

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas , METALÚRGICA E DE
Materiais -PPGEM**

**MODELAGEM E AVALIAÇÃO DE DADOS GEOFÍSICOS E GEOQUÍMICOS
APLICADA NA PESQUISA DE METAIS BÁSICOS E Au NO PROSPECTO
VOLTA GRANDE (COMPLEXO INTRUSIVO LAVRAS DO SUL, RS, BRASIL)**

CARLOS ALBERTO DA FONSECA PIRES

**Tese de
Doutorado em Engenharia**

Porto Alegre

MARÇO - 2002

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

**MODELAGEM E AVALIAÇÃO DE DADOS GEOFÍSICOS E GEOQUÍMICOS
APLICADA NA PESQUISA DE METAIS BÁSICOS E Au NO PROSPECTO
VOLTA GRANDE (COMPLEXO INTRUSIVO LAVRAS DO SUL, RS, BRASIL)**

Carlos Alberto da Fonseca Pires

Geólogo

Trabalho realizado no Laboratório de Modelagem Geológica e Ambiental (MODEGAGE – DEMIN) da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa e Tecnologia Mineral

Porto Alegre

MARÇO - 2002

Essa Tese foi julgada adequada para obtenção do título de Doutor em Engenharia, área de concentração e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Adelir José Strieder

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Adelir José Strieder (PPGEM – UFRGS)

Prof. Dr. Marcos Túlio Menna Barreto de Villena (PPGEM – UFRGS)

Prof. Dr. Francisco José F. Ferreira (DGEO - UFPR)

Prof. Dr. José Leonardo Silva Andriotti (DE Geologia – UNISINOS)

Prof. Dr. Telmo Fernando P. de Quadros (DEMIN – UFRGS)

Dedico aos meus filhos Bruno e Carlos, e a minha esposa Vânia.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Adelir José Strieder pelo estímulo e acompanhamento na realização desse trabalho.

Aos colegas Sérgio Buffon, Firmino Constantino de Moraes Neto, Débora Roldão, Sandro Schneider, Antônio Pedro Viero, Edgardo Ramos Medeiros, José Luís Silvério da Silva, Luís Eduardo de Sousa Robaina, Andréa Valli Nummer, Átila Rosa e demais colegas professores e servidores do Departamento de Geociência da Universidade Federal de Santa Maria pelo apoio e incentivo.

À colega Vlândia Cristina Souza pelo apoio e indispensável auxílio na análise variográfica dos dados e na elaboração dos produtos gráficos desse trabalho e aos acadêmicos da UFSM, Denecir de Almeida Dutra e Quelen Osório, bem pelo auxílio na execução das tarefas desse trabalho

Ao corpo técnico da Companhia Riograndense de Mineração, em especial aos geólogos Fernando Dable de Mello, José Alcides Ferreira, Roberto Saraiva; e aos engenheiros Jorge Dariano Gavronski, Nilo Rigotti, pelo apoio logístico nas atividades de campo.

A todos que colaboraram direta ou indiretamente; aos amigos; meus irmãos.

Em especial, à minha esposa Vânia e aos meus filhos Bruno e Carlos pelas palavras de conforto e gestos de carinho, especialmente nos momentos mais difíceis da execução desse trabalho.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Mapa de localização e acesso à região de Lavras do Sul (RS).....	4
Figura 1.2 – Mapa geológico simplificado e localização das principais ocorrências minerais na região de Lavras do Sul (RS) (Nardi, 1984).....	6
Figura 1.3 Mapa geológico da região de Lavras do Sul e localização das principais ocorrências minerais (Gastal 19997)	7
Figura 1.4 – Arcabouço geológico–geotectônico do Escudo Sul-riograndense (modificado a partir de Santos et al. 1989).....	11
Figura 1.5 – Mapa Geológico do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS) (Strieder, 2001).....	32
Figura 1.6 - Mapa digital de elevação e infra-estrutura do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS) (Strieder, 2001)	37
Figura 2.1 – Diagrama ilustrando o grau de superposição dos maiores grupos de software de uso comum nas atividades de exploração mineral (Power et al, 1995).....	56
Figura 3.1 - Fluxograma do processo de integração de dados no Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS).....	85
Figura 3.2 - Estruturação do banco de dados da área 1.....	86
Figura 3.3 - Estruturação do banco de dados da área 2.....	87
Figura 3.4 - Estruturação do banco de dados da área 4	87
Figura 3.5 - Distribuição em 2D do levantamento CSAMT:.....	89
Figura 3.6 - Distribuição em 3D do levantamento CSAMT.....	89
Figura 3.7- Distribuição em 3D do levantamento CSAMT.....	90
Figura 3.8 – Planilha <i>assay</i> (teores de Au e Cu)	92
Figura 3.9 – Planilha <i>collar</i> (teores de Au e Cu)	92
Figura 3.10 –Planilha <i>survey</i> (teores de Au e Cu).....	92
Figura 3.11 - Histogramas de resistividade aparente da área 1, Prospecto Volta Grande: (valores aritméticos e frequência acumulada).....	96
Figura 3.12 - Histogramas de resistividade aparente da área 1 Prospecto Volta Grande (frequência do logaritmo e frequência acumulada)	96
Figura 3.13 - Histogramas de resistividade aparente da área 2, Prospecto Volta Grande: (valores aritméticos e frequência acumulada)	97
Figura 3.14 - Histogramas de resistividade aparente da área 2 Prospecto Volta Grande (frequência do logaritmo e frequência acumulada).....	97

Figura 3.15 - Histogramas de resistividade aparente da área 4, Prospecto Volta Grande: (frequência valores aritméticos e frequência acumulada)	98
Figura 3.16 - Histogramas de resistividade aparente da área 4, Prospecto Volta Grande: (frequência do logaritmo e frequência acumulada)	98
Figura 3.17 - Pontos cujos valores de resistividade aparente são menores do que 600 Ω m	103
Figura 3.18 - Croqui da área 2 do Prospecto Volta Grande.....	105
Figura 3.19 - Histogramas da área de ocorrência de granito, na área 2. (valores aritméticos e frequência acumulada).....	105
Figura 3.20 - Histogramas da área de ocorrência de monzogranito, na área 2, (valores aritméticos e frequência acumulada).....	106
Figura 3.21 - Histogramas da área de ocorrência de rochas vulcanoclásticas, na área 2, (valores aritméticos e frequência acumulada).....	106
Figura 3.22 - Histogramas da área de ocorrência de granito, na área 2, (valores aritméticos e frequência acumulada)	107
Figura 3.23 - Histogramas da área de ocorrência de monzogranito, na área 2, (valores aritméticos e frequência acumulada).....	107
Figura 3.24 - Histogramas de resistividade aparente na área de ocorrência de rochas vulcanoclásticas, na área 2, (valores aritméticos e frequência acumulada).....	108
Figura 3.25 - Histogramas de teores de Au da área 1, (valores aritméticos e frequência acumulada).....	112
Figura 3.26 - Histogramas de teores de Au da área 1, (frequência dos logaritmos e frequência acumulada dos logaritmos).....	112
Figura 3.27 - Histogramas de teores de Au da área 2, (valores aritméticos e frequência acumulada).....	113
Figura 3.28 - Histogramas de teores de Au da área 2, (frequência dos logaritmos e frequência acumulada dos logaritmos)	113
Figura 3.29 - Histogramas de teores de Au da área 4, (valores aritméticos e frequência acumulada).	113
Figura 3.30 - Histogramas de teores de Au da área 2, (frequência dos logaritmos e frequência acumulada dos logaritmos)	114
Figura 3.31 - Histogramas de teores de Cu da área 1, (valores aritméticos e frequência acumulada).	114
Figura 3.32 - Histogramas de teores de Cu da área 1, (frequência dos logaritmos e frequência acumulada dos logaritmos)	114

Figura 3.33 - Histogramas de teores de Cu da área 2, Prospecto Volta Grande : (valores aritméticos e frequência acumulada)	115
Figura 3.34 - Histogramas de teores de Cu da área 2, (frequência dos logaritmos e frequência acumulada dos logaritmos).....	115
Figura 3.35 - Histogramas de teores de Cu da área 4, (valores aritméticos e frequência acumulada)	115
Figura 3.36 - Histogramas de teores de Cu da área 4, (frequência dos logaritmos e frequência acumulada dos logaritmos)	116
Figura 3.37 - Histograma de frequência cumulativa com todos os valores de resistividade aparente da área 2 (granito, monzogranito e rochas vulcanoclásticas).....	120
Figura 3.38 - Semivariograma omnidirecional área 1.....	121
Figura 3.39 - Semivariograma resistividade aparente área 1, azimute 0 e Dip 0.....	121
Figura 3.40- Semivariograma resistividade aparente área 1, azimute 0° e Dip 45°	122
Figura 3.41 - Semivariograma resistividade aparente área 1, azimute 0° e Dip 90°	122
Figura 3.42- Semivariograma resistividade aparente área 1, azimute 90° e Dip 90°	123
Figura 3.43 - Semivariograma resistividade aparente área 1, azimute 120° e Dip 90°	124
Figura 3.44 - Semivariograma resistividade aparente área 1, azimute 150° e Dip 90°	124
Figura 3.45- Semivariograma resistividade aparente área 1, azimute 180° e Dip 90°	125
Figura 3.46- Semivariograma resistividade aparente área 1, azimute 210° e Dip 90°	125
Figura 3.47 - Semivariograma resistividade aparente área 1, azimute 240° e Dip 90°	126
Figura 3.48 - Semivariograma resistividade aparente área 1, azimute 270° e Dip 90°	126
Figura 3.49 - Semivariograma omnidirecional resistividade aparente área 2	127
Figura3.50 - Semivariograma resistividade aparente área 2, azimute 0° e Dip 0°	128
Figura 3.51- Semivariograma resistividade aparente área 2, azimute 0° e Dip 45°	128
Figura 3.52 - Semivariograma resistividade aparente área 2, azimute 0° e Dip9 0°	129
Figura 3.53 - Semivariograma resistividade aparente área 2, azimute 90° e Dip 90°	130
Figura 3.54 - Semivariograma resistividade aparente área 2, azimute12 0° e Dip90°	130
Figura 3.55- Semivariograma resistividade aparente área 2, azimute15 0° e Dip90°	131
Figura 3.56 - Semivariograma resistividade aparente área 2, azimute18 0° e Dip90°	131
Figura 3.57 - Semivariograma resistividade aparente área 2, azimute210° e Dip90°	132
Figura 3.58 - Semivariograma resistividade aparente área 2, azimute24 0° e Dip90°	132
Figura 3.59-Semivariograma resistividade aparente área 2, azimute270° e Dip90°	133
Figura 3.60 - Semivariograma omnidirecional resistividade aparente área 4.	134

Figura 3.61 - Semivariograma resistividade aparente área 4, azimute 0° e Dip0°.....	135
Figura 3.62 - Semivariograma resistividade aparente área 4, azimute 0° e Dip45°.....	135
Figura 3.63 - Semivariograma resistividade aparente área 4, azimute 0° e Dip90°.....	136
Figura 3.64 - Semivariograma resistividade aparente área 4, azimute 0° e Dip90°.....	137
Figura 3.65 - Semivariograma resistividade aparente área4, azimute 90° e Dip90°.....	137
Figura 3.66 - Semivariograma resistividade aparente área 4, azimute 120° e Dip90°.....	138
Figura3.67 - Semivariograma resistividade aparente área 4, azimute150° e Dip90°.....	138
Figura 3.68 - Semivariograma resistividade aparente área 4, azimute 180° e Dip90°.....	139
Figura 3.69 - Semivariograma resistividade aparente área 4, azimute 240° e Dip90°.....	139
Figura3.70 - Semivariograma resistividade aparente área 4, azimute270° e Dip90°.....	140
Figura 3.71 - Histograma de freqüência resistividade, área 1 valores reais e estimado.....	149
Figura 3.72 - Histograma de freqüência do erro e <i>scatterplot</i> , área 1, valor real e estimado.....	150
Figura 3.73 - Histograma de freqüência resistividade, área 2, valores reais e estimado	150
Figura 3.74 - Histograma de freqüência do erro e <i>scatterplot</i> , área 2, valor real e estimado.....	150
Figura 3.75 - Histograma de freqüência resistividade, área 4 valores reais e estimado.....	150
Figura 3.76 - Histograma de freqüência do erro e <i>scatterplot</i> , área 4, valor real e estimado.....	150
Figura 3.77 - Gráfico da correlação da resistividade aparente x Teores de Au, área 1.....	155
Figura 3.78 - Gráfico da correlação da resistividade aparente x Teores de Cu, área 1.....	156
Figura 3.79 - Gráfico da correlação da resistividade aparente x Teores de Au, área 2.....	157
Figura 3.80 - Gráfico da correlação da resistividade aparente x Teores de Cu, área 2	157
Figura 3.81 - Gráfico da correlação da resistividade aparente x Teores de Au, área 4	158
Figura 3.82 - Gráfico da correlação da resistividade aparente x Teores de Cu, área 4	159
Figura 3.83 – Perfil com as curvas de isovalores de resistividade da área 1.....	163
Figura 3.84 - Perfil com as curvas de isovalores de resistividade da área 2.....	164
Figura 3.85- Perfil com as curvas de isovalores de resistividade da área 4.....	165
Figura 4.1- Vista em planta dos wireframe para resistividade aparente $\leq 600\Omega\text{m}$, área 1.	167
Figura 4.2- Vista em perfil YZ do wireframe para resistividade aparente $\leq 600\Omega\text{m}$, área 1.....	168
Figura 4.3 - Vista (3D) dos wireframe para resistividade aparente $\leq 600\Omega\text{m}$, área 1.	169
Figura 4.4 - Corpo com resistividade menor do que 600 ohm/m, na área 1.....	170
Figura 4.5 - Zoom, teores de cobre e superfície do corpo de baixa resistividade aparente,aa área 1.	171
Figura 4.6 - Vista dos <i>wireframe</i> para resistividade aparente no intervalo 600 - 800 Ωm , área 1.	172
Figura 4.7 – Vista dos <i>wireframes</i> $\leq 600\Omega\text{m}$; 600-800 Ωm e 800-1200 Ωm , na área 1.....	173

Figura 4.8 - Vista em planta do <i>wireframe</i> da resistividade aparente $\leq 600\Omega\text{m}$, área 2.	174
Figura 4.9 - Vista em perfil YZ do <i>wireframe</i> da resistividade aparente $\leq 600\Omega\text{m}$, área 2.	175
Figura 4.10 - Vista (3D) <i>wireframe</i> resistividade aparente $\leq 600\Omega\text{m}$, área 2.....	176
Figura 4.11 - Vista em planta do <i>wireframe</i> da resistividade aparente $\leq 600\Omega\text{m}$, área 4.	177
Figura 4.12 - Vista em perfil YZ do <i>wireframe</i> da resistividade aparente $\leq 600\Omega\text{m}$, área 4.	178
Figura 4.13 - Vista (3D) <i>wireframe</i> resistividade aparente $\leq 600\Omega\text{m}$, área 4.....	179

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

% - porcentagem.

θ - A diferença de fase.

σ - desvio padrão.

\leq - menor ou igual.

μ -- permeabilidade magnética.

ρ - resistividade do meio.

ω é a frequência angular ($\omega = 2\pi f$).

$\mu_0 = (4\pi \times 10^{-7} \text{ } \Omega\text{s/m})$ permeabilidade padrão para condutores não magnéticos).

ρ_a - resistividade aparente.

(BP - plano-posterior).

$^{\circ}\text{C}$ –medidas de (temperatura graus Celsius).

$\Omega\text{s/m}$ – unidade de permeabilidade.

$<$ - menor do que.

$>$ - maior do que.

$2\pi f$ – $2 \times 3,1416 \times$ frequência.

2D – duas dimensões.

3D – três dimensões.

A - padrão de fraturamento definido por Hancock 1985.

AAM-I Associação de arco magmático I.

AAM-II Associação de arco magmático II.

Au - ouro.

BR-290 rodovia federal.

BR-392 - rodovia federal.

B_y - densidade de fluxo.

CAD - *Computer Aided Design*.

CILS – Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS.

cm - centímetros.

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais.

cpy – calcopirita.

CRM - Companhia Riograndense de Mineração.

CSAMT - *Controlled Source Audio frequency Magneto-telluric*.

Cu - cobre.

DEMIN – Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

DNPM – *Departamento Nacional de Produção Mineral*.

DPM - Diretoria de Produção Mineral do Rio Grande do Sul.

EM - eletro-magnético.

Eng. - engenheiro.

EW – direção leste-oeste.

E_x - campos elétrico.

Fig. – figura.

fO_2 – pressão parcial de oxigênio.

FP plano-frontal.

GIS - *Geographic Information System*.

GSLIB - *Geostatistical Software Library*.

H^+ - cátions hidrogênio.

H_y - campo magnético

Hz – Hertz (unidade de frequência)

I - padrão de fraturamento definido por Hancock 1985.

i,j,k - coordenadas locais do centróide da cela.

IP – *Induced Polarization*.

km – quilômetros.

m – metros.

Ma – milhões de anos.

mm – milímetros.

MP - plano-médio limite.

mV/km – unidade de campo elétrico.

NE – direção nordeste.

NEL - sistema de coordenadas norte/sul, leste/oeste, cota, azimute e inclinação.

NS - direção norte-sul.

nT - unidade de campo magnético.

Pb - chumbo.

$p\text{CO}_2$ – pressão parcial de gás carbônico.

PIs - planos de informação

ppm - partes por milhão.

py – pirita.

qzo – quartzo.

Rb-Sr método de datação rubídio-estrôncio.

Ro (Rb-Sr).

RS – Estado do Rio Grande do Sul.

RS-111 – rodovia estadual.

SGMB - Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil.

SIG - Sistemas de Informações Georreferenciadas.

Sm-Nm – método de datação Samário - Niodímio.

SP – *Spontaneous Potentials*.

SW – direção sudoeste.

T - padrão de fraturamento definido por Hancock (1985).

U-Pb – método de datação urânio-chumbo.

V - padrão de fraturamento definido por Hancock (1985).

VLF – *Very Low Frequency*.

X - padrão de fraturamento definido por Hancock (1985).

X,Y,Z - coordenadas geográficas.

Y - padrão de fraturamento definido por Hancock (1985).

Zn – zinco.

$\gamma(h)$ - semivariograma.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Tabulação da distribuição das sondagens por área de pesquisa dentro do Prospecto da Volta Grande (Dable de Mello 1995).....	36
Tabela 3.1 - Resumo estatístico dos dados de resistividade aparente: distribuição dos valores aritméticos e de seus respectivos logaritmos, nas áreas 1, 2 e 4 do Prospecto Volta Grande (Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS).....	99
Tabela 3.2 - Relação das médias (em ordem crescente) dos valores de resistividade aparente da área 1, área 2, e área 4 do prospecto Volta Grande (Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS).....	99
Tabela 3.3 - Relação dos R_k em função do número de grupos e dos graus de liberdade dos dados de resistividade das áreas 1, 2 e 4 do prospecto Volta Grande (Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS).....	101
Tabela 3.4 - Determinação do valor R_x em função do valor R_k dos dados de resistividade da área 1, área 2, e área 4 do prospecto Volta Grande (Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS).....	101
Tabela 3.5 - Resumo estatístico dos valores da variável resistividade aparente na áreas de ocorrência de granito, monzogranito e rochas vulcanoclásticas, área 2 do Prospecto Volta (Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS).....	104
Tabela 3.6 - Relação das médias (em ordem crescente) dos valores de resistividade da área 1, área 2, e área 4, no Prospecto Volta Grande (Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS).....	108
Tabela 3.7 - Relação dos R_k em função do número de grupos e graus de liberdade dos dados de resistividade da área 1, área 2, e área 4, no Prospecto Volta Grande (Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS).....	108
Tabela 3.8 - Determinação do valor R_x em função do valor R_k dos dados de resistividade da área 1, área 2, e área 4, no Prospecto Volta Grande (Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS).....	109
Tabela 3.9 Resumo estatístico das variáveis teores de Au e Cu nas áreas 1, 2 e 4 do Prospecto Volta Grande (Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS)	109
Tabela 3.10 - Parâmetros básicos da subrotina Gamv-GSLIB e dos modelos gerados no <i>software</i> Varfit para o semivariograma omnidirecional que contém duas estruturas esféricas, área 1 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS)..	116
Tabela 3.11 - Parâmetros básicos da subrotina Gamv-GSLIB e dos modelos gerados no <i>software</i> Varfit para os semivariogramas direcionais e contém duas estruturas esféricas (área 1 do Prospecto Volta Grande).....	120
Tabela 3.12 - Parâmetros básicos da subrotina Gamv-GSLIB e dos modelos gerados no <i>software</i> Varfit para todos os semivariogramas direcionais que contém duas estruturas esféricas (área1 do Prospecto Volta Grande).....	121

Tabela 3.13 Parâmetros básicos da subrotina Gamv-GSLIB e dos modelos gerados no <i>software</i> Varfit para o semivariograma omnidirecional que contém duas estruturas esféricas (área 2 do Prospecto Volta Grande).....	123
Tabela 3.14 Parâmetros básicos da subrotina Gamv-GSLIB e dos modelos gerados no <i>software</i> Varfit para o semivariograma que contém duas estruturas esféricas (área 2 do Prospecto Volta Grande).....	127
Tabela 3.15 - Parâmetros básicos da subrotina Gamv-GSLIB e dos modelos gerados no <i>software</i> Varfit para todos os semivariogramas direcionais que contém duas estruturas esféricas (área 2 do Prospecto Volta Grande).....	127
Tabela 3.16 - Parâmetros básicos da subrotina Gamv-GSLIB e dos modelos gerados no <i>software</i> Varfit para o Semivariograma ominidirecional e contém duas estruturas esféricas (área 4 do Prospecto Volta Grande).....	129
Tabela 3.17 - Parâmetros básicos da subrotina Gamv-GSLIB e dos modelos gerados no <i>software</i> Varfit para todos semivariogramas e contém duas estruturas esféricas (área 4 do Prospecto Volta Grande).....	133
Tabela 3.18 - Parâmetros básicos da sub rotina Gamv-GSLIB e dos modelos gerados no <i>software</i> Varfit para todos os semivariogramas direcionais e contém duas estruturas esféricas, (área 4 do Prospecto Volta Grande).....	134
Tabela 3.19 - Parâmetro para sub-rotina KT3d-GSLIB para validação do modelo variográfico dos valores de resistividade aparente da área 1 do Prospecto Volta Grande (Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS).....	136
Tabela 3.20 - Parâmetro para sub-rotina KT3d-GSLIB para validação do modelo variográfico dos valores de resistividade aparente da área 2 do Prospecto Volta Grande (Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS).....	144
Tabela 3.21 - Parâmetro para sub-rotina KT3d-GSLIB para validação do modelo variográfico dos valores de resistividade aparente da área 4 do Prospecto Volta Grande (Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS).....	145
Tabela 3.22. Resumo estatístico dos dados de resistividade da área 1 do Prospecto Volta Grande (Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS), valores reais e valores estimados.....	146
Tabela 3.23. Resumo estatístico dos dados de resistividade da área 2 do Prospecto Volta Grande (Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS) , valores reais e estimados.....	148
Tabela 3.24. Resumo estatístico dos dados de resistividade da área 4 do Prospecto Volta Grande (Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS), valores reais e valores estimados.....	148
Tabela 4.1 - Cálculo de volume das estruturas condutivas das áreas 1, 2 e 4 do Prospecto Volta Grande (Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS), médias, variâncias e desvio padrão da resistividade aparente associada, bem como teor de Au e teor Cu correlacionáveis.	183

RESUMO

A modelagem, a correlação e a análise de dados geofísicos e geoquímicos, aplicados para avaliar/definir a distribuição e o controle de teores de minério num espaço 3D, não são procedimentos adotados para o caso de depósitos de metais básicos e Au. Essa tese de doutorado tem o objetivo de avaliar e definir uma metodologia de modelagem, correlação e análise de dados geofísicos e geoquímicos para controle de teores de metais básicos e Au. Tal metodologia foi aplicada no Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS).

A região de Lavras do Sul (RS) possui uma série de ocorrências minerais do tipo veios de quartzo com metais básicos e Au, as quais estão relacionadas com o processo de alojamento do Complexo Intrusivo Lavras do Sul. Esse complexo é uma intrusão predominantemente granítica, zonada e multifásica, cujas rochas têm filiação com as séries shoshonítica a alcalina. As ocorrências de veios estão relacionadas a zonas de alteração hidrotermal controladas por fraturas predominantemente WNW-ESE. O Prospecto Volta Grande é constituído por uma série de tais veios alojados tanto no granito intrusivo, quanto nas rochas vulcânicas e vulcanoclásticas da Formação Hilário.

A metodologia desenvolvida consiste: 1) da construção de uma base de dados comum para o georreferenciamento 3D dos dados; 2) processamento estatístico e geoestatístico das variáveis de interesse (dados geofísicos e geoquímicos); 3) modelagem 3D das variáveis de interesse para definir a distribuição espacial; e 4) análise da correlação entre as variáveis para definir o controle 3D dos teores de minério por meio de métodos indiretos. Essa metodologia, na medida em que haja a possibilidade de várias fontes de informação e a possibilidade de aplicar algoritmos de lógica matemática, poderá incorporar a integração de dados num espaço 3D.

A aplicação de tal metodologia no Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS) permitiu verificar que os dados geofísicos e geoquímicos se adaptam mais adequadamente a uma distribuição do tipo lognormal. Além disso, a comparação múltipla das médias de resistividade aparente permitiu distinguir um controle litológico sobre os dados geofísicos.

Desse modo, foram definidos os procedimentos de análise variográfica e, então, os parâmetros para a modelagem 3D dos corpos condutores em cada área de pesquisa. A adequação do suporte amostral dos dados geofísicos e geoquímicos permitiu a correlação entre essas variáveis. A análise dos diagramas de correlação revelou superposição de pulsos de mineralização com distintas cargas metálicas. A utilização de métodos indiretos para controle de teores em depósitos sulfetados do tipo veios de quartzo com Au + Cu é, portanto, uma possibilidade concreta, garantida a adequada resolução espacial dos levantamentos geofísicos.

