendencioso, que pode ser explicado da seguinte maneira:

Linear: Devido ao fato das estimativas serem combinações lineares, atribuindo pesos, aos dados disponíveis;

Não tendenciosa: Porque faz com que a média dos erros seja igual a zero;

Melhor: Porque minimiza a variância do erro.

Krigagem é definida como um conjunto de métodos de regressão linear que minimizam a variância da estimativa, a partir da solução de um sistema de equações lineares considerando a relação espacial (covariância) entre as amostras (Olea, 1991).

A diferença básica desse método de estimativa em relação à outros métodos é justamente a minimização da variância do erro. A krigagem, porém, se propõe a um

objetivo que em senso prático se faz inatingível uma vez que a média e a variância dos erros é sempre desconhecida (Isaaks & Srivastava, 1989). Isto se deve ao fato de não termos acesso ao valor verdadeiro ao realizarmos a estimativa de uma determinada área. Portanto se não é conhecida a média dos erros não se pode garantir que essa será igual a zero e nem podemos minimizar a variância dos erros porque essa também é desconhecida.

Em krigagem ordinária faz-se uso de um modelo probabilístico onde a influência e a variância do erro do modelo podem ser calculados, atribuindo pesos às amostras vizinhas certificando que a média dos erros do modelo venha a ser zero bem como a variância dos erros modelada seja minimizada. Por apresentar independência dos dados amostrais, a variância de krigagem pode somente propor alternativas de disposição das amostras no espaço e não deve ser utilizada como uma medida de acuracidade para uma estimativa.

A teoria em que está baseada a ferramenta com a qual foram gerados os resultados desse trabalho, denominada Krigagem, está extensivamente descrita por autores tais como: Isaaks & Srivastava (1989), Journel & Huijbregts (1978), David (1977, 1988).

Ao se mencionar a realização de um modelo, se está admitindo inferências a respeito de locais dentro da área de interesse onde assumem-se valores estipulados por esse modelo, uma vez que são conhecidos somente os pontos condicionantes correspondentes às amostras. Para estimativa de valores em pontos desconhecidos serão utilizados modelos de função randômica, os quais se baseiam em características estatísticas do fenômeno. A avaliação do modelo gerado só será ratificada pela presença de dados adicionais que venham a corroborar a estimativa realizada.

Citando-se que qualquer informação adicional quantitativa (valores amostrais adicionais) ou qualitativa (informações a respeito do fenômeno de formação) que se puder

dispor é considerada bem vinda para o esclarecimento do modelo. Uma vez que estamos lidando com probabilidades e incertezas associadas ao modelo, define-se aqui uma abordagem geoestatística da estimativa.

Em modelos probabilísticos os dados disponíveis são tidos como resultados gerados por um processo aleatório. Embora muitos fenômenos relacionados à geociências não sejam relacionados a processos simplesmente denotados randômicos, o uso dessa associação é de grande utilidade para o problema de estimativa, uma vez que não se pode dispor de modelos determinísticos para descrever o comportamento de uma variável em qualquer ponto do espaço nesse campo de estudo.

Para tanto a solução probabilística para esse problema consiste da conceitualização de valores desconhecidos que partem de um processo randômico. A resposta parte de um modelo teórico, onde para qualquer ponto desconhecido, o modelo é representado por uma função randômica estacionária que é gerada a partir de diversas variáveis randômicas, atribuídas a cada um dos valores amostrais disponíveis no banco de dados. Qualquer par de variáveis randômicas que tenha uma distribuição conjunta depende somente da direção e magnitude do vetor h que separa os dois pontos e não da sua localização.

A equação 9 descreve o sistema de krigagem, na forma de matriz. A dedução do sistema de krigagem e as hipóteses assumidas até atingir a forma de relação apresentada pela equação 10 pode ser encontrada em Isaaks & Srivastava (1989 - pag 278 a 289).

$$\begin{bmatrix} \tilde{C}_{11} & \cdots & \tilde{C}_{1n} & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \tilde{C}_{n1} & \cdots & \tilde{C}_{nn} & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{C}_{10} \\ \vdots \\ \tilde{C}_{n0} \\ 1 \end{bmatrix} \quad 9$$

Essa equação pode ser simplificada como:

$$C \cdot w = D \quad 10$$

onde:

C: representa a matriz das covariâncias entre todos os pontos

W: a matriz incógnita contendo os pesos

D: representa a matriz das covariâncias dos pontos com o ponto a estimar (origem).

A solução do sistema se dá da seguinte maneira:

$$C \cdot w = D$$

$$C^{-1} \cdot C \cdot w = C^{-1} \cdot D \quad 11$$

$$I \cdot w = C^{-1} \cdot D$$

$$w = C^{-1} \cdot D$$

onde:

C^{-1} : inversa da matriz C

I : matriz identidade

Quando assumiu-se pelo modelo de função randômica a mesma média e variância para qualquer variável randômica pode-se obter uma relação entre o variograma e a covariância (equação 12).

$$\tilde{\gamma}_{ij} = \tilde{\sigma}^2 - \tilde{C}_{ij} \quad 12$$

Esse sistema está expresso em termos da covariância entre pares de amostras. Para modelar o sistema em termos do variograma, basta substituir nas expressões a covariância, pela expressão que define o variograma.

$$\left\{ \sum_{j=1}^n w_j \tilde{\gamma}_{ij} - \mu = \tilde{\gamma}_{i0} \quad \forall i = 1, \dots, n \right.$$

O sistema descrito na equação diz respeito a krigagem por pontos, porém para krigagem por blocos o sistema é essencialmente o mesmo, exceto pelo fato da representação do variograma médio entre os dados amostrais e o bloco. Isto se verifica em termos práticos pela discretização de pontos dentro do bloco onde cada ponto abrange um mesmo volume de influência.

Para os modelos gerados neste trabalho, foram discretizados 4 x 4 x 4 pontos para o modelo de blocos com dimensões de 30 x 30 x 15 m, assim como para o modelo de 10 x 10 x 15 m, respectivamente para os eixos x, y, z do referencial de coordenadas.

A figura 41 apresenta um esquema com o funcionamento da krigagem por blocos. Os

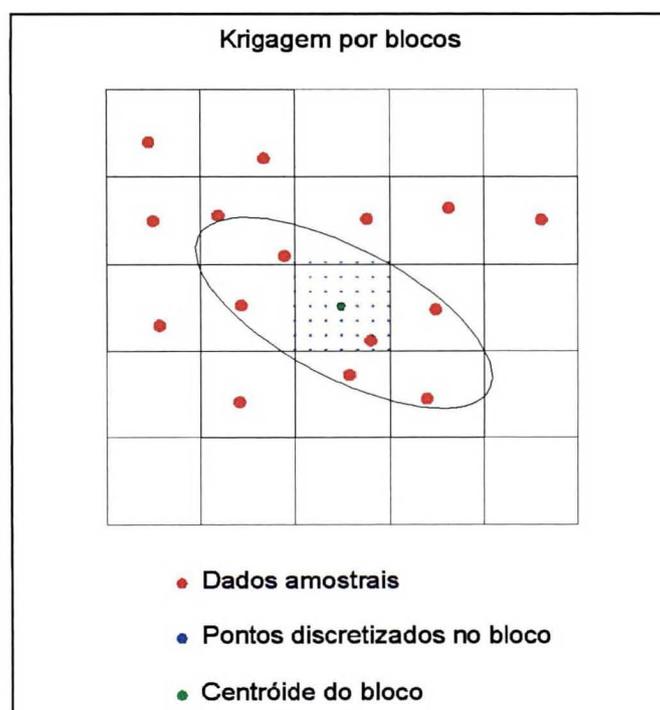


Figura 41- Krigagem por blocos.

pontos amostrais inseridos na elipse de busca são levados em consideração na estimativa de cada um dos pontos discretizados considerando todos os atributos da krigagem, tais como distância do ponto, concentração de pontos, etc.

A partir de cada um dos pontos discretizados estimados é feita uma média aritmética desses, considerando que cada um ocupa uma mesma área (ou volume em três dimensões) dentro do bloco a estimar. O ponto que representa o centróide do bloco contém a média aritmética dos pontos discretizados e assume o valor estimado para o bloco.

6.2 - MODELOS DE BLOCOS

A partir da definição dos modelos geológicos e variográficos, foi estabelecida uma estratégia para a construção de modelos de blocos de diferentes dimensões, com o respectivo parâmetro de qualidade (teor) associado às unidades de lavra. A geração de modelos com diferentes dimensões de blocos permitiu a análise e comparação para seleção daquele que proporcione um melhor ajuste ao modelo geológico e, ao mesmo tempo, represente adequadamente a variabilidade dos teores na mina.

A geração destes modelos de diferentes dimensões corresponde ao que se chamou de modelos de estimativa, uma vez que todo o desenvolvimento, análise de resultados e conclusões estão baseadas na comparação da seletividade e operacionalidade que uma determinada dimensão de blocos venha a produzir.

Para tanto serão apresentados quatro modelos distintos. O primeiro modelo refere-se às estimativas feitas para blocos de 10x10x15, com intuito principal de verificar os problemas oriundos da amostragem heterogênea nas estimativas. Nesta etapa foram utilizados os parâmetros variográficos obtidos em modelos com alcance menor nos variogramas direcionais ao longo dos furos.

O segundo modelo trata de uma comparação entre os resultados obtidos da estimativa de blocos de 10x10x15 com blocos de 30x30x15, além da variação dos parâmetros variográficos estabelecidos. Nesta etapa utilizou-se modelos de regionalização mais amplos (maior alcance).

O terceiro modelo de estimativa, chamado de modelagem global, baseou-se no somatório dos principais corpos de minério, desconsiderando a compartimentação do minério nos corpos CD1, CM1 e CM2. O mesmo foi realizado devido ao fato de que as estimativas, com base nos dois primeiros modelos, mostram variações nas distribuições dos óxidos, que sugerem uma compartimentação diferente dos valores limites estabelecidos para os tipos de minério definidos na regionalização inicial. Embora tal variação seja mais evidente na distribuição da sílica, observou-se que para o compartimento CD1, localmente encontram-se valores maiores que 10% tanto para o SiO quanto para MgO. Da mesma forma, para o compartimento CM2, também foram observados valores de SiO maiores que 10% e valores de MgO maiores que 4%.

Cabe ressaltar, que a regionalização estabelecida para estes compartimentos, conforme já foi visto anteriormente, prevê teores de MgO entre 4% e 10%, e de SiO menores que 10% para o compartimento CD1 e, para o compartimento CM2, valores de MgO menores que 4% e SiO menores que 10% (vide tabela 2 do capítulo 3).

Desta forma, fez-se a estimativa com base no modelo global com o objetivo de validação e comparação entre as diferentes regionalizações propostas para o depósito.

O quarto e último modelo de estimativa visa quantificar e representar a anisotropia presente no depósito, considerando o fenômeno geológico, a disposição das camadas e a forma de distribuição espacial dos óxidos.

Com o intuito de realizar uma comparação e validação desta última etapa com os modelos anteriormente estabelecidos, procurou-se manter a mesma dimensão para os tamanhos dos blocos, ou seja, bloco de 10x10x15m. Assim como o modelo anterior, os dados utilizados para esta estimativa são o somatório dos principais corpos de minério.

Convém salientar que tais estimativas foram realizadas utilizando-se somente os óxidos de sílica e magnésio, que são os elementos que definem qualitativamente os tipos de minério na jazida e incluem níveis dos corpos já minerados, bem como níveis ainda não minerados.

6.2.1 - PRIMEIRA ESTIMATIVA - MODELO DE 10x10x15M

Primeiramente realizou-se uma krigagem para blocos cujas dimensões mais se aproximassem aos tamanhos de blocos atualmente utilizados na lavra, que é de 7x12,5x15m. Em relação a estes, os blocos de dimensão 10x10x15m, não representam uma diferença significativa em termos operacionais, entretanto para fins de representação espacial e processamento dos dados são mais adequados ao fenômeno isotrópico considerado (dimensão de 10m para as direções x e y e de 15m para z, este último correspondente a altura da bancada).

Os dados utilizados para esta primeira estimativa referem-se aos compartimentos geológicos CD1 e CM2. Para tanto utilizou-se os resultados obtidos da variografia na direção 125° e mergulho de 45°, cujos variogramas modelados podem ser vistos na figura 40 do capítulo 5.

As figura 42 e 43 mostram os mapas krigados, e seus respectivos mapas de erro de estimação para o compartimento CD1 e CM2, respectivamente, nos quais foram utilizados os parâmetros variográficos citados acima.

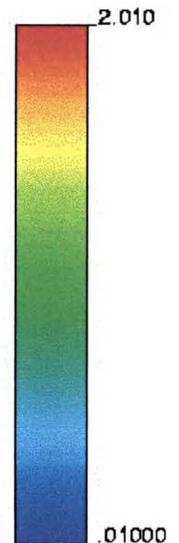
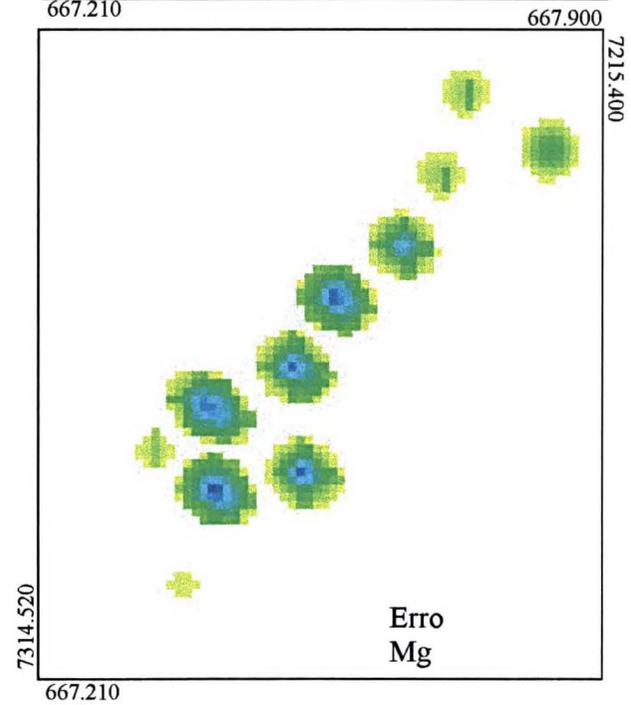
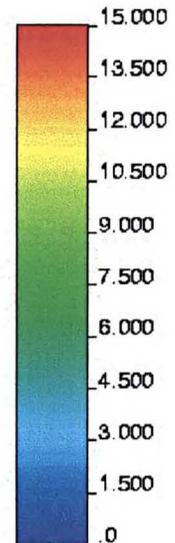
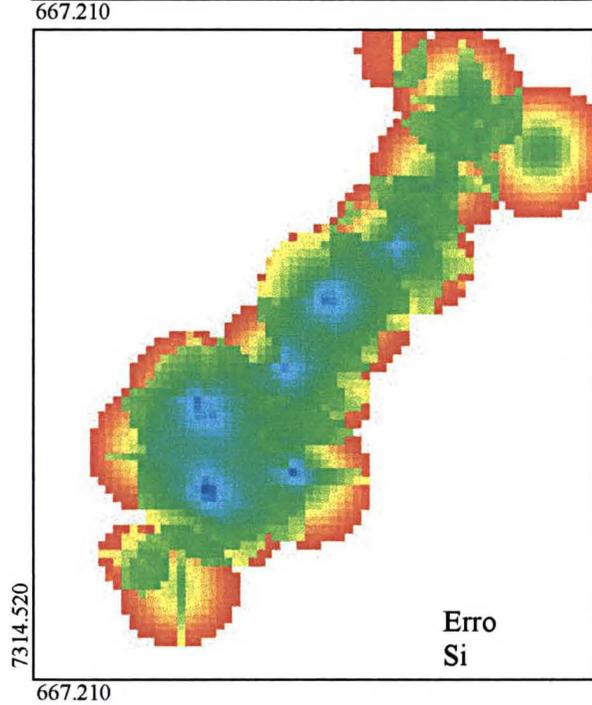
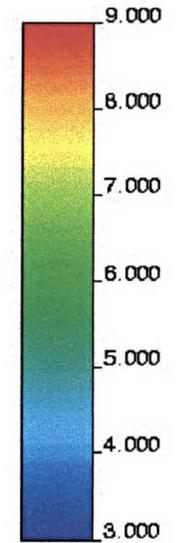
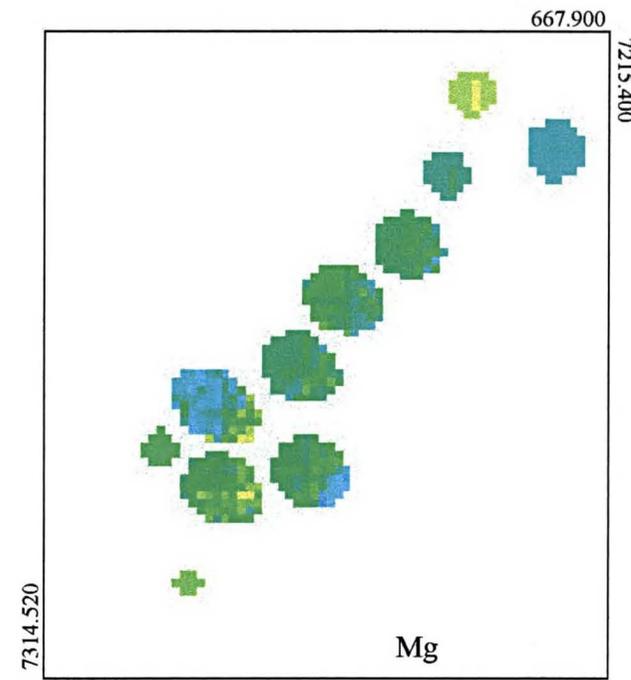
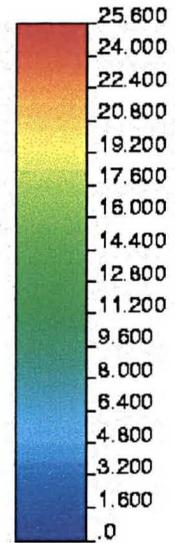
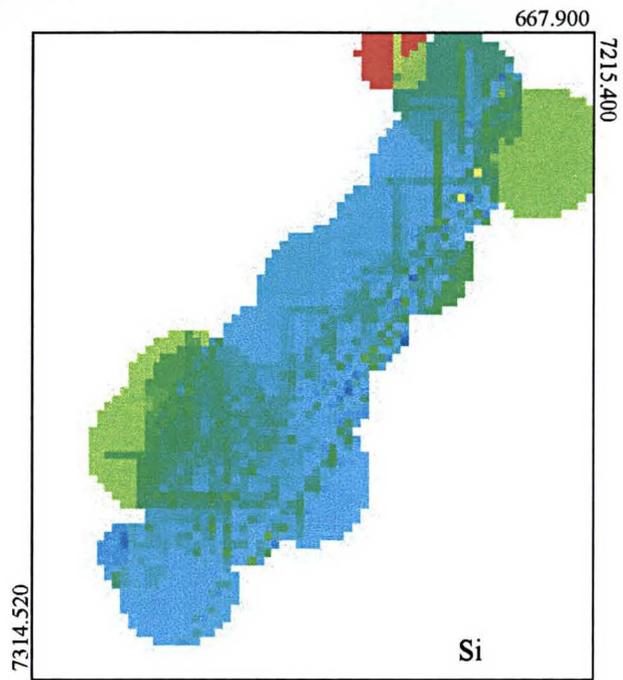
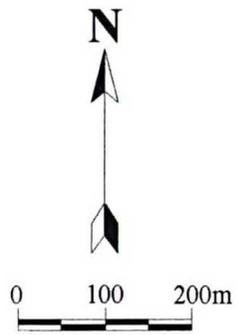


Fig. - 42: Mapas krigados e seus respectivos mapas de erro de estimação, para os óxidos de Si e Mg referente ao compartimento Cd1 Blocos de 10x10x15 / Nível - 945 / Plano xy.