ABSTRACT

The modeling, correlation and analysis of geophysical and geochemical data applied to evaluate or to define the 3D distribution and control ore contents are not usual procedure for exploration of basic metals and Au. This doctorate thesis aims to evaluate and to define a methodology to model, correlate and analysis geophysical and geochemical data to control basic metals and Au contents. Such a methodology was applied in Volta Grande Prospect (Lavras do Sul, RS).

The Lavras do Sul (RS) region has a group of quartz lode veins with basic metals and Au, which are related with emplacement process of Lavras do Sul Intrusive Complex. This complex is predominantly a granitic intrusion, whose rocks are affiliated to the shoshonitic to alkaline rocks series. The lode veins are related to hydrothermal alteration zones controlled by predominant WNW – ESSE fractures. The Volta Grande Prospect show a large number of such lode veins, emplaced in the intrusive granite and also in the volcanic and volcano-sedimentary rocks of Hilário Formation.

The developed methodology consists of 1) constructing a common cartographic base to 3D data; 2) statistical and geostatistical processing of interest variable (geophysical and geochemical data); 3) 3D modeling of interest variable to define their spatial distribution; 4) correlation analysis to define the 3D control of ore contents by indirect methods. This methodology might to incorporate 3D data integration if a greater number of information is available and is possible to apply logical mathematical algorithms.

The application of this methodology in Volta Grande Prospect (Lavras do Sul, RS) permit to verify that geophysical and geochemical data conform more adequately to a lognormal distribution. On the other hand, the average multiple comparison technique permits to distinguish a lithological control on the geophysical data. Then, the procedure of variographic analysis was defined, as well as the 3D modeling parameter for the conductive bodies in search area. The adjustment of sample support of geophysical and geochemical data revealed the telescoping of different mineralization pulses, each one with different metallic load. The use of indirect methods for grade control in sulphide-rich quartz-lode veins with Au + Cu is a concrete possibility, since one have an adequate spatial resolution of geophysical surveys.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

RESUMO

ABSTRACT

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Localização e acessos	3
1.2 Aspectos fisiográficos.....	4
1.3 Histórico da mineração em Lavras do Sul (RS).....	5
1.4 Aspectos geológicos regionais.....	10
1.5 Contexto geológico local.....	20
1.5.1 Geologia das rochas encaixantes do CILS.....	20
1.5.2 Geologia do CILS.....	22
1.5.3 Geologia das ocorrências do CILS e o Prospecto de Volta Grande.....	27
1.6 Objetivos.....	33
1.7 Metodologia de trabalho.....	34
2 FUNDAMENTAÇÃO CONCEITUAL DA INTEGRAÇÃO DE DADOS.....	40
2.1 Dispositivo Controlled Source Audio-frequence Magneto-telluric (CSAMT).....	41
2.2 Modelagem e Integração de dados.....	43
2.2.1 Características gerais do processo de modelagem e integração de dados.....	44
2.2.1.1 Sistemas de Informações Geográficas	45
2.2.2 Características do processo de modelagem e integração de dados em pesquisa mineral.....	49
2.2.3 Modelagem e Integração de dados 2D vs. 3D.....	54
2.2.4 Estruturas de dados na transformação 2D para 3D.....	57
2.3 Modelagem geológica de corpos de minério.....	63
2.3.1 Características gerais do processo de modelagem.....	65
2.3.2 Tipos de modelagem geológica e sua aplicação.....	70
2.4 Análise dos procedimentos de integração de dados em 2D e em 3D.....	81
3. MODELAGEM E INTEGRAÇÃO DE DADOS GEOFÍSICOS E GEOQUÍMICOS APLICADA À PESQUISA DE METAIS BÁSICOS E Au	84
3.1 Apresentação dos dados	86
3.2 Análise estatística dos dados	93
3.3 Modelamento geoestatístico da variável resistividade aparente	117

3.3.1 Estudo variográfico	119
3.3.2 Análise e interpretação dos resultados do modelamento geoestatístico	142
3.4 Validação cruzada	147
3.5 Correlação estatística entre a variável resistividade aparente e os teores de Au e Cu	151
3.6 Análise integrada de dados geofísicos e geoquímicos	161
3.5.1 Definição da geometria das estruturas condutivas (mineralizadas)	162
4. RESULTADOS OBTIDOS	167
4.1 Cálculo do volume das estruturas condutivas (mineralizadas), das médias dos valores de resistividade aparente associadas e teores de Au e Cu (correlação)	171
5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	184
6. CONCLUSÃO	190
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	192

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A geologia dos depósitos minerais tem evoluído e despertado a atenção dos homens desde os primórdios da civilização. Os depósitos minerais constituem, provavelmente, o primeiro aspecto da geologia analisado com a preocupação da lógica e do interesse econômico. A acumulação dos conhecimentos, durante todo o tempo em que a pesquisa dos metais foi feita de maneira apenas empírica, proporcionou as primeiras comparações entre diferentes depósitos com composição semelhante. Desde então, a pressão oriunda da necessidade cada vez maior dos metais, decorrente da evolução natural da civilização, e as dificuldades de encontrar novos depósitos fez com que o estudo da geologia dos depósitos minerais passasse a evoluir geometricamente. Assim, a quantidade de informações existentes e a rapidez de geração de novas informações eram tão grandes que se tornava muito difícil a elaboração de grandes sínteses, abrangendo a geologia de todos os depósitos (Pires, 1994).

O advento da informática tem trazido profundas modificações dentro das atividades de engenharia e de geologia; são grandes os efeitos que a sua utilização trouxe em quase todos os aspectos. As constantes melhorias implantadas nos computadores propiciaram uma expansão nas variedades de sua aplicação e criaram oportunidade de utilização desses equipamentos em diversas áreas, inclusive no tratamento estatístico de dados (Pires, 1994).

O conjunto de metodologias para a pesquisa mineral e as técnicas de correlação entre os resultados dessas diferentes metodologias foram profundamente influenciados pela introdução do processamento digital e da aquisição de dados espectrais por meio de sensores remotos. A modelagem e a integração de dados obtidos pelas mais variadas técnicas de pesquisa mineral via processamento digital constitui, hoje, a tecnologia mais poderosa para a hierarquização de áreas alvo e para o *follow up* da pesquisa mineral (p.ex.:

Gupta 1991; Legg, 1992). No entanto, o desenvolvimento dessa técnicas de modelagem e de integração de dados via processamento digital no Brasil tem sido lenta devido a diversos fatores: 1) carência de levantamentos geológico-estruturais de detalhe (escala 1:50.000, ou maior), 2) carência de levantamento geofísicos e/ou geoquímicos regionais e de detalhe, e 3) pequeno conhecimento dos controles geológico-estruturais dos depósitos minerais. Essas dificuldades quanto à modelagem e à integração de dados para a pesquisa mineral advém do fato dos levantamentos geológicos no território brasileiro serem muito recentes (meados da década de 1960 por meio dos convênios **DNPM/PROSPEC S.A.** e, após, por meio da **CPRM** - Comp. de Pesquisa de Recursos Minerais). Atualmente, alguns trabalhos têm sido realizados com base na determinação do comportamento espectral e radiométrico de alvos (p.ex.: Meneses & Porto, 1992; Hernandez & Crósta, 1994), ou com base na integração digital de dados resultantes de dois tipos de metodologias aplicados em pesquisa geológica regional (p.ex.: Queiroz & Blum, 1994), com base no processamento de levantamentos geofísicos aerotransportados (p.ex.: Ferreira *et al.* 1995; Crósta & Moore, 1989), ou com base em análises visuais de estruturas geológico-deformacionais (Strieder, 1993, Strieder & Nilson, 1993, Amaro & Strieder, 1994); porém, poucos são os estudos diretamente relacionados à integração de dados em pesquisa, que utilizam mais de três tipos distintos de metodologias simultaneamente (por exemplo: Quadros, 2000). Nesse ponto, é importante lembrar que a confiabilidade, ou o sucesso da seleção de alvos para pesquisa mineral por meio da integração digital de alvos está diretamente relacionada com a quantidade de dados distintos cujos valores anômalos coincidem numa determinada área (Strieder, 1996).

Os dados passíveis de integração para pesquisa mineral via processamento digital são bastante variados (Strieder, 1996):

- a) levantamentos geoquímicos de solos, de rochas, de água, ou de vegetais;
- b) levantamentos geofísicos, principalmente magnetometria e radiometria, mas também IP, gravimetria, SP e VLF;

c) levantamentos geológico-estruturais de detalhe, que incorporem a interpretação visual de lineamentos a partir de produtos impressos em papel (fotografias aéreas, imagens LANDSAT, imagens de radar);

d) determinação espectro-radiométrica de alvos mineralizados e de suas encaixantes e subsequente processamento digital para busca de áreas (conjunto de pixel) que possuam o mesmo padrão espectral;

e) além de outros dados geológicos, geofísicos e/ou geoquímicos disponíveis de acordo com a escala da investigação em curso.

A modelagem e a integração de dados para pesquisa mineral, então, tem sido realizada basicamente sobre dados dispostos em mapas de escala regional, ou semi-regional (2D). Algum grau de análise integrada de dados em 3D tem sido usada na indústria petrolífera. Porém, esse tipo de investigação não tem sido tentado para as investigações de detalhe em depósitos de minerais metálicos, como ferramenta de auxílio na programação de sondagens que conduzam à delimitação (modelamento geológico) e à avaliação de jazidas minerais.

1.1 Localização e acessos

O acesso à região de Lavras do Sul, a partir de Porto Alegre, é feito por meio da BR-290 até o entroncamento com a BR-392, de onde se dirige para Caçapava do Sul e, em seguida, toma-se a Rodovia Estadual RS-111 em direção à cidade de Lavras do Sul, por aproximadamente 51 km (Fig. 1.1). O acesso final às áreas é feito por meio de estradas municipais. Para o Prospecto da Volta Grande, o acesso é feito por meio da Rodovia RS-111, por 4 km a partir da cidade de Lavras do Sul em direção à Caçapava do Sul e, a partir daí, por estrada municipal por 5 km em direção à Fazenda Vista Alegre.

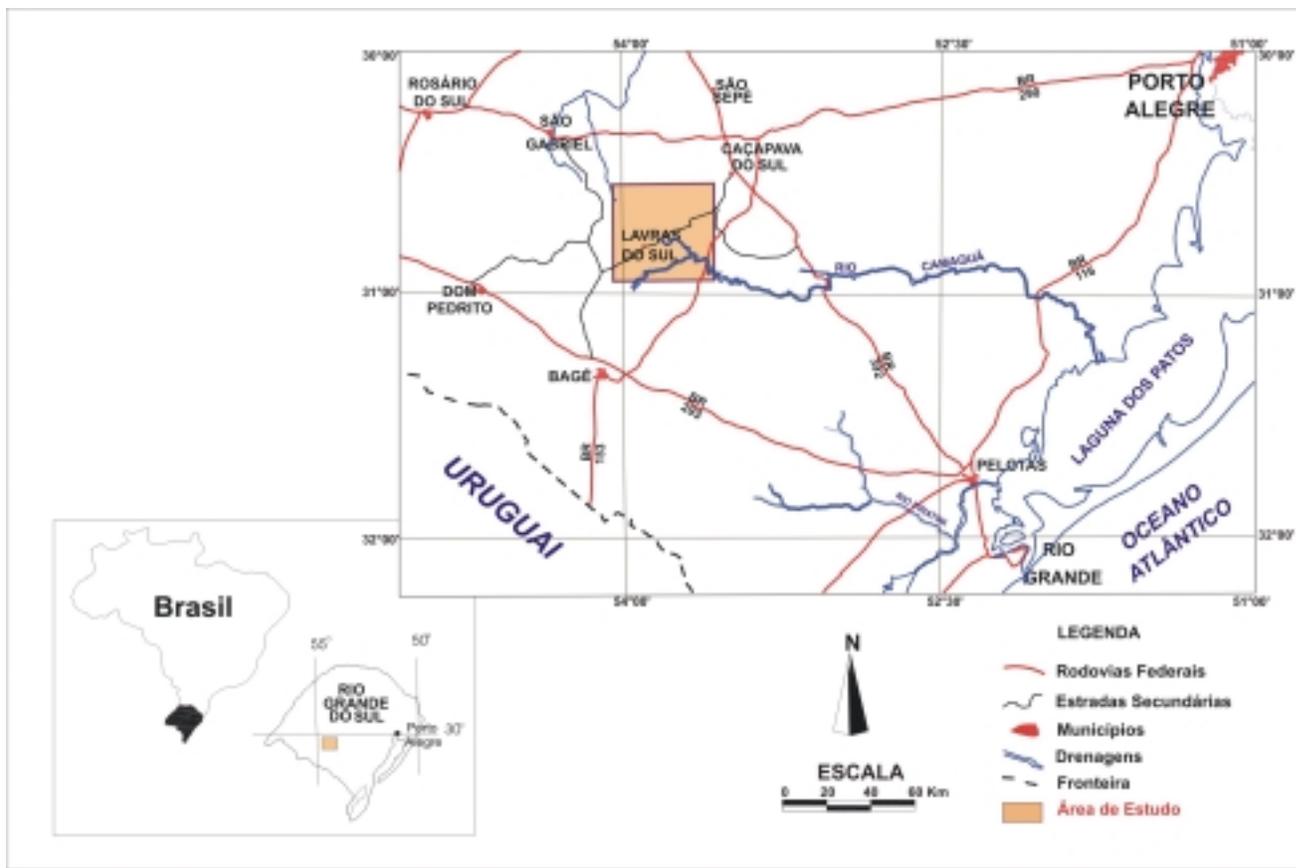


Figura 1.1 – Mapa de localização e acesso à região de Lavras do Sul (RS).

1.2 Aspectos fisiográficos

O clima na região de Lavras do Sul (RS) é temperado e apresenta precipitação anual de 750mm a 1500 (Teixeira, 1982). O mês de Janeiro é o mais quente, com temperatura média superior a 24 °C, enquanto Julho é o mês mais frio, com temperatura média de 3 °C.

Geomorfologicamente, destacam-se duas unidades distintas nas proximidades da área de Volta Grande: 1) o Complexo Granítico Lavras (*sensu* Nardi, 1984), com área de cerca de 120 Km² e uma altitude média de 350m, que é representado por um relevo de coxilhas de vertentes suaves (Fig 1.2); e 2) as rochas intrusivas monzodioríticas e quartzomonzoníticas ao norte do Complexo Intrusivo Lavras do Sul (*sensu* Gastal, 1997) e as

rochas da Formação Hilário, que são caracterizadas por um relevo abrupto, com vertentes íngremes, recortados por vales profundos, principalmente nas rochas vulcânicas (Fig. 1.3) nas rochas intrusivas, as vertentes são mais suaves e os vales adquirem um formato em U. A área de Volta Grande encontra-se principalmente sobre a segunda unidade geomorfológica.

A vegetação na região de Volta Grande é predominantemente arbustiva e possui uma maior densidade e porte nas proximidades dos cursos d'água (matas galeria). A cobertura de solo é geralmente pequena, da ordem de 10 a 40 cm, e pouco diferenciados. Os solos são pouco diferenciados e são classificados como: solos mais arenosos e solos mais argilosos (Teixeira, 1982). De um modo geral, pode-se distinguir solos mais arenosos relacionados com o Complexo Intrusivo Lavras do Sul e solos mais argilosos relacionados com as rochas vulcânicas da Fm. Hilário.

1.3 Histórico da mineração em Lavras do Sul (RS)

O ouro de Lavras do Sul foi descoberto no fim do Século XVIII, por bandeirantes que percorriam a região (Dable de Mello, 1995). Ao tomar conhecimento da descoberta de ouro no sul do Brasil, o Governo da Colônia enviou à região de Lavras do Sul um fiscal cognominado de “guarda-mor”, a fim de cobrar os “dízimos” e demarcar as “datas”, que eram as extensões delimitadas para os garimpeiros. Em 1809, o Eng. von Tindner fez estudos mineralógicos na região de Lavras do Sul. No governo de Dom João VI, o Barão de Eshweg, encarregado do serviço de mineração no Brasil, fez referência a ricos depósitos auríferos existentes nas proximidades de Santo Antônio das Lavras (antiga denominação do município de Lavras do Sul).

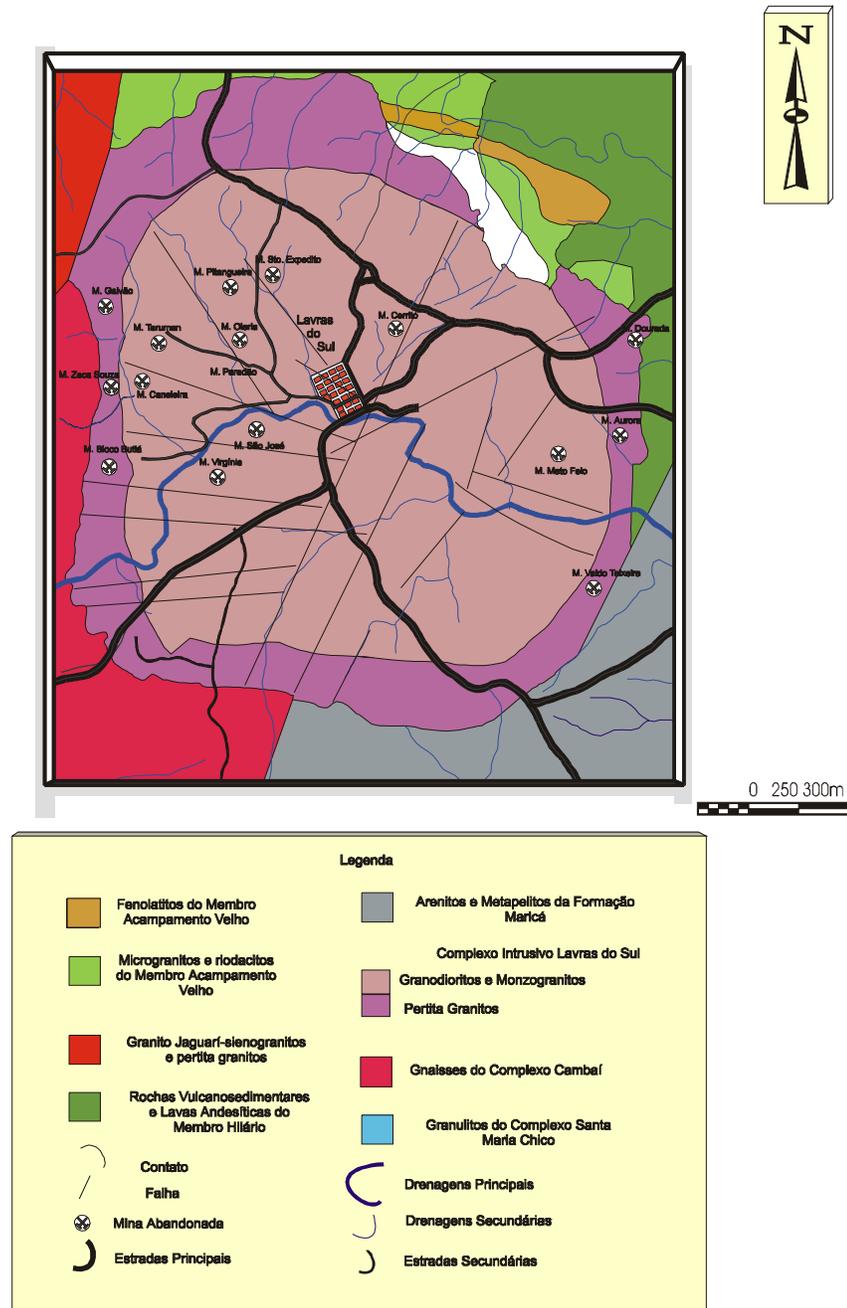


Figura 1.2 – Mapa geológico simplificado e a localização das principais ocorrências minerais e áreas de pesquisa na região de Lavras do Sul (RS) (segundo Nardi, 1984).

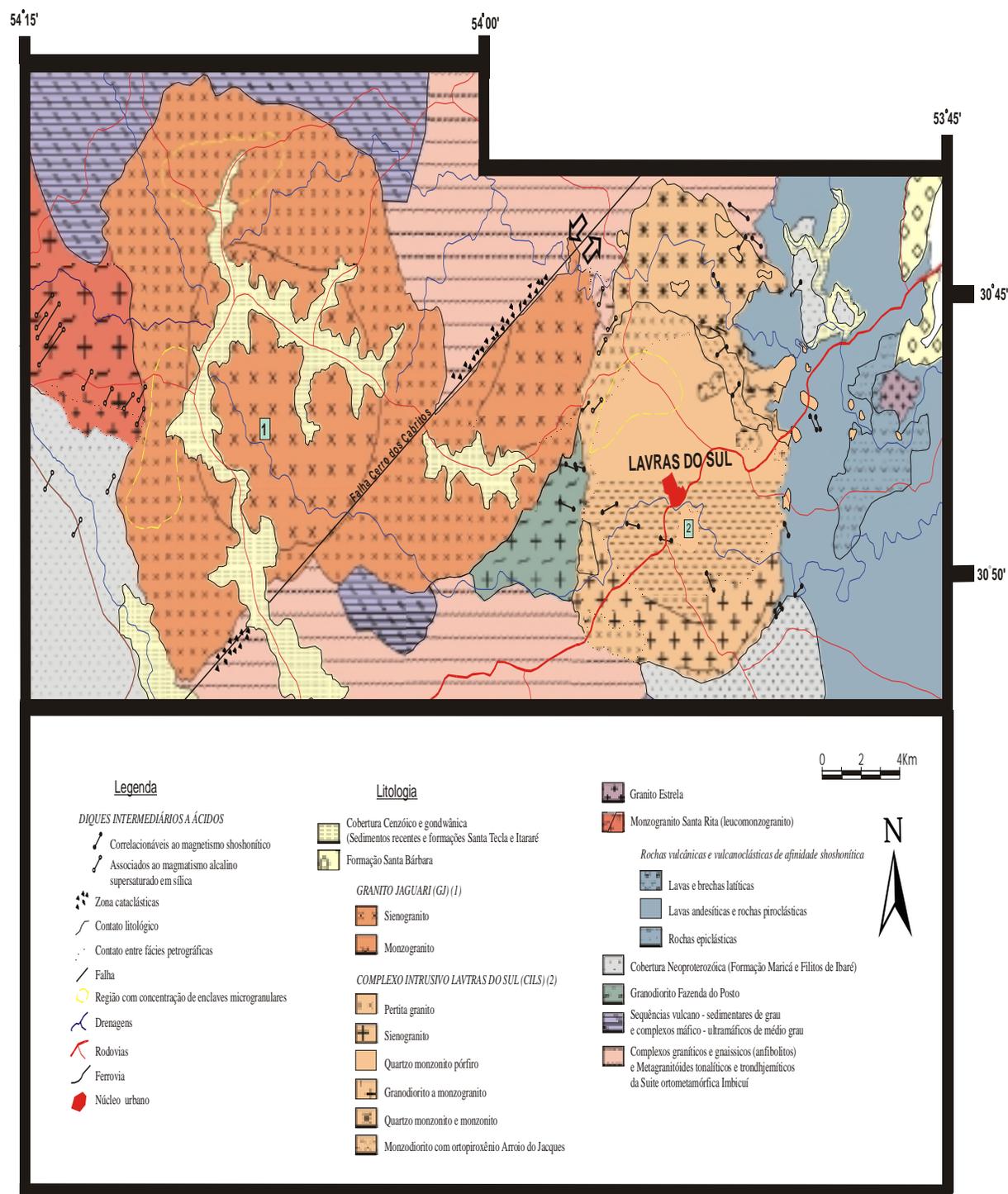


Figura 1.3– Mapa geológico da região de Lavras do Sul (Gastal, 1997) e a localização das principais ocorrências minerais.

Durante a Revolução Farroupilha (1835-1845), os trabalhos exploratórios foram quase totalmente paralisados. Após esse período, foi constituída a **The Rio Grande do Sul Gold Mining Company**, empresa inglesa que atuou de 1845 a 1855. Procedeu-se, nesse período, a exploração dos filões auríferos, pois o que se explotava até então era o ouro dos aluviões do Arroio Camaquã das Lavras e de seus afluentes. A britagem/moagem do minério era feita em instalações rudimentares, denominadas “monjolos”, que eram pilões de ferro acionados por rodas d’água (Dable de Mello, 1995).

A mineração encontrava-se praticamente paralisada em 1874, quando o Naturalista Henri Claude Gorceix publicou um estudo sobre as jazidas de ouro de Lavras do Sul. Tendo conhecimento do trabalho de Henri Claude Gorceix por volta de 1900, alguns brasileiros foram a Londres, onde conseguiram capital para fundar a **Brazilian Gold Field Ltd.**, que ficou conhecida como Companhia Inglesa em Lavras do Sul; essa empresa atuou até o início da 1ª Guerra Mundial. Em 1902, também se instalou em Lavras do Sul a **Companhia Belga**, que desenvolveu suas atividades até 1907. As duas empresas vieram a falir em função do não conhecimento do controle dos depósitos, pois reportavam ser o minério desuniforme e decrescente em profundidade (Dable de Mello, 1995).

O Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil (SGMB) enviou o eng. de minas Paulino Franco de Carvalho, em 1928, para fazer um reconhecimento geológico no Rio Grande do Sul. Os engenheiros de minas Paulino Franco de Carvalho e Nero Passos também realizaram estudos geofísicos nos arredores de Lavras do Sul. Por essa época (1932), a **Companhia Estrada de Ferro e Minas São Jerônimo** interessou-se pela exploração do ouro de Lavras do Sul e conseguiu, inclusive, paralisar os serviços do **SGMB**. Entretanto, após ter aberto escavações, abandonou a região, alegando não ser compensador o emprego de capital.

Em 1935, a empresa **Pedro Mata & Cia.** foi organizada em Lavras do Sul, e foi posteriormente designada de **Mineração de Ouro do Butiá Ltda.** Essa empresa realizou, a partir de 1936, os trabalhos de pesquisa para o Departamento Nacional de Produção Mineral (**DNPM**) e a Diretoria de Produção Mineral do Rio Grande do Sul (**DPM**). Emílio Alves Teixeira (**DNPM**) e Victor Leinz (**DPM**) fizeram trabalhos de detalhe na referida

região. A **Mineração de Ouro do Butiá Ltda.** encerrou suas atividades na região granítica conhecida por “Bloco do Butiá” (Figura 1.2) em 1949, devido às dificuldades financeiras da época (Giacomelli, 1998).