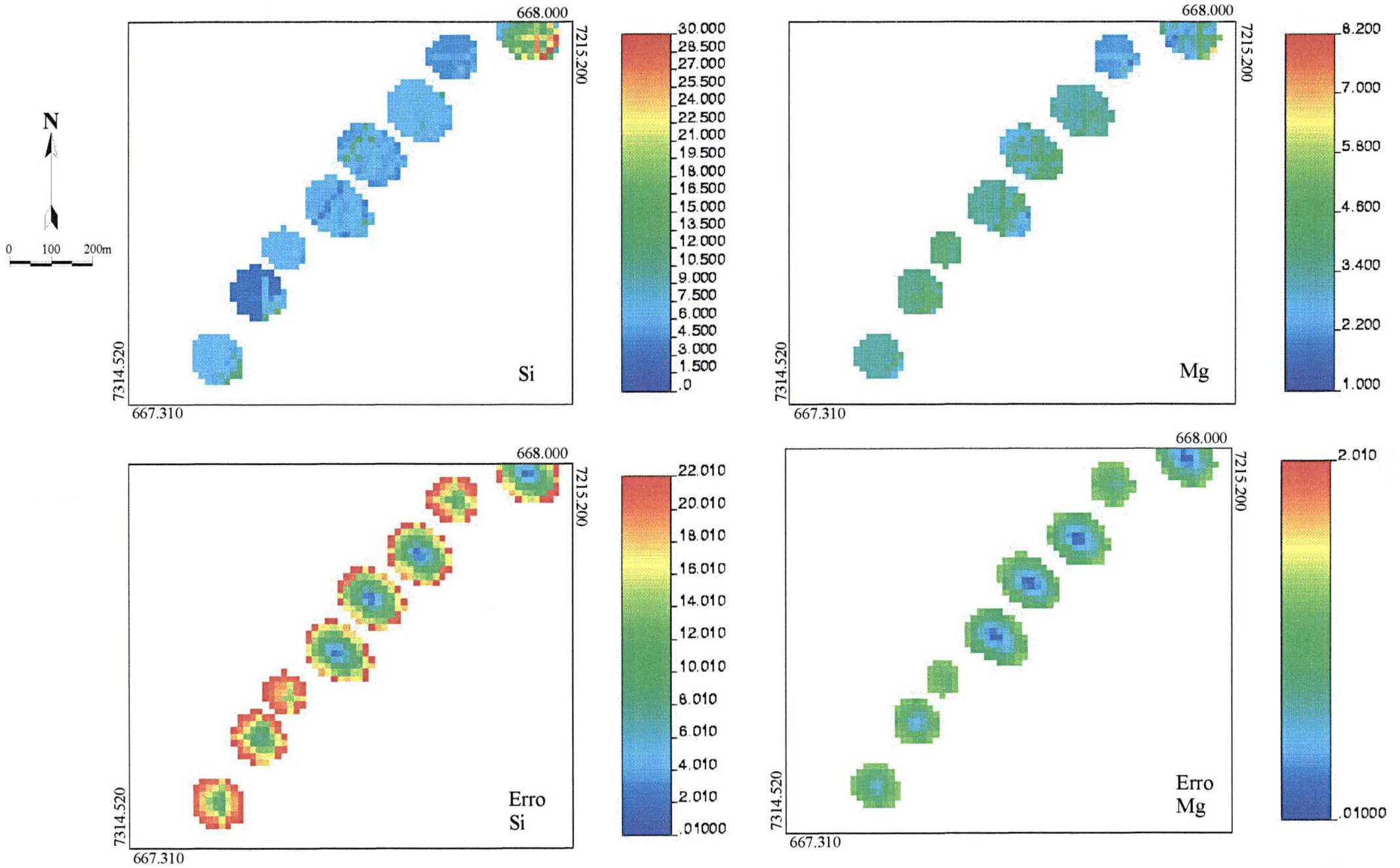


Fig. - 43: Mapas krigados e seus respectivos mapas de erro de estimação, para os óxidos de Si e Mg referente ao compartimento Cm2 Blocos de 10x10x15 / Nível - 945 / Plano xy.

A análise destes mapas permite afirmar que, em função da forte heterogeneidade amostral, há ocorrências de áreas onde não é possível obter resultados da estimativa por krigagem. Isto deve-se ao fato de que o alcance médio dos variogramas gira em torno de 30 a 40 metros, ou seja, muito inferior à distância média entre os furos de sondagem e consequentemente entre os dados amostrais.

A exceção foi para o óxido de sílica para o compartimento CD1, que muito embora seja um elemento mais móvel e suscetível aos processos de metamorfismo superpostos, exibiu alcances maiores (maior continuidade espacial), minimizando o problema da estimativa, claramente verificado para o óxido de magnésio.

A tabela abaixo mostra os resultados obtidos da validação cruzada (módulo *K13D* da *GSLIB*) para esta estimativa. Pode-se notar que a média realizada entre as diferenças dos valores reais e os valores estimados é pouco significativa.

ÓXIDO / COMPARTIMENTO	MÉDIA (validação cruzada)	DESVIO PADRÃO
Si – CD1	4.61 E-4	3.14
Si – CM2	2.56 E-3	3.10
Mg – CD1	-1.71 E-3	0.85
Mg – CM2	-1.29 E-3	0.61

Tabela - 17: Resultados obtidos da validação cruzada para a primeira estimativa.

6.2.2 - SEGUNDA ESTIMATIVA - MODELO DE 10x10x15M E 30x30x15M

Esta segunda krigagem teve como principal objetivo verificar se haviam diferenças significativas nas médias dos valores estimados entre os blocos de 10x10x15m e os de 30x30x15m, bem como verificar a variabilidade dos teores com base em variogramas com maior alcance.

Cabe ressaltar que para o óxido de magnésio foi utilizado um alcance maior, em virtude do problema evidente apresentado na primeira krigagem. Esta decisão não foi e nem pode ser aleatória, está baseada no fato de que alguns variogramas direcionais (*lag* 10m)

para este óxido apresentaram alcances maiores, que chegam a atingir 50 a 60 metros (Figs. - 37 e 38; cap.5), e também no fato de que alguns destes variogramas sugerem a presença de uma segunda estrutura, cujo alcance gira em torno de 60-90 metros (Fig. - 40; cap. 5). Desta forma foram realizados alguns testes e optou-se em utilizar alcances de 80 metros para o óxido de magnésio. Para o óxido de sílica, que não apresentou este problema, foram mantidos os parâmetros estabelecidos inicialmente.

As figuras 44 e 45 mostram os mapas krigados referentes aos blocos de 30x30x15m, para ambos elementos, e seus respectivos mapas de erros, para os compartimentos CD1 e CM2 respectivamente. Igualmente, as figuras 46 e 47 mostram os mapas krigados para os blocos de 10x10x15m.

Inicialmente pode-se notar que o problema apresentado pelo óxido de magnésio, ou seja, a presença de áreas não estimadas, foi solucionado com as alterações realizadas nos parâmetros variográficos.

Com relação aos blocos de 30x30x15, pode-se dizer que não significam um ganho no modelo de estimativa dos dados, pois além de não haver uma redução expressiva das médias dos valores estimados. Este tamanho de bloco também não representa, em termos operacionais, uma melhora na representação da variabilidade dos teores, além do fato de que há uma perda visual na representação gráfica da distribuição dos mesmos.

A tabela 18 apresenta os resultados da validação cruzada para esta estimativa. É importante notar que os blocos de 30x30x15 não reduzem as médias das diferenças dos valores estimados, pelo contrário, pode se notar que há um pequeno aumento destes valores.

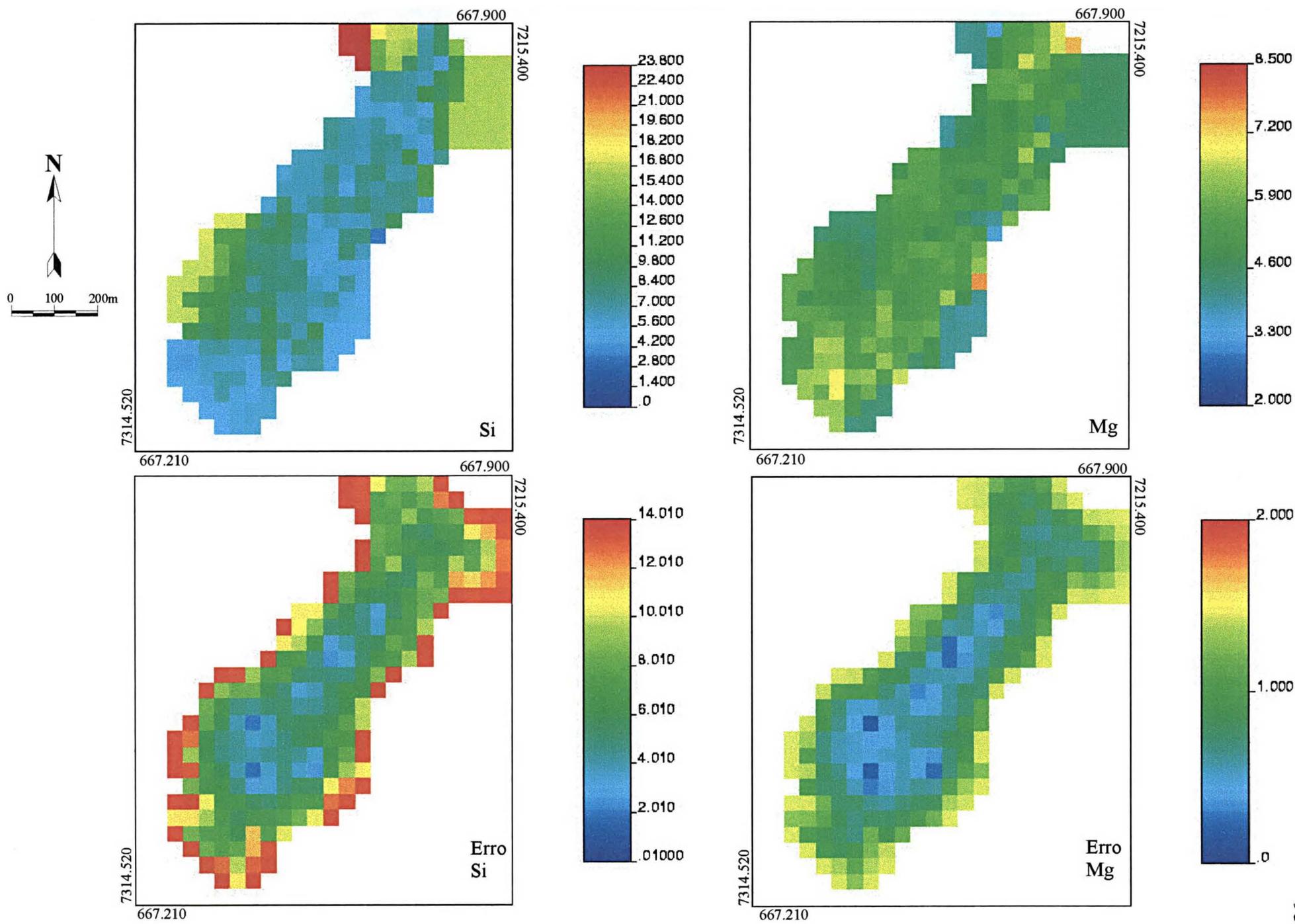


Fig. - 44: Mapas krigados e seus respectivos mapas de erro de estimação, para os óxidos de Si e Mg referente ao compartimento Cd1 Blocos de 30x30x15 / Nível - 945 / Plano xy

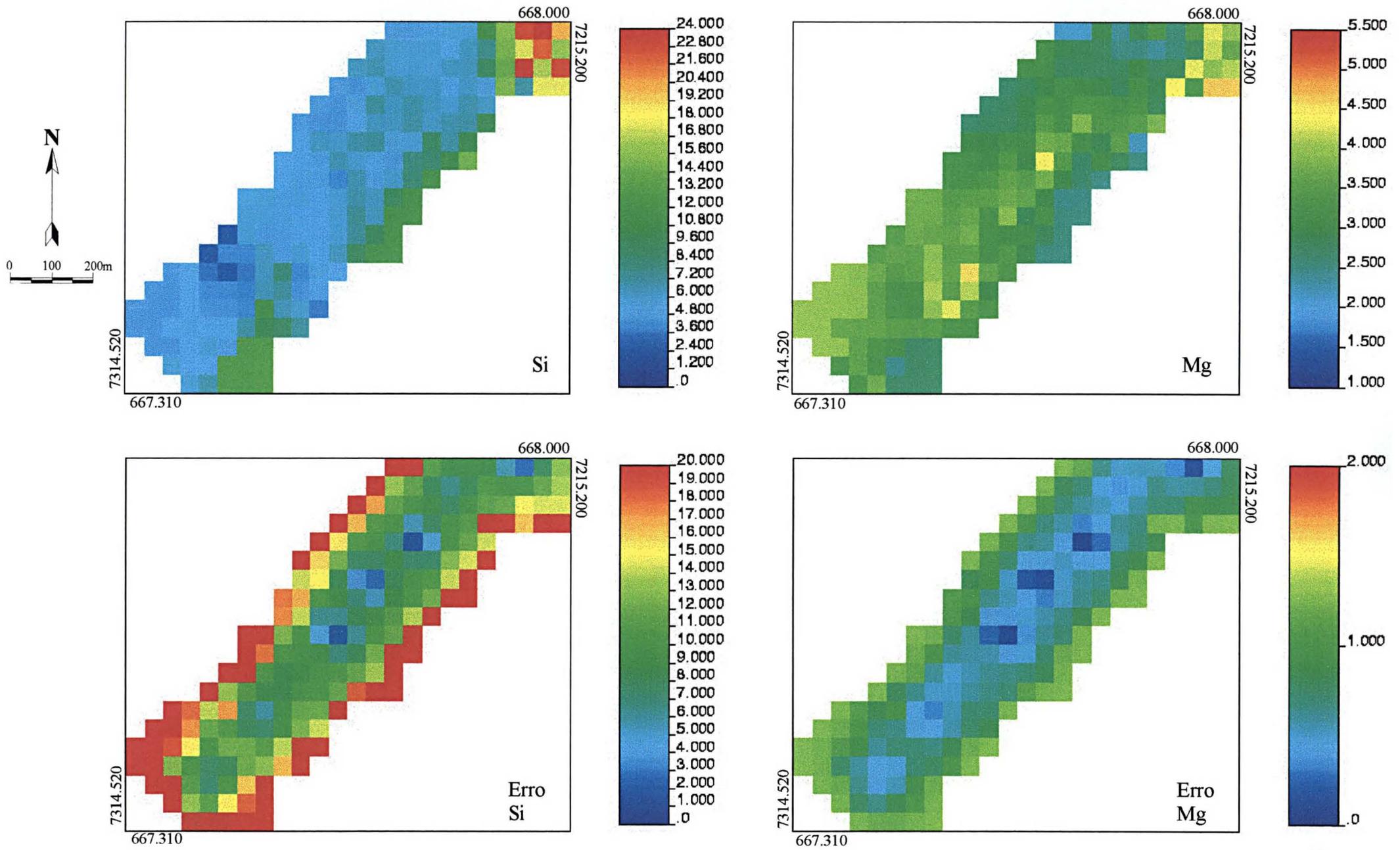


Fig. - 45: Mapas krigados e seus respectivos mapas de erro de estimação, para os óxidos de Si e Mg referente ao compartimento Cm2
 Blocos de 30x30x15 / Nível - 945 / Plano xy