Em 1935, outra companhia também iniciou seus trabalhos exploratórios em Lavras do Sul: a **Empresa Mineradora Serapião Freitas de Souza**. Essa empresa explorou os filões em rochas granitóides e vulcânicas na área da Volta Grande (Figura 1.2) e tratou, no Engenho do Paredão, grande quantidade de antigos rejeitos. Dificuldades surgidas com pessoal e com deficiência de maquinaria para trituração/moagem (“socagem”, na linguagem dos relatórios da época), fizeram-na encerrar as suas atividades em 1947 (Dable de Mello, 1995).

A **Empresa Mineradora José Hipólito de Souza Ltda.** foi formada em 1938 para retomar a exploração dos filões encaixados em rochas vulcânicas do “Cerro Rico” (Figura 1.2), anteriormente trabalhadas pela **Brazilian Gold Field Ltd.** Essa empresa instalou moinho de bolas (marca Krupp) com capacidade de 10 t/dia e, assim, promoveu uma melhor moagem do minério em Lavras do Sul. Essa empresa atuou até 1952, quando encerrou suas atividades por elevada multa que lhe foi cobrada (Dable de Mello, 1995). Em 1948, o Eng. José Garcia de Azevedo (**DNPM**) prospectou a Mina Aurora (Figura 1.2) e coletou cerca de 400 amostras para análise química em antigos poços e galerias abertos pela antiga **Brasilian Gold Field Ltd.** Contudo, os resultados dessa pesquisa são desconhecidos até hoje. Entre 1959 e 1963, o **DNPM** retomou a pesquisa da extensa “Mina Volta Grande” (Figura 1.2). O trabalho foi executado pelo eng. de minas Eros Faria Gavronski, em cooperação técnica com o eng. José Garcia de Azevedo, consultor técnico do proprietário do solo, João Ricardo de Souza, que detinha o Manifesto de Mina. O trabalho também contou com a colaboração financeira do Grupo Langoni e objetivou principalmente a mineralização cuprífera (Giacomelli, 1998). Outros trabalhos de pesquisa em Lavras do Sul foram elaborados em 1961: Goñi (**O Rapakivi Lavras - Jazidas Metálicas Associadas**) e Barbosa & Constantino (**A Mineração de Cobre de Volta Grande e sua Relação com o Granito Lavras**). Toda a área mineralizada foi incluída no mapa do **DNPM** (Quadrícula de Caçapava), em escala 1:250.000, executado por Ribeiro *et al.* (1966) .

Em 1972, a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (**CPRM**) passou a pesquisar o distrito aurífero de Lavras do Sul para o **DNPM** e concluiu suas investigações em 1974. O relatório final das pesquisas (Kaul, P.F.T. & Rheineimer, D., 1974) contém inúmeras conclusões sobre a geologia da região de Lavras do Sul, com abundantes dados de campo e de laboratório. Nas conclusões relativas à geologia econômica, indicou-se as “minas” Volta Grande, Cerro Rico, Bloco do Butiá e Valdo Teixeira (Figura 1.2) como as mais promissoras para mineralizações primárias. Em 1973, a Companhia Riograndense de Mineração (**CRM**) assina termo de compromisso com o Sr. João Ricardo de Souza para pesquisa complementar nas áreas do manifesto de mina de 29.10.1935, que engloba as áreas denominadas “Fazenda da Chácara” e “Vista Alegre” (Figura 1.2). A **CRM** inicia então uma série de trabalhos de pesquisa, que incluem levantamentos geológicos, geofísicos e campanhas de abertura de trincheira e sondagens. No período de 1983 à 1988, a **CRM** explora o ouro aluvionar ao longo do Arroio Camaquã das Lavras (Fig. 1.2), na área denominada de Volta Grande (Dable de Mello, 1995).

1.4 Aspectos geológicos regionais

A região de Lavras do Sul (RS) localiza-se na porção oeste do Escudo Sul-riograndense (Figura 1.4). As principais unidades petrotectônicas dessa porção são geologicamente compartimentadas, principalmente, em associações de rochas granito-gnáissicas, de granitóides e de rochas vulcânicas e vulcanoclásticas do Ciclo Brasileiro. Essa porção oeste do Escudo Sul-riograndense é dividida em dois blocos: 1) o Bloco Taquarembó e 2) o Bloco São Gabriel, os quais são separados pelo Lineamento de Ibaré. O Lineamento Ibaré é considerado como uma falha transformante com direção N50W, de movimento dextral, que sofreu reativação sinistral (Fernandes *et al.*, 1995). O Bloco Taquarembó localiza-se na porção sudoeste do Escudo Sul-riograndense (Figura 1.3). Uma das características geológicas mais importantes desse Bloco é a presença de rochas metamórficas de alto grau (Complexo Granulítico Santa Maria Chico: Nardi & Hartmann 1979), cujos dados geocronológicos indicam uma idade arqueana, modificada por eventos metamórficos de idade proterozóica (Hartmann, 1987; Hartmann *et al.*, 1998; Hartmann *et al.*, 2000).

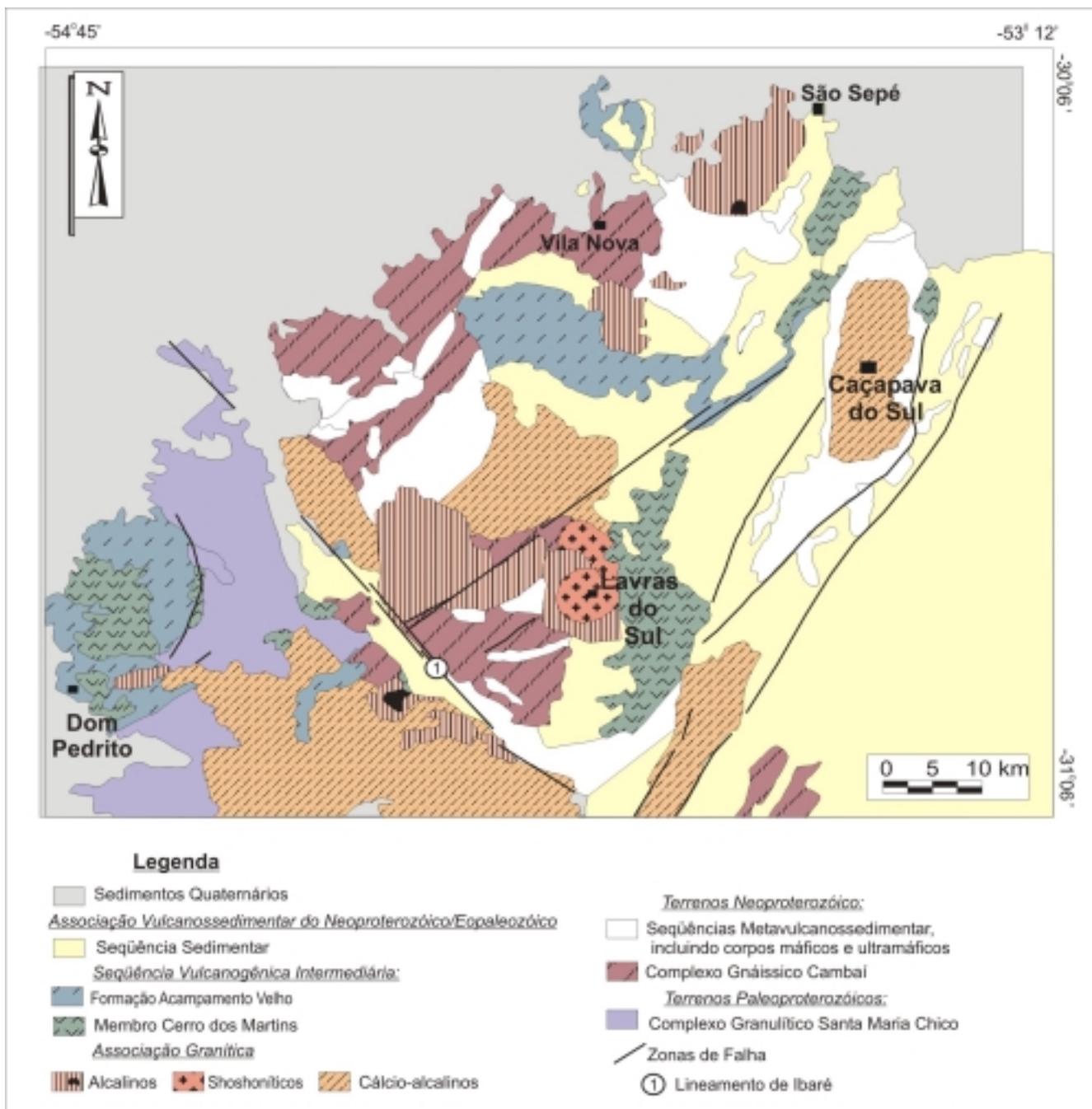


Figura 1.4 – Arcabouço geológico-geotectônico do Escudo Sul-riograndense (modificado de Santos *et al.*, 1989).

Na porção sul do Bloco Taquarembó, afloram rochas de composição granítica a granodiorítica, deformadas e gnaissificadas. Esse conjunto litológico é representado como

Complexo Cambaí no mapa geológico do Rio Grande do Sul (Santos *et al.*, 1989) e recebe diferentes interpretações. Fragoso Cesar (1991) estabelece uma correlação entre esses gnaisses e os metagranitóides que afloram no Bloco São Gabriel, denominando-os de Granitóides e Gnaisses Bagé, supostamente de idade transamazônica. Fernandes *et al.*, 1992a, por outro lado, interpreta essa unidade como parte de uma associação de arco magmático relacionado ao Ciclo Brasileiro (Associação de Arco Mágmatóico II).

Dados geocronológicos apresentados por Soliani Jr. (1986) revelam a existência de duas populações de idades: 1) 1988 ± 133 Ma e 2) 665 ± 265 Ma. O primeiro grupo de idades representa possivelmente as rochas granito-gnáissicas, deformadas e metamorfisadas, mais antigas do Bloco Taquarembó, conforme apresentado acima. O segundo grupo de idades está relacionado principalmente com os granitóides intrusivos do Bloco Taquarembó, para os quais Soliani Jr. (1986) sugere idades entre 570-530 Ma.

A caracterização do Monzogranito Santo Antônio (Barros, 1992) demonstrou a existência de rochas intrusivas não deformadas de afinidade shoshonítica nessa região e os dados geocronológicos Rb-Sr indicam idade 645 ± 19 Ma. Os estudos geocronológicos Rb-Sr no Complexo Granítico Santo Afonso, também um corpo intrusivo no Bloco Taquarembó, fornecem idade de 586 ± 32 Ma para o magmatismo (Chemale Jr. *et al.*, 1994a).

Uma revisão sobre granitóides da porção centro-sudeste do Escudo Sul-riograndense (Gastal *et al.*, 1992) amplia o espectro das rochas alcalinas do Bloco Taquarembó, com a inclusão das rochas monzodioríticas a sieníticas organizadas numa feição anelar (Complexo Anelar Leões) e alojadas em rochas piroclásticas ácidas. Gastal *et al.* (1992) destacam o domínio das rochas alcalinas e shoshoníticas não deformadas no Bloco Taquarembó e relacionam esses granitóides a uma fonte mantélica modificada por processos de subducção ao final da orogenia brasileira. Gastal (1997) reforça a origem mantélica, com pouca assimilação crustal, do magmatismo shoshonítico a alcalino e indica que ele representa um evento tardi a pós-orogênico com relação ao Ciclo Brasileiro.

O grande volume de rochas vulcânicas e vulcanoclásticas é outro traço geológico importante no Bloco Taquarembó. Essas rochas são sobrejacentes a arenitos arcoseanos

intercalados com níveis conglomeráticos (Formação Maricá). As rochas vulcânicas e vulcanoclásticas são agrupadas em: 1) derrames e piroclásticas andesíticas na porção basal (Formação Hilário, de Ribeiro & Fantinel, 1978) e 2) piroclásticas e derrames predominantemente riolíticos (Formação Acampamento Velho). As rochas de composição intermediária são possivelmente de natureza shoshonítica, conforme Sommer (1994) e Lima *et al.*, (em prep.), as quais são intrudidas pelo monzogranito Santo Antônio. Entre as rochas vulcânicas ácidas predominam ignimbritos, cuja afinidade alcalina pós-orogênica é indicada por Sommer *et al.* (1993) seguindo as sugestões de Nardi *et al.* (1992).

O Bloco São Gabriel, de outro modo, está localizado a noroeste do Escudo Sul-riograndense (Figura 1.4) e reúne um arranjo complexo de diferentes tipos de rochas granito-gnáissicas, seqüências vulcano-sedimentares metamorfisadas e deformadas, granitóides intrusivos, rochas vulcânicas e sedimentares. Essa região do Escudo também tem recebido diferentes interpretações geotectônicas e estratigráficas, principalmente no que se refere às relações entre o granito-gnaisses e as seqüências vulcano-sedimentares metamorfisadas e deformadas.

Naumann *et al.* (1984) reúnem, sob a designação de Complexo Cambaí, metagranitóides tonalíticos, dioríticos, granodioríticos, monzograníticos, gnaisses trondhjemiticos intercalados com anfibolitos e calcários metamorfizados em fácies anfibolito. Chemale Jr. *et al.* (1994a) adotaram essa denominação e destacaram a afinidade cálcio-alcalina dos gnaisses diorítico-tonalítico-granodioríticos. Chemale Jr. *et al.* (1994a) também incluíram no Complexo Cambaí os corpos meta-ultramáficos (p.ex.: Passo do Ivo; Cambaizinho; Cerro Mantiqueira).

Fragoso Cesar (1991) separa os metagranitóides do sudoeste de Lavras do Sul e os correlaciona às rochas do Complexo Santa Maria Chico e aos gnaisses a noroeste do Bloco São Gabriel. Tal procedimento foi influenciado pelos trabalhos de Silva Filho (1984) e Silva Filho & Soliani Jr. (1987), que identificaram a presença de três associações distintas nessa região: (1) gnaisses diorítico (703±41 Ma) intrudidos por (2) ortognaisses cálcio-alcalino trondhjemiticos da série gabro-diorito-tonalito-trondhjemitico, polideformados (673±65 Ma) e injetados por (3) granodioritos e monzogranitos (643±28 Ma). De acordo

com a interpretação geotectônica de Fragoso César (1991) as seqüências 1 e 2 representam as frações plutônicas de um arco de ilha intra-oceânico e a seqüências mais jovem (3) resulta de produtos da fusão crustal da subducção durante o evento de obducção das escamas tectônicas do Terreno Vacacaí sobre o Cráton Rio de La Plata.

Fernandes *et al.* (1992a,b) apresentam uma concepção alternativa para os terrenos gnássicos do Proterozóico Superior no Escudo Sul-riograndense. Fernandes *et al.* (1992a,b) propõem o desenvolvimento de duas associações de arco magmático (AAM-I e AAM-II). Os metagranitoides da região de Lavras do Sul (Kraemer *et al.*, 1993) e os gnaisses do noroeste do Bloco São Gabriel são a parte principal da AAM-II e são genericamente descritos como granitoides orogênicos, remanescentes de uma infra-estrutura de arcos magmáticos. As rochas da AAM-II foram deformadas e metamorfasadas durante a estruturação de uma colagem orogênica. A estruturação do Arco Magmático II (650 Ma), conforme o modelo geotectônico proposto por Fernandes *et al.* (1992a,b) tem origem a partir da colisão do Arco Magmático I com o Cráton do Kalahari, com o fechamento de uma bacia de retro-arco (porção oeste do AAM-I) e o desenvolvimento de uma nova zona de subducção. O regime de deformação tangencial, identificado na região de Lavras do Sul, foi responsável pela imbricação desses metagranitoides com rochas ultramáficas, que mostram feições de deformação mantélica (Tomasi, 1991).

As seqüências vulcano-sedimentares do Bloco São Gabriel foram deformadas e metamorfasadas em fácies xisto-verdes a anfíbolito. Diferentes interpretações e denominações são apresentadas para essas unidades (Naumann *et al.*, 1984). Chemale Jr. *et al.* (1994a) reúnem sob a designação de Grupo Palma as rochas pretencentes a: 1) Formação Cerro da Cruz (metamorfitos de natureza máfica-ultramáfica), 2) Formação Campestre (metavulcânicas básicas a ácidas, meta-vulcanoclásticas, meta-epiclásticas, *cherts* e formações ferríferas) e 3) Formação Passo Feio (metapelitos, anfíbolitos, anfíbólio xistos e gnaisses, mármore, quartzitos e metabasaltos com lavas em almofada). Uma idade de 653 ± 2 Ma, obtida em zircão (U-Pb) de um metatufos aglomerático da Formação Campestre, é interpretada como a idade original dessa unidade (Machado *et al.*, 1990; Remus *et al.*, 1999).

As rochas das seqüências vulcano-sedimentares foram designadas de Supracrustais Vacacaí por Fragoso Cesar (1991) que as organiza e interpreta estratigraficamente como:

- 1) Metavulcano-sedimentares Campestre: seqüência de antefossa, com afinidade cálcio-alcalina à tonalítica, composta pela Formação Campestre e parte da Formação Passo Feio;
- 2) Metagrauvas Arroio das Pedras: depósitos distais relacionados à bacia antearco e representados por metatufos básicos e intermediários (Vacacaí não xistoso de Ribeiro, 1970) e por metagrauvas e metarcóseos (parte da Formação Passo Feio); e
- 3) Filito Ibaré: depósito sintectônico instalado no Lineamento Ibaré, constituído por meta-ritmitos areno-pelíticos, por vezes conglomeráticos, de derivação vulcânica, plutônica e metamórfica.

Fragoso Cesar (1991) interpreta o conjunto de rochas como originadas em uma ante-fossa durante a Orogenia Cambaí (750-650 Ma). Dados litogeoquímicos e petrográficos (Wilder & Lima, 1992a), no entanto, redefinem parte da Formação Arroio das Pedras como uma unidade de natureza cálcio-alcalina alto potássio a shoshonítica, que está relacionada às rochas andesíticas da Formação Hilário (Ribeiro & Fantinel, 1978).

Fernandes *et al.*, 1992a relacionam esse conjunto de seqüências meta-vulcano-sedimentares a um ambiente do tipo bacia marginal, estabelecido durante o desenvolvimento do Arco Magmático I. Os dados estruturais discutidos por Fernandes *et al.*, 1992a sugerem que o metamorfismo e a deformação concentram-se ao longo de zonas de cisalhamento e que as direções NE, obtidas por estruturas lineares, sugerem que a deformação dessa bacia foi dominada por movimentos paralelos ao alongamento do Cinturão Dom Feliciano.

Parte dessas seqüências meta-vulcano-sedimentares são intrudidas por um conjunto de granitóides deformados, de dimensões batolíticas, cuja composição dominante é granodiorítica a sienogranítica. Esses granitóides formam o Complexo Granítico de Caçapava do Sul (Bitencourt, 1983), ou Batólito de Caçapava do Sul (Chemale Jr. *et al.*, 1994a), foram metamorfisados em condições de fácies do xisto verde e possuem uma forte foliação paralela à xistosidade das rochas da Formação Passo Feio. Nardi & Bitencourt,

1989 caracterizam essas rochas graníticas como metaluminosas de afinidade cálcio-alcálica e sugerem uma origem por fusão parcial da crosta, ou diferenciação de magmas mantélicos com contaminação crustal. Nardi & Bitencourt (1989) consideram esses granitóides como parte de uma intrusão diapírica, contemporânea à segunda fase de deformação registrada nas rochas da Formação Passo Feio.

A idade do Complexo Granítico de Caçapava do Sul é de 552 ± 4 Ma (Sartori & Kawashita, 1985), valor questionado por Chemale Jr. *et al.* (1994a) por representar um magmatismo tardi-orogênico, que não é compatível com as características sin-deformacionais entre as rochas graníticas e as rochas metarmórficas da Formação Passo Feio. Os resultados geocronológicos obtidos para o Complexo Granítico de Caçapava do Sul sempre ocasionaram controvérsias em sua interpretação geotectônica, uma vez que as idades mais jovens (Sartori & Kawashita, 1985) eram consideradas incompatíveis com suas características sin-deformacionais (Chemale Jr. *et al.*, 1995). No entanto, essas idades mais jovens são confirmadas pelos resultados isotópicos U-Pb (Leite, 1995; Remus *et al.*, 1997a) para amostras possivelmente relacionadas às facies mais evoluídas. Esses resultados também revelam a presença significativa de Pb herdado, de idades variadas, bem como a existência de pelo menos três intervalos de idades para a caracterização do Complexo Granítico de Caçapava do Sul (Remus *et al.*, 1997a). A participação de componentes crustais em sua geração também é demonstrada por Babinski *et al.* (1996). O conjunto dos resultados isotópicos (Rb-Sr, Sm-Nm e U-Pb) para o Complexo Granítico de Caçapava do Sul sugere, assim, uma evolução policíclica de suas fácies graníticas, em cuja gênese são envolvidos segmentos de uma crosta antiga e heterogênea, o que é consistente com suas características petrográficas (Gastal, 1997).

Interpretações alternativas também são apresentadas para a origem e a forma do Complexo Granítico de Caçapava do Sul. Fragoso Cesar (1991) propõe que essas rochas graníticas constituem um *sheet* intrudido concordantemente ao longo da zona de obducção do Terreno Rio Vacacaí sobre a Plataforma Carbonática Pedreiras. Fernandes *et al.*, (1992a) propõem que esses granitóides foram intrudidos e deformados em uma bacia marginal.

Granitóides não deformados a pouco deformados, interpretados como tardi a pós-orogênicos, também estão presentes no Bloco São Gabriel. Esses granitóides, como no Bloco Taquarembó, constituem geralmente *stocks* graníticos de afinidade shoshonítica a alcalina.

O plutonismo shoshonítico está particularmente representado pelos monzogranitos e granodioritos do núcleo do Complexo Granítico de Lavras (Nardi, 1984) e pelo Monzogranito Santa Rita (Naumann, 1985). O Monzogranito Santa Rita localiza-se próximo ao Lineamento Ibaré e diferencia-se do Complexo Granítico de Lavras pelo aspecto parcialmente deformado. O Complexo Granítico de Lavras reúne, em estreita relação de campo, rochas de afinidade shoshonítica e alcalina, que estão separadas por uma fácies granítica com características intermediárias.

O plutonismo alcalino do Bloco São Gabriel é constituído por diferentes intrusões não-deformadas, que possuem padrões geoquímicos sugestivos de um posicionamento pós-orogênico. Gastal (1997) inclui, entre essas intrusões, o Granito São Sepé (Sartori, 1978), o Granito Ramada (Naime 1987), os sieno e pertita-granitos de bordo do Complexo Granítico de Lavras (Nardi, 1984) e o Granito Jaguarí (Jost & Villwock, 1966).

O Granito São Sepé é formado por um corpo granítico zonado: os monzogranitos predominam na porção central, enquanto os sienogranitos finos estão concentrados nas bordas (Sartori, 1978). Wildner *et al.* (1990) consideram que essas duas fácies do Granito São Sepé representam manifestações plutônicas relacionadas a eventos intrusivos temporalmente distintos e propõem a designação informal de Monzogranito Rincão dos Coqueiros para a parte central e Granito São Sepé para a fácies de borda. Wildner *et al.* (1990) também sugerem uma afinidade cálcio-alcalina para o núcleo e alcalina para a porção periférica do Granito São Sepé. Gastal (1997) a partir de dados litogeoquímicos e petrográficos mais detalhados, diverge desse enfoque e indica uma afinidade alcalina para todas as fácies graníticas do Granito São Sepé, as quais podem ter sido geradas por um mecanismo de mistura parcial de magmas. Os dados Rb-Sr recalculados por Soliani Jr. (1986) considerando as duas fácies do Granito São Sepé, apontam para uma idade de 527 ± 8 Ma; porém, as idades obtidas isoladamente fornecem 669 ± 15 Ma para o núcleo e 524 ± 11

Ma para a borda do Granito São Sepé.

O Granito da Ramada (Naime, 1987), localizado a SW do Granito São Sepé, também é uma das intrusões pós-orogênicas descritas no Bloco São Gabriel. O Granito da Ramada é formado por rochas monzograníticas a sienograníticas não deformadas, intrudidas de modo simultâneo ao magmatismo riolítico em que estão encaixadas (Naime & Nardi, 1991). As características gerais desses granitóides assemelham-se àquelas descritas para as rochas alcalinas supersaturadas da Suite Intrusiva Saibro (Nardi & Bonin, 1991). Os dados Rb-Sr discutidos por Naime (1987) indicam uma idade de 463 ± 12 Ma ($R_o = 0,710$), semelhante àquela obtida por Soliani Jr. (1986) para os riolitos alcalinos do Cerro Tupanci.

Os granitos de afinidade alcalina na região de Lavras do Sul estão representados pela porção periférica do Complexo Granítico de Lavras (Nardi, 1984) e pelo Granito Jaguari. A porção periférica do Complexo Granítico de Lavras é caracterizada como um granito *hiper-solvus* (pertita granito), que parcialmente envelopa os anfibólio granodioritos e monzogranitos de afinidade shoshonítica do núcleo. Essa relação espacial foi originalmente interpretada como resultado da intrusão de um magma alcalino, que assimilou parcialmente os granitóides shoshoníticos e que gerou um corpo zonado e uma zona híbrida (Nardi, 1984). Os dados Rb-Sr dessas três fácies forneceram: 653 ± 34 Ma para o núcleo, 592 ± 46 Ma para a zona intermediária e 554 ± 25 Ma para o pertita granito de bordo (Soliani Jr., 1986). Vieira Jr. & Soliani Jr. (1989) sugerem alternativamente que os diferentes fácies do Complexo Granítico de Lavras são originadas da zonação magmática na própria câmara, a qual seria responsável pelo desenvolvimento de uma zona superior (pertita granito) e de uma porção inferior (granito shoshonítico). Essa hipótese permite, dado ao caráter "comagmático" dessas rochas, justificar a utilização de amostras dos três fácies graníticos na construção de uma única isócrona Rb-Sr; tal procedimento fornece uma idade de 550 ± 11 Ma ($R_o = 0,704$) para o Complexo Granítico de Lavras.

O Granito Jaguari pós-data relativamente todos os fácies do Complexo Granítico de Lavras. Gastal & Nardi (1992) identificaram a presença de margens resfriadas nessa intrusão, junto ao contato com o Pertita-granito do Complexo Granítico de Lavras. Estudos preliminares (Jost & Villwock, 1966; Sartori, 1978, Naurnann *et al.*, 1984) haviam

caracterizado o Granito Jaguari como sienogranitos equigranulares grossos a médios, de tendência leucocrática e de conteúdo variável de biotita. Os dados geocronológicos (Rb-Sr) apresentados por Soliani Jr. (1986) sugerem uma idade de 539 ± 20 Ma para o Granito Jaguari.

A revisão sobre o plutonismo alcalino concentrado nos Blocos Taquarém e São Gabriel (Nardi & Bonin, 1991) inclui todas essas intrusões graníticas na Suite Intrusiva Saibro. Essas intrusões representariam o termo metaluminoso do magmatismo alcalino, de provável derivação mantélica. Esse magmatismo estaria posicionado em uma região cratônica durante e após os estágios finais da Orogenia Brasileira, onde dominaria uma tectônica extensional (Nardi & Bonin, 1991).

As rochas shoshoníticas e alcalinas presentes no Bloco São Gabriel também estão representadas por expressivos depósitos de rochas vulcânicas. As rochas shoshoníticas reúnem, de maneira dominante, rochas básicas a intermediárias (derrames separados por tufos e brechas vulcânicas) denominadas originalmente como Andesito Hilário (Robertson, 1966). Posteriormente, Lima & Nardi (1992) incluíram intrusões monzoníticas rasas, lamprófiros espessartíticos e raros diques riolíticos junto a essas vulcânicas básicas a intermediárias. Esse conjunto de rochas ocorre principalmente na região de Caçapava do Sul, onde também se observam vulcânicas cálcio-alcalinas alto potássio, e na região de Lavras do Sul. Na região de Lavras do Sul, o vulcanismo é responsável pelo desenvolvimento de uma estreita franja de metamorfismo de contato sobre os arenitos arcoseanos da Formação Maricá, que cobrem os gnaisses designados como Cambaí. De acordo com Nardi & Lima (1985) esse magmatismo é vinculado ao núcleo do Complexo Granítico de Lavras, que, juntamente com o Monzogranito Santa Rita, o Monzogranito Santo Antônio e os monzonitos de Lavras do Sul, constituem a Associação Shoshonítica de Lavras do Sul.

As rochas vulcânicas alcalinas do Bloco São Gabriel são referidas como Formação Acampamento Velho. Elas estão sobrejacentes às rochas vulcânicas shoshoníticas, geralmente por meio de discordâncias angulares, e são formadas por derrames e por rochas piroclásticas ácidas, inclusive ignimbritos. Embora com dados pouco conclusivos, são

comparativamente semelhantes aos depósitos descritos no Bloco Taquarembó. Os dados químicos discutidos por Roisenberg *et al.* (1983) e por Sommer (1994), bem como a presença de anfibólio alcalino (Menegotto & Medeiro, 1976; Lima & Sommer, em prep.) atestam a afinidade alcalina desse vulcanismo. A carência de dados geocronológicos prejudica uma melhor correlação entre as formações vulcânicas e as rochas sedimentares da bacia do Camaquã (Bacias “molássicas”). Chemale Jr. *et al.* (1994a) mencionam idades de 570 a 530 Ma, obtidas pelos métodos Rb-Sr e K-Ar, para as rochas vulcânicas intermediárias, intercaladas nas seqüências molássicas. Um valor superior a esse (620 Ma) foi obtido pelo método Rb-Sr (Lima *et al.*, em prep.) para as rochas vulcânicas básicas, intermediárias e monzoníticas da região de Lavras do Sul.

1. 5 Contexto geológico local

A região de Lavras do Sul localiza-se, então, na porção centro-sul do Bloco São Gabriel (Figura 1.4). As principais ocorrências minerais (metais básicos + Au) estão relacionadas com o Complexo Intrusivo Lavras do Sul (**CILS**, Gastal 1997), conforme pode ser observado na Figura 1.3. A relação entre o **CILS** e essas ocorrências minerais foi preliminarmente discutida por Andrade *et al.* (1998) e por Strieder *et al.* (1999); essa investigação, principalmente com relação ao controle estrutural do alojamento do **CILS** e da distribuição espacial dos veios mineralizados, está amplamente analisada e discutida por Strieder (2001). A Figura 1.3 mostra que as ocorrências minerais referidas estão hospedadas tanto no **CILS**, quanto nas rochas vulcânicas da Fm. Hilário. Assim, esse item está organizado para avaliar 1) as características das rochas encaixantes do **CILS**, 2) a geologia do **CILS** e 3) a geologia do Prospecto de “Volta Grande”, onde está enfocada essa tese de doutoramento.

1.5.1 Geologia das rochas encaixantes do CILS

Na região de Lavras do Sul, a unidade geológica mais antiga está representada pelo Complexo Cambaí (Figura 1.3), o qual é constituído pelos metamorfitos Cerro da Mantiqueira (unidade máfica-ultramáfica; Leite, 1997), e por metagranitóides e gnaisses cálcio-alcálicos. Estratigraficamente, o Complexo Cambaí está recoberto em discordância angular pelas rochas arcoseanas anquimetamórfica da Formação Maricá e, seqüencialmente, pelas rochas vulcânicas das Formações Hilário (afinidade shoshonítica) e Acampamento Velho (afinidade alcalina). Os granitóides shoshoníticos (parte do **CILS**) e alcalinos (parte do **CILS** e Granito Jaguari) constituem as contrapartes plutônicas dessas formações vulcânicas (Formação Hilário e Formação Acampamento Velho). Todas essas unidades descritas acima estão recobertas pelas rochas conglomeráticas da Formação Santa Bárbara. No limite leste da área (Figura 1.3), as rochas conglomeráticas da Formação Santa Bárbara estão justapostas, por discordância angular, às rochas vulcânicas da Formação Hilário. O limite oeste do Granito Jaguari é feito com o Monzogranito Santa Rita (afinidade shoshonítica de: Nardi & Lima, 1985; Nardi & Bonin, 1991; Gastal, 1997), enquanto o limite noroeste e norte desse granito é feito com a seqüência Vulcano-sedimentar da Palma (Jost & Villwock, 1966; Roldão & Strieder 2000; Strieder *et al.*, 2001). Por outro lado, o limite norte do **CILS** é constituído por ortognaisses e metagranitóides do Complexo Cambaí e por arenitos arcoseanos e pelitos da Formação Maricá. O limite sudeste do **CILS** é intrusivo sobre as rochas vulcânicas da Fm. Hilário e as rochas sedimentares da Fm. Maricá; mas, o limite sul do **CILS** e do Granito Jaguari é intrusivo sobre as rochas gnáissicas do Complexo Cambaí.

As rochas ultramáficas da região de Lavras do Sul foram originalmente descritas por Goñi (1962), que as denominou de Formação Cerro da Mantiqueira. Essas rochas são envolvidas pelos gnaisses e metagranitóides do Complexo Cambaí e constituem um corpo máfico-ultramáfico alinhado na direção EW, cuja porção principal possui cerca de 9 km de comprimento e 0,5 km de largura. Leite *et al.* (1993) avaliam que essas rochas formam um sinclínório aberto assimético com eixo sub-horizantalizado **EW** e individualizam três unidades internas: 1) harzburgitos serpentinizados, 2) xistos magnesianos e 3) anfíbolitos.

A Formação Maricá foi originalmente descrita por Leinz *et al.* (1941) como arenitos arcoseanos “sal e pimenta”. Outras designações, como Grupo Maricá (Goñi, 1962; Santos *et al.* 1978) e Formação Maricá (*sensu* Fragoso Cesar *et al.*, 1985), consideram que essas rochas são parte das seqüências vulcano-sedimentares sobrepostas (Formação Hilário e Formação Acampamento Velho). Descritivamente, a Formação Maricá constitui depósitos que reúnem espessos pacotes de rochas arcoseanas de cor rosa, cinza e bordô, por vezes com aspecto listrado devido à presença de níveis mais claros, intercaladas com rochas pelíticas de cor marrom (“chocolate”). Ribeiro & Fantinel (1978) admitem que a sedimentação que originou a Formação Maricá possui todas as características de um *flysch* e que a intercalação entre arcóseos e ritmitos pelíticos laminados sugere a forte influência de correntes de turbidez durante a deposição. A anterioridade dessas rochas sedimentares em relação ao magmatismo shoshonítico da Formação Hilário é registrada na forma de uma estreita franja de metamorfismo de contato, responsável pelo “endurecimento” dos arenitos junto ao contato com os derrames da base (Lima & Nardi, 1992). A relação desse vulcanismo com os sedimentos da Formação Maricá dá-se, também, por meio de discordâncias angulares, ou mesmo por um estreito “halo” de vesiculação nas lavas ao longo das zonas de contato.

Interpretações de natureza tectônica envolvendo o vulcanismo shoshonítico foram apresentadas por Ribeiro & Fantinel (1978). Ribeiro & Fantinel (1978) promoveram esse depósito à condição de Formação Hilário e reconheceram, na região de Lavras do Sul, a presença remanescente de antigos cones vulcânicos compostos de andesitos orogênicos e de rochas pertencentes à suíte cálcio-alcálica; a área da “Volta Grande” (Figura 1.3) seria um importante centro de atividade magmática. Estruturas do tipo lavas em almofada, bem como alterações “metassomáticas”, responsáveis pela modificação da química original das rochas vulcânicas, são utilizadas como argumentos na caracterização desse vulcanismo como de ambiente marinho (Ribeiro & Fantinel, 1978). O vulcanismo básico e intermediário da região de Lavras do Sul é temporalmente sucedido por intrusões de dois grupos distintos de rochas: 1) intrusões monzoníticas e 2) intrusões lamprofíricas (Lima, 1995); a essas intrusões deve-se acrescentar, ainda, a intrusão do próprio **CILS** (Gastal, 1997), anteriormente definido como Complexo Granítico Lavras do Sul (Nardi, 1984).

1.5.2 Geologia do CILS

O Complexo Granítico de Lavras do Sul, conforme caracterizado por Nardi (1984) é composto por um núcleo monzogranítico a granodiorítico, de afinidade shoshonítica, envolvido por sienogranito e pertita-granito, de afinidade alcalina. Esses dois fácies litogeoquímicos são separadas por rochas graníticas transicionais, tanto do ponto de vista químico, quanto petrográfico. A porção central desse corpo é geralmente porfirítica, onde os megacristais de feldspato (<5 cm) mostram-se usualmente cercados por auréolas de albita (textura rapakivi) e estão envolvidos por uma matriz de plagioclásio, anfibólio, biotita e quartzo. Esses aspectos contrastam com aqueles observados nos granitos pertíticos que são equigranular, faneríticos médios e leucocráticos. Os granitos pertíticos estão preferencialmente distribuídos na parte noroeste e sul do complexo e mostram uma completa gradação textural e mineralógica em direção ao núcleo, o que impede a definição de um limite claro entre essas duas fácies (Nardi, 1984).

Recentemente, Gastal (1997) amplia a abrangência territorial e composicional do Complexo Granítico Lavras do Sul definido por Nardi (1984) ao incorporar as rochas hipo-abissais monzoníticas que foram caracterizadas por Lima (1995) e que ocorrem preferencialmente nos bordos leste e **NE** do complexo. Assim, por não possuir somente rochas graníticas, Gastal (1997) propõe uma pequena modificação na designação formal do complexo: Complexo Intrusivo Lavras do Sul (**CILS**).

As intrusões monzoníticas são expressivas e reúnem biotita-hornblenda monzonito a quartzo monzonitos porfiríticos a faneríticos, médios a grossos. Essas intrusões afloram como diques, ou pequenas intrusões isoladas ou agrupadas, circulares a elípticas na parte a leste do **CILS**; na porção norte do **CILS**, essas intrusões envolvem o corpo intrusivo principal (**CILS**) e definem uma feição semi-circular (Lima, 1995). Esse conjunto de litologias intrusivas subvulcânicas foi definido informalmente por Matos Neto *et al.* (1980), como Complexo Quartzo-monzonítico-riodacítico e foi correclacionado, dado à sua natureza intermediária a ácida, às rochas vulcânicas da Formação Acampamento Velho.

Essa interpretação, no entanto, é descartada por Lima & Nardi (1992), que identificam essas rochas como os termos intrusivos tardios associados ao magmatismo shoshonítico da região.

Os corpos monzoníticos isolados perfuram toda a seqüência vulcânica básica-intermediária (Formação Hilário, leste do **CILS**) e podem representar a porção inferior de antigos *necks* vulcânicos, conforme originalmente sugerido por Salomão Neto (1976) em um mapa de detalhe da porção leste da área de “Volta Grande”. Deve-se destacar o caráter porfirítico dessas rochas, onde ocorrem megacristais de ortoclásio (< 5 cm), plagioclásio, anfibólio e biotita que estão envolvidos por uma matriz feldspática, fanerítica média a fina (Gastal, 1997).

Os diques monzoníticos também possuem uma textura fanerítica média a fina e são porfiríticos; além disso, mostram freqüentes “aglomerados” de minerais máficos (hornblenda e biotita). Esses diques monzoníticos posicionam-se preferencialmente segundo o sistema de fraturas **N35W**, envolve de maneira parcial o **CILS** e possuem as mesmas características observadas nas intrusões isoladas (Gastal, 1997). Os diques monzoníticos também podem aflorar junto a diversas intrusões agrupadas, por vezes recortadas por diques intermediários e por inúmeros e estreitos “diques” monzoníticos, os quais definem um padrão reticulado. A distribuição em planta dos corpos monzoníticos define, nas bordas leste e NE do **CILS**, um padrão em meia-lua, que sugere uma “estrutura anelar” (Gastal, 1997). Intrusões rasas, semicirculares e segmentadas, são relativamente comuns em regiões onde se desenvolve o magmatismo de natureza shoshonítica (Lipman, 1976 e 1984). De acordo com Tauson (1983), a vinculação entre estruturas e rochas da “série latítica” (designação utilizada no leste europeu e equivalente à série shoshonítica) deve-se à relativa estabilidade dos terrenos onde ocorre esse tipo de magmatismo. As relações de campo entre o conjunto de rochas monzoníticas e o núcleo do **CILS** sugerem a sua contemporaneidade, razão pela qual se supõe que as rochas monzoníticas representem líquidos deslocados através de zonas de fraqueza, associados a um corpo granítico principal. A exposição do núcleo desse complexo (**CILS**), de características epizonais, e das rochas hipoabissais monzoníticas de bordo deve ter resultado da erosão de parte de um antigo campo vulcânico

parcialmente preservado a leste. Se essa hipótese está correta, o núcleo do **CILS** corresponderia à “zona de raiz” da atividade magmática (Lima, 1995).

O magmatismo alcalino na região de Lavras do Sul seria então representado por três tipos diferentes de granitos: 1) pertita granito do Complexo Granítico de Lavras; 2) Granito Jaguari; 3) Granitos do Bloco Butiá (Lima, 1995). O pertita granito aflora predominantemente na porção norte do **CILS** e a oeste (Figura 1.3), onde possui uma nítida relação de contato com o Granito Jaguari. A presença de margens resfriadas no Granito Jaguari estabelece a precocidade dos pertita granito do **CILS** dentro da evolução do magmatismo alcalino. Esse tipo de granito caracteriza-se pela presença de mesopertita, quartzo, anfibólio (ferro-hastingsita) e biotita, além de acessórios como zircão, esfeno, apatita, magnetita, ilmenita e raros grãos de fluorita (Lima, 1995). O Granito Jaguari está localizado na porção oeste da região de Lavras do Sul e possui uma composição predominantemente sienogranítica (Figura 1.3). Essa intrusão epizonal caracteriza-se pela presença de margens resfriadas faneríticas finas, que gradam para um núcleo monzogranítico de grão médio a grosso. A presença de plagioclásio cálcico e de feldspato potássico indica a condição *subsolvus* de cristalização do Granito Jaguari; a mineralogia varietal (anfibólio + biotita) indica, por outro lado, a sua natureza metaluminosa (Lima, 1995).

O Bloco Butiá está representado por intrusivas peralcalinas, situadas a oeste de Lavras do Sul. Elas ocorrem no extremo nordeste do Complexo Granítico Lavras (*sensu* Nardi, 1984), nas proximidades da estrada Lavras do Sul - São Gabriel, logo após à bifurcação que leva à Ibaré. Um outro corpo, com as mesmas características, aflora próximo ao limite leste do Complexo Intrusivo, no Passo do Hilário. Essas rochas intrusivas alcalinas são caracterizadas por uma textura fanerítica grossa e por uma mineralogia a base de feldspato potássico perítico, de quartzo e de riebeckita (Lima, 1995).

Recentemente, Srieder *et al.* (1999) apresentaram uma nova avaliação da constituição do **CILS**, que envolveu a integração de dados de mapeamento geológico, de análise estrutural com auxílio de imagens de satélite e de fotografias aéreas e de dados aeromagnetométricos e aerogamaespectométricos. Os trabalhos em andamento (Srieder 2001) representam, antes de tudo, o acúmulo continuado de informações geológicas,

geoquímicas e geocronológicas a cerca desse complexo intrusivo, desde o trabalho de detalhe pioneiro de Nardi (1984), passando por Lima (1985 e 1995); por Leite (1997) e por Gastal (1997). Esse acúmulo de dados, somados a novas informações, permitiu que o magmatismo do **CILS** pudesse ser dividido em três pulsos (Gastal *et al.*, 1999): 1) o pulso shoshonítico, responsável pelos termos monzoníticos e monzodiorítico (bordos norte e leste) e granodiorítico a monzogranítico (núcleo do **CILS**), 2) o pulso alcalino, responsável pelos termos monzo a sienograníticos, pertita granitos, e 3) o pulso lamprofírico, responsável pelos magmas básicos alcalinos (kersantitos, lamprófiros, minetes); é importante destacar que os magmas básico-alcalinos intrudem o **CILS** e as suas rochas vulcânicas encaixantes (Formação Hilário) na forma de diques métricos controlados por zonas de fratura e, nesse caso, pós-datam as fácies graníticas anteriores.

As características estruturais do **CILS** evidenciam diferentes processos magmáticos associados à formação, crescimento e ressurgência de uma câmara magmática epizonal e estratificada, em que a diversidade de tipos e de fácies petrográficas se deve à inclusão de magmas básicos e intermediários de afinidades contrastantes: shoshoníticos, lamprofíricos e alcalinos (Srieder *et al.*, 1999). “O conjunto de fácies do **CILS** formam uma estrutura múltipla (intrusões agregadas), típica de ambientes subvulcânicos e relacionada a mecanismos de subsidência de caldeiras. No setor norte, estão preservadas as porções mais antigas com composições monzonito-monzodioríticas. O corpo granítico principal, situado a sul, representa intrusão centrada ressurgente, em que a evolução multicíclica resultou na zonalidade reversa de suas fácies shoshoníticas e alcalinas. Granodioritos e monzogranitos, de afinidade shoshonítica, constituem o núcleo desse corpo principal e exibem evolução mais complexa relacionada ao desenvolvimento de estrutura dômica durante a ressurgência pós-colapso. As porções apicais do domo representam regiões favoráveis ao acúmulo de líquidos residuais e de fases fluidas, como registrado pela presença de fácies mais leucocráticas contendo segregações pegmatóides e de diques de dacitos e riolitos. Sienogranitos e pertita granitos, de afinidade alcalina, ocorrem como corpos semicirculares e pequenos **stocks** dispostos ao redor do domo central. A maior concentração de encraves e de porções máficas caracterizam as regiões do contato entre os dois conjuntos de fácies graníticas, a NW e SE, onde também ocorrem diques de lamprófiros potássicos (minetes). Essas feições evidenciam a diversidade de processos durante a ressurgência pós-colapso,

incluindo a recarga da câmara sotoposta com magmas básicos contrastantes e a transição nos mecanismos de colocação, de uma estrutura dômica no final do episódio shoshonítico para intrusões anelares no evento alcalino. A natureza policíclica, a presença de magmas máficos originados a partir de fontes mantélicas distintas, bem como a relação espacial e temporal das ocorrências de lamprófiros potássicos e dacitos com o desenvolvimento do domo central permitem analogias entre o **CILS** e as estruturas de subsidência de caldeiras associadas a depósitos do tipo Mo-Cu-Au pórfiro” (Strieder *et al.*, 1999).

Esse conjunto de informações permite esboçar algumas idéias gerais sobre a vinculação das ocorrências minerais com os processos petrogenéticos na transição dos eventos magmáticos shoshonito-alcalino no **CILS**. “A migração do centro magmático ocorreu, no tempo e no espaço, em direção ao sul, o que resultou no seu formato elíptico alongado N-S. As principais ocorrências minerais concentram-se na porção essencialmente granítica, equivalente ao denominado Complexo Granítico de Lavras (Nardi, 1984). As ocorrências minerais nesse complexo estão alojadas tanto em zonas de fratura relacionadas às falhas regionais, quanto às zonas de fratura radiais ramificadas formadas durante o desenvolvimento do domo ressurgente. A disposição das diferentes fácies do **CILS** foi controlada pela propagação das duas falhas limítrofes. O seu formato elíptico e a seqüência de intrusões (fácies mais antigas a norte, e mais jovens a sul) indicam que tais falhas limítrofes estiveram ativas durante seu alojamento e propagaram-se de norte para sul. Essa relação entre os controles magmáticos e estruturais criou condições favoráveis a que os processos de subsidência de caldeira, ressurgência e mineralização fossem mais proeminentes na porção granítica. As características dessas ocorrências minerais, como composição, diversidade e multiplicidade dos eventos magmáticos associados e tipologia das paragêneses de minério, permitem classificá-las como do tipo Climax. Deve-se destacar, no entanto, que a cúpula de Mo-pórfiro foi erodida; atualmente, o **CILS** expõe os corpos de minério tipo veio em zonas de fratura laterais situados imediatamente abaixo da cúpula. Comparativamente, pode-se concluir que a ausência de ocorrências minerais similares no Granito Jaguari é decorrente de sua composição homogênea e posicionamento estrutural” (Andrade *et al.*, 1998).

1.5.3 Geologia das ocorrências minerais do CILS e o Prospecto de Volta Grande

As principais ocorrências minerais da região de Lavras do Sul estão situadas tanto sobre as rochas encaixantes vulcano-sedimentares da Formação Hilário (prospectos da Volta Grande, Merita, Cerro Rico e Saraiva; Figura 1.3), quanto sobre as rochas do Complexo Intrusivo Lavras do Sul (Cerrito do Pires, Cerrito do Rezende, Aurora, Waldo Teixeira, Santo Expedito, Bloco Butiá, Olaria, Zeca Souza, Taruman, Pitangueira, Caneleira, Galvão, São José, Mato Feio, Virgínia, Dourada e Paredão; Figura 1.3). Essas ocorrências minerais são polimetálicas (metais básicos + Au) e apresentam várias sucessões de paragêneses de minerais metálicos e silicatados hidrotermais. Em conjunto, essas ocorrências minerais podem genericamente ser classificadas como do tipo veios de quartzo (*lode quartz veins*) alojados em zonas de fratura. Elas estão geneticamente ligadas ao magmatismo tardio no Ciclo Brasileiro (610-580 Ma), que possui afinidade shoshonítica e alcalina e que está representado pelo Complexo Intrusivo Lavras do Sul e vulcânicas traquiandesíticas associadas (Formação Hilário), conforme discutido anteriormente (Andrade *et al.*, 1998; Strieder *et al.*, 1999).

O Departamento Nacional da Produção Mineral cita a região de Lavras do Sul, como distrito Mineiro de Lavras do Sul, situado no Domínio do Escudo Sul-Rio-Grandense, Região Centro-Oeste, juntamente com o Distrito Mineiro de Caçapava do Sul-Minas do Camaquã. O critério usado para delimitação de cada distrito mineiro é fundamentado na concentração de títulos minerários e na vocação mineral predominante do contexto geológico-metalogenético envolvido (Santos *et al.*, 1998). Dentro dessas condições de alojamento dos veios de quartzo e das zonas hidrotermais, a análise estrutural da distribuição espacial das zonas de fratura relacionadas com o **CILS** constitui etapa primordial. Andrade & Strieder (1997) realizaram a análise de preliminar de fotolineamentos e classificação dos padrões estruturais relacionados ao **CILS**, por meio de imagem de satélite LANDSAT TM5 (bandas 3-4-5, escala 1:50.000). A metodologia de extração de fotolineamentos foi desenvolvida por Amaro & Strieder (1994) e ampliada por Strieder & Amaro (1997) e objetiva uma separação de lineamentos designados como **tipo 1** e **tipo 2**. Os lineamentos do **tipo 2** são os mais adequados para a investigação pretendida, uma vez que representam estruturas rúpteis (zonas de fratura) com arranjos retilíneos ou

levemente curvilíneo, predominantemente representados por feições geomorfológicas negativas, e que frequentemente truncam limites litológicos. O alojamento das rochas do **CILS** provocou a formação de uma série de falhas com orientação geral predominante nas direções: **N-S**, **N50-70W** e **N80W-N80E**, responsáveis pelo controle das ocorrências minerais (Andrade & Strieder 1997). Essas falhas apresentam-se, em grande parte, preenchidas por veios de espessura, comprimento e paragénese variados, acompanhados, muitas vezes, de intensa brechação hidráulica; em algumas situações, essas estruturas são deslocadas por falhas de direções **N10-30W** e **N40-60W**, conforme observações de campo conduzidas por (Andrade & Strieder 1997). O aprofundamento da análise mostrou que as zonas de fratura identificadas como lineamentos **tipo 2** em escala regional (imagens LANDSAT TM-5) e em escala de detalhe (fotografias aéreas 1:20.000 e 1:60.000) desenvolvem padrões geométricos característicos (Strieder 2001). Os padrões mais característicos são do tipo **V**, **X**, **Y**, **I**, **T** e **A**, os quais significam diferentes tipos de relações entre fraturas desenvolvidas sob regime frágil (Hancock, 1985). “O aspecto mais importante dessa análise está relacionado com o fato de ambas as intrusões (Complexo Intrusivo Lavras do Sul e Granito Jaguari) mostrarem uma diferenciação dos padrões de fratura do centro para a borda. Ambas as intrusões mostram um predomínio de fraturas em padrão **I** nas suas porções centrais. As bordas dessas intrusões, por outro lado, mostram grande predominância de padrões **X**, **Y** e **V**. Os padrões **T** e **A** são pouco desenvolvidos, mas aparecem com mais frequência na parte externa das intrusões” (Strieder, 2001). “A diferenciação dos padrões de fraturas definidos por meio dos lineamentos **tipo 2** também pode ser observada em nível de maior detalhe. Nesse nível de observação, pode-se perceber que os padrões **I**, no centro das intrusões mostram uma distribuição aproximadamente radial. Os padrões **X**, **Y** e **V** são claramente mais frequentes na borda das intrusões. Observa-se adicionalmente que os padrões **X**, **Y** e **V** constituem ramificações de zonas de fratura, o que resulta em geometrias estruturais do tipo **en-echelon**, **relay**, **oblique**, **in-line** e alguns **duplexes** essencialmente transcorrentes. Nesse sentido, os padrões de lineamento **I** observados no centro das intrusões também mostram efeitos de ramificação de fratura, mas em intensidade muito menor do que aquela apresentada pelas zonas de fratura na borda das intrusões. A análise geométrica dessas zonas de fratura, quando incorporados os dados resultantes de análise cinemática, poderá permitir a classificação dos padrões geométricos e

a indicação dos padrões potenciais para a abertura de dilatâncias (**extensional splays and duplexes**: Woodcock & Fisher, 1986)” (Strieder, 2001). “A diferenciação dos padrões de zonas de fratura ao redor de intrusões (Complexo Intrusivo Lavras do Sul e Granito Jaguari) está relacionada, de um lado, com o mecanismo de alojamento e, de outro lado, com a geometria da intrusão e a taxa de distorção produzida durante o alojamento (Withjack & Scheiner, 1982). Dentro dessas condições, a predominância do padrão **I** no centro das intrusões pode ser interpretada como o resultado do alojamento dos granitos de núcleo (principalmente para o caso do Complexo Intrusivo Lavras do Sul; 607 ± 7 Ma) sob ausência de tensões regionais significativas. A presença de zonas de fratura ramificadas transcorrentes nos bordos das intrusões e o predomínio de direções **E-W** em nível regional sugerem que o alojamento das fácies graníticas de bordo (principalmente para o caso do Complexo Intrusivo Lavras do Sul; 580 ± 7 Ma) ocorreu sob a ação de esforços compressivos regionais orientados **N-S**” (Strieder 2001).