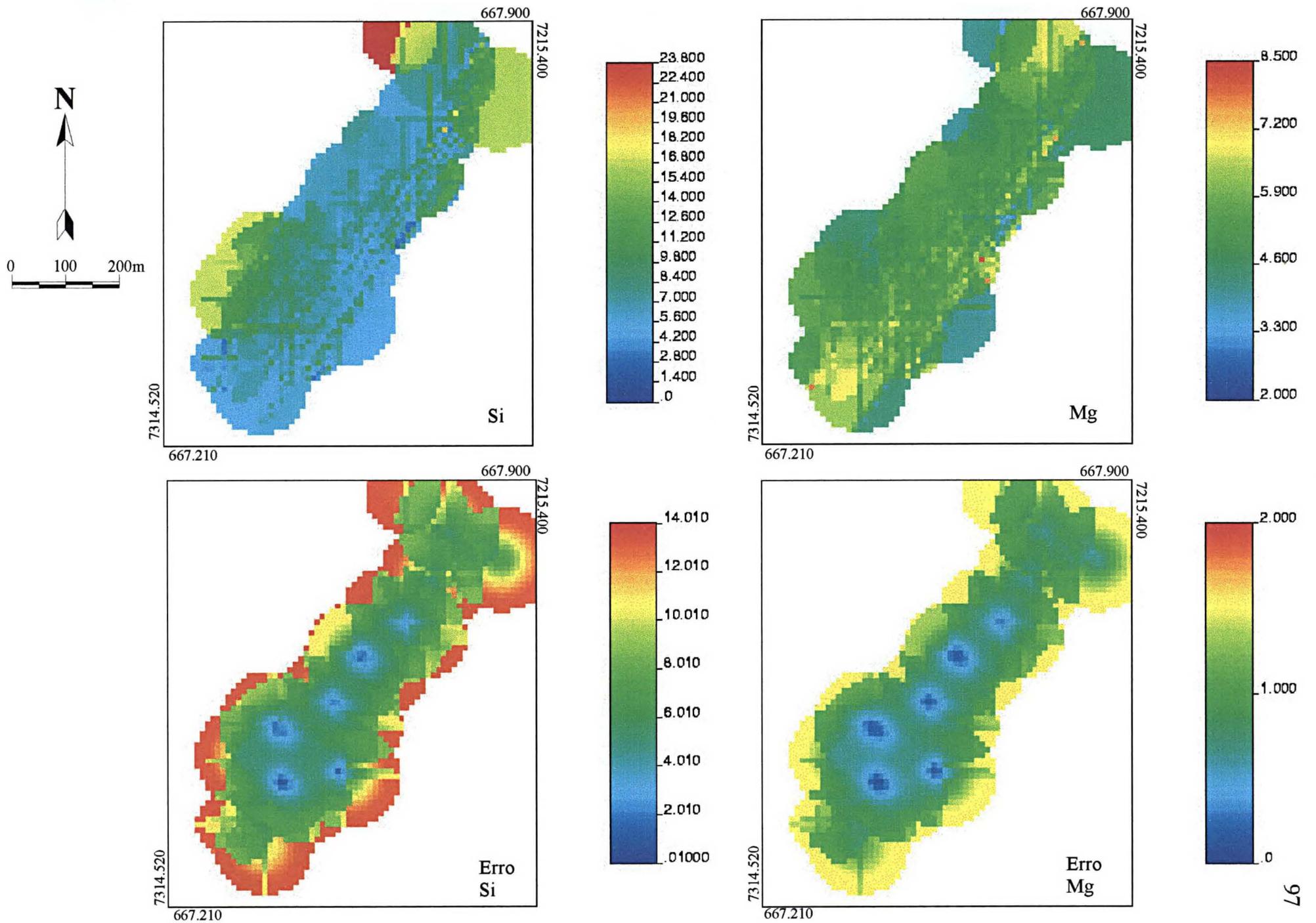


Fig. - 46: Mapas krigados e seus respectivos mapas de erro de estimação, para os óxidos de Si e Mg referente ao compartimento Cd1 Blocos de 10x10x15 / Nível - 945 / Plano xy

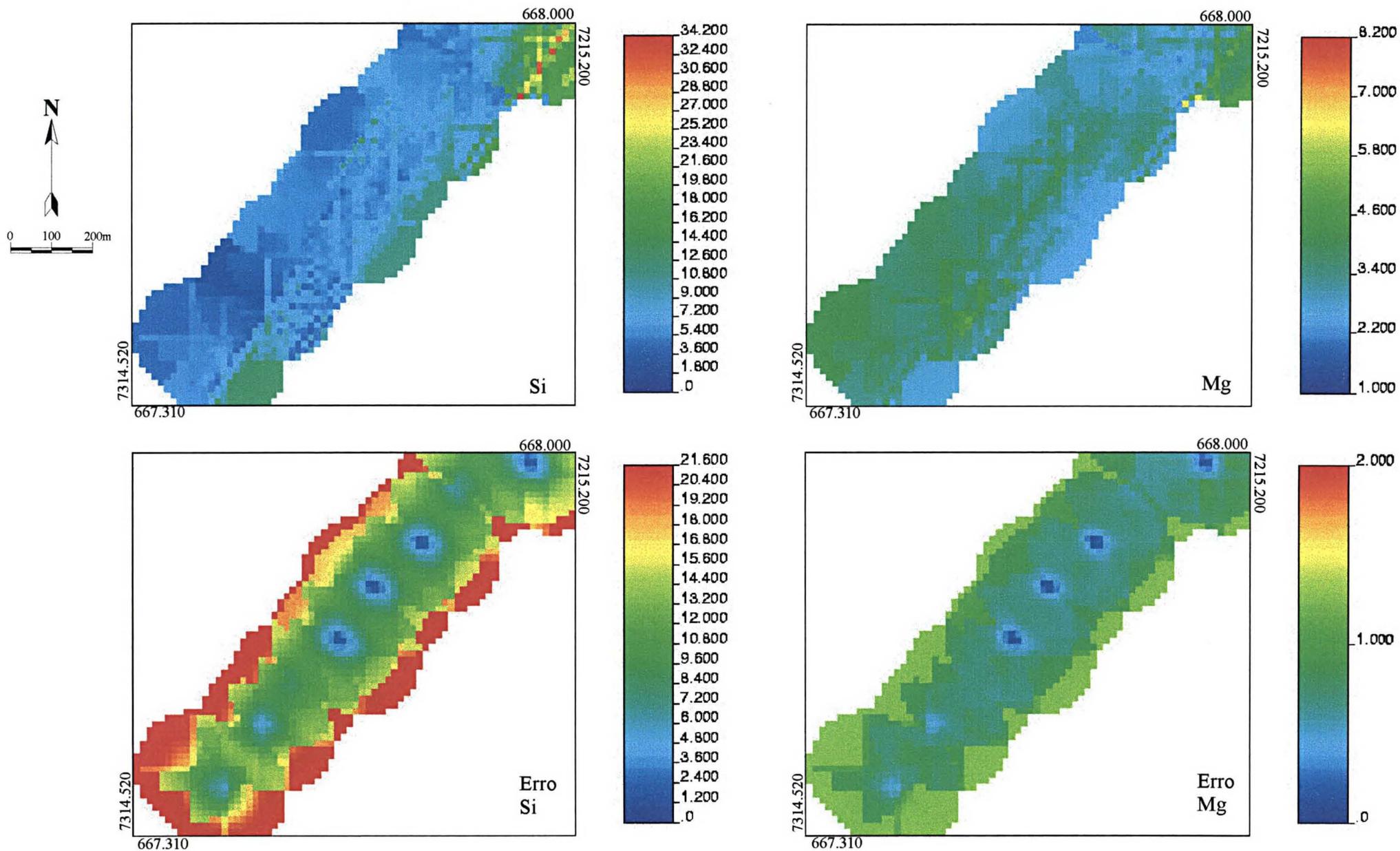


Fig. - 47: Mapas krigados e seus respectivos mapas de erro de estimação, para os óxidos de Si e Mg referente ao compartimento Cm2 Blocos de 10x10x15 / Nível - 945 / Plano xy

ÓXIDO / COMPARTIMENTO	BLOCO	MÉDIA (validação cruzada)	DESVIO PADRÃO
Si – CD1	10X10X15	8.93 E-2	3.15
Si – CD1	30X30X15	0.11	3.17
Mg – CD1	10X10X15	-9.35 E-3	0.85
Mg – CD1	30X30X15	1.24 E-2	0.86
Si – CM2	10X10X15	6.01 E-2	3.13
Si – CM2	30X30X15	8.23 E-2	3.17
Mg – CM2	10X10X15	5.17 E-4	0.62
Mg – CM2	30X30X15	1.196 E-4	0.62

Tabela - 18: Resultados obtidos da validação cruzada para a segunda estimativa.

A análise destas figuras permite notar ainda que, com relação à distribuição dos teores, o óxido de sílica apresenta-se de forma mais homogênea para o compartimento CM2, enquanto que para o compartimento CD1 sua distribuição é mais irregular e seus valores são mais elevados. O óxido de magnésio, ao contrário mostra que sua distribuição é mais irregular, sendo que no compartimento CM2, conforme era esperado, seus valores são mais baixos que no CD1.

É interessante notar também que os valores de magnésio aumentam para norte (porção mais NE da área), tanto no compartimento CD1 quanto para o compartimento CM2.

6.2.3 - TERCEIRA ESTIMATIVA - ESTIMATIVA GLOBAL

Neste item propôs-se fazer uma estimativa para o somatório dos dados dos principais corpos de minério, a saber: CD1, CM2 e CM1.

Como o modelo de blocos de 30x30x15m não se mostrou interessante para a representação da variabilidade, decidiu-se realizar as estimativas desta etapa apenas para os blocos de 10x10x15m.

Inicialmente fez-se uma verificação do comportamento estatístico do conjunto de dados referente aos compartimentos analisados. Verificou-se que não haviam alterações significativas na distribuição e nos parâmetros estatísticos deste somatório dos dados. Desta

forma obteve-se uma média de 6.99 para sílica e 4.60 para o magnésio, cujo coeficiente de variação para a sílica é de 0.58 e para o magnésio é de 0.31.

Posteriormente realizou-se uma variografia exploratória destes dados e assim como para cada um dos compartimentos geológicos estudados anteriormente, a direção cujo variograma apresenta uma estrutura de covariância entre os pares de amostras é aquela próxima à direção de sondagem. Ou seja, os variogramas modelados nesta etapa tem 125° de azimute e 45° de mergulho e podem ser vistos na figura 48.

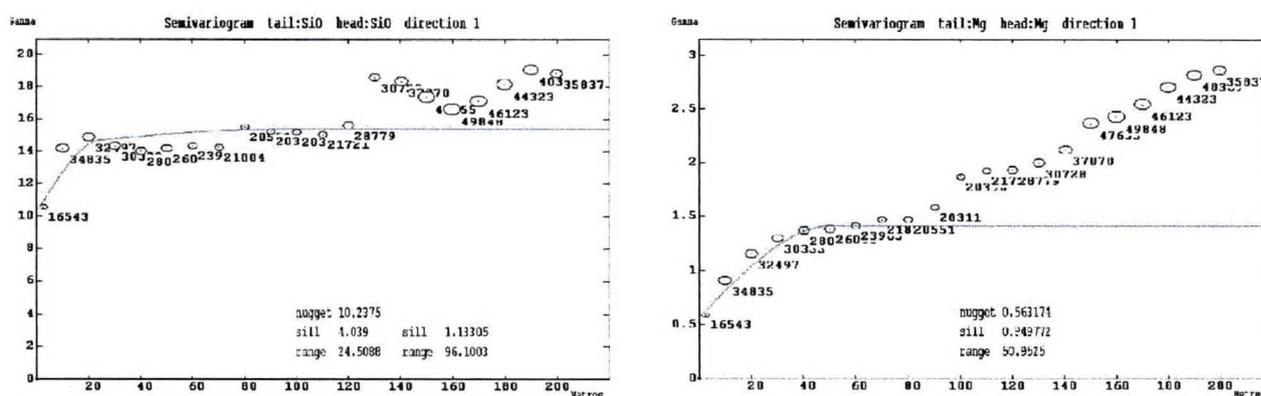


Fig - 48: Variogramas para os óxidos de Si e Mg, respectivamente, utilizados como parâmetro para a krigagem global.

O último passo nesta etapa foi fazer uma krigagem para o plano xy, para diferentes níveis, a fim de verificar a distribuição espacial dos óxidos em profundidade. Estes mapas, bem como seus respectivos erros de estimação podem ser vistos nas figuras 49 e 50 para o óxido de sílica e nas figuras 51 e 52 para o óxido de magnésio.

A interpretação destas imagens, permite afirmar que:

- A sílica mostra valores mais altos a norte da área e um aumento expressivo nas bordas dos compartimentos estudados. É possível verificar também um aumento deste óxido em profundidade.

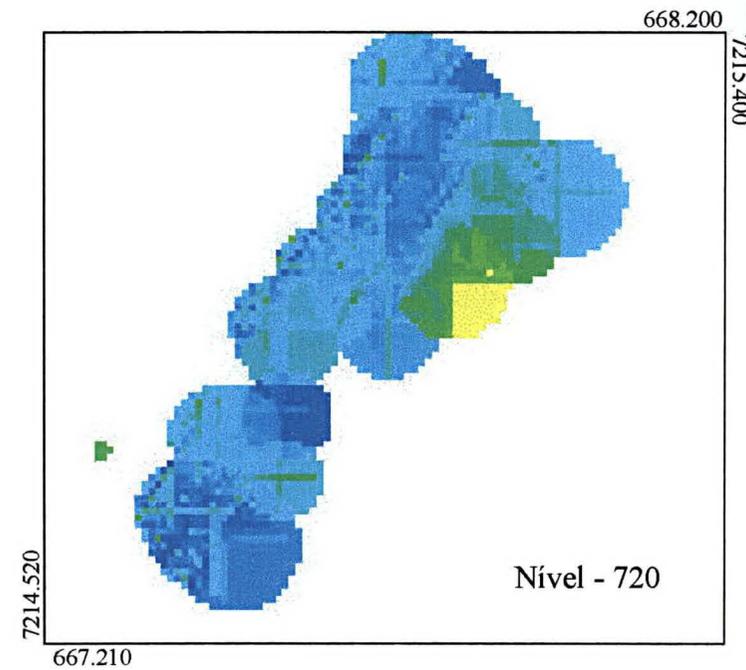
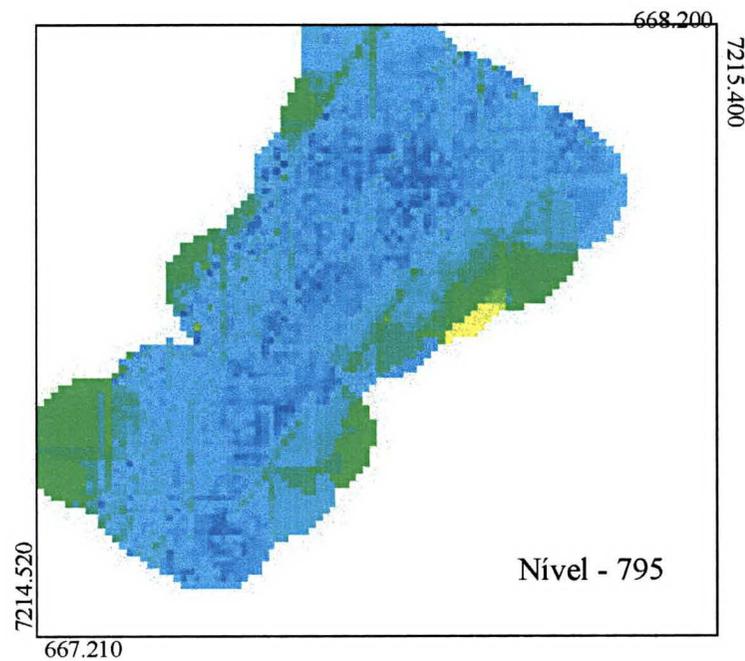
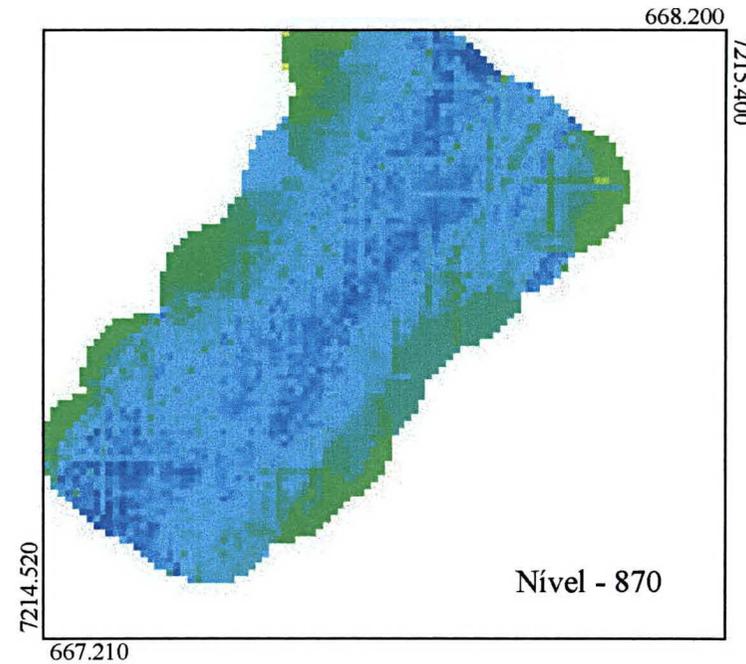
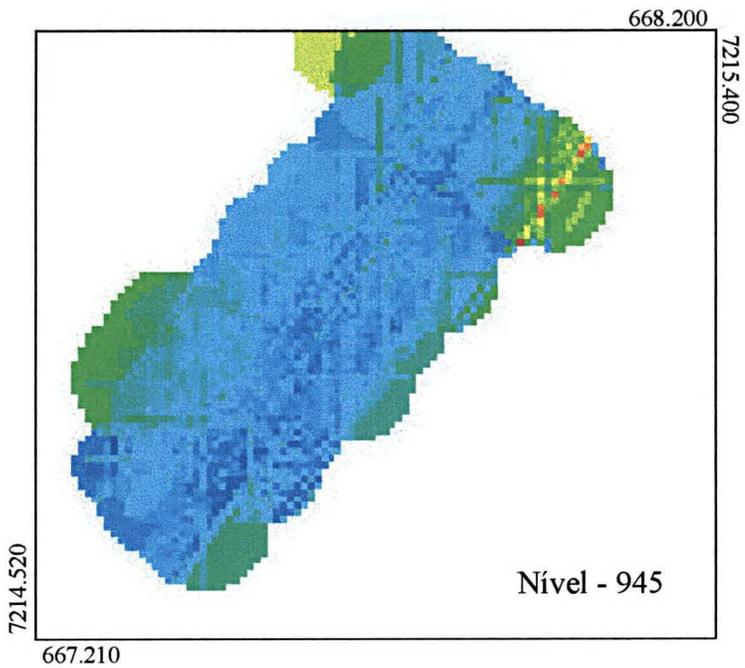
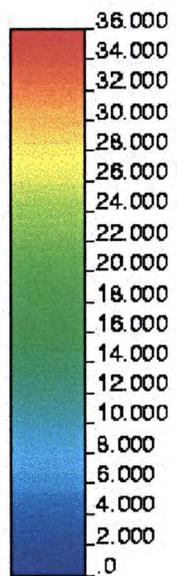
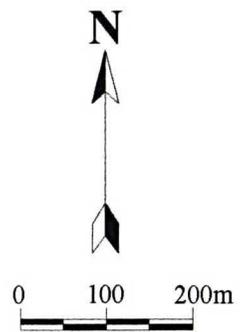


Fig. - 49: Mapas krigados para o óxido de Si, por níveis para o plano xy (Blocos de 10x10x15).

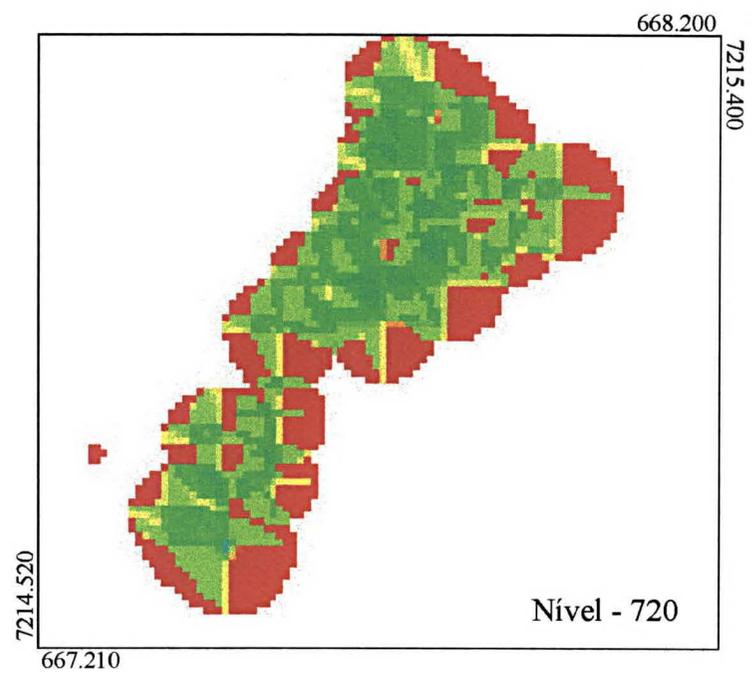
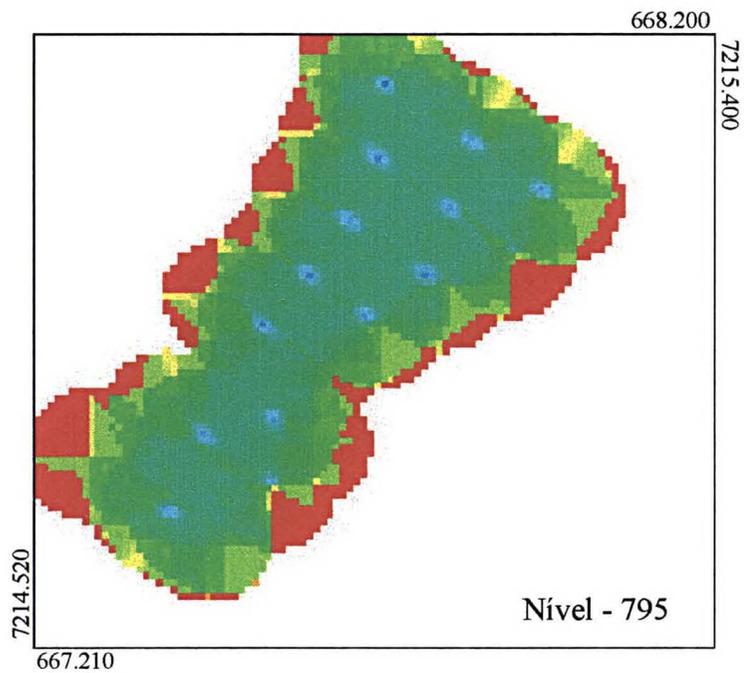
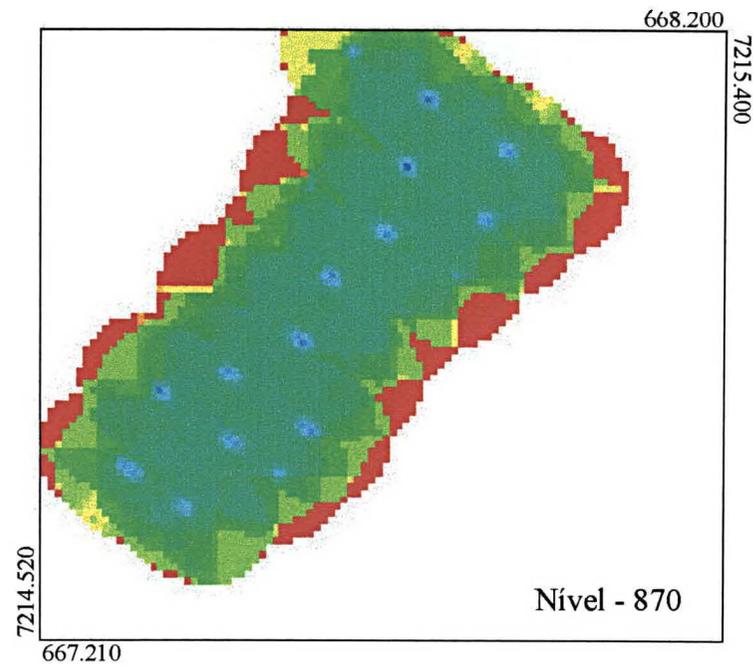
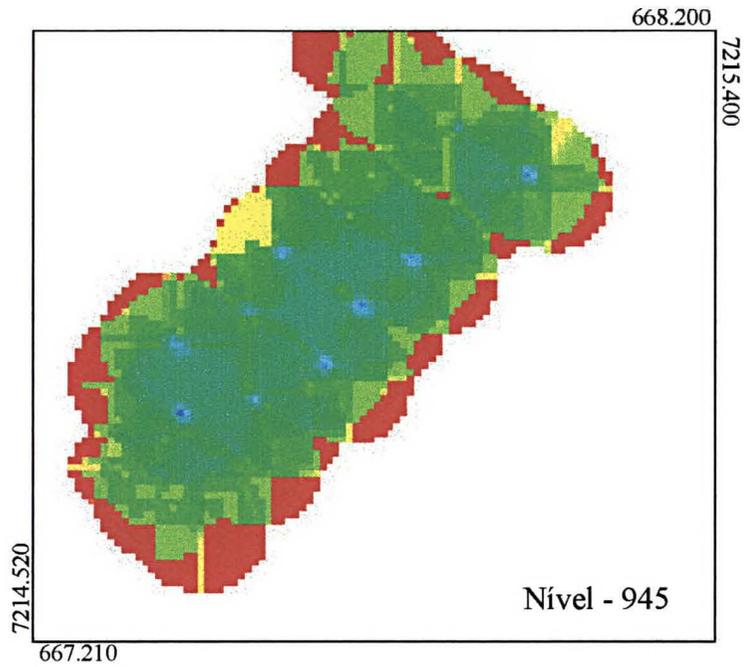
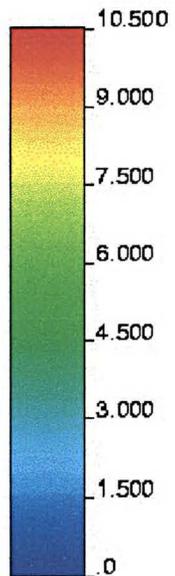
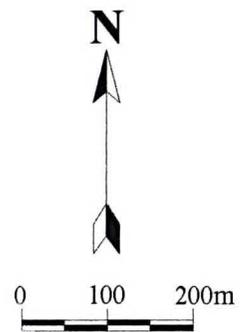


Fig. - 50: Mapas dos erros de estimação para o óxido de Si, por níveis para o plano xy (Blocos de 10x10x15).

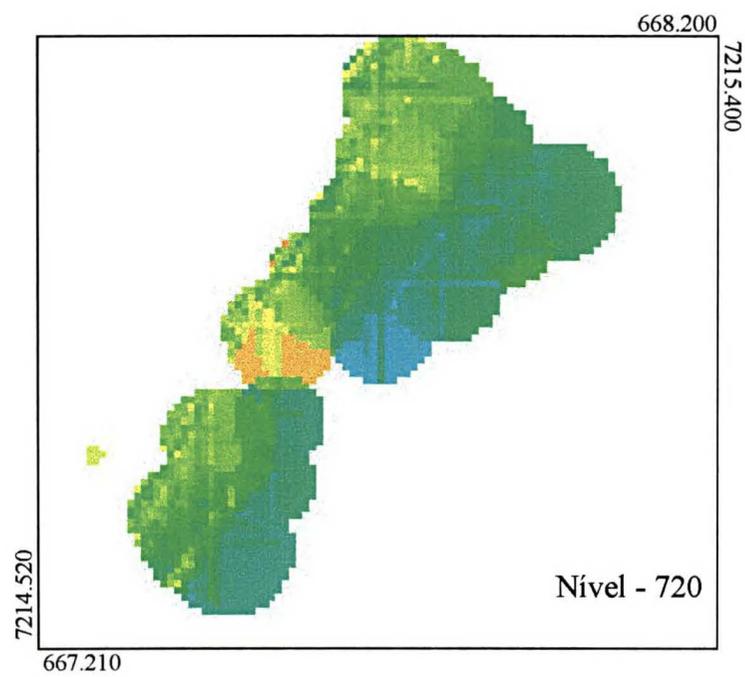
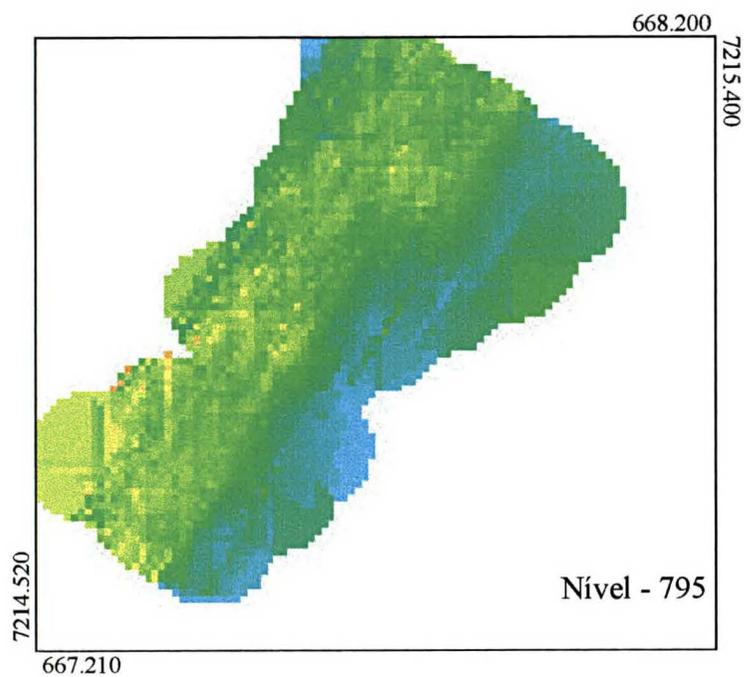
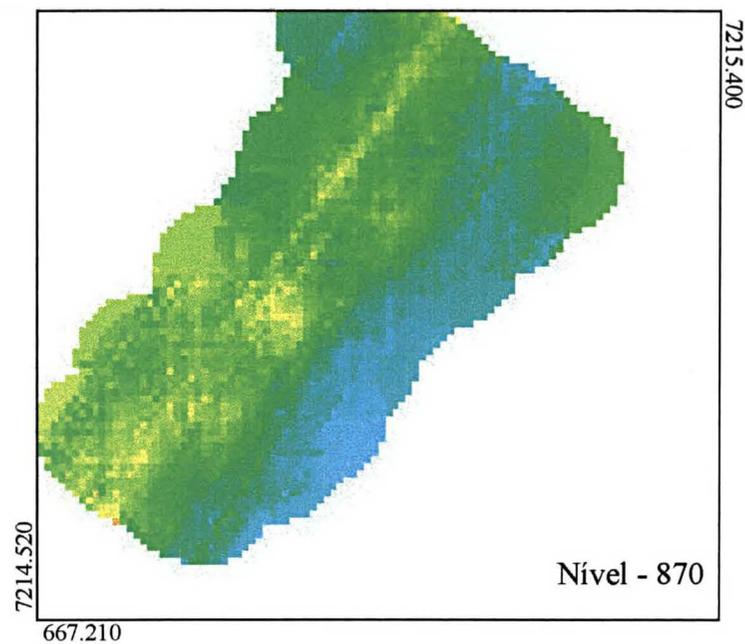
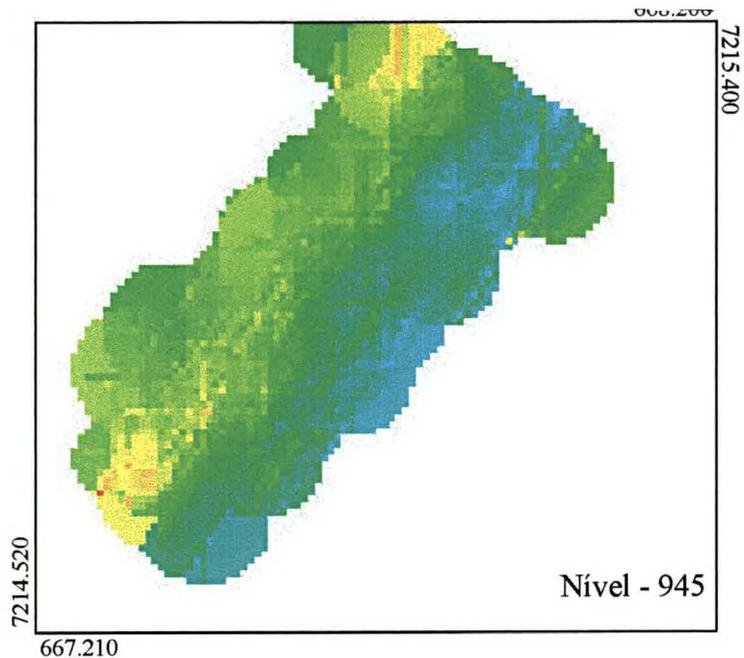
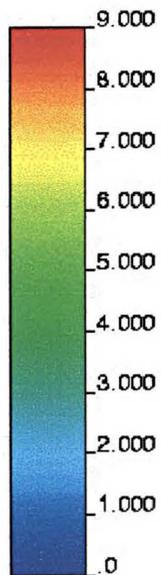
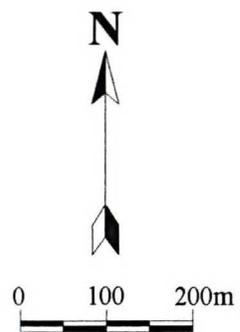


Fig. - 51: Mapas krigados para o óxido de Mg, por níveis para o plano xy (Blocos de 10x10x15).