Gavronski (1964), no relatório dos trabalhos de pesquisa do **DNPM**, adotou o parcelamento da "jazida" de Volta Grande em 7 ocorrências em pesquisa, que foram denominadas áreas 1, 2-Sul, 2-Norte, 4, 5, 5A e Merita; além dessas, a área do Cerro Rico foi posteriormente incorporada (Figura 5). Os limites entre essas áreas são imprecisos e obedecem apenas às ocorrências existentes. Ainda hoje, observa-se a nomenclatura utilizada por Gavronski (1964), com algumas pequenas modificações. A área da Volta Grande caracteriza-se estruturalmente pela presença de uma série de fraturas com orientação geral predominante nos intervalos **N-S**, **N20-70W** e **N30-80E**, que possuem mergulho vertical e que exercem um importante papel no controle espacial dos corpos de minério. Essas zonas de fratura possuem caráter frágil a frágil-dúctil e permitiram a formação de áreas mineralizadas com zonação composicional de minério e de ganga com espessura desde centimétrica até uma dezena de metros; são, assim, responsáveis pela condução e pelo alojamento de veios de qzo-py-Au, ou qzo-Au-py-galena em rochas granitóides e de Au-py-cpy-galena-carbonato em rochas vulcânicas e vulcanoclásticas (Andrade & Strieder, 1995).

Os trabalhos de detalhe realizados por Lima (1985) e por Lima (1995) na região de “Volta Grande” envolveram a caracterização geoquímica de lavas intermediárias e de tufos à cristal associados e estabeleceu a afinidade shoshonítica do vulcanismo. A sequência de

rochas vulcânicas e piroclásticas (tufos e brechas) que fazem da Formação Hilário na região de Volta Grande encontram-se intrudidas pelo **CILS**. A intrusão gerou uma auréola de metamorfismo de contato de 0 a 500 m de espessura. O grau metamórfico varia de anfibolito inferior a xistos-verdes (Mexias, 1990; Mexias, *et al.*, 1990a). A intrusão granítica atuou como fonte de calor na geração e na manutenção de um sistema hidrotermal (Mexias, 1990; Mexias *et al.*, 1990a). As características petroquímicas, bem como os padrões de zonação dos produtos de alteração assemelham-se ao que se observa nos depósitos tipo Cu pórfiros (Mexias, 1990; Mexias *et al.*, 1990a). Mexias (1990) e Mexias *et al.* (1990a) caracterizam 3 fases principais de alteração hidrotermal na área da Volta Grande: 1) alteração potássica, 2) alteração propilítica e 3) alteração fílica. Esse sistema hidrotermal foi reponsável pela remobilização e pela concentração de metais, tais como Au, Cu, Pb e Zn (Mexias, 1990; Mexias *et al.*, 1990a, b). A cristalização das paragêneses minerais de mais alta temperatura (alteração potássica) ocorreu logo após a formação dos cornubianitos e está relacionada ao processo de infiltração dos fluidos finais do magmatismo granítico, através de fraturas interconectadas da rocha encaixante (Mexias, 1990; Mexias *et al.*, 1990a). Essa fase de alteração é composta basicamente por uma associação de hornblenda \pm actinolita + diopsídio + quartzo-biotita + plagioclásio (andesina-labradorita). A cristalização de epidoto + clorita (+ actinolita nas porções mais próximas do granito) ocorreu pela interação dos fluidos com a rocha em microfraturas e em poros estagnantes (alteração propilítica). Essa alteração hidrotermal ocorreu sob a influência da transferência de calor na forma condutiva, de modo que a composição da rocha original influenciou o quimismo dos minerais secundários (Mexias, 1990; Mexias *et al.*, 1990a). A alteração fílica foi desenvolvida por fluidos com alta atividade H^+ , que percolaram através de fraturas após e/ou concomitante à alteração propilítica. Esses fluidos atuaram de forma destrutiva na rocha, em condições de temperatura equivalente, ou levemente superior a 300 °C e geraram uma paragênese a base de illita + clorita + quartzo + pirita (Mexias, 1990; Mexias *et al.*, 1990a,b). A circulação de fluídos com alta pCO_2 e fO_2 foi, por fim, responsável pela cristalização de calcita, corrensita, hematita e feldspato. Esses fluidos encerraram a atividade hidrotermal relacionada com o alojamento do **CILS**, ou são fluidos associados a um outro sistema, relacionado, por exemplo, às falhas mais recentes (Mexias, 1990).

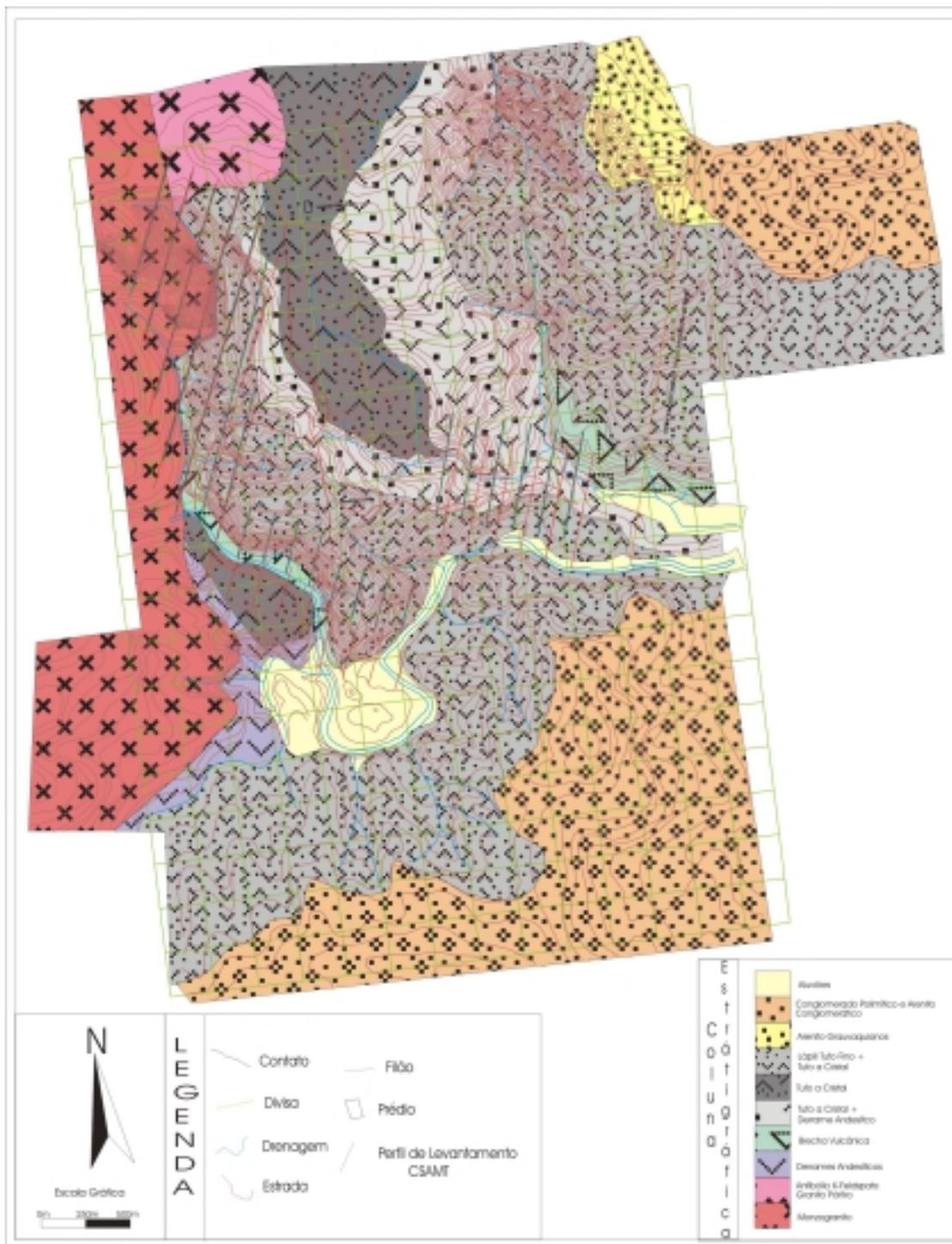


Figura 1.5 - Mapa geológico do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS) (Strieder, 2001).

1.6 Objetivo

A utilização dos métodos geofísicos (indiretos) na prospecção tem sido usualmente feita com o objetivo de indicar a posição espacial e a continuidade dos corpos de minério. Assim, conhecidos esses parâmetros, pode-se projetar uma campanha exploratória por métodos diretos (sondagens) e acessar a distribuição espacial de teores de minério.

A utilização de métodos indiretos para acessar a distribuição espacial de teores de minério tem sido realizada corriqueiramente para o caso dos depósitos de elementos radioativos. Isso tem sido feito tanto em campanha regionais (Maurice & Charbonneau, 1987; Reeves, 1992), como em escala de mina (Heising & Zamora Reyes, 1996; Okujeni & Funtua, 1994), ou em escala de pilha de minério na planta de beneficiamento (Ashry *et al.*, 1995; Leduc *et al.*, 1987), como em várias outras condições industriais (Nir-El, 1997; Kalsi *et al.* , 1995). Nessa situações, a distribuição espacial dos teores de minério é alcançada por meio da calibração de curvas de correlação entre teor medido vs. incidência de partículas gama em espectômetro de radiação (contagem por segundo, cps) (Ahrens & Ward, 1983).

A aplicação de outros métodos indiretos em depósitos sulfetados com metais básicos tem tomado um caráter indicativo, principalmente com relação à disposição de zonas anômalas, da geometria e da continuidade espacial dos corpos de minério. Recentemente, Oldenburg *et al.* (1997) realizaram a análise , a modelagem e a inversão conjunta de dados geofísicos (IP, EM, magnetometria) e geológicos com o objetivo de alcançar um controle da distribuição de minérios no depósito de Cu-Au pórfiro de Mt. Milligan (EUA).

Essa tese de doutoramento tem como objetivo principal avaliar e desenvolver técnicas de modelagem de dados 3D em pesquisa avaliação mineral de detalhe para subseqüentes campanhas de sondagem que visem definir a continuidade espacial de estruturas mineralizadas. Os dados disponíveis para modelagem no Prospecto de Volta Grande são: dados geofísicos (particularmente Audio-freqüência Magneto-Telúrica de Fonte Controlada, **CSAMT**), dados geoquímicos (teores de Au e Cu em esparsas

sondagens) e dados geológicos (geometria da zonas de fraturas hidrotermalizadas e preenchidas por veios mineralizados).

Essa modelagem de dados permite: definir métodos exploratórios mais adequados para a região; desenvolver uma interpretação mais precisa dos resultados geofísicos (CSAMT); indicar operações adicionais de exploração para o Prospecto da Volta Grande.

Nesse sentido, essa tese de doutoramento busca cumprir as seguintes metas:

avaliar alguns aspectos geológicos locais do Prospecto Volta Grande, na região de Lavras do Sul (RS); avaliar o comportamento espacial (2D e 3D) dos corpos de minério do Prospecto Volta Grande a partir da modelagem dos dados identificados anteriormente; criar modelos **raster** (blocos) da distribuição espacial (3D) das variáveis quantitativas (resistividade aparente **CSAMT** *vs.* teores de elementos metálicos) dentro do Prospecto Volta Grande, como suporte à interpretação mais segura dos dados geofísicos; analisar os resultados da modelagem de dados e discutir as suas implicações nas estratégias de exploração e avaliação mineral da região e na programação de sondagens adicionais dentro do Prospecto Volta Grande.

1.7 Metodologia de trabalho

Os procedimentos de investigação adotados nessa tese de doutoramento foram os seguintes:

- 1) mapeamento estrutural da área do Prospecto da Volta Grande;
- 2) digitalização dos seguintes planos de informação (PIs) em *software* de planejamento de mina (Microlynx, Lynx e Datamine): a) altimetria; b) rede de drenagem; c) vias de circulação e infra-estrutura; d) trabalhos mineiros (trincheiras e sondagens); e) geologia; f) dados geofísicos; g) dados de prospecção geoquímica.
- 3) modelagem dos PIs (geoquímica e geofísica) nos próprios *softwares*, visando à investigação de correlações;

4) desenvolvimento de interpretações geológicas a partir dos resultados obtidos pela modelagem e correlação dos diferentes PIs;

5) indicações para a continuidade dos trabalhos de exploração no Prospecto da Volta Grande e sugestões para o planejamento de campanhas exploratórias de detalhe no Distrito Mineiro de Lavras do Sul.

O processo de mapeamento geológico da área do prospecto Volta Grande busca evidenciar as condições de alojamento dos veios de quartzo e das zonas hidrotermais. Andrade & Strieder (1997) realizaram a análise preliminar de fotolineamentos e classificação dos padrões estruturais relacionados ao **CILS**, por meio de imagem satélite LANDSAT TM5 (bandas 3-4-5), na escala 1: 50.000. A metodologia de extração dos fotolineamentos foi desenvolvida por Amaro & Strieder (1994) e ampliada por Strieder & Amaro (1997), objetivando a separação de diferentes tipos de lineamentos.

A definição dos padrões estruturais que controlam a geometria das ocorrências minerais, tanto em nível regional, como em nível local (Prospecto Volta Grande) é o resultado do trabalho desenvolvido por Strieder (2001); os trabalhos em nível local contaram com a participação do autor dessa tese de doutorado.

O mapa digital de elevação terreno, com dados de altimetria, rede de drenagem, vias de circulação e infra-estrutura foi organizado a partir de mesa digitalizadora, com utilização de software CAD (Figura 1.6). A construção dos planos de informação dos trabalhos mineiros necessitou de procedimentos de transformação de sistema referencial para obtenção de um sistema X, Y, Z de coordenados global. Os dados geoquímicos (teores de Au e Cu) obtidos a partir de testemunho de sondagem foram organizados com a utilização dos *softwares* Lynks e Mycrolinks, definindo as variáveis: coordenadas X, Y, Z da boca do furo; azimuth, inclinação e comprimento do furo de sondagem; número da amostra; litologia; teor de Au; teor de Cu. As primeiras campanhas de sondagens foram realizadas pelo **DNPM** (Ministério de Minas e Energia) e pelo **DPM** (Estado do Rio Grande do Sul). Essas campanhas de sondagem foram realizadas nos seguintes períodos: **1)** de 1959 a 1962, executada pelo **DNPM**, produziu 20 furos em diâmetro AX e totalizou 1948 m perfurados; **2)** em 1966, foi realizada pelo **DPM**, produziu 3 furos de sonda com

diâmetro AX e totalizou 326 m (Tabela 1.1). As novas sondagens foram executadas pela **CRM**, de modo a controlar os antigos trabalhos e a complementar a delimitação dos corpos de minério. Essas novas sondagens foram realizadas nas áreas de pesquisa da Volta Grande, com exceção das áreas inclusas no **CILS**, e foram localizadas principalmente ao longo de anomalias geofísicas resultantes dos trabalhos feitos pela Companhia Brasileira de Geofísica. De 1974 a 1978, a **CPRM** executou, por contrato firmado com a **CRM**, 80 furos de sonda, totalizando outros 10.802 m perfurados; essas sondagens foram feitas com diâmetro BX e AX. Mais recentemente (1984), a **CRM** executou 10 furos, totalizando 481 m (Tabela 1.1).

Tabela 1.1 - Tabulação da distribuição das sondagens por área de pesquisa dentro do Prospecto da Volta Grande (Dable de Mello, 1995).

ÁREAS DE PESQUISA	DNPM 1959-1962	DPM 1966	CRM e CPRM 1974-1978	CRM 1984	Totais de metros perfurados
1	6	3	20	0	4.707 m
2 SUL	13	0	6	0	1.983 m
2 NORTE	0	0	2	0	200 m
4	1	0	31	10	4.122 m
5	0	0	6	0	659 m
5 ^A	0	0	4	0	466 m
MERITA	0	0	11	0	1.420 m
TOTAL	20	3	80	10	13.557 m

A amostragem para avaliação dos depósitos consistiu de amostras de canal na lapa das diferentes escavações e de amostras dos testemunhos de sondagem. Essa amostragem passou por secagem, britagem, quarteamento, moagem e pesagem das amostras finais antes do envio para análise química. As análises químicas foram efetuadas na **CIENTEC** (Porto Alegre, RS), na **GEOSOL** (Belo Horizonte, MG) e no **SBS** (Rio de Janeiro, RJ). As dosagens requeridas para Au e Cu e forneceram resultados em partes por milhão (**ppm**), ou em porcentagem (%), respectivamente. O método preferido para análise do Au e do Cu foi a absorção atômica.

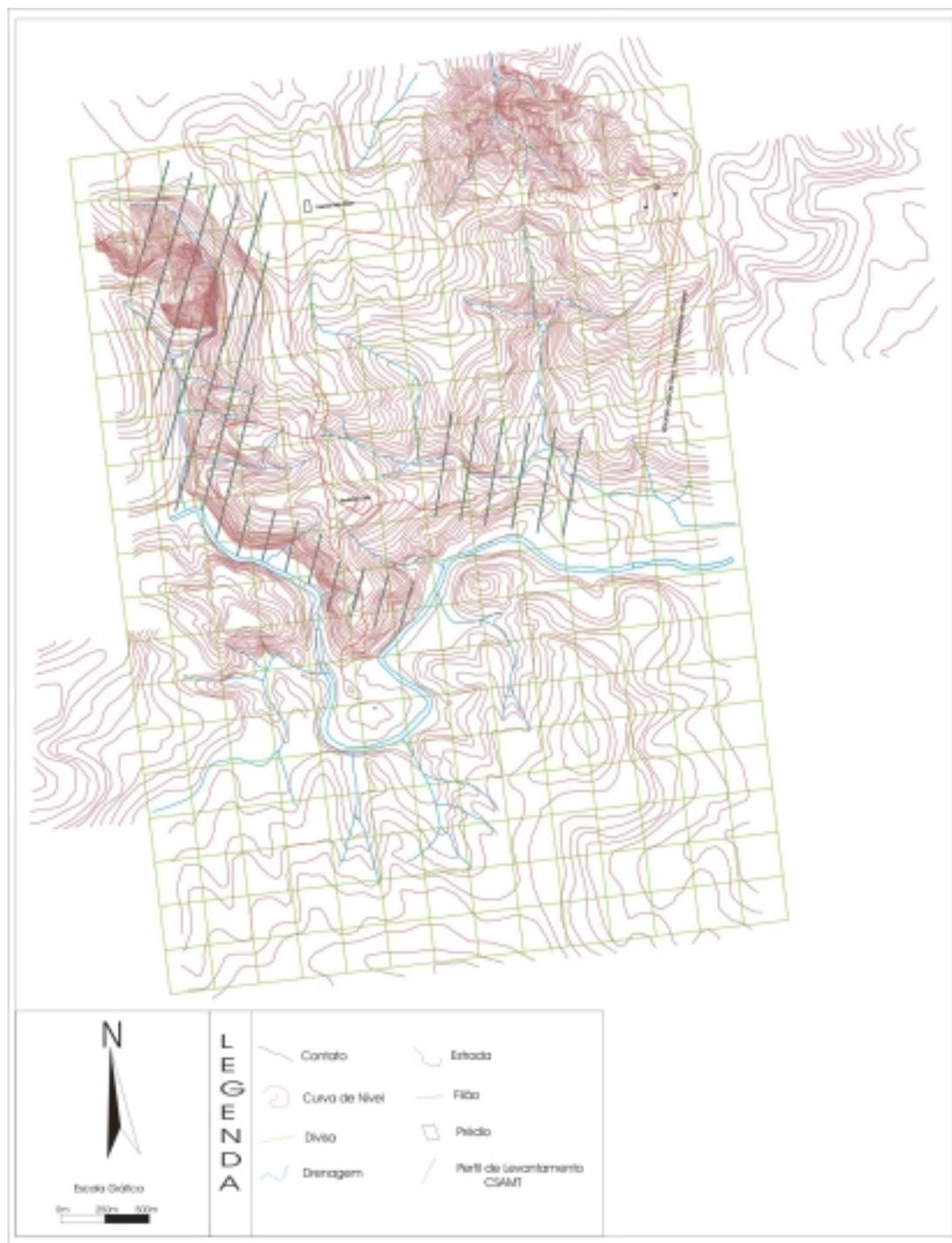


Figura 1.6 - Mapa digital de elevação e infra-estrutura da área do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS) (Strieder, 2001).

A amostragem para avaliação dos depósitos consistiu de amostras de canal na lapa das diferentes escavações e de amostras dos testemunhos de sondagem. Essa amostragem passou por secagem, britagem, quartamento, moagem e pesagem das amostras finais antes do envio para análise química. As análises químicas foram efetuadas na **CIENTEC** (Porto Alegre, RS), na **GEOSOL** (Belo Horizonte, MG) e no **SBS** (Rio de Janeiro, RJ). As dosagens requeridas para Au e Cu e forneceram resultados em partes por milhão (**ppm**), ou em porcentagem (%), respectivamente. O método preferido para análise do Au e do Cu foi a absorção atômica. Os dados de geoquímica (teores de Au e Cu) obtidos a partir de trincheiras não foram incorporados ao banco de dados, porque não estão acompanhados de um preciso sistema referencial e sua incorporação implica na introdução de um conjunto de erros na base de dados. A aquisição dos dados de geofísica foi realizada em julho de 1995, pela empresa Zonge Engineering and Research Organization. Foi medido um total de 288 estações em 21 linhas, assim distribuídas: i) área 1, as linhas 14 até 21; ii) área 2, linhas 7 até 13; iii) área 4, linhas 1 até 6. Esse banco de dados é composto por 5228 leituras de coordenadas X,Y,Z e resistividade (resistividade aparente). O instrumento de campo utilizado pela Zonge Engineering no levantamento **CSAMT** foi um receptor portátil com microprocessador acoplado capaz ajustar de 16 canais simultaneamente. O sinal do campo elétrico é captado por uma antena de campo magnético, enquanto a fonte é um transmissor de corrente controlada. Esse equipamento foi construído pela empresa executora do trabalho. Não existem estruturas interceptando as linhas receptoras nesse levantamento (cerca, linhas de força, oleodutos ou outros objetos condutores feitos pelo homem). O banco de dados de resistividade das áreas 1, 2 e 4 está estruturado no formato GEO-EAS, conforme mostram as Figuras 3.2, 3.3 e 3.4, respectivamente. Essa estrutura é composta do nome indicativo do banco de dados na primeira linha; na segunda linha o número de variáveis (4) e, nas próximas quatro, linhas aparece o nome das quatro variáveis (X, Y, Z, resistividade). A partir da sétima linha, aparecem os valores das variáveis organizadas em colunas.

A análise estatística básica foi realizada a partir do *software* **GSLIB** (*Geostatistical Software Library*). O histograma e resumo estatístico dos valores de resistividade aparente das áreas 1, 2 e 4 foram gerados por meio do módulo **histplt**. Para cada área, foi gerado um histograma com os valores aritméticos da resistividade e um histograma com o logaritmo dos valores de resistividade. O resumo estatístico foi realizado com os valores aritméticos da resistividade. Os procedimentos para verificação da hipótese de normalidade da distribuição foram : a) análise visual do histograma (ajuste a curva de Gauss); b) análise, a partir do resumo estatístico, da porcentagem de elementos do conjunto cujo valor esteja situada no intervalo $\text{média} \pm \sigma$. A verificação da existência de diferença significativa entre os três conjuntos de dados de resistividade (área 1, área 2 e área 4) foi efetivada mediante a utilização do procedimento estatístico denominado **comparação múltipla entre as médias dos grupos**, conforme Nanni & Ribeiro (1992).

Os valores de resistividade nas diferentes áreas foram divididos em subconjuntos, mediante a definição de seis (6) intervalos de valores: a) resistividade aparente ≤ 600 ; b) $600 < \text{resistividade aparente} \leq 800$; c) $800 < \text{resistividade aparente} \leq 1200$; d) $1200 < \text{resistividade aparente} \leq 1600$; e) $1600 < \text{resistividade aparente} \leq 2000$, f) resistividade aparente ≥ 2000 . A escolha do intervalo para os menores valores de resistividade foi feita experimentalmente, de modo que se pudesse representar os valores de resistividade, que de algum modo, estejam associados aos teores de Cu e Au identificados na descrição dos furos de sondagem. A escolha do intervalo para os maiores valores de resistividade também foi feita experimentalmente, de modo que se pudesse representar aqueles valores de resistividade que não tivessem alguma relação com os teores de Cu e Au identificados nos furos de sondagem. A escolha dos outros intervalos foi feita de modo que pudesse descrever o comportamento desta variável resistividade entre estes dois extremos.

Os *wireframe* (superfícies de contorno) representativos destes diferentes intervalos foram construídos com a utilização do software DATAMINE.

A definição dos padrões estruturais que controlam a geometria das ocorrências minerais, tanto em nível regional, como em nível local (Prospecto Volta Grande) é o resultado do trabalho desenvolvido por Strieder (2001), a partir da caracterização morfoestrutural do relevo, caracterização estrutural do Complexo Intrusivo Lavras do Sul e análise de lineamentos, onde o autor utiliza técnicas gráficas de análise direcional para a prospecção de depósitos minerais que apresentam forte controle estrutural. O autor busca o entendimento das estruturas tectônicas que exercem influência sobre as ocorrências de ouro registradas na área de estudo, por meio de análise estrutural. A área individualizada para levantamento de detalhe do trabalho acima citado compreende o Complexo Intrusivo Lavras do Sul e as rochas vulcânicas e vulcano-sedimentares da Formação Hilário, onde estão as ocorrências de veios quartzo-auríferos mais importantes da região e, principalmente, o Prospecto Volta Grande (Figura 5).

CAPÍTULO II

FUNDAMENTAÇÃO CONCEITUAL DA MODELAGEM E INTEGRAÇÃO DE DADOS

A pesquisa mineral, em qualquer nível de exploração (regional, semi-regional, semi-detalle, ou detalle), está baseada na identificação e na análise de “zonas anômalas” (p.ex.: Hoover *et al.*, 1992; Hood, 1979; Rose, 1991; Reedman, 1979), tanto para os métodos diretos (prospecção geoquímica, poços, trincheiras, sondagens, etc., quanto para os métodos indiretos (p.ex.: prospecção geofísica). Assim, deve-se entender “zonas anômalas” como áreas (2D), ou volumes (3D) de rochas que apresentem valores acima (anomalias positivas), ou abaixo (anomalias negativas) de um determinado valor de referência para aquele tipo de rocha, ou de unidade litológica. Deve-se considerar, ainda, que a pesquisa mineral, novamente em qualquer escala de exploração, utiliza a correlação de “zonas anômalas” demarcadas por vários tipos de informações (concentração de elementos químicos medidos na prospecção geoquímica e parâmetros físicos determinados na prospecção geofísica, p.ex.); desse modo, então, as correlações entre os mais diversas informações que identificam um determinado tipo de depósito mineral podem ser positivas e negativas, dependendo da informações considerada e do tipo de “assinatura” que o depósito mineral em questão apresenta para a(s) informação(ões).

Esses conceitos gerais, apesar de serem do senso comum aos geólogos prospectores, são raramente explicitados em detalle nas campanhas exploratórias. As campanhas de prospecção geoquímica, por usualmente serem entendidas como métodos diretos, tem explicitado e explorado timidamente tais correlações (Hood, 1979). As campanhas de prospecção geofísica, por outro lado, tem tradicionalmente fundamentado o planejamento dos métodos de levantamento sobre “modelos de depósitos minerais”, no sentido de que são claramente explicitadas as respostas esperadas (anomalias positivas ou negativas) frente a um determinado tipo de depósito mineral sob investigação (Paranis, 1997; Dobrin, 1978).

A explicitação das respostas esperadas frente ao depósito mineral considerado é fator importantíssimo nos processos de modelagem e integração de dados via meio digital. A importância da explicitação das respostas e das correlações reside em dois aspectos: 1) garantir a interpretação adequada das respostas e das correlações observadas e 2) definir os métodos de modelagem e integração a serem utilizados. A adequação da interpretação está diretamente relacionada com o grau de conhecimento do tipo de depósito mineral sob investigação, dos seus parâmetros e/ou estruturas controladoras e, fundamentalmente, das influências que outros fatores podem exercer sobre as informações (dados) que estão sendo colhidas e analisadas. Os dados de prospecção geofísica são particularmente susceptíveis às influências de outros fatores que não sejam, ou estejam diretamente relacionados com o depósito mineral, pois, a depender do método, várias podem ser as fontes para a geração de “artefatos”. A interpretação dos dados geofísicos, portanto, pode requerer a análise conjunta (integração) com dados diretos para garantir confiabilidade na modelagem. Os métodos de modelagem e integração de dados via meio digital são os mais variados (Flewelling *et al.*, 1992; Pigot, 1992; Reid, 1992; Lamb, 1994; Lin *et al.*, 1995); no entanto, determinados métodos não permitem a exploração de correlações, quaisquer que sejam, entre tipos distintos de informações (variáveis, dados), como por exemplo o Método dos Pesos de Evidência (Bonhan-Carter, 1994; Quadros 2000).

Nesse capítulo, pretende-se explorar sucintamente as bases conceituais do principal método geofísico utilizado recentemente no Prospecto da Volta Grande (CSAMT, Carlson & Reed, 1995) e do processo de modelagem e integração de dados conforme aplicado em pesquisa mineral.

2.1 Dispositivo *Controlled Source Audio-frequency Magneto-telluric* (CSAMT)

O *Controlled Source Audio-frequency Magneto Telluric* (CSAMT) é um dispositivo dos métodos eletromagnéticos (EM), que utiliza campos EM de fonte controlada (Parasnis, 1997); é, portanto, uma modificação dos dispositivos telúricos e magneto-telúricos de força natural. As frequências utilizadas variam com a procedência dos equipamentos, mas usualmente estão compreendidas entre 0,001 Hz até 1 Hz; isto é, de frequências

extremamente baixas, até frequências relativamente baixas em relação às frequências utilizadas nos dispositivos **EM** convencionais, que utilizam frequências entre 100 Hz e 5000 Hz.

O dispositivo **CSAMT** foi idealizado com o objetivo principal de obter grandes alcances em profundidade. Esse alcance é conseguido com a utilização de frequências extremamente baixas e com a grande separação (considerada de dimensão infinita: > 8 km) entre a fonte dos impulsos **EM** e o receptor. Nesse sentido, foi alcançado algum sucesso e tem sido verificada a capacidade de penetração de várias centenas de metros. Porém, as anomalias mostram efeitos generalizados em grandes áreas, uma vez que pequenos contrastes de condutividade produzem amplas anomalias no dispositivo **CSAMT**.

O campo **EM** natural, ou induzido junto ao solo varia em intensidade e direção no tempo (variações instantâneas, diurnas e sazonais), em grande parte de forma aleatória. Cada impulso **EM** costuma ser elipticamente polarizado, devido aos efeitos de correntes induzidas no subsolo; se as medidas num determinado ponto são feitas durante um grande intervalo de tempo, obtém-se um elipsóide de integração que é resultado da polarização em dois planos perpendiculares entre si. Assim, os campos elétrico e magnético são ortogonais entre si e as suas amplitudes (E_x e H_y , respectivamente) estão relacionadas à equação 2.1. abaixo:

$$\left| \frac{E_{tx}}{E_{ri}} \right| = (\mu\omega\rho)^{\frac{1}{2}} \quad 2.1$$

onde μ é a permeabilidade magnética ($\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ } \Omega\text{s/m}$, permeabilidade padrão para condutores não magnéticos), ω é a frequência angular ($\omega = 2\pi f$) e ρ é a resistividade do meio. A partir dessa equação, obtém-se que (equação 2.2.):

$$\rho = \frac{\mu_0}{2\pi f} \left| \frac{E_x}{B_y} \right|^2 \quad 2.2$$

onde B_y é a densidade de fluxo magnético ($B_y = \mu_0 H_y$). Dessa forma, a resistividade entre os eletrodos pode ser medida pela equação 2.3. abaixo:

$$\rho = \frac{0.2}{f} \left| \frac{E_x}{B_y} \right|^2 \quad 2.3$$

em que E_x é expresso em mV/km e B_y é expresso em nT.

A diferença de fase (θ) entre E_x e H_y é $\pi/4$. Assim, as medidas de diferença de fase entre E_x e H_y , numa determinada frequência, poderão constituir uma primeira indicação da não homogeneidade do terreno. Além disso, a resistividade medida em diferentes frequências não será a mesma, mas poder-se-á definir uma resistividade aparente (ρ_a) por meio da equação 2.2. acima.

A determinação da diferença de fase e da resistividade aparente em função da frequência permite a realização de “sondagens magneto-telúricas”, de modo semelhante à sondagem elétrica; além disso, também permite o mapeamento (caminhamento) lateral, semelhante aos procedimentos adotados nos métodos elétricos. A diferença básica entre esse dispositivo **CSAMT** e os métodos elétricos é a penetrabilidade (profundidade de investigação). Os contrastes de condutividade detectados pelo dispositivo **CSAMT** podem ser associados a contatos geológicos subverticais (ou muito inclinados), falhas, zonas brechadas, ou fissuras; cursos d’água e linhas de cristas do relevo também causam, no entanto, eixos fortemente anômalos. Admite-se que o alcance em profundidade e a resolução do método sejam muito prejudicados por esses ruídos (ou *background*) inerentes ao método.

2.2 Modelagem e Integração de dados

“Uma grande variedade de aplicativos interagem de diferentes modos com a pesquisa mineral. A partir da análise dos padrões e da origem desses aplicativos é possível identificar o tipo de transferência de dados e as dificuldades que podem ocorrer no dia-a-dia da pesquisa” (Power *et al.*, 1995). Segundo Pimentel *et al.* (1997), todo aplicativo é uma

rotina que, por meio da utilização do computador, tenta armazenar dados que representem o mundo real. O mundo real é extraordinariamente complexo para que se possa entendê-lo totalmente mediante o uso de modelos estatísticos. Necessita-se, portanto, de instrumentos que nos permitam interpretar e compreender a realidade a nossa volta. Daí o desenvolvimento de aplicativos que utilizam dados geograficamente referenciados como instrumentos à modelagem e à integração de informações sobre depósitos minerais.

2.2.1 Características gerais do processo de modelagem e integração de dados

O globo terrestre e um mapa, por exemplo, são modelos do mundo todo, ou de uma porção específica. Os modelos geográficos, em geral, representam as três dimensões da realidade: a dimensão espacial, a dimensão temática e a dimensão temporal (Pimentel *et al.*, 1997).

A dimensão espacial é representada pelos dados que possam ser identificados por uma localização geográfica. A localização geográfica é medida por meio de coordenadas. Assim, essa dimensão é constituída a partir de entidades espaciais, tais como: pontos, linhas, áreas, superfícies e redes.

A dimensão temática identifica os atributos, que são as características, ou as propriedades de uma entidade, ou de uma localização. O valor de um atributo varia de acordo com a escala de medição usada. Existem quatro tipos de escalas de medida: nominal, ordinal, intervalo e razão.

A dimensão temporal é a medida de uma unidade de tempo e permite comparar dados coletados em épocas diferentes, de modo a avaliar, tanto qualitativa, quanto quantitativamente as mudanças ocorridas no intervalo de tempo considerado.

2.2.1.1 Sistemas de Informações Georreferenciadas (SIGs)

Os Sistemas de Informações Georreferenciadas (SIGs) são instrumentos computacionais projetados para a organização, armazenamento e análise de objetos e fenômenos onde a localização geográfica é uma característica importante. Assim, o fator que diferencia os SIGs de outros sistemas de armazenamento e de recuperação é a utilização da localização formal dos atributos num espaço geográfico de coordenadas. Esse conceito pode não depender necessariamente da utilização do computador; por exemplo, o armazenamento de mapas de papel numa mapoteca e a posterior superposição desses mapas em mesas de luz, ou por meio de papel transparente para escolher áreas alvo para exploração mineral. Entretanto, com o desenvolvimento da tecnologia digital e de ferramentas matemáticas sofisticadas, foram abertas novas possibilidades de análise espacial, temática e temporal, que resultaram numa maior disseminação da tecnologia SIG (Fisher, 1992).

O objetivo principal de um SIG é fornecer suporte para a tomada de decisão baseada em dados espacialmente distribuídos num sistema georreferenciado. A aplicação dos SIGs pode ser subdividida em uma, ou mais das seguintes atividades com dados espaciais: visualização, interrogação (**query**), combinação, análise e predição (Pimentel *et al.*, 1997).

Os SIGs exploram a visualização não só por meio dos monitores de vídeo, mas também por meio de saídas de impressoras coloridas, onde se utilizam cores, símbolos, perspectivas, sombreamentos e outros recursos. A interrogação é uma complementação da visualização, porque nem sempre a visualização é útil para responder questões como o valor de um dado particular. O SIG possui ferramentas apropriadas para duas questões fundamentais: 1) quais as características dessa localização? e 2) onde ocorrem situações com tais características? (Bonham-Carter, 1994).

Os dados, uma vez adequadamente georreferenciados, podem ser arranjados de muitas formas diferentes. Esquemas para organização dos dados são chamados **modelos de dados**: i) modelo conceitual e modelo exploratório; ii) modelo lógico; iii) modelo físico. Esses modelos de dados precisam organizar eficientemente as observações de acordo com

suas características espaciais e não-espaciais. A partir dos modelos de dados, então, os **SIGs** permitem a combinação, ou a modelagem e integração de dados provenientes de fontes diversas, mesmo que apresentem tipos e formas de armazenamento diferentes (Fisher, 1992).

Os “*modelos de depósitos minerais são classes que podem ser representadas por depósitos minerais idealizados. Esses modelos são conceituais e, geralmente, descritos por palavras e gráficos*” (Pimentel *et al.*, 1997). Essas classes são chamadas de modelos, embora não o sejam no sentido pleno do termo, uma vez que “modelar é sinônimo de análise numérica e simulação de sistemas contínuos representados por equações diferenciais” (Houlding, 1994). Nesse sentido, “*os modelos de depósitos minerais apenas descrevem as características de um tipo particular de depósito e são acompanhados de informações a respeito do seu processo de formação. Os modelos de depósito mineral são importantes como fundamento teórico para orientar o estudo via SIG na área de interesse; ajudam na seleção de dados e na definição das feições a realçar e dos pesos relativos dessas feições para indicar os potenciais minerais*” (Bonham-Carter, 1994).

Para construir um modelo de potencial mineral, precisa-se concluir as seguintes etapas: 1) modelo conceitual do depósito; (1a) modelo exploratório do depósito; 2) construção da base de dados espaciais georreferenciados; 3) processamento dos dados; 4) aplicação de metodologias de integração. A etapa do modelo conceitual do depósito consiste no estabelecimento do depósito mineral idealizado, descrito por palavras e gráficos, enquanto o modelo exploratório é a utilização de características do modelo conceitual identificadas no depósito. A etapa da construção da base de dados consiste na definição da área de estudo e na entrada de dados por meio da digitalização, da *rasterização*, etc. A etapa do processamento dos dados consiste na avaliação estatística das populações e sub-populações, análise da variabilidade espacial das variáveis de interesse, correlação de variáveis, etc. A etapa de aplicação de metodologias de integração consiste na combinação de mapas, junção de mapas, comparação, ou mesmo sobreposição (*overlay*), de acordo com os parâmetros definidos para o modelo de depósito considerado (Pimentel *et al.*, 1997).

Os dados inseridos num **SIG** podem estar baseados em duas principais representações de dados: vetorial e *raster*. A representação vetorial é derivado da cartografia e representa o mundo real como um conjunto de linhas e de pontos interconectados que representam localizações e/ou limites das entidades espaciais (pontos, linhas, áreas, superfícies e redes). A representação *raster*, por sua vez, é derivado da tecnologia digital e aplica uma estrutura de grades com células de dimensão variada sobre o terreno; essa célula (*pixel: picture x elements*) representa uma entidade espacial (área) onde um determinado atributo (variável) possui um valor específico (Fisher, 1992).

A representação *raster* é adequada para representação de variáveis contínuas, para a análise e o processamento de imagens, por exemplo. A fidelidade da representação *raster* com o mundo real é função do tamanho da célula (*pixel*); maior a fidelidade, menor o tamanho da célula e, conseqüentemente, maior o espaço de memória requerido. A representação vetorial, por outro lado, é mais adequado para objetos. *Raster* e vetor podem ser diferenciados, então, pelo tipo de objeto espacial que utilizam para representar o espaço; enquanto o *raster* emprega área, ou volume, o vetor usa limites, ou polígonos para representar áreas, ou volumes (Pimentel *et al.*, 1997).

Em cada uma das representações especificadas, existem diversos métodos de estruturar os dados, para que eles possam ser manipulados com eficiência pelo computador. Esses métodos são denominados estruturas de dados espaciais (Bonham-Carter, 1994). A melhor escolha da estrutura dos dados para cada um das representações (*raster*, ou vetorial) depende da natureza dos dados. Alguns **SIGs** utilizam ambas as estruturas, além de estruturas alternativas para o mesmo dado. Essas diferentes estruturas são usadas em diferentes tarefas dentro do **SIG**, dependendo de qual seja a mais eficiente e mais adequada.

A estrutura *raster* mais simples consiste numa grade regular quadrada, ou retangular. A localização de cada célula (*pixel*) é definida pelos números de linhas e de colunas (x,y). O valor atribuído à célula (z) indica o valor do atributo que ela representa. As células quadradas permitem utilizar a representação matricial, cujas operações são bastante conhecidas em termos de algoritmos na maioria das linguagens de computação; assim, os primeiros **SIGs** eram todos baseados na estrutura *raster*. Como o tamanho dos arquivos

está relacionado à área de cobertura, ele aumenta com o quadrado da resolução (lado da célula); por esse motivo, os arquivos *raster* tendem a ser muito grandes. Mas, como existem muitas células com o mesmo valor, pode-se obter redução de tamanho do arquivo por meio de métodos de compressão, dentre os quais pode-se citar três: 1) *run-length encoding*; 2) *value point encoding* e 3) *quadtree* (Pimentel *et al.*, 1997).

No método de compressão *run-length encoding*, as células adjacentes, ao longo da mesma linha, que possuem o valor idêntico são tratadas como um grupo denominado corrida, ao invés de armazenar o mesmo valor repetidamente para cada célula. No método *value point encoding*, são atribuídas às células o número de posições com o mesmo valor, começando com o canto superior esquerdo e caminhando da esquerda para direita, de cima para baixo. O método de compressão *quadtree* constitui uma estrutura de dados hierárquicos baseados em sucessivas subdivisões em 4 quadrantes por *pixel*; ao invés de dividir uma área em células do mesmo tamanho, subdivisões maiores são usadas naquelas regiões com maiores detalhes e, neste sentido, um alto grau de resolução é dado somente onde seja estritamente necessário. Em mapas temáticos, um detalhamento da grade é usualmente necessário na vizinhança de linhas, pontos e limites de polígonos. A raiz da árvore (*tree*) é definida como o ponto a partir do qual todos os outros galhos se expandem; uma folha é um ponto a partir da qual não existem mais galho; todos os outros pontos na árvore são denominados nós (Pimentel *et al.*, 1997).

A estrutura vetorial pode ser subdividida em modelos *spagetti* e modelos topológicos. Os modelos topológicos são estruturas vetoriais em que os limites dos polígonos são quebrados em arcos e nós e a relação entre arcos, nós e polígonos são definidas numa tabela de atributos; esse modelo é capaz de fazer sobreposição (*overlay*) e operações de modelagem. Os modelos *spagetti* são modelos vetoriais em que os limites de dois polígonos são digitalizados duas vezes; portanto, se ocorrer erro de digitalização, existirá um erro na linha entre os dois polígonos adjacentes (Bonham-Carter, 1994).

2.2.2. Características do processo de modelagem e integração de dados em pesquisa mineral

A modelagem de dados é o processo de transformação e ajuste espacial dos dados brutos para construir um modelo espacialmente contínuo de dados discretizados para análise, correlação e integração. A integração de dados é o processo de criar uma forma comum para vários dados (Houlding, 1987). A análise é o processo de inferir significado aos dados. Os processos de análise podem ser efetuados, por tratamento estatístico, modelos de ajuste de dados e/ou outras operações. Além de analisar as informações espaciais para se extrair conhecimento, também é possível a utilização de relações conhecidas para modelar, ou para prever uma situação geológica a partir de um conjunto de condições.

Todo projeto de caracterização tem sua própria lista de características pertinentes e de variáveis. No início de um projeto, essa lista deve ser definida em termos de identidades apropriadas, tipos, informações de formato, etc..., para produzir uma estrutura que acomode todas as fontes de dados. Essa lista é ampliada com melhorias de caracterização, para acomodar as características novas, ou as variáveis derivadas de funções, de interpretações, ou de estimativas que envolvem as fontes originais de dados (Houlding, 1987).

Essas considerações mostram a necessidade da administração efetiva de localização e de identidade de dados. Para que isso seja alcançado, deve-se desenvolver uma lógica satisfatória de categorização e de organização dos dados. Esses problemas são idênticos aos enfrentados por sistemas de informação georreferenciadas convencionais. Há muitos modos de categorizar uma grande variedade de informação de pesquisa para produzir a base de qualquer caracterização (Fisher, 1992).

A categorização pode ser feita estritamente a partir da perspectiva de dados, quando é necessário lidar com observações que têm valores numéricos, alfa-numéricos, ou valor integral (estimado, ou medidos). As observações são invariavelmente acompanhadas de informações relativas às características, como: litologia, mineralogia, unidade geológica, ou identidade de seqüência e estrutura geológica. A maioria delas deriva de observação visual, testemunho de sondagem, afloramentos de superfície, ou de escavações. Por outro lado, as

medidas geralmente, mas não exclusivamente, têm a ver com variáveis tais como: concentrações de contaminante (de amostras de laboratório), teor de minério (de ensaios), porosidade de reservatório e saturações (de uma variedade de perfilagens geofísicas) e propriedades geomecânica (de testes, ou de amostras *in situ*). As medidas também podem ser a fonte de informações características, por exemplo litologia, derivada indiretamente de: a) testemunho de sondagem; b) superfície de gravações geofísicas (resistividade, sísmica, radar, etc.); c) informação de estratos e d) medidas de penetração de cone de teste, etc.

A categorização a partir de uma perspectiva de aplicação leva em conta as características que formam a base das interpretações a serem produzidas e as variáveis que produzem a fonte para estimar distribuições espaciais. Em geral, as características são qualidades geológicas observáveis, às quais se aplica uma qualificação espacial; as variáveis são qualidades mensuráveis, às quais se aplica um quantificador para mostrar a sua variabilidade espacial. A característica comum de todo item de informação está associada com uma localização e uma extensão (ponto, fileira, área, blocos, ou *grid*) no espaço 3D. A definição da localização e da extensão de uma característica, ou de uma variável é, em todos os casos, função da geometria implícita dos dados.

A categorização de dados a partir da perspectiva da geometria dos dados é o meio mais eficiente e pertinente de organizar os dados numa aproximação computadorizada. A extensão espacial de cada característica é representada como dados de blocos, nos quais valores definidos para as variáveis são associados com geometrias de blocos irregulares. A variabilidade espacial de cada informação (variável) é representada como dados de uma malha (*grid*) 3D, onde uma medida contínua da variabilidade espacial está simulada por valores no centróide de cada célula da malha.

A informação que fundamenta a caracterização de um depósito mineral, então, está baseada em uma variedade de tipos e de formatos de fontes diferentes. A organização e correlação dessas informações em uma forma utilizável são freqüentemente os passos mais demorados no processo de integração plena. Esse é um fato de vital importância, quer se esteja usando processos digitais, ou não. Embora seja um processo razoavelmente simples, a tarefa de transformar as informações em dados digitais tem a vantagem de, previamente,

forçar a unificação e correlação das informações. Assim, por exemplo, a simples organização das descrições de testemunho de sondagem em um formato padrão de dados é vantajosa até mesmo se o instrumento para análise é uma planilha eletrônica simples, ou um sistema de banco de dados mais complexo. De modo semelhante, a organização dos dados de pesquisas topográficas e de pesquisas geofísicas em uma planilha de sistemas tipo **GIS**, ou **CAD** assegura geralmente que eles estejam espacialmente correlacionados, pelo menos num grau limitado.

A análise cuidadosa dos conteúdos e das associações de todas as possíveis fontes de informação mostra que a maioria dos tipos de informações (dados) pode ser acomodada em dois tipos de estruturas referenciais de dados (Houlding, 1987): 1) as estruturas do tipo furos de sondagem e/ou dados de mapa e 2) as estruturas do tipo dados de blocos e/ou dados de *grid*.

As fontes originais de informação (descrição de furo de sondagem, mapas de contorno digitalizados, ou dados importados de fontes externas) são normalmente inseridas por meio de estruturas referenciais simples de dados, de forma que as associações necessárias entre esses dados possam ser mantidas. Segundo Houlding (1987), a estrutura de dados de furo de sondagem e a estrutura de dados de mapa são estruturas simples que satisfazem as exigências para administração de dados cuja fonte de informação é derivada da investigação. Além disso, todas as informações podem ser integradas dentro de um espaço 3D comum e estar prontamente acessíveis ao processo de caracterização. A utilização de um sistema de coordenadas reais (geográfica, preferencialmente), com cotas, azimutes e inclinações de objetos, permite que a caracterização geológica torne-se mais acessível, utilizável e completa. Na estrutura de um furo de sondagem, cada conjunto de valores característicos e de observações está associado com um intervalo definido ao longo da linha geométrica da estrutura. Por outro lado, na estrutura de dados de mapa, cada conjunto está associado com um ponto, uma linha, ou uma forma poligonal referenciada ao plano do mapa.

A descrição do testemunho de sondagem requer uma unidade coletiva de informação (em um formato de *log*), ou um conjunto individual de amostra e de

observações nas localizações corretas. A manutenção das relações geométricas implícitas de uma descrição de testemunho de sondagem é particularmente importante; de modo semelhante, também devem ser mantidas a integridade e associações de dados de um mapa de contorno, pesquisa, ou mapa geológico. Cada uma dessas entidades de dados contém feições geométricas (pontos, linhas, polígonos, etc.) com características associadas, ou com informação variável. Essas exigências de associação de dados, geometria implícita e relação espacial não estão satisfeitas pela tecnologia convencional de banco de dados.