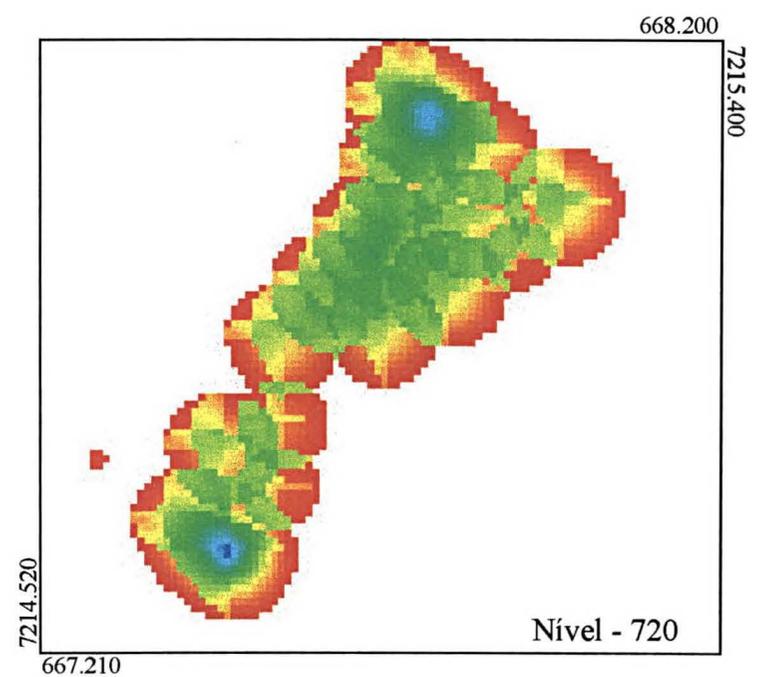
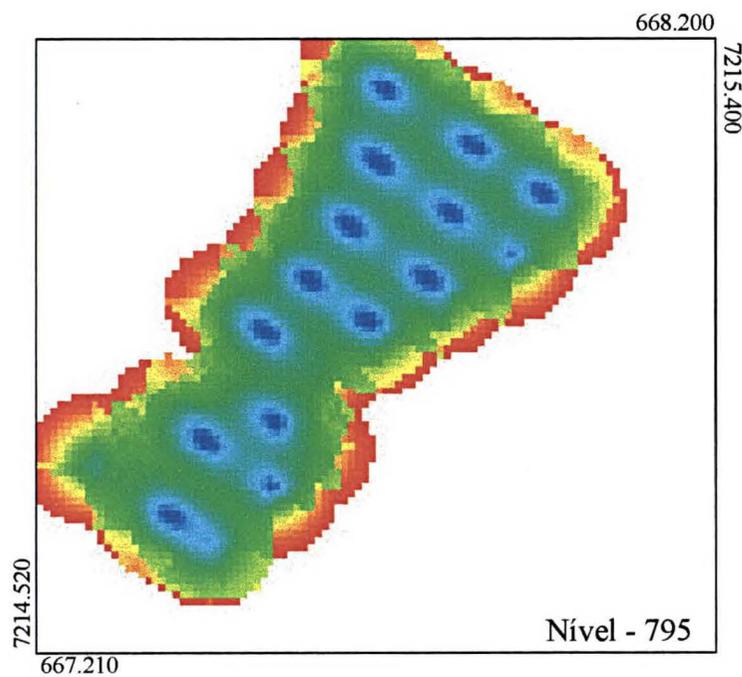
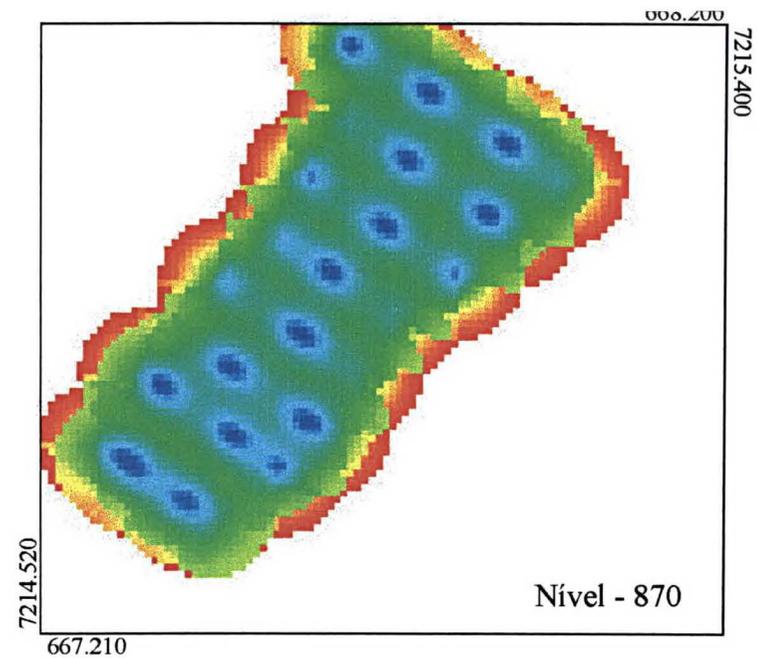
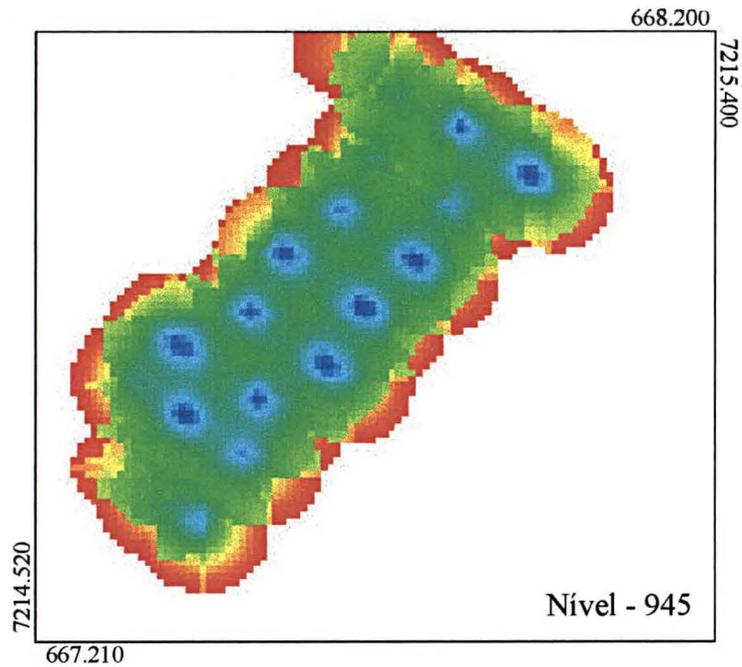
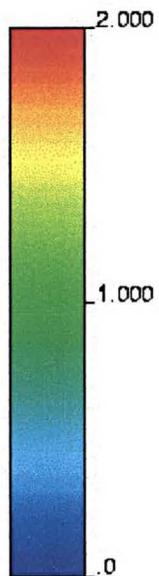
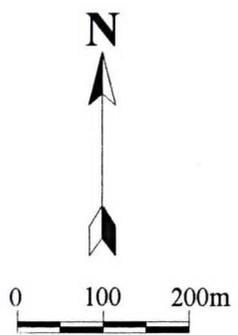


Fig. - 52: Mapas dos erros de estimação para o óxido de Mg, por níveis para o plano xy (Blocos de 10x10x15).

- Existem duas ordens de grandeza para a variabilidade dos teores. A de primeira ordem é caracterizada por três faixas distintas: uma central, com teores mais baixos e duas nas bordas da área, uma a NW e outra a SE, com valores mais elevados dos óxidos. A segunda ordem de grandeza é mais marcante para sílica, e mostra um comportamento repetitivo (aparentemente cíclico), mais retilíneo ou alinhado e penetrativo, preferencialmente segundo a direção N30-40E, fato que pode estar associado a uma foliação metamórfica ou a estruturas tectônicas.
- O óxido magnésio exibe uma distribuição mais irregular, com um aumento do teor para o norte (noroeste) e em profundidade. É possível afirmar ainda que localmente ocorre uma diminuição deste elemento em profundidade.
- A porção SE da área, realmente apresenta valores de magnésio mais reduzidos, fato este que corrobora a regionalização estabelecida inicialmente. Entretanto é possível individualizar pequenas variações na distribuição dos teores, que significariam um ganho considerável para o planejamento da lavra.

Nesta etapa, adicionalmente, realizou-se ainda a edição de mapas krigados para o plano xz, que podem ser vistos nas figuras 53 para o óxido de sílica e na figura 54 para o óxido de magnésio.

A análise destes mapas auxilia na interpretação da distribuição espacial dos teores e permite afirmar novamente que a sílica apresenta um comportamento condicionado de modo muito mais retilíneo, enquanto que o magnésio é mais irregular, e sua forma de distribuição tem um aspecto “acunhado”, representando provavelmente um contato sedimentar pretérito.

Este mapas mostram que a estimativa feita por krigagem 3D permite individualizar de maneira mais detalhada, a na variação espacial dos teores.

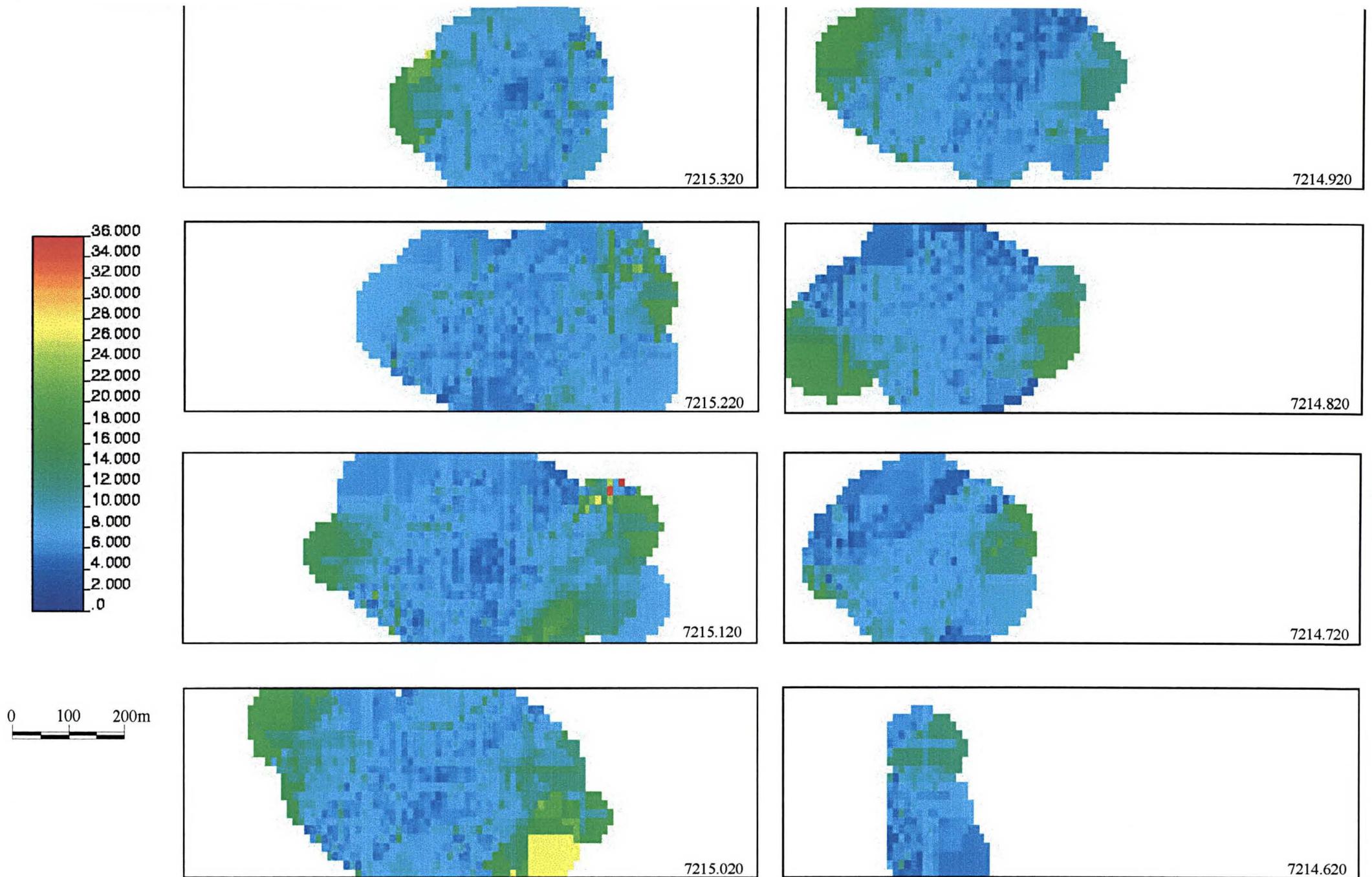


Fig - 53: Mapas krigados para o óxido de Si, por níveis para o plano xz (Blocos de 10x10x15)
Slices de 100 em 100 metros de sul para norte.

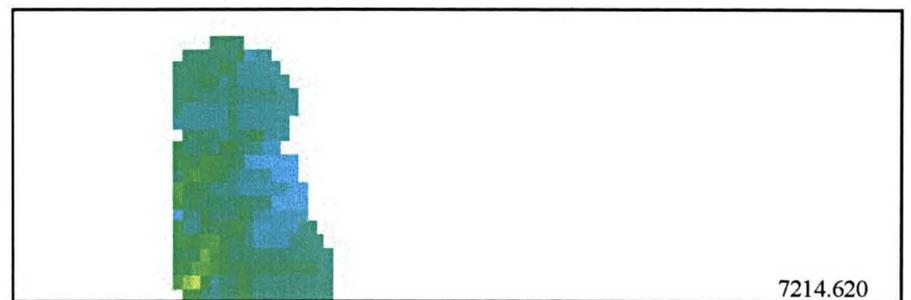
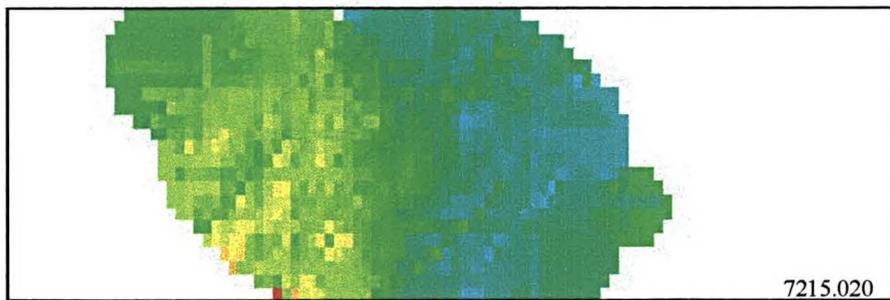
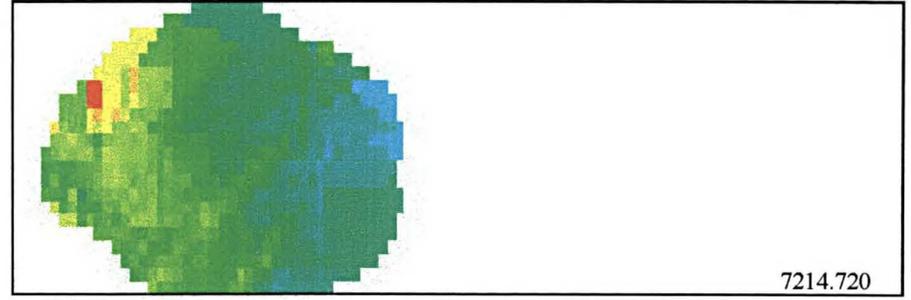
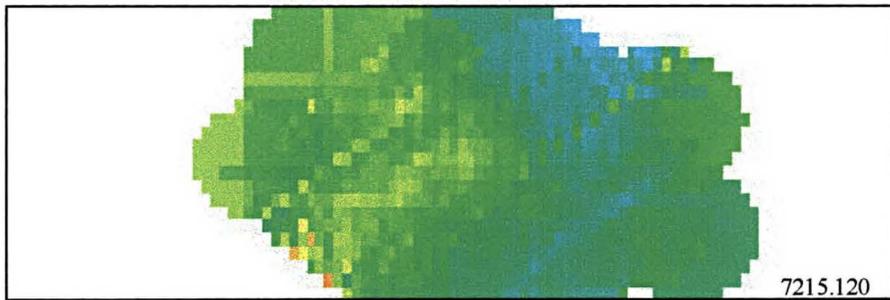
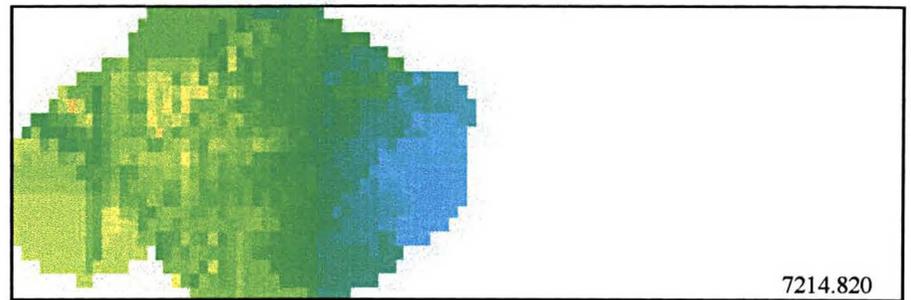
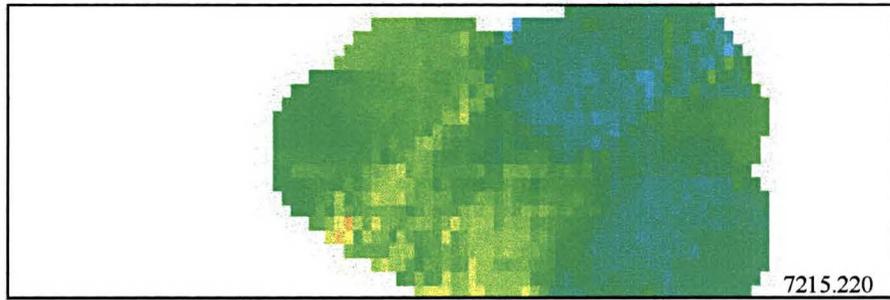
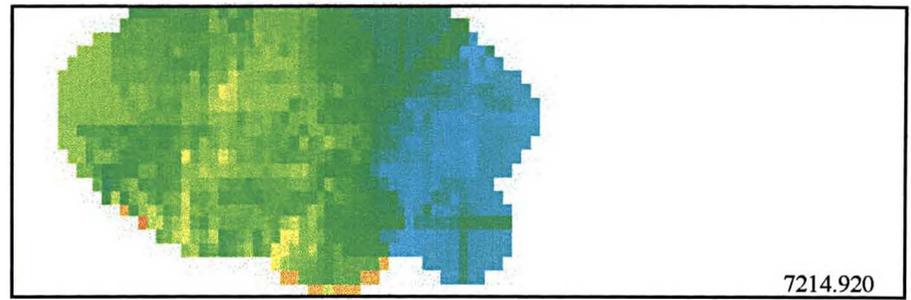
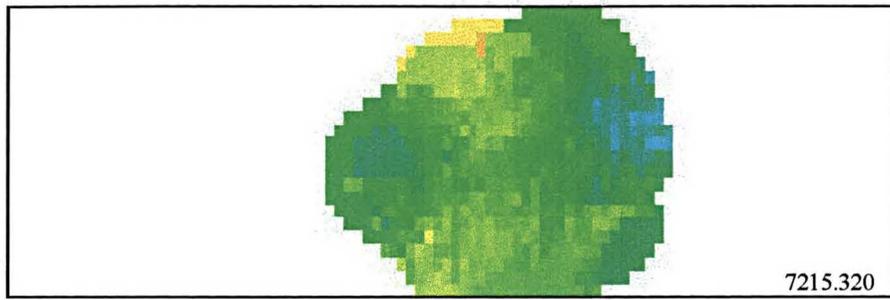
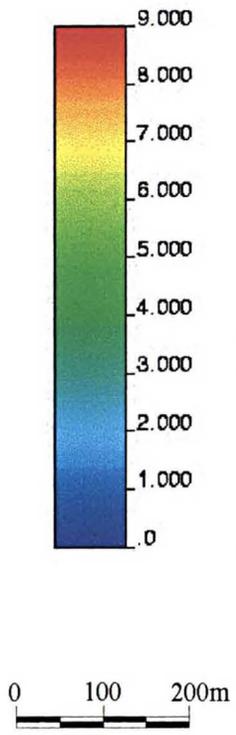


Fig - 54: Mapas krigados para o óxido de Mg, por níveis para o plano xz (Blocos de 10x10x15)
 Slices de 100 em 100 metros de sul para norte.