Os componentes básicos da estrutura de dados de furo de sondagem incluem: identificador (nome, categoria e subconjunto de tempo); localizador (coordenadas da boca do furo); geometria (descrição, azimute e inclinação); e o conteúdo de informação primário, que consiste nas observações amostradas e/ou estimadas. Os componentes básicos da estrutura de dados de mapa incluem: identificador (nome do mapa e descrição); localizador (coordenadas de referência, de origem plana, seu azimute e inclinação); geometria (descrita por meio de características apropriadas como pontos, linhas e polígonos); e conteúdo de informações primárias, que consiste em observações e em valores de amostras associadas (Burns, 1992).

A caracterização completa-se com estruturas de dados apropriadas para armazenar informações relativas aos resultados de interpretação (estrutura de dados de bloco), ou aos resultados de estimativa de variáveis (estrutura de dados de *grid*). A estrutura de dados de bloco somente acomoda valores característicos; cada valor está associado com um componente. A estrutura de dados de *grid* acomoda essencialmente valores de variáveis associados com a célula do *grid* e localizados no centróide desse *grid*; contudo, também acomoda valores característicos e blocos com o propósito de controle espacial (Burns, 1992).

A estrutura de dados de bloco satisfaz as exigências para representação de blocos geológicos irregulares discretos (Houlding, 1987). A estrutura consiste em três limites poligonais paralelos, planos de compensação e ligações (*links*) que os une na terceira dimensão. A generalização dessa estrutura de dados de forma que os limites possam ser definidos em qualquer orientação espacial e que o bloco esteja vinculado a uma característica geológica permite obter uma caracterização geométrica da geologia. Os

componentes básicos dos modelos de bloco são definidos em uma orientação espacial apropriada e incluem: o identificador da estrutura dos dados (identificador de unidade geológica, um nome de componente e uma descrição); o localizador (coordenadas e rotações do plano a partir do qual o componente é definido inicialmente); a geometria (os três limites do bloco, a compensação, ou a espessura do plano e os seus instrumentos intermediários); e o conteúdo da informação primária (código vinculado ao bloco para representar seu valor característico). As estruturas de dados de bloco comportam uma aproximação de base vetorial para a representação de limites geológicos definidos, são compatíveis com todas as exigências de caracterização, permitem executar interpretação interativa inicialmente em seções geológicas 2D e, subseqüentemente, em 3D. Esse tipo de estrutura também se presta à geração rápida de modelos geológicos simples de informação de superfície, por meio de formas triangulares simples de componentes geométricos; à obtenção de seções geológicas em qualquer orientação pelo modelo geológico elaborado; à integração espacial do modelo geológico com a estrutura de *grid* 3D de dados; ao controle dos processos de estimativa de variáveis, além de outras possibilidades de manuseio e edição. A estrutura de dados de bloco é o componente chave que permite integração pelo processo informatizado (Burns, 1992).

A estrutura de dados de *grid* 3D satisfaz as exigências de representação da variabilidade espacial de uma, ou mais variáveis. Os valores da variável de interesse são estimados e armazenados de forma a estarem vinculados ao centróide da célula de *grid*. Assim, uma medida contínua da variável é representada por um conjunto finito de valores em pontos discretos, regularmente espaçados. O identificador dessa estrutura de dados inclui o nome do *grid*, a descrição e o nome da variável. O localizador inclui as coordenadas da origem de *grid* e as suas rotações. A geometria do *grid* está implicitamente definida pelas dimensões das células do *grid* regular e pelo número de células de *grid* em direções ortogonais. O conteúdo de informação primária inclui o valor estimado da variável no centróide de cada célula de *grid*, junto com uma medida de sua incerteza. A estrutura de dados de 3D produz um instrumento apropriado para a representação de informação do tipo *raster*, é compatível com todas as técnicas de estimativa variáveis e representa uma medida espacial contínua de uma variável em qualquer densidade de informação (Burns, 1992).

2.2.3. Modelagem e Integração de dados 2D vs. 3D

A complexidade da estruturação de dados aumenta quando as informações necessárias ao processo de integração não mais se conformam numa dimensão 2D, mas numa dimensão 3D. Uma grande variedade de *softwares* tem ajudado as empresas de exploração e de mineração. Na exploração, o objetivo está normalmente centrado em uma área bastante ampla (normalmente maior que 100 km²), que é explorada primeiramente em 2D. Para exploração mineral em 2D, os Sistemas de Informações Georreferenciadas (SIGs) e de tratamento de imagens (STIs) e, em alguns casos 2D *Computer Aided Design* (CADs) têm sido aplicados. Tipicamente, os *softwares* de GISs são mais usados em mapeamento digital de terrenos e cidades; os *softwares* de tratamento de imagens (STIs) são mais usados para geofísica e para tratamento digital de imagens orbitais e os *softwares* 2D CAD são mais usados para a confecção de mapas urbanos, ou territoriais. Por outro lado, na pesquisa mineral de detalhe e na mineração, quase todas as atividades têm um caráter 3D e os *softwares* de processamento (Lynx, Datamine, Vulcan, por exemplo) têm funções de integração muito limitadas ou inexistentes.

A expressão "computação gráfica" leva, muitas vezes, a imaginar de imediato a utilização de sistemas CAD exclusivamente, dentre os quais destaca-se o AutoCAD . “Por outro lado, os sistemas tipo CAD foram (e ainda são) os grandes promotores tecnológicos que nortearam o desenvolvimento da atual geração de pacotes integrados aplicados à mineração. A tecnologia de representação das imagens gráficas utiliza a técnica de vetorização das imagens, de forma a se representar estruturas complexas da geologia, via processamento de vetores. Tal tecnologia é hoje padrão, até porque não parece haver nada melhor do que vetores para a representação de entidades tão distintas quanto perímetros geológicos, pés, cristas, curvas de nível, entre outras” (Houlding, 1987). De outro modo, “a representação dos atributos de qualidade anteriormente mencionados parece casar perfeitamente com a tecnologia *raster*, que consiste de blocos regulares discretizando uma determinada área, por meio da atribuição de valores quantitativos aos centróides de cada bloco” (Houlding, 1987).

A pesquisa 2D geralmente utiliza aplicativos de processamento de imagem, Sistema de Informações Georreferenciadas (**SIGs**) e, em alguns casos, o AutoCAD. No entanto, os sistemas CAD têm uma aplicação limitada nas atividades de mineração, por falta da capacidade de quantificar parâmetros de fundamental importância, ou seja, os atributos de qualidade (teores, tipos litológicos, densidades, etc.) inerentes a cada bloco tecnológico. Esses atributos, em última instância, são os dados que importam para obtenção dos resultados de reservas, planejamento de lavra e controle da produção (Power *et al.*, 1995).

Dentro do ambiente mineiro, por outro lado, quase todas as atividades têm um caráter 3D. Os *softwares* especializados de planejamento mineiro são similares aos CAD, mas tipicamente têm capacidade adicional, tais como: módulos especializados de operação com dados de pesquisa, furos de sondagem, desenho de minas subterrâneas, desenho e otimização de *open pit*, criação de modelos de blocos mineiros e/ou cálculo de reserva de minério (Power *et al.*, 1995). No entanto, faltam a esses aplicativos a capacidade de manipulação, integração e correlação de dados como as ferramentas desenvolvidas para os aplicativos do tipo **GIS**.

Infelizmente, as diferentes origens dos aplicativos na pesquisa e na mineração conduzem diretamente ao problema na mudança de dados e desenho do sistema. Esse problema resulta de diferentes modos de tratamento de dados, seguido por diferentes classes de aplicativos. A Figura 2.1 ilustra esquematicamente a importância dos dados compartimentados e a funcionalidade encontrada no maior grupo de *softwares* usados para atividades de pesquisa mineral e de mineração. Na Figura 2.1, o plano 2D representa a largura e a profundidade dos tipos de dados possíveis; cada classe maior de *software* pode operar sobre o entendimento de algum subconjunto daqueles dados. Existe uma superposição limitada entre o entendimento dos dados pelos diferentes *softwares*, como está ilustrado por uma elipse que se sobrepõe apenas parcialmente ao processamento de imagem e **GIS**, ou **GIS** e *softwares* tipo **CAD 2D** (Power *et al.* 1995).

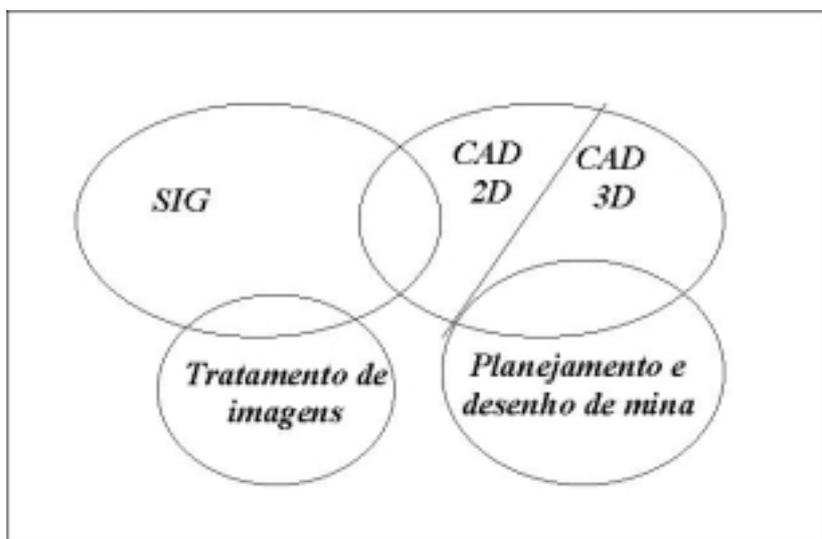


Figura 2.1 – Diagrama ilustrando o grau de superposição no entendimento dos maiores grupos de *software* de uso comum nas atividades de exploração mineral e de mineração. (Power *et al.*, 1995).

Não há, ainda, um padrão de formato de arquivos da indústria satisfatório para transferir informação geológica 3D. A maioria dos formatos padrões vetoriais aceitos (*p. ex.*: IGES, DXF, HPGL) e vários formatos padrões de imagem de tipo *raster* foram originalmente desenvolvidos para traçar aplicações gráficas. Elas tendem a perder informação e conectividade (estrutura) em um contexto 3D, até mesmo quando se trabalha com estruturas de dados de mapa relativamente simples. Elas são inadequadas no contexto de blocos e estruturas de dados de malha 3D. Os desenvolvimentos mais recentes e promissores para formulação de padrões de dados espaciais têm sido patrocinados pela indústria de petróleo (Houlding, 1987). Essas aproximações para transferência de dados são geralmente conhecidas como aproximações da própria definição do arquivo. Em um nível mais baixo, elas empregam uma representação ASCII para transferir informações com base em caracteres, o que é largamente aceito pelos computadores modernos; nesse padrão, todo registro de dados dentro de um arquivo é precedido de um registro de formato que define

sua estrutura. Ele assegura que um conjunto de dados pode realmente ser manipulado, ou reformatado para se colocar ao alcance da tecnologia.

2.2.4. Estruturas de dados na transformação 2D para 3D

As quatro estruturas de dados descritas anteriormente permitem que todas as informações possam ser administradas efetivamente na caracterização geológica com fins de exploração mineral de detalhe. Essas estruturas de dados permitem integrar tipos diferentes de informação no espaço 3D, recobrir e manter informação de uma maneira apropriada, visualizar e analisar efetivamente as informações.

A geometria das quatro estruturas de dados introduzidas nessa discussão, são os objetos espaciais com os quais se lida na modelagem 2D-3D. Além de uma geometria implícita, cada uma dessas estruturas de dados tem vários outros atributos de importância. Esses atributos incluem: a) uma identidade (com um ou mais componentes), b) uma localização em termos de coordenadas globais e rotações e c) as observações associadas e os valores de medida. A identidade, a localização e a geometria de cada uma das estruturas de dados produzem um esquema organizacional, que será a plataforma para o processo de caracterização plena (Houlding, 1987).

No mais baixo nível organizacional, há a necessidade de se definir a coordenada global, dentro da qual se pode identificar a localização de qualquer objeto. Por conveniência, os sistemas para planejamento de minas utilizam o **NEL** (sistema de coordenadas norte/sul, leste/oeste, cota, azimuth e inclinação). A geometria interna de qualquer objeto é definida tipicamente em termos de um sistema de coordenadas ortogonais locais (**XYZ**). Essas duas convenções de coordenada são definidas para as várias estruturas de dados e produzem a estrutura necessária para integração espacial de todas as estruturas de dados (Barchi *et al.*, 1992).

A administração efetiva das informações necessita de meios para prontamente transformar a localização de qualquer item de informação de um sistema de coordenadas para outro. A referência global para qualquer ponto armazenado na estrutura de dados pode

ser obtida a partir de transformação adequada. Em um contexto de dados de mapa, essas transformações permitem definir (ou importar) informação conveniente e eficazmente em um sistema de coordenada local por meio de digitalização de um mapa de contorno, por exemplo, ou dos limites geológicos de uma seção e ainda localizar imediatamente essa informação em um espaço 3D. No entanto, é necessário assegurar que nosso plano de observação (*viewplane*) coincida com a localização e a orientação definidas da estrutura de dados de mapa. A geometria de dados de mapa pode ser definida, então, em termos de características como pontos, linhas e polígonos no espaço de coordenada local (Houlding, 1987).

Dentro desses sistemas de coordenadas, então, cada ponto de uma característica de mapa (objeto) é localizado por coordenadas X e Y no plano do mapa e uma coordenada Z normal ao plano de mapa; um valor de Z igual a zero indica que o ponto recai no plano do mapa. Cada característica de mapa (objeto) pode estar associada a uma, ou mais observações e/ou valores de amostra; é, usualmente, exigidas uma variedade de tipos de características com fontes de dados diferentes. Se os objetos forem pontos discretos de amostra, então, as suas localizações são representadas por meio de características de ponto com coordenadas XYZ e cada ponto pode ter qualquer número de observações e valores amostrais associados. No caso de contornos de linha (ou isolinhas), cada objeto é representado por uma feição de contorno que contém uma multidão de pontos com Z constante e tipicamente um único valor de variável associado, chamado de feição característica. Por outro lado, uma pesquisa é representada por uma característica com diferentes Z 's estimados, ou por valores variáveis a cada ponto; essa mesma característica também é útil para representar perfis geofísicos. O mapa geológico é representado por meio de características de poligonais fechadas com um valor característico associado à área inclusa. As plantas de localização, ou as plantas de uso em engenharia são representadas por meio de feições de linha simples com um valor de Z igual a zero, para que recaia no plano de mapa (Houlding, 1987).

O principal objetivo da estrutura de dados em blocos, segundo Houlding (1987), é proporcionar meios de qualificar o espaço da subsuperfície e estabelecer valores

característicos a blocos geológicos discretos e irregulares. Porém, também deve satisfazer dois objetivos secundários importantes:

- a) produzir o caminho para interatividade que se impõe pelo controle de interpretação no processo de caracterização;
- b) aplicar o controle espacial (geológico) à estimativa geoestatística de valores variáveis.

Uma completa caracterização geológica pode exigir muitos blocos geológicos (ou modelos), cada um com dezenas, ou centenas desses elementos chamados, por conveniência, de componentes. Uma simples unidade geológica dentro de um modelo pode ser representada por centenas de componentes. Assim, é necessário um conveniente e eficiente meio de identificação de subconjuntos de componentes, hierarquizados por meio da identificação do tipo de bloco, nome do bloco (ou modelo) e descrição. O tipo do bloco define se o bloco é geológico, ou uma escavação. O nome do bloco permite usar muitos modelos de blocos em uma caracterização, representar diferentes regiões, ou representar diferentes distribuições espaciais de várias características, por exemplo: litologia e mineralogia. Com esse arranjo, pode-se recuperar prontamente todos os componentes de um bloco, ou todos os componentes que representam uma unidade, ou subunidade geológica particular, ou todos os componentes com um valor característico particular, ou um único componente (Barchi *et al.*, 1992).

Todo componente em uma estrutura de dados de bloco é referenciado a seu próprio plano componente, com sua própria localização, orientação e coordenadas **X,Y,Z** locais. Isso é distinto da estrutura de dados de mapa, onde todas as características contidas são referenciadas a um único plano de mapa. Esse arranjo de dados em blocos produz o alto grau de flexibilidade necessário para caracterizar condições complexas. Cada componente de um bloco pode, então, ser definido e referenciado ao plano mais apropriado em termos de complexidade geológica, continuidade e informação disponível. Então, de modo similar à estrutura de dados de mapa, cada componente é primeiramente localizado no espaço por meio de coordenadas globais NEL e rotação, que definem a orientação dos planos componentes. A geometria do componente é então definida em termos de suas coordenadas **XYZ** (Houlding, 1987).

A geometria dos componentes consiste em três limites poligonais fechados: a) um plano-médio limite (**MP**) coincidente com o plano do componente e b) dois limites paralelos estendidos normalmente para qualquer lado do plano de componente, chamado plano-frontal (**FP**) e plano-posterior (**BP**) limites, respectivamente. Esses limites são conectados por vínculos de linha diretos, que unem os pontos correspondentes em cada um deles. Cada limite, então, consiste em um jogo de pontos, localizados por coordenadas **XYZ**, e em segmentos de linha retas, que unem os pontos. A quantia de detalhe que pode ser incorporado em um limite depende do número de pontos avaliados como necessários pelo intérprete, de acordo com as exigências da caracterização pretendida. Desse modo, qualquer forma irregular pode ser representada por muitos desses componentes para alcançar o grau de detalhe exigido para os blocos; os blocos inclusos podem ser qualificados pela atribuição de um valor característico apropriado a cada componente (Houlding, 1987).

A habilidade para se definir o plano de componente, a sua orientação e a sua localização apropriada a qualquer objeto é de grande vantagem no processo de interpretação geológica. A espessura inicial de um componente é prontamente aplicável à interpretação interativa de limites geológicos em seções e em planos 2D. A habilidade para estender e modificar os limites na terceira dimensão satisfaz as exigências para interpretação 3D. A caracterização geométrica de um componente presta-se à computação eficiente de limites de intersecção com planos em qualquer orientação que satisfaça a exigência para visualizar seções por blocos geológicos cada um representado por um componente nos dados de estrutura em blocos; cada componente define uma porção do bloco da unidade geológica e a sua característica geológica. Não há nenhum limite ao número de componentes para definir uma unidade; assim, o grau de detalhe geológico incorporado não depende da diligência (e paciência) do intérprete (Barchi *et al.*, 1992).

O primeiro passo para a modelagem de blocos é, então, estender as interpretações de seções normalmente aos planos de componente (**MP**), de forma que eles se encontrem em planos comuns entre as seções de interpretação. Isso é alcançado denominando-se de espessura a componente de frente a fundos do bloco (**FP e BP**). O resultado é equivalente à suposição simplificada, implícita em muitas interpretações convencionais, de uma geologia

uniforme entre um par de seções para o próximo par; porém, com a ajuda do computador, pode-se ampliar consideravelmente a interpretação para além desse ponto.

Um limite pode ser aplicado segundo a necessidade do intérprete, de forma que os pares de planos limites sejam modificados e emparelhados aos planos comuns para produzir uma interpretação tridimensional contínua da unidade geológica. Isso é equivalente a uma interpolação linear do limite entre cada par de seções. Assim, os limites de interpretação 2D iniciais foram “estirados” e foram modificados para 3D, de forma a definir um bloco irregular, equivalente ao bloco da unidade geológica entre as seções. Esse processo pode ser continuado ao longo da região representada pelo modelo geológico até que a unidade seja definida completamente em 3D. A representação final consiste em vários sub-blocos contíguos, cada um representado por um componente nos dados de estrutura em blocos; cada componente define uma porção do bloco da unidade geológica e a sua característica geológica. Novamente, não há nenhum limite ao número de componentes para definir uma unidade (Barchi *et al.*, 1992).

A partir da estrutura de dados em blocos, pode-se executar interpretações tridimensionais de todas as unidades geológicas para produzir um modelo geológico completo da região. No entanto, em qualquer caso, deve-se atentar para a produção de várias seções de exame, para assegurar que os limites de unidades adjacentes estejam emparelhados uns aos outros; qualquer espaço vazio deixado inadvertidamente no modelo final será, mais tarde, considerado espaço indefinido. Deve-se notar também, que as interpretações iniciais de seções não estão limitadas a planos paralelos; podem ser executadas interpretações individuais na orientação de qualquer plano de observação (*viewplane*) apropriado à estrutura geológica. Assim, uma estrutura geológica complexa modelada somente por planos componentes (MP) pode deixar vários espaços vazios no modelo geológico 3D interpretado inicialmente; esses espaços podem ser adequadamente preenchidos com componentes definidos por planos de observação (*viewplane*) adequadamente orientados segundo as estruturas geológicas. O resultado é uma caracterização geométrica espacial de sub-superfície por valores de características geológicas, que é uma extensão 3D da interpretação convencional equivalente em seções 2D (Houlding, 1987).

Poder-se-ia discutir se não seria mais eficiente, com uso de computador, representar cada unidade geológica com uma definição geométrica contínua, em lugar de vários componentes. Esse realmente poderia ser o caso para condições geológicas relativamente simples (meios geológicos perfeitamente estratificados, por exemplo). Porém, a flexibilidade e a eficiência oferecidas pelo modelo de bloco multi-componente representa e edita interpretações complexas com muito mais definição e apresenta grandes vantagens sobre a alternativa computacional. Além disso, também produz um caminho eficiente para o geólogo impor controles interpretativos nos resultados. A aproximação multi-componentes para modelagem de bloco é igualmente eficaz para condições que envolvam estratigrafia simples, onde quer que tenha informação suficiente para definir os contatos entre unidades como superfícies triangulares (Fisher, 1992).

A habilidade para cortar e visualizar seções de observações arbitrárias (*viewplane*) no modelo geológico é, como um todo, de importância suprema na caracterização geológica e particularmente importante para o processo de interpretação. Toda essa informação geométrica é armazenada em coordenadas de **XYZ** locais relativas ao plano de observação a partir do qual os componentes foram definidos; isso é, a visão de interpretação dos planos de seção. Esses planos, por seu turno, são definidos em termos de coordenadas globais (**NEL**) e rotação e, conseqüentemente, a geometria do componente é definida completamente no espaço tridimensional por uma transformação de coordenada apropriada (Fisher, 1992).

A geometria de um componente pode ser redefinida em termos das coordenadas locais de qualquer outro plano de observação (*viewplane*) por meio de algoritmos de transformação inversa de coordenadas. Se cada um dos componentes que compõem um bloco geológico é transformado e é analisado desse modo, então, os limites de interseção coletivos representam a interseção do bloco com o novo plano de observação. A interseção com o modelo geológico inteiro é obtida de um modo semelhante. O processo pode se tornar trabalhoso, mas de fato leva só alguns segundos em computadores modernos de alta capacidade de processamento. Assim, obtém-se uma metodologia para examinar seções cortantes em qualquer orientação do modelo tridimensional da geologia e o mesmo método pode ser empregado para corte tridimensional em visões de perspectiva (Houlding, 1987).

A análise de blocos na interseção de um componente de modelo em bloco por um plano de observação (*viewplane*) de orientação arbitrária é assim introduzida. Se esse processo for duplicado em vários planos paralelos, igualmente espaçados ao longo do bloco do componente, a área bidimensional de intersecção do componente com o plano k é prontamente determinada aplicando-se um algoritmo simples para planimetria numérica dos pontos nos limites de intersecção; se cada uma dessas áreas de intersecção for multiplicada pelo espaçamento dos planos paralelos e os blocos seccionais resultantes para todos os planos que cruzam o componente forem somados, então, o resultado é uma medida do volume total do bloco do componente geológico. Assim, obtém-se uma metodologia para determinar o bloco de um componente (com precisão controlável) e, conseqüentemente, por meio de extensão, o bloco de uma unidade geológica inteira, qualquer que seja a orientação da intersecção do plano com relação à unidade (ou o componente individual). O processo é análogo à aproximação convencional para determinar blocos por perfis desenhados à mão em seções individuais, mas muito mais eficiente, flexível e preciso (Houlding, 1987).

A geometria de uma malha 3D também é definida dentro da estrutura de coordenadas **XYZ** local em termos de dimensões de célula, índices de célula e números de células em cada direção. Os pontos de interesse dentro da malha são os centróides de célula, desde que todas as estimativas de valores variáveis sejam feitas nesses pontos. As coordenadas locais do centróide da cela (i,j,k) podem ser obtidas prontamente de uma expressão, da mesma forma que as coordenadas globais são derivadas de uma transformação padrão (Fisher, 1992).

2.3. Modelagem geológica de corpos de minério

Os modelos geológicos são fundamentados em interpretação e timativa de dados limitados e os dados disponíveis contêm os seus próprios componentes de erro e de incerteza. Além do passo óbvio de resultados de validação cruzada onde quer que seja possível, há três opções disponíveis para se resguardar contra “ficções geológicas” (Houlding, 1987:

- a) a primeira é manter o processo computadorizado interativo e acessível para o usuário sempre que possível. O ente geológico deve ser armazenado e visualizado pelo computador do mesmo modo como o intérprete o define. A aproximação deve considerar o que se observa geologicamente, ao invés de permitir uma solução do tipo “caixa-preta”, onde um dado é introduzido com uma finalidade e se espera resultados finais sem que se tenha uma compreensão plena dos processamentos internos intermediários;
- b) a segunda opção é fazer uso extenso da capacidade de visualização do computador, que permite uma simulação gráfica realista das interpretações e das estimativas oferecidas. Isso permite destacar suposições incompatíveis, errôneas, ou inadequadas nos modelos em construção;
- c) a terceira opção é enfatizar e quantificar, onde possível, a incerteza associada com quaisquer dos resultados obtidos. Essa quantificação tem menor força quando aplicada às características geológicas qualitativas, onde a análise de consistência do modelo produzido é constantemente confrontada pela retro-alimentação de dados.

As técnicas computacionais, discutidas por Burns (1992) fazem uso constante de todas as três opções. Quando usadas cuidadosamente asseguram uma solução consistente para a modelagem, isso é, que seja razoável no contexto do “mundo real”. A aproximação do mundo real por meio do desenho dos *software* geologicamente inteligentes requer um suporte geológico crítico; um conjunto de classes geológicas possibilitaria sofisticadas operações, tais como: extrapolações inteligentes, ou geologicamente compatíveis, análise da consistência geológica, ou modificações no complexo modelo geológico 3D.

A maioria dos conceitos discutidos inclui geometria. Assim, faz sentido usar o conceito de corpo-objeto para construir as classes básicas para o objeto geológico. Os objetos geológicos devem, de todo modo, usar as classes geométricas/topológicas descritas acima (Lasseter, 1992). Essa estratégia conduz a três avanços que influem diretamente no desenvolvimento de *software*:

- 1) melhora a capacidade de reutilizar o código criado para outra finalidade;
- 2) melhora a capacidade para adaptar e modificar os códigos durante o desenvolvimento e a vida de produto; e

3) melhora as condições para estender as capacidades de *software*.

A modelagem de corpos de minério é a base para a tomada de decisões de investimento, planejamento e operação no setor mineiro. O problema é fazer estimativas de reservas fidedignas, considerando a complexidade dos processos geológicos que formam o depósito e a conseqüente complexidade de distribuição de teor na maioria dos depósitos de minério. Infelizmente, na maioria dos depósitos de minério, a distribuição dos teores é normalmente muito complexa e as informações sobre o controle dos depósitos são insuficientes para permitir uma aproximação determinística da estimativa de distribuição de teor em um depósito particular, pois há muitas fontes de incerteza sobre os valores de variáveis geológicas em locais não amostrados. O uso de funções aleatórias em modelos probabilísticos que incorporam e que administram essas incertezas é justificado para modelar a distribuição espacial das variáveis quantitativas, mas ainda há um caminho muito grande a percorrer para o caso de variáveis qualitativas.

2.3.1. Características gerais do processo de modelagem

O termo “modelo” está sendo utilizado para indicar um esquema que pode ser usado para organizar e caracterizar dados comuns de pesquisa exploratória e de atividade de planejamento mineiro. O termo “modelo de dados” inclui semântica (arte de significação) e sintaxe dos dados (ordem de disposição). O termo não faz referência a um grupo específico de dados geológicos, tais como: um mapa geológico particular, um modelo geológico sólido 3D, ou um modelo de bloco mineiro particular. Preferencialmente, o modelo de dados refere-se a um esquema geral que pode ser usado para armazenamento e tratamento de dados e objetos de interesse para a pesquisa e para a lavra (Power *et al.*, 1997). Estão incluídas no modelo de dados:

- a) informações do significado dos termos;
- b) informações sobre a relação entre os diferentes tipos de dados;
- c) informações a respeito de quais métodos de operação podem ser associados na estrutura do corpo-objeto.

É importante lembrar que o processo de modelagem deve estar preocupado principalmente com a representação de blocos geológicos, ao invés de superfícies. Isso é compatível com os objetivos de caracterização geológica e também prove um meio eficiente para interpretação interativa de geologia. Isso é bastante diferente das técnicas de modelagem baseadas em superfícies; elas exigem determinar a geologia inicialmente em termos de superfícies geológicas, que subsequentemente derivam os blocos. As aproximações baseadas em superfície para modelar condições complexas com descontinuidades significativas mostram claramente as dificuldades envolvidas nesse processo.

As dificuldades criadas por descontinuidades são largamente eliminadas pela aproximação da modelagem em blocos que usam tantos componentes irregulares quanto o necessário para representar qualquer forma complexa. As descontinuidades requerem, na pior das hipóteses, interpretação mais adequada de moldagem de blocos e orientação adequada de componentes. No entanto, há que se observar que é relativamente fácil criar vazios não intencionais entre os blocos quando se trabalha com blocos discretos independentes, particularmente quando se interpreta blocos adjacentes em 3D. A integridade de modelos com grande quantidade de descontinuidades pode ser verificada rápida e eficazmente cortando seções de observação (*viewplane*) em orientações apropriadas e retificando interativamente os limites de componente (Houlding, 1987).

A modelagem pode ser alcançada pelo uso de ferramentas de interpretação interativas. Isso permite incorporar qualquer porção de um limite de uma componente atual, ou romper pontos de uma definição atual para pontos de limite adjacentes; as espessuras de um componente também podem ser modificadas interativamente durante a sua extensão para a terceira dimensão e durante o ajuste dos limites adjacentes. Se há a necessidade de definição adicional em um limite de componente, então, novos pontos podem ser inseridos em qualquer fase. A interpolação automática entre limites pode estabelecer ligações (*links*) de interação que mantenham a integridade de características proeminentes; essas ligações também são vantajosas nas aproximações baseadas em superfícies, onde elas fazem a edição de blocos com incorporação de informação nova (Lasseter, 1992).

A interpretação de condições geológicas complexas pode ser um processo difícil, tedioso, repetitivo e demorado, não importa qual a metodologia utilizada. A interpretação 3D é um salto de qualidade desenvolvido a partir do equivalente 2D, porém mais complexo. Se a caracterização pretendida envolve complexidade geológica considerável, então, deve-se manter a atenção desde o começo, pois o processo de interpretação 3D vai exigir um esforço significativo. Esses elementos dirigem a observação para o próximo ponto: a “costura” de uma interpretação com a informação disponível para os objetivos de caracterização pretendida. Se o nível de detalhe da interpretação não pode ser justificado pelos dados de fonte, ou pelo conhecimento da região, então, o esforço desperdiçado será duplo, pois haverá a necessidade de reinterpretar a geologia. De modo semelhante, não há nenhuma justificativa para incorporar detalhe que terá pequeno efeito mensurável no resultado da caracterização. Um projeto adequado de caracterização beneficia significativamente o planejamento e a programação (Houlding, 1987).

No passado, usava-se lápis, papel, borracha e planímetro para alcançar esses objetivos. Posteriormente, as aproximações essencialmente 2D em um computador usaram as ferramentas **CAD**, ou **SIG**. Muitas vezes, os sistemas computacionais foram utilizados para descrever aproximações geológicas como conjuntos de seções, ou superfícies, ou blocos, ou malhas. Uma deficiência singular de muitas dessas técnicas computacionais é a falta de um mecanismo por meio do qual os geólogos possam impor controles interpretativos na solução (Houlding, 1994).

A interpretação geológica é, por natureza, um processo interativo e requer definição de grande quantidade de informação espacial. Idealmente, o que se necessita para essa tarefa é um sistema **CAD-3D** para geólogos, que permita definir e visualizar rápida e eficazmente blocos geológicos altamente irregulares. Está claro que há diferenças significativas entre um sistema **CAD-3D** e sistemas **CAD** normais, como: 1) acomodar o tipo de estruturas de dados, 2) trabalhar com blocos altamente irregulares em vez de cubos, cilindros e esferas, e 3) permitir “amarrar” atributos geológicos a esses blocos. Além disso, esses sistemas também deveriam acomodar, de um modo conveniente, os métodos familiares de interpretação que os geólogos desenvolveram com a experiência (Power *et al.*, 1995).

Quando se interpreta estrutura geológica em papel, está-se caracterizando sub-superfícies (seções geológicas 2D) espaçadas, que incorporam litologia, tipologia de minério, estrutura, ou sucessão geológica. Em um exercício manual, desenha-se simplesmente limites que representam a interpretação, ou a suposição deduzida da interseção de várias entidades geológicas com o plano da seção; então, colore-se as áreas entre os limites, de modo a distinguir as entidades geológicas pelo seu valor característico. Todos esses elementos são referências visuais e espaciais para as observações, ou dados característicos, que são pertinente à seção interpretada (Houlding, 1987).

Esse procedimento é relativamente fácil e eficaz em um computador. A tela do computador pode ser orientada de tal modo que defina um plano de observação (*viewplane*) com coordenadas tridimensionais rotacionadas e que corresponda à orientação da seção de interpretação. Mais adiante, pode-se exibir, no plano de observação, uma projeção escalonada dos dados geológicos que são espacialmente pertinentes, isto é, dentro de uma distância especificada, ou do alcance da seção. A informação de fundo só é exibida para os propósitos de referência visual e pode assumir muitas formas, pois depende do que é pertinente à interpretação; projeções de intervalos, código de cores de litologia são freqüentemente usadas. Muitas vezes, estão associadas com interseções de planos de observação com modelos topográficos e falhas prévias, ou superfícies derivadas de pesquisas geofísicas, ou interseções com outras seções de interpretação (Houlding, 1987).

Os limites de componentes podem ser traçados de modo semelhante a uma interpretação no papel (dispositivos gráficos tipo *mouse*). Cada limite consiste de uma série de pontos unidos por segmentos de reta; o número de pontos em cada limite é controlado pelo grau de detalhe geológico incorporado no limite. O limite completo é armazenado como um componente em uma estrutura de blocos com zero de densidade e os três limites da estrutura de dados iguais e coincidentes. O plano de observação torna-se o componente de plano e eles compartilham a mesma origem e orientação. O componente é nominado por um código que designa seu valor característico e que controla a cor na qual são exibidas a sua geometria e sua interseção com o plano de observação. O procedimento é continuado até que todas as interseções geológicas de interesse sejam interpretadas nessa seção e, então, repetidas em várias outras seções em várias orientações. O resultado, visto em uma

perspectiva 3D, é um modelo geológico. A compatibilidade entre as interpretações de seção é assegurada exibindo-se as interseções dos planos de observação para referência durante o processo de interpretação (Houlding, 1987).

A interpretação tridimensional plena da geologia pode ser realizada depois das interpretações de seções 2D simples como ponto de partida. Ilustrar o processo permite considerar a interpretação de uma única unidade geológica e supõe a interpretação da mesma unidade em duas seções de observação adjacentes; nessas seções, os limites de interpretação têm configurações um pouco diferentes (Barchi, 1992).

A sub-superfície geológica não é um conjunto de superfícies, de seções, ou de blocos; tampouco é uma quantidade contínua. Toda unidade geológica é um volume irregular com uma, ou mais características singulares. Os limites entre unidades criam descontinuidade que podem se tornar complexas por falhas, erosão, etc. É dentro dessa complexidade que estão inseridas variáveis como: teor de minério, propriedades geomecânica, propriedades geofísicas, etc...; essas informações escalares são, de um modo geral, continuamente variáveis dentro do volume de uma unidade, mas descontinuamente variáveis nos limites das unidades. Pode-se dizer, então, que a sub-superfície geológica é discreta em termos de volumes geológicos e pseudo-contínua em termos da variabilidade espacial de suas informações (variáveis).

As caracterizações geológicas também se preocupam com volumes definidos pela ocorrência de variáveis que excedam um patamar especificado (*cut-off*, por exemplo). A distribuição espacial de uma característica geológica freqüentemente influencia a variabilidade espacial de uma informação escalar (variável) e, desse modo, deve-se considerar ambas (distribuição espacial e variabilidade espacial das variáveis). Para representar adequadamente esse ambiente complexo em um computador, deve-se considerar uma quantidade contínua, semi-infinita, de volumes discretos, irregulares, descontínuos, que controlam a variabilidade espacial de variáveis. De uma perspectiva do computador, a geometria de volumes geológicos irregulares é equivalente à informação de base vetorial e a variabilidade espacial de informações escalares (variáveis) é equivalente à informação de base *raster*. A integração dessas duas informações digitais em um contexto

3D produz uma plataforma para a caracterização geológica efetiva em um computador (Houlding, 1987).

As ferramentas de caracterização geológicas necessárias para integração dentro desse contexto 3D são basicamente: a) administração de informação espacial; b) ferramentas gráficas para interpretação geológica; c) ferramentas geoestatística para análise espacial e estimativa; d) análise de volumes e os seus conteúdos; e) visualização gráfica. Isso automatiza o processo em termos de modelagem geológica (Power *et al.*, 1995).

A investigação geológica invariavelmente se depara com limitações de ordem econômica, que forçam à derivação de modelos a partir de informações limitadas que estão disponíveis, ou que são de baixo custo de aquisição. A interpretação nessas condições possui conotações implícitas de incerteza. A possibilidade de quantificar a incerteza associada com a interpretação geológica e a estimativa geoestatística desempenha um papel importante no processo de caracterização geológica, na medida em que produz uma base lógica para definir uma taxa de risco em atividades de planejamento subsequentes (Houlding, 1994).

2.3.2. Tipos de modelagem geológica e sua aplicação

Os modelos geológicos podem, segundo Houlding (1987):, ser genericamente classificados em:

- a) modelos geológicos interativos (convencionais e computadorizados),
- b) modelos geológicos de blocos discretos,
- c) modelos de superfícies geológicas e
- d) modelos de variáveis geológicas.

2.3.2.1 Modelo geológico interativo convencional

A aproximação convencional de um modelo geológico é alcançada a partir da interpretação da estrutura geológica e da estratigrafia por meio de planos e de seções. As

observações de características geológicas em perfis de superfícies, como topografia e falhas plotadas para referência visual, são correlacionadas com as interseções de furos de sondagem de uma unidade geológica. Assim, a estratigrafia da(s) unidade(s) geológica(s) do perfil entre interseções de furos de sondagem, ou ao longo de um perfil sísmico pode ser adequadamente interpretada. Esse modelo de interpretação simples pode ser aplicado mesmo onde um grau significativo de complexidade geológica esteja presente, desde que se tenha bastante informação para definir as condições diretamente.

O modelo geológico convencional simplifica a interpretação para proporções manejáveis, limitadas inicialmente a duas dimensões, e obriga o pesquisador a realizar exercícios mentais para interpretação simultânea em três dimensões. Depois de repetir esse processo em várias seções, pode-se tentar correlacionar as interpretações de seções em uma direção transversal aos cortes iniciais. No caso de condições geológicas complexas, no entanto, o modelamento geológico convencional torna-se um processo iterativo que requer muita edição e refinamento antes que se alcance um resultado aceitável. Apesar de sua natureza tediosa, esse ainda é um método efetivo de interpretação muito utilizado.

A melhoria da interpretação é normalmente governada pela capacidade de entendimento da(s) informação(ões) disponível(eis), mesmo em edições via computador. A aproximação computadorizada duplica o processo de interpretação convencional, pois faz uso da técnica de modelagem de bloco em base vetorial, conforme discutido anteriormente.

O plano de observação (tela de computador) substitui a seção de papel e qualquer informação pertinente à interpretação é exibida no fundo, em formatos gráficos apropriados. A estrutura de dados em bloco substitui os perfis geológicos traçados à mão e o seu limite é definido por meio de ferramentas de desenho interativas apropriadas. Nessa fase, executa-se apenas uma interpretação 2D e todos os três limites da estrutura de dados em bloco são um conjunto igual, designado por uma espessura nominal. A estrutura de dados também é nominada por um código, que designa sua característica e que determina sua cor de exibição. Para facilidade de recuperação em operações subseqüentes, é nominada uma identidade apropriada e, finalmente, uma descrição.

A modelagem de blocos refere-se a cada uma dessas entidades interpretadas como componentes e a interpretação de seções inclui várias delas, uma para cada perfil geológico interpretado na seção. Nessa fase, cada componente é uma superfície plana, de forma irregular, portadora de uma espessura nominal e localizada no plano da seção geológica simulada pela superfície de observação (*viewplane*) escolhida; assim, o perfil geológico interpretado está localizado no espaço 3D. Em uma fase posterior, quando a interpretação é completada em um número suficiente de seções, esses componentes são estendidos e modificados na terceira dimensão para alcançar uma interpretação 3D completa. Isto é possível pela caracterização geométrica de blocos produzida pelo modelamento de bloco e pela estrutura de dados em bloco.

2.3.2.2 Modelo geológico interativo computadorizado

A aproximação computadorizada interativa da modelagem geológica tem vantagens significativas sobre a aproximação convencional, na medida em que o plano de observação (*viewplane*) pode ser fácil e rapidamente manipulado para uma nova orientação e, assim, a validade de qualquer interpretação pode ser verificada imediatamente em relação às interpretações ortogonais adjacentes. A geometria da estrutura de dados em bloco permite que a interseção do plano de observação com um componente seja rápida e precisamente determinada e exibida na cor apropriada. Isso é o equivalente da aproximação convencional de informação feita manualmente, onde várias seções são escolhidas e recolocadas em uma nova intersecção; mas, essa aproximação apresenta a vantagem de ser muito menos trabalhosa e menos propensa a erros. Os dados estruturados e as ferramentas de desenho produzidas também permitem rápidas edições e refinamento de perfis geológicos. Em qualquer fase do processo, também se pode mover para uma visualização 3D em perspectiva, para obter uma avaliação e uma correlação visual dos resultados (Barchi, 1992).

Essas ferramentas de interpretação permitem alcançar rapidamente uma avaliação das condições complexas e, com uma aproximação eficiente, construir uma interpretação detalhada da geologia em um conjunto de seções 2D. O resultado é um modelo geológico

3D que representa os limites e as áreas de interseção de blocos geológicos discretos com um conjunto de planos de seção (Tipper, 1992).

2.3.2.3 Modelos geológicos de blocos discretos

Um segundo estágio da interpretação diverge da aproximação convencional e da aproximação computadorizada por estender e correlacionar as interpretações das unidades geológicas iniciais (2D) para representações 3D de blocos irregulares. A aproximação convencional supõe implicitamente que a área (e o perfil) de cada unidade é constante no espaço entre um par de seções e o próximo par de seções. No caso de áreas geologicamente complexas, essa é uma aproximação abrupta, embora os erros estejam, obviamente reduzidos, como a diminuição do espaçamento das interpretações de seções (Houlding, 1987).

As técnicas de modelagem de bloco e as estrutura de dados em bloco permitem eliminar algumas aproximações convencionais e técnicas de computador com antecedência. A estrutura de dados é projetada para acomodar a extensão exigida e a correlação (interpretação) na terceira dimensão. A derivação desses blocos irregulares está baseada nas interpretações iniciais de seções. Desse modo, a principal exigência da aproximação computadorizada é satisfeita: incluir os dados interpretativos na representação final da geologia. Também se pode acomodar as complexidades tridimensionais pela introdução de descontinuidades geológicas, como falhas e dobras, bifurcações e intrusões, desde que a técnica também permita exercitar um controle interpretativo na terceira dimensão (Barchi, 1992).

A chave para a aplicação proveitosa dessa aproximação é a produção de um conjunto apropriado de ferramentas de interpretação para derivar blocos a partir de áreas. Para cada componente da modelagem de bloco, o primeiro passo é estender a espessura normal para o plano que contenha o perfil inicial de interpretação. O resultado é um bloco com um perfil constante, mas irregular, ao contrário da suposição convencional de que os perfis são constantes entre seções; porém, cada perfil estendido é modificado de maneira

que o plano de observação novamente seja localizado no plano de perfil compensado. Os perfis estendidos são re-interpretados para detalhar as informações (topografia, planos de falha, dados de observação, dados de amostra, blocos geológicos interpretados, etc...) no plano de observação compensado. A geometria do componente resultante consiste em três perfis de interpretação irregulares unidos por vínculos (*links*) e pode acomodar formas extremamente complexas. Na prática, uma unidade geológica completa é representada por um jogo de componentes contíguos cujos perfis se emparelham uns aos outros em planos comuns (Houlding, 1987).

As unidades geológicas mostram, em muitos casos, algum grau de continuidade na terceira dimensão e é desnecessária uma interpretação interativa. Nesses casos, algoritmos podem ser aplicados a pares de componentes para alcançar um perfil interpolado entre eles. Por outro lado, nos casos de extrema complexidade geológica, então, pode ser necessário definir componentes novos com orientações de planos de observação apropriados para preencher vazios indefinidos em nossa interpretação inicial. Como cada perfil de uma componente acomoda uma quantidade grande de detalhe e cada unidade geológica é representada por vários componentes, o grau de detalhe interpretado só está limitado pela perseverança e pelo controle de tempo do intérprete. A técnica de modelagem de blocos em base vetorial (ao invés de um *raster*, ou de um *grid*) permite alcançar representações precisas dos limites abruptos e irregulares que definem as estruturas geológicas e a estratigrafia; também permite atualizar prontamente e refinar as interpretações pela acomodação de informações novas (Tipper, 1992).

A representação final de um modelo geológico é equivalente a um mapa tridimensional de geologia. As áreas geológicas 2D de um mapa convencional são substituídas por blocos geológicos 3D irregulares, que podem ser visualizados em qualquer plano seccional, ou cortes ao longo do modelo (Houlding, 1987).

2.3.2.4 Modelos de superfícies geológicas

A caracterização geológica nem sempre requer a interpretação interativa de geologia. No caso de depósitos minerais simples, a informação disponível pode ser perfeitamente adequada para uma definição mais direta de blocos geológicos. Nesses casos, pode-se usar uma aproximação com “base em superfície” para criar modelos geológicos: são geradas superfícies triangulares, que representam horizontes geológicos, ou contatos principais, e os blocos entre elas são preenchidos de componentes da modelagem de bloco. Desse modo, pode-se criar rapidamente modelos geológicos 3D de condições relativamente simples, sem qualquer necessidade de recorrer à interpretação interativa (Houlding, 1994).

Essa aproximação é possível pela habilidade da estrutura dos dados de bloco assumir uma grande variedade de formas geométricas; nesse caso, uma configuração de prisma triangular com uma variabilidade linear de espessura. Pode-se estender essa aproximação para condições mais complexas, por meio da produção de ferramentas de manipulação de superfície. Essas ferramentas incluem a habilidade para 1) cortar uma superfície em um limite poligonal, 2) cruzar uma superfície com outra e truncá-las, 3) manipular informação de superfície com lógica matemática e expressões de aritmética, 4) traçar uma superfície sobre outra e 5) permitir gerar superfícies em qualquer orientação espacial. Essas ferramentas permitem modelar condições moderadamente complexas; por exemplo: a representação de uma intrusão descontínua, ou a representação de condições de falha, que modela uma unidade geológica de cada vez em um bloco de falha. A aproximação com “base em superfície” também é aplicada com vantagem durante a interpretação de representações de superfícies como topografia (Barchi, 1992).

2.3.2.5 Modelos de variáveis geológicas

O objetivo desse tipo de modelagem é estimar a variabilidade espacial de informações predominantemente escalares, baseado em valores de amostra disponíveis, em técnicas de estimativa apropriadas e nos controles espaciais do modelo geológico. O

processo equivalente na aproximação convencional consistiria em contornar amostra estimadas em planos e em seções que usam um algoritmo de interpolação simples. Na aproximação computadorizada, estende-se todos os aspectos da estimativa espacial em três dimensões; também são utilizadas técnicas de estimativa e modelos que são “amarrados” à variabilidade espacial das amostras (Houlding, 1987).

As técnicas apropriadas de modelo de estimativa para cada variável dentro de cada unidade geológica geralmente foram determinadas por análise espacial das amostras por meio de variografia. Na maioria dos casos, a técnica de estimativa escolhida é a krigagem e uma relação apropriada de variogramas é usada como o modelo de estimativa. Se um resultado de estimativa aceitável não é alcançado, pode-se recorrer a uma técnica de estimativa alternativa, como um algoritmo de ponderação pelo inverso da distância; nesses casos, onde uma técnica apropriada não pode ser estabelecida, porque a variabilidade espacial não é mensurável, qualquer técnica adequada pode ser útil. A krigagem é usualmente enfocada, porque é apropriada na maioria de casos e porque é uma técnica que proporciona uma medida da incerteza associada ao resultado (Houlding, 1987).

A estrutura de dados para os valores estimados é uma estrutura em malha (*grid*) 3D discutida anteriormente. O objetivo é estimar valores dos centróides de todas as células da malha e produzir uma medida contínua da variável no espaço 3D. Assim, ao longo da região sob caracterização, o processo envolve o centróide de célula da malha e procura o subconjunto de amostras que caem dentro desse bloco no banco de dados (dados de furo de sondagem e dados de mapa). O valor estimado para o centróide está baseado nesse subconjunto de amostra, nas distâncias das amostras ao centróide e no modelo de estimativa selecionado. Esse processo é comum a todas as técnicas de estimativa; todas empregam alguma forma de algoritmo de ponderação pela distância, de forma que as amostras próximas do centróide têm maior influência do que aquelas em distâncias maiores (Lasseter, 1992).

Há outros fatores, além da escolha de técnica de estimativa, que afetam o resultado: as dimensões de bloco de busca e as dimensões de célula da malha. Na krigagem, por exemplo, as dimensões do bloco de busca são freqüentemente fixadas pelos alcances

estabelecidos a partir da análise variográfica. Porém, se a densidade de amostra é altamente variável, pode-se aumentar essas dimensões para evitar estimar muitos valores indefinidos em regiões de baixa densidade de amostra. Pode-se, também, impor restrições na relação espacial das amostras para com o centróide de célula da malha; por exemplo: só estimar um valor se pelo menos três dos quadrantes de bloco de busca estão ocupados por amostras (Houlding, 1987).

As dimensões de células de malha controlam a densidade resultante de informação estimada. É preferível que essa densidade seja compatível com o grau de precisão exigido na caracterização; porém, o uso de células muito pequenas, muito aquém da densidade de amostra comum e dos alcances estabelecidos pela variografia, resulta em esforço perdido no processo de estimativa e numa falsa impressão de precisão. Idealmente, as dimensões das células de malha deveriam estar entre duas a cinco vezes menores do que os alcances de influência determinados pela variografia e o espaçamento das amostras comuns nas direções correspondentes. Isso significa que as células das malhas deveriam poder assumir qualquer configuração retangular; se a variabilidade de amostra é alta em uma direção particular, a densidade resultante de informação estimada naquela direção também deveria ser mais alta e isso pode resultar na definição de células retangulares (Tipper, 1992).

A exigência mais importante, como foi enfatizada anteriormente, é a habilidade para controlar o processo de estimativa de acordo com o controle espacial do modelo geológico. Uma deficiência da estimativa por krigagem é a suavização das variações de um atributo ao longo da descontinuidade, o que, em pesquisa mineral, pode determinar o “aplainamento” de anomalias. Essa deficiência, contudo, pode ser eliminada pelo controle do processo de estimativa das células dentro de uma unidade geológica (Houlding, 1994).

A geoestatística tem algumas vantagens reconhecidas sobre outras técnicas