É interessante observar que o *trend* N30-40E mais penetrativo, observado em mapa (plano xy), tende a um mergulho constante, em torno de 40° a 50° para o quadrante NW, já a compartimentação em menor ordem de grandeza (faixas mais amplas) apresenta limites irregulares no plano xz, e em profundidade tende a verticalização ou com altos mergulhos para o quadrante sudeste.

Embora de modo preliminar, os resultados da krigagem global evidenciam dois controles na variação dos teores: 1) em maior escala, um controle litológico - sedimentar, que teria condicionado a individualização das grandes faixas NE, com alto e baixo MgO, respectivamente, nas quais o SiO₂ apresenta uma distribuição mais constante; 2) em menor escala, um controle litológico - metamórfico, que estaria representado pela repetição de pequenas faixas ou ciclos em torno de 30 a 40 metros, observados no *trend* N30-40E com caimento para NW; tal variação de teores está refletida tanto no Mg quanto na Si, mas principalmente na Si, por esta apresentar a característica de maior mobilidade durante processos de metamorfismo.

Os resultados da validação cruzada para as estimativas feitas nesta etapa podem ser vistos na tabela abaixo.

ÓXIDO	MÉDIA (validação cruzada)	DESVIO PADRÃO
Si	4.28 E-2	3.29
Mg	-1.23 E-3	0.77

Tabela - 19: Resultados obtidos da validação cruzada para a terceira estimativa.

6.2.4 - QUARTA ESTIMATIVA - MODELO DE 10X10X15M

Como este modelo também refere-se ao somatório dos dados dos principais corpos de minério, o comportamento estatístico básico dos valores utilizados nesta etapa são os mesmos verificados para a terceira estimativa.

A quarta estimativa foi feita com o objetivo de testar o resultado da krigagem a partir de um modelo que considere o comportamento anisotrópico dos calcários da mina Saivá. Considera-se que a posição espacial dos compartimentos (CD1, CM1, CM2), é o resultado do acamamento sedimentar com superposição de uma xistosidade subparalela. Desta forma é lógico esperar que a continuidade da covariância alcance distâncias maiores ao longo da camada do que na direção transversal a esta. Tal anisotropia não foi diagnosticada pela variografia exaustiva devido à distribuição heterogênea e inadequada da amostragem.

Nas estimativas anteriores, fez-se a krigagem isotrópica por esta ser a única possível, dada a restrição dos dados. Nesta, procura-se inferir uma anisotropia próxima da esperada considerando o contexto geológico da mina, embora não fugindo aos resultados obtidos com a variografia exploratória.

Em função desta forte heterogeneidade amostral os dados apresentam uma restrição para a modelagem das anisotropias, pois os variogramas para direções diferentes das sondagens não apresentam uma estrutura aceitável de covariância espacial. Entretanto o conhecimento do modelo geológico permite pressupor que o fenômeno é anisotrópico, de maneira que esta etapa procurou estabelecer parâmetros, baseados nos variogramas modelados anteriormente, para quantificar e modelar os eixos de anisotropia da variação espacial dos teores.

Desta forma, os principais critérios estabelecidos para o modelo anisotrópico estão baseados nas seguintes premissas:

- 1) Os variogramas para a direção horizontal, ao longo do *strike* das camadas para distâncias acima de 120 metros, atingem o efeito pepita puro. De tal forma que o

fenômeno de continuidade espacial esperado para esta direção deve ser inferior a 120 metros.

- 2) Os variogramas direcionais, assim como alguns omnidirecionais exibem um alcance que gira em torno de 60-70 metros, que representa o fenômeno de continuidade espacial intermediário.
- 3) Na direção ortogonal às camadas pode-se verificar que há um fenômeno de menor escala, representado nos variogramas com *lags* pequenos que apresentam alcances em torno de 20-30 metros.

Assim, os valores estabelecidos para o elipsóide que representa a anisotropia geológica, são de 120 metros para o eixo de maior continuidade, 60 metros para o eixo intermediário e 40 para o eixo menor.

Os mapas krigados, bem como os mapas dos erros de estimação (Figs. 55 e 56, 57 e 58), permitem verificar as estimativas feitas para os óxidos de Si e Mg, respectivamente, considerando-se a anisotropia.

A interpretação dos mapas krigados nesta etapa permite verificar as mesmas características observadas na terceira krigagem, embora com amplificação do *trend* NE., onde o óxido de si tem um comportamento retilíneo e repetitivo, com ciclos em torno de 25 a 30 metros. O magnésio apresenta uma distribuição mais irregular, entretanto é clara a evidência de que na porção noroeste da área os teores deste elemento são mais elevados. Pode se verificar também que há um ligeiro aumento do valores de magnésio para o norte, principalmente na porção sudeste da área.

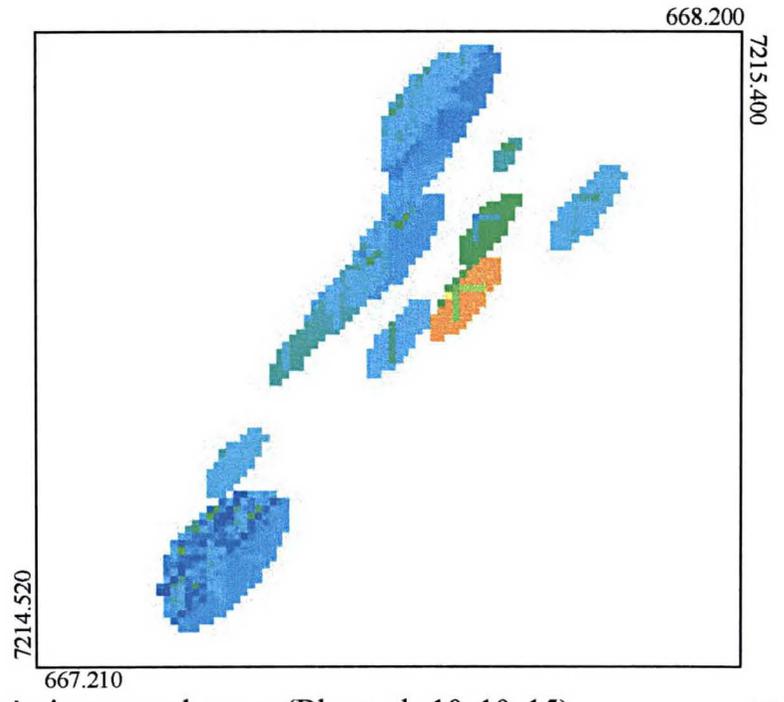
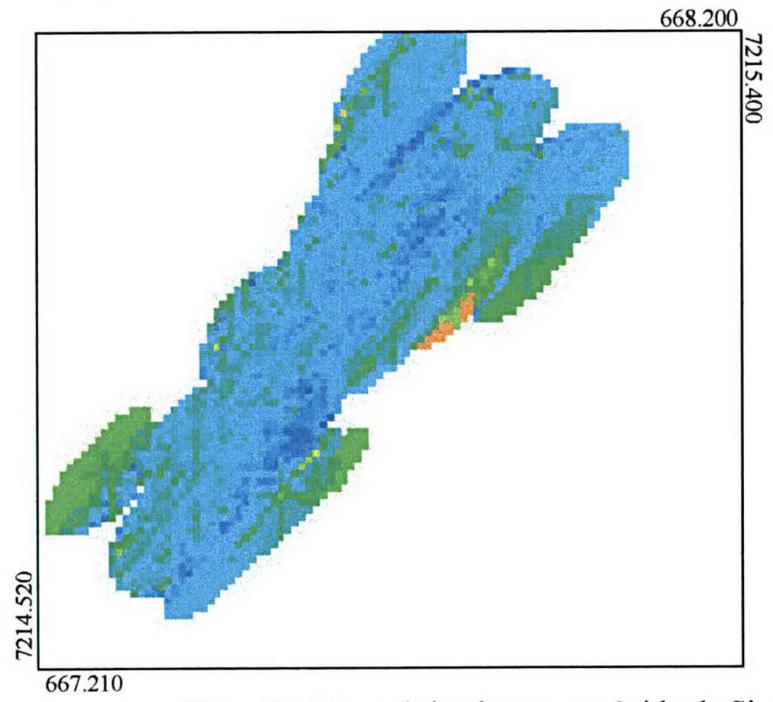
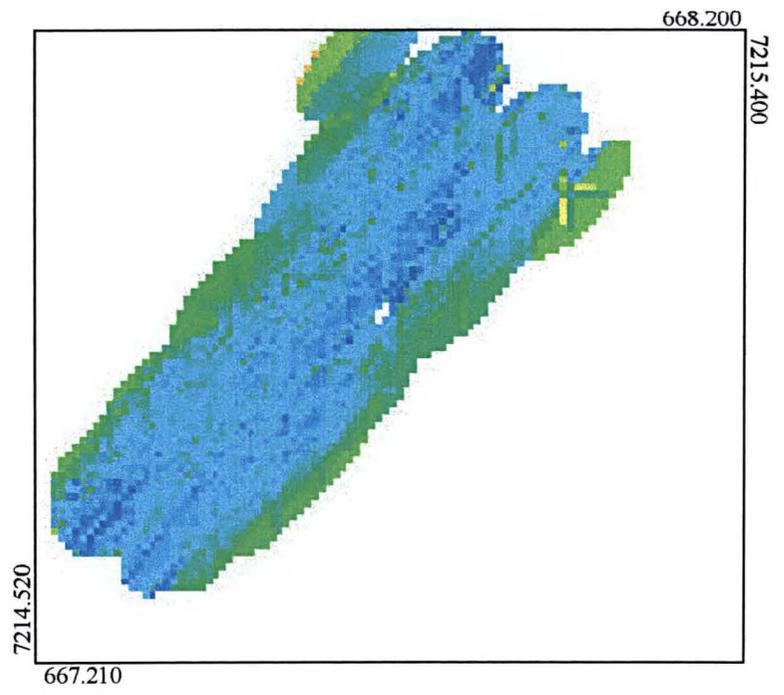
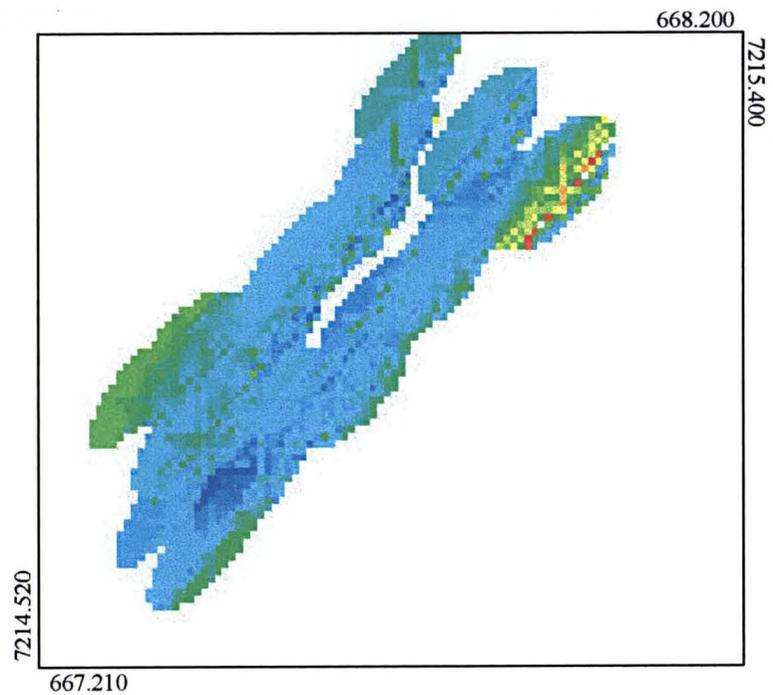
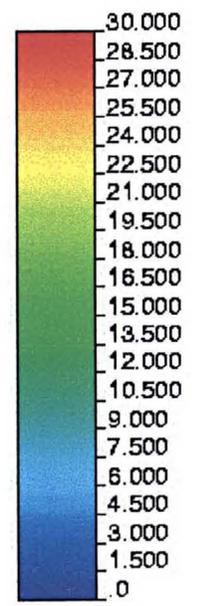
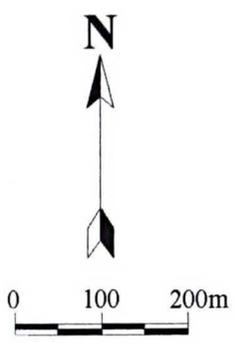


Fig. - 55: Mapas krigados para o óxido de Si, por níveis para o plano xy (Blocos de 10x10x15). Eixos da anisotropia - 120m; 60m; 40m.

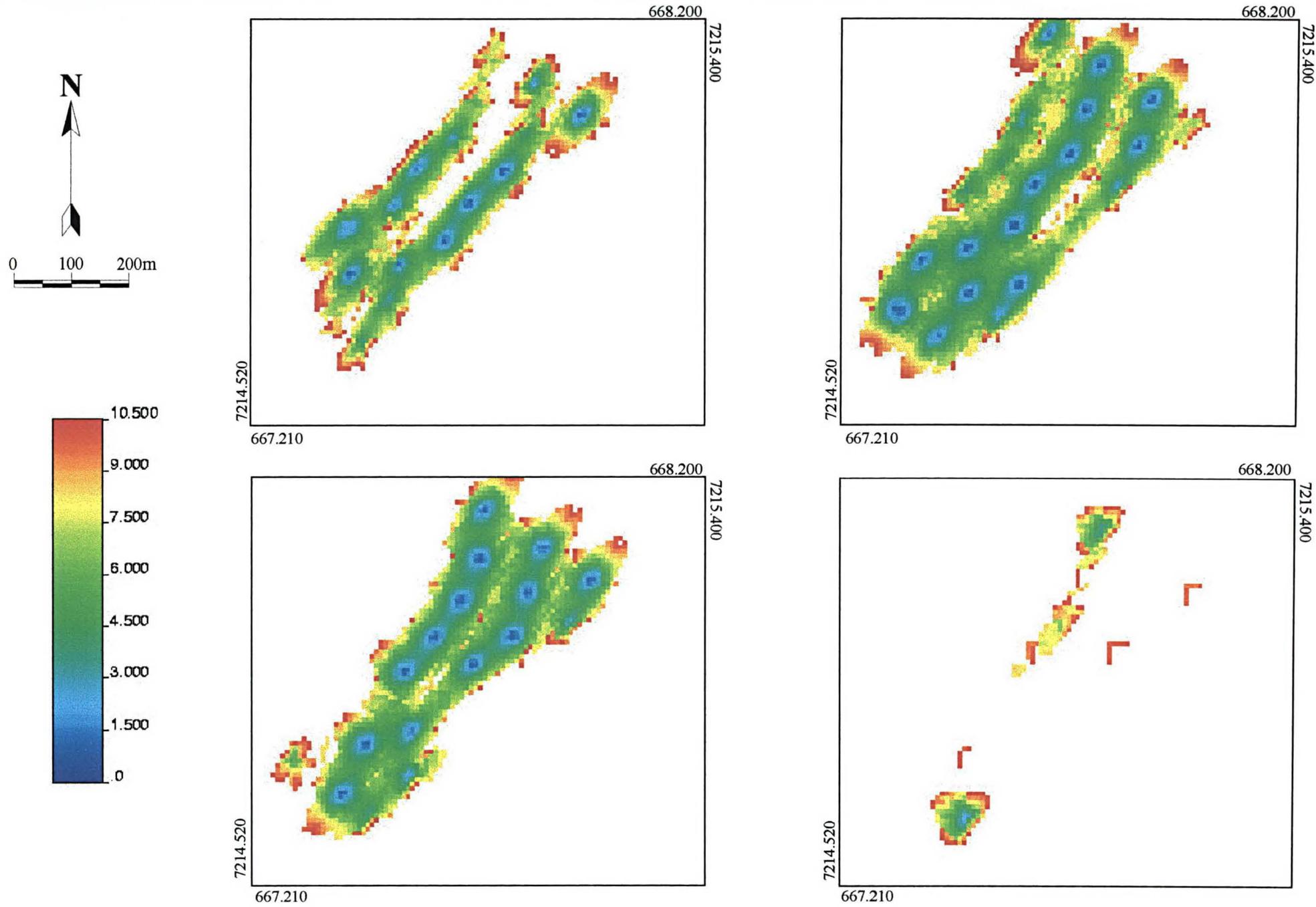


Fig. - 56: Mapas dos erros de estimação para o óxido de Si, por níveis para o plano xy (Blocos de 10x10x15). Eixos da anisotropia - 120m; 60m; 40m.

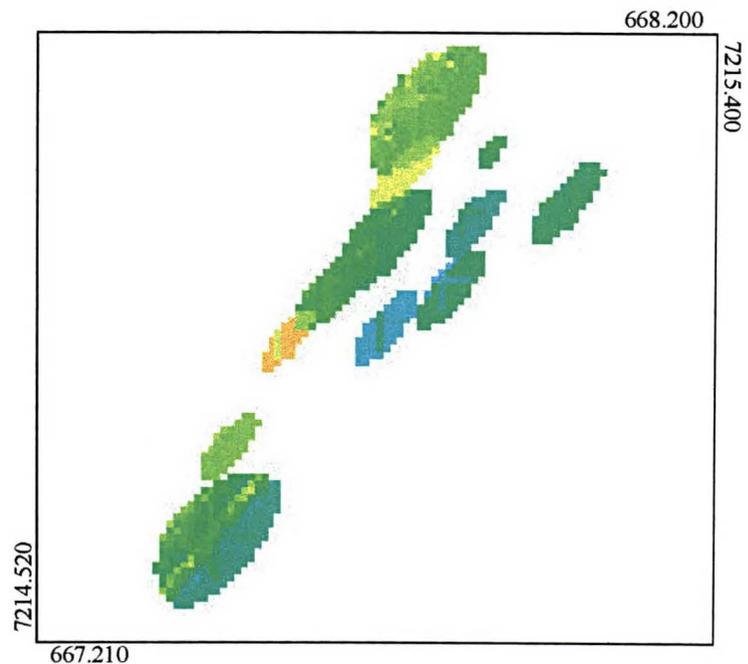
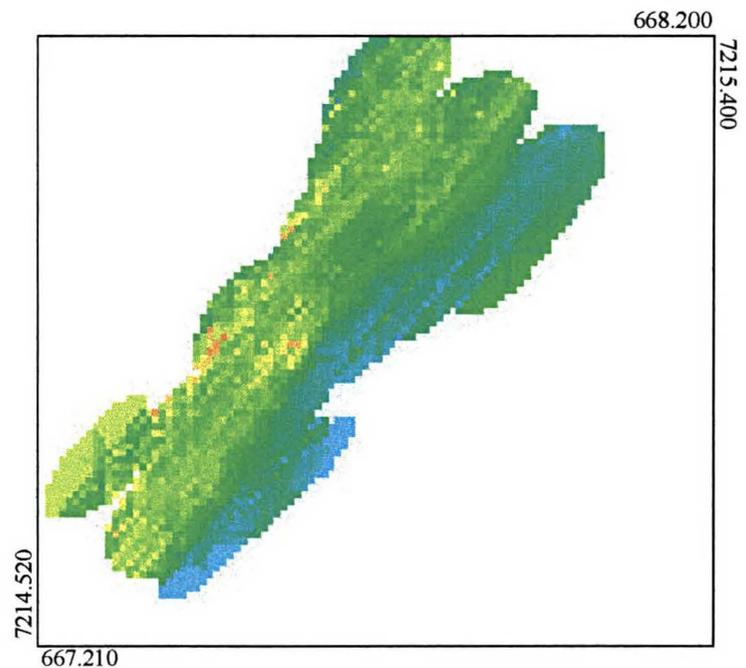
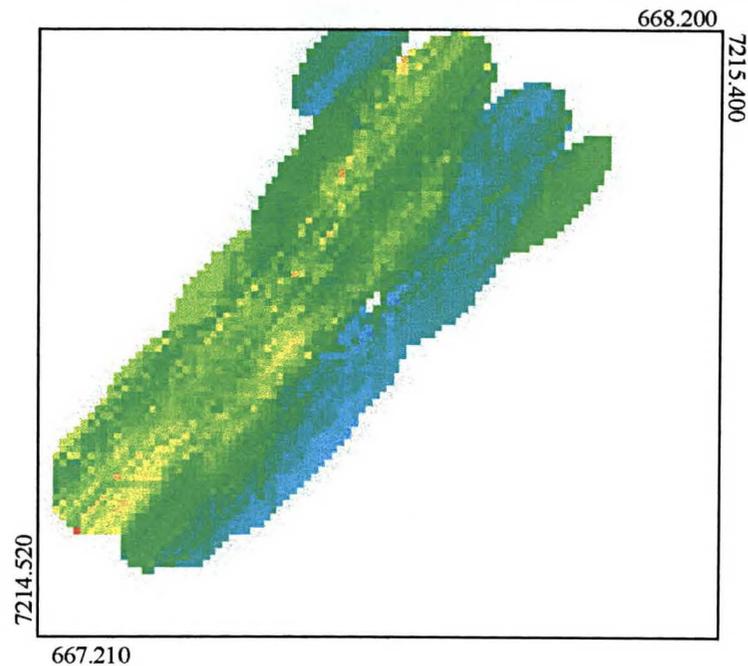
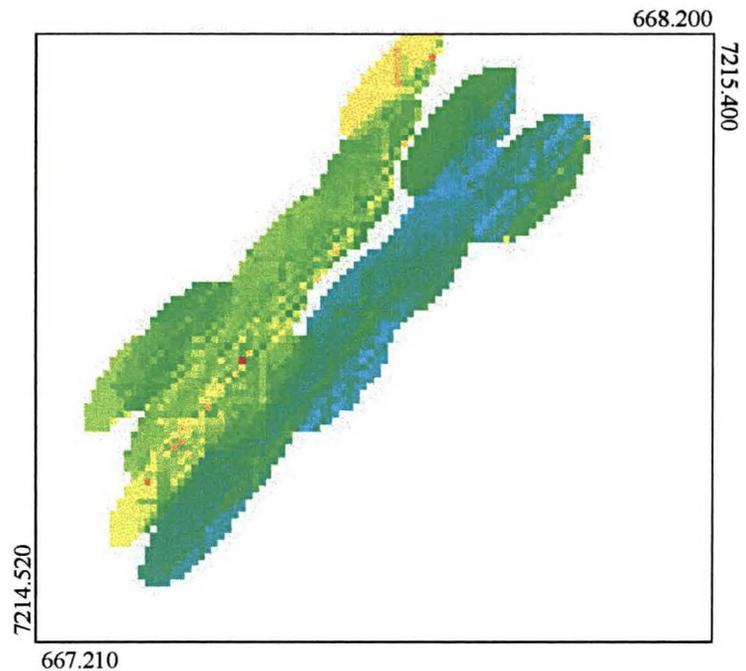
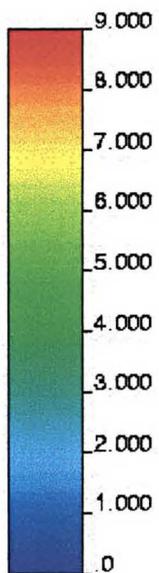
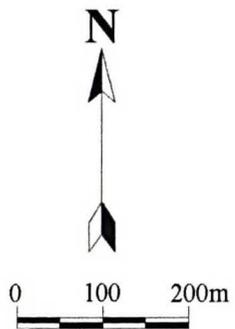


Fig. - 57: Mapas krigados para o óxido de Mg, por níveis para o plano xy (Blocos de 10x10x15).
Eixos da anisotropia - 120m; 60m; 40m.

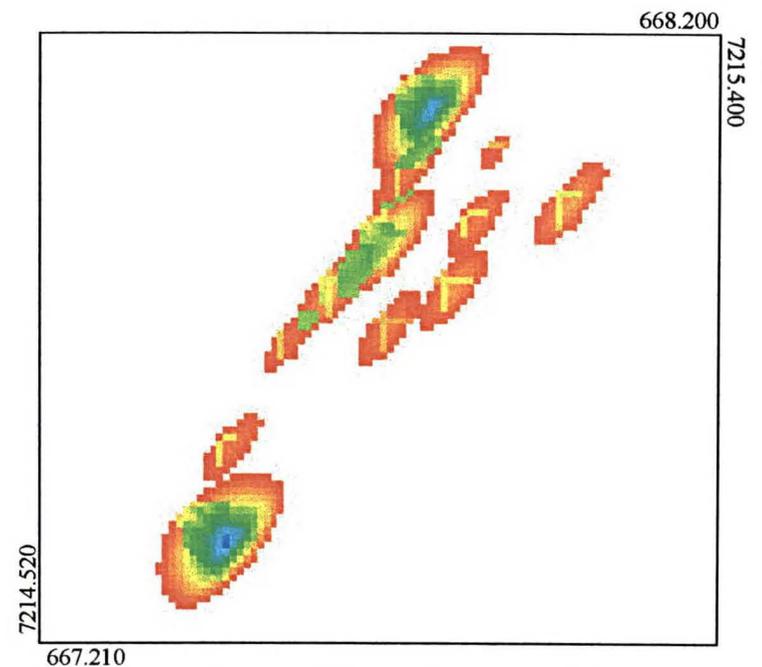
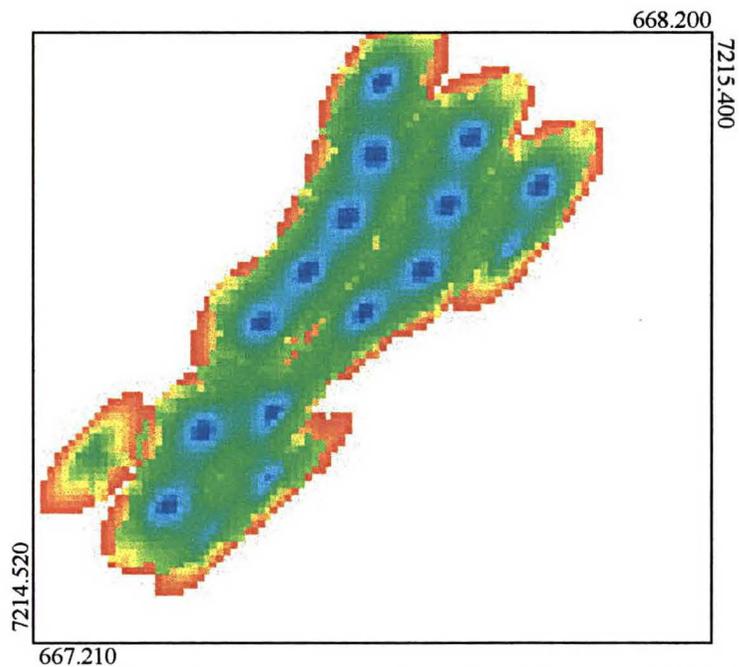
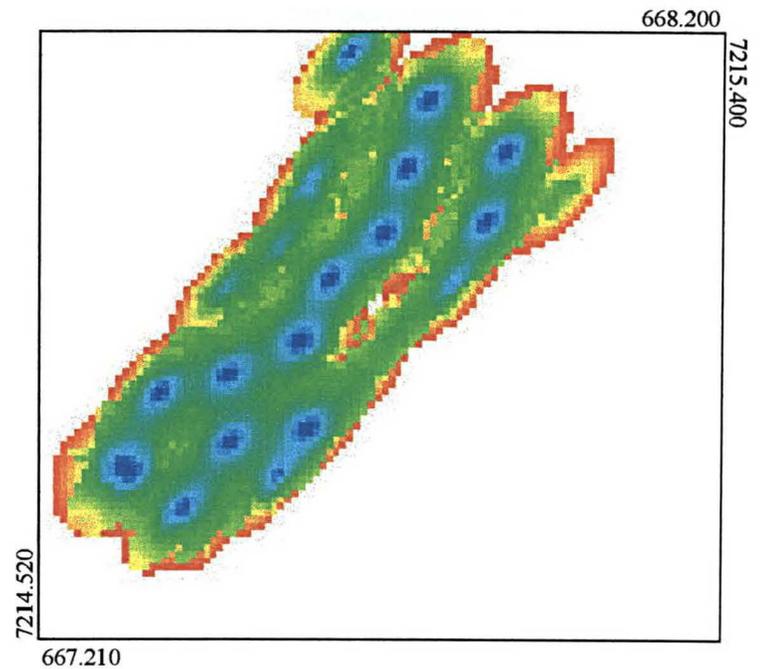
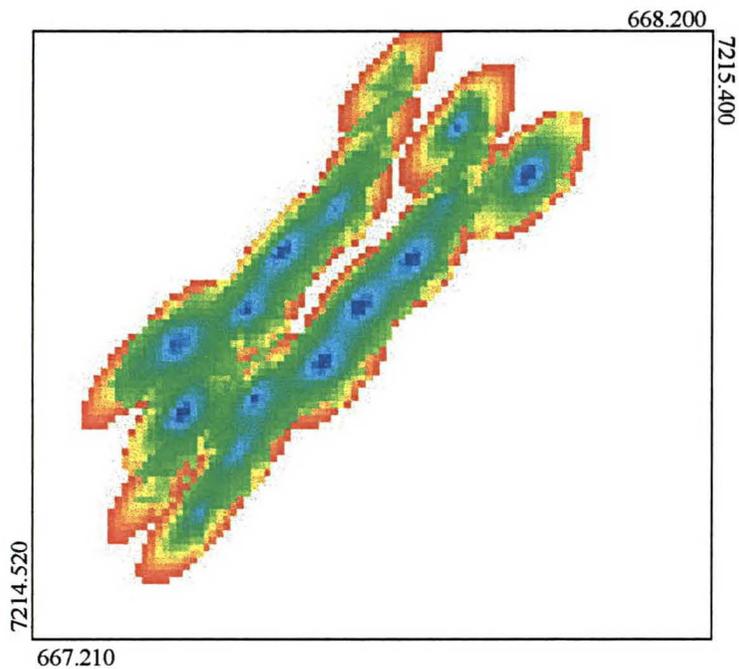
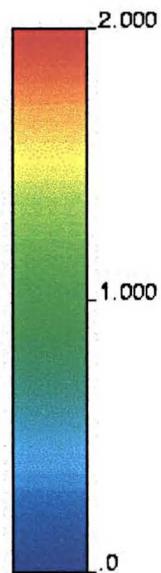
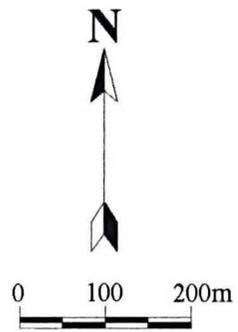


Fig. - 58: Mapas dos erros de estimação para o óxido de Mg, por níveis para o plano xy (Blocos de 10x10x15). Eixos da anisotropia - 120m; 60m; 40m.

Os resultados da validação cruzada para as estimativas feitas nesta etapa podem ser vistos na tabela 20.

ÓXIDO	MÉDIA (validação cruzada)	DESVIO PADRÃO
Si	1.94 E-2	3.23
Mg	-2.29 E-3	0.77

Tabela - 20: Resultados obtidos da validação cruzada para a quarta estimativa.

É interessante notar que a média das diferenças dos valores estimados para esta estimativa é um pouco mais alta, embora tenha se considerado a anisotropia prevista para o depósito.

Estas predições de valores são de extrema importância e tem a finalidade de auxiliar a etapa de planejamento, desenvolver e orientar o andamento do processo extrativo, embora a confirmação acerca do valor real de um determinado bloco ou painel só será definitivamente conhecido após esse estar completamente minerado e beneficiado.

Vale ressaltar que todas estas estimativas foram feitas utilizando-se a *GSLIB*, e que o resultado desta krigagem pode ser facilmente importado para o software *Datamine*, que permite criar um modelo de blocos 3D associado ao modelo geológico definido.

Os exemplos abaixo são os resultados de algumas krigagens preliminares feitas para os compartimentos principais (CD1, CM2, e CM1) e modeladas no *Datamine*. Embora as dimensões dos blocos sejam muito maiores do que as definidas nestas etapas, os parâmetros variográficos se assemelham, de maneira que a visualização das figuras 59 e 60 permite obter uma idéia razoável da utilização desta ferramenta.

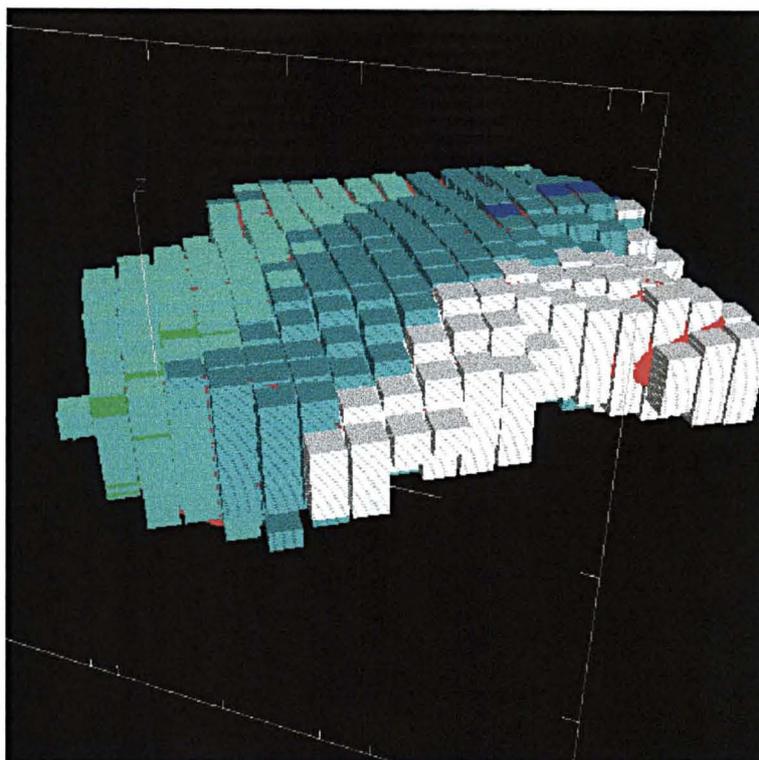


Fig – 59: Exemplo de um modelo 3D, com blocos de 50x50x15, para o óxido de Mg, referente aos principais corpos de minério.

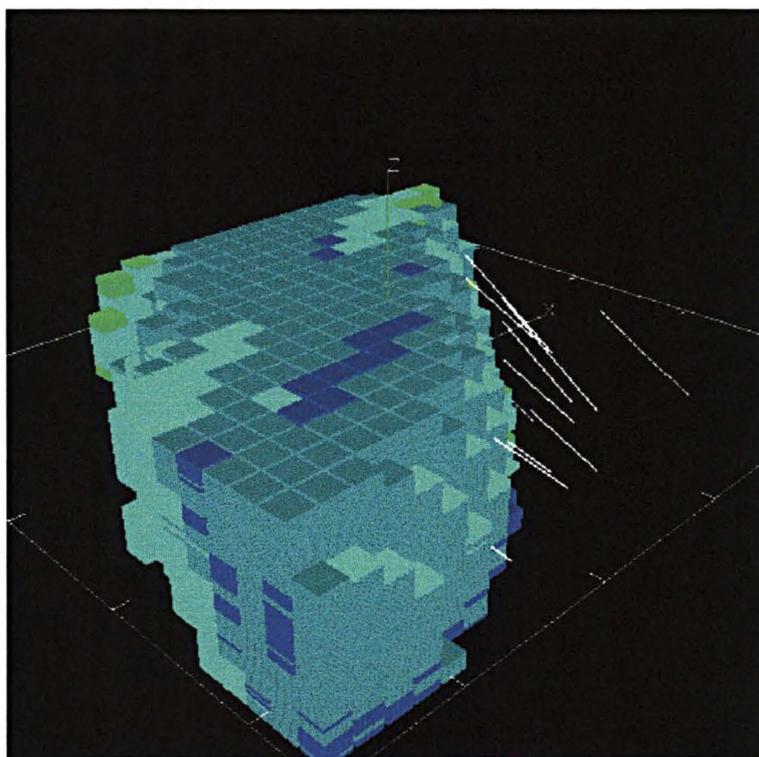


Fig – 60: Exemplo de um modelo 3D, com blocos de 50x50x15, para o óxido de Si, referente aos principais corpos de minério.

6.3 – ESTIMATIVAS DAS RESERVAS (CUBAGEM)

Para estes modelos de estimativa da mina Saivá, onde os atributos geológicos de qualidade são os teores dos óxidos de sílica e de magnésio, só fez sentido o esforço na direção de obter resultados de tonelagem de minério para os limites estabelecidos destes teores, que como já foi visto, classificam os tipos de minério.

Embora a cubagem geoestatística não seja o objetivo principal deste trabalho, procurou-se resumir as tonelagens de minério, discretizadas em função dos teores de SiO e MgO. A tabela 21 sintetiza a cubagem dos blocos cujos valores médios estimados encontram-se dentro dos limites de Si menor que 10% e Mg maior que 4%, e também para Si menor que 10% e Mg menor que 4%.

Cabe ressaltar que para estes cálculos foram utilizados os blocos de dimensão 10x10x15, e uma densidade média para o calcário de 2,5 t/m³, com o resultado representando todo o minério, inclusive a quantidade já lavrada.

TEOR - SiO E MgO	TON.
Si<10% e Mg >4%	123.138.750
Si<10% e Mg <4%	80.940.000

Tabela - 21: Resultado da tonelagem de minério, discretizadas por teores de SiO e MgO, com base no terceiro modelo de estimativa.

CAPÍTULO 7

7.1 - DISCUSSÕES FINAIS

Esse capítulo aborda de maneira crítica os resultados obtidos, fazendo uma análise da estimativa e dos modelos gerados. Além de conclusões, nesse capítulo são levantadas proposições de continuidade dos trabalhos a partir desse estudo com a finalidade de avaliação, modelamento e planejamento da jazida de calcário da mina Saivá.

Esse estudo certamente dará motivo para questões múltiplas a respeito da reprodução da realidade e da "acuracidade" com que foram gerados os modelos, utilizando técnicas geoestatísticas. Porém fica explícita a validade e a necessidade da utilização de um suporte técnico robusto para um planejamento de lavra, onde deve estar baseada qualquer decisão, antes de considerar esse ou aquele modelo de bloco.

A intenção dessa dissertação de mestrado, além de um produto acadêmico, propôs-se a atingir resultados aplicáveis ao caso estudado, reforçando o crescimento continuado de uma interação Universidade x Empresa.

Resultados, no sentido estrito da palavra, são conseqüências advindas de um conjunto de esforços em uma direção. A partir das considerações constantes nesse capítulo, devem ficar claras as aplicabilidades e limitações dos métodos utilizados além da conscientização da necessidade de estudos adicionais complementares.

As proposições desse estudo não são consideradas definitivas, para tanto são sugeridas uma série de outras técnicas e implementações no sentido de produzir resultados complementares e adicionais.

7.2 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Todos os resultados gerados nesse estudo estão relacionados à utilização das técnicas geoestatísticas. Mesmo considerando a falta de um trabalho orientado à otimização da lavra, e sabendo das restrições de aplicabilidade, não seria demasiado exagero sugerir a introdução destas técnicas no dia-a-dia da empresa como suporte a análises qualitativas e quantitativas.

A estatística exploratória, realizada para os dados provenientes da pesquisa da mina, permite orientar a escolha de estratégias de estudo e modelagem. Desta forma foi considerada como uma etapa de fundamental importância para a aplicação das técnicas geoestatísticas.

Entre outros resultados, a análise exploratória mostrou que os dados, para alguns compartimentos, apresentam uma distribuição assimétrica, que pode ser suavizada com a transformação logarítmica. O coeficiente de variação, sempre inferior a um, aliado a análise de outros gráficos, tais com histogramas e "box plot", permitiu verificar que os dados tem um comportamento homogêneo, cujas populações não apresentam valores erráticos.

A decisão de estacionaridade foi reconhecida como um passo decisivo da análise. Só foi tomada após extensa análise descritiva que leve em conta a posição das mostras.

A capacidade de detectar a variabilidade é determinada em grande parte pelo plano amostral, que precisa ser definido tendo em mente as estruturas que deseja-se detectar. Pode-se dizer que o maior problema encontrado na aplicação das técnicas geoestatísticas foi a forte heterogeneidade amostral, pois, embora o modelo geológico sugira a presença de uma anisotropia, os variogramas não apresentam uma estrutura aceitável de covariância espacial, exceto para as direções dos furos de sondagens, configurando assim uma amostragem tendenciosa.

As estimativas feitas por krigagem ordinária permitem verificar que, embora de modo preliminar, existem pelo menos dois controles na variação dos teores: 1) em menor escala, provavelmente um controle litológico - sedimentar, que teria condicionado a individualização de grandes faixas na distribuição dos teores na mina, na qual o SiO₂ apresenta uma distribuição mais constante; 2) em maior escala, um controle litológico - metamórfico, que estaria representado pela repetição de pequenas faixas ou ciclos em torno de 30 a 40 metros, observados em *trends* N30-40E com caimento para NW; tal variação de teores está refletida tanto no Mg quanto no Si, mas principalmente no Si, por este apresentar a característica de maior mobilidade durante processos de metamorfismo.

Por tratar-se de um estudo de modelagem de uma mina em lavra, utilizando estimativa por krigagem, procurou-se responder questões relacionadas a um modelo de blocos tridimensional, onde se tem acesso ao valor médio estimado para o bloco com a maior precisão possível. Cabe ressaltar que as alterações nos parâmetros destes modelos não mostraram diferenças marcantes nos resultados da validação cruzada.

Dessa forma, fica demonstrada uma ferramenta para auxílio e orientação no planejamento de médio e longo prazo pela previsão do valor do atributo de qualidade (teores de SiO e MgO) presente em cada zona da jazida.

7.2.1 - PROPOSIÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os seguintes temas são sugeridos para continuidade deste trabalho:

1. Implementação de uma sistemática de controle de teor em frente de operação (análise sistemática do pó dos furos para detonação e registro de suas coordenadas geográficas);
2. Realização de uma cruz geoestatística para as direções onde não se tem um espaçamento amostral adequado;
3. Simulação para controle de teor em frente de lavra;
4. Krigagem e Simulação condicional para avaliação de novas áreas de interesse;
5. Estimativa e simulação dos teores de sílica e magnésio contidos em cada um dos blocos para avaliação da qualidade do bloco e determinação do erro de flutuação;
6. Simulação de dimensão de pilha de homogeneização relativa à dimensão de blocos de lavra e flutuabilidade de teor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, F. F. M. de. 1944. *Collenia Itapevensis - Um fóssil Pré-Cambriano no Estado de São Paulo*. São Paulo, Fac. Fil. Ci. Letras, p. 29 - 106 (Boletim 45).
- Bigarella, J. J.; Salamuni, R. 1956. Estudos preliminares na Série Açungui. V - Estruturas organógenas nos dolomitos da Formação Capiirú (Estado do Paraná), Dusênia, Curitiba, 7 (6): 317 - 323.
- Bigarella, J. J.; Salamuni, R. 1958. *Estudos Preliminares da Série Açungui. VII. A Formação Votuverava*. Curitiba, Bol. Inst. Hist. Nat. Geol. p. 1 - 14.
- Bigarella, J. J.; Salamuni, R.; Pinto, V. M. 1967. Geologia do Pré-Devoniano e Intrusivas Subsequentes da Porção Oriental do Estado do Paraná. *Boletim Paranaense de Geociências*, p. 23 - 25.
- Campanha, G. A. C. 1991. *Tectônica do Proterozóico no Alto e Médio Vale do Ribeira - Estados de São Paulo e Paraná*. São Paulo. USP, São Paulo, Tese de doutoramento.
- Clark, I. 1979. *Practical geostatistics*. Essex, Applied Science Publ. 129 p.
- Cordeiro D. S.; Felipe, R. S.; PONTES, J. B. 1981. Notas sobre ocorrência de fluorita do Vale do Ribeira (PR). In: SBG, Simpósio Regional de Geologia, 3, Curitiba, *Anais* 1:21 - 35.
- Cressie, N. 1989. *Geostatistics*. The American Statistician, Alexandria, 43(4): 197-202.
- Cressie, N. 1989. Spatial prediction and ordinary kriging. *Mathematical Geology*, New York, 20(4): 405 – 21, 1988. [Erratum, *Mathematical Geology*, New York, 21(4): 493 – 4, 1989.]
- Cressie, N. 1991. *Statistics for spatial data*. New York, John Wiley, 900p.

- Derby, O. 1878. Geologia da região diamantífera da Província do Paraná, Brasil. *Arq. Mus. Nac.* Rio de Janeiro, 3:86 - 89.
- Deutsch, C. V.; Journel, A. G. 1996. GSLIB: Geostatistics software library and user's guide. Oxford University Press.
- Ebert, H. - 1971 - Observações sobre a litologia e subdivisão do Grupo Setuva no Estado do Paraná. In: Congresso Brasileiro Geologia, 25, São Paulo, *Anais*, 1:131 - 165.
- Fiori, A. P. 1990. *Tectônica e estratigrafia do Grupo Açungui a norte de Curitiba*. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, Tese de Livre-Docência, 261 p.
- Fiori, A. P. 1992. Tectônica e estratigrafia do Grupo Açungui (PR). *Boletim do Instituto de Geociências.*, 23: 55 - 74
- Fiori, A. P. 1993. Sobre a evolução geológica do Grupo Açungui. In: SBG, Simpósio Sul Brasileiro de Geologia, 5, Curitiba. Bol. de resumos. p. 5.
- Fuck, R. A.; Marini, O.J.; Trein, E.; Muratori, A. 1971 Geologia do leste Paranaense. In: SBG, Congresso Brasileiro Geologia, 25, Rio de Janeiro, *Anais*, 1:121-130.
- Gomes, D. L., Geologia da Mina Saivá. 1989. Relatório técnico interno. Votorantim – Cia de Cimentos Portland Rio Branco.
- Guerra, P. A. G. 1988. *Geoestatística operacional*. Brasília, Ministério das Minas e Energia, 145p.
- Isaaks, E. H.; Srisvastava, R. M. 1989. *An introduction to applied geostatistics*. New York, Oxford University Press, 560 p.
- Journel, A. G. 1988. *Geostatistics for Environmental Sciences*. Las Vegas, Environmental Protection Agency.
- Journel, A.; Huijbregts, Ch. 1978. Mining geostatistics. London, Academic Press.

- Li, D.; Lake, L. W. 1994. A moving window semivariance estimator. *Water Resources Research*, Washington, 30(5). p. 1479- 89.
- Marini, O. J.; Trein, E.; Fuck, R. A. 1967. O Grupo Açungui no Estado do Paraná. *Boletim Paranaense de Geociências.*, Curitiba, **23/25**: 43 - 103.
- Matheron, G. 1971. The theory of regionalized variables and its applications. *Les Cahiers du CMM, ENSPM*, Paris. Fasc. nº 5.
- Matheron, G., 1963. Principles of Geostatistics. *Economic Geology*, **58**: 1246-1266.
- Olea, R. A. 1991. *Geoestatistical Glossary and Multilingual Dictionary*. Inst. Assoc. Math. Geology, n.3: Oxford University Press.
- Oliveira, A. I.; Leonardos, O. H. 1943. *Geologia do Brasil*. Rio de Janeiro. *Ministério da Agr. Serv. Didático*. **2**:782.
- Oliveira, E. P. 1927. *Geologia dos recursos minerais do Estado do Paraná*. Rio de Janeiro. *Serv. Geol. Min., Monografia*. **6**:172.
- Pannatier, Y. 1996. *VARIOWIN: Software for Spatial Data Analysis in 2D*, Springer-Verlag, New York, NY.
- Pontes, J. B. 1982. *Geologia e potencialidades econômicas da Formação Água Clara (PR)*. In: SBG, Congresso Brasileiro Geologia, 32, Salvador, *Anais*, **3**:1.002-1.016.
- Ribeiro Jr, P. J. 1985. *Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de parâmetros físicos do solo. Piracicaba*. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" ESALQ/USP, São Paulo, Tese de Mestrado, 100p.
- Robinson, G. K. 1990. A role for variograms. *Australian Canberra, Journal of Statistics*. **32**(3): p. 327-35.

- Samper, F. J.; Ramirez, J. C. 1990. *Geoestadística - aplicaciones a la hidrogeología subterránea*. Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. 484p.
- Scholl, W. U. 1981. Geologia do Grupo Açungui na região a noroeste de Rio Branco do Sul, Paraná. In: SBG, Simpósio Regional. Geologia, 3, Curitiba, *Atas*, 1:170 - 184.
- Scholl, W. U.; Silva, A. C. G. A.; Monastier, M. S. 1982. A Formação Setuva do Pré-Cambriano do Estado do Paraná. In: SBG, Congresso Brasileiro Geologia, 32, Salvador, *Anais*, 1:55 - 63.
- Soares, P. C. 1985. Relatório Sucinto Parcial dos Trabalhos de Geoestatística da Mina do Saivá. Relatório interno - CIMENTO VOTORAN (Cia. Cimento Portland Rio Branco. Divisão de Mineração). Inédito. Curitiba - PR.
- Soares, P. C. 1987. Sequências tectono-sedimentares e tectônica deformadora no centro-oeste do escudo paranaense. In: Simpósio Sul-Brasileiro Geologia, 3, Curitiba, *Atas*, 2:743 - 771.
- Soares, P. C. 1996. Seleção de Casos em Arquivos X, Y, Z em Turbo Basic (*SELCASO*). Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná.. Curitiba - PR.
- Stereonet Version 3.3 - Licensed to UNESP Copyright © 1995 Geological software.
- Valim, Armando. VARFIT – *Software de Variografia*. 1998. Laboratório de Processamento Mineiro (LAPROM). Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN). Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). PortoAlegre.
- Winters, A. A. M. 1978. Descrição dos furos de sondagem e geologia da mina Saivá (Relatório Interno - VOTORANTIN - CIA DE CIMENTO PORTLAND RIO BRANCO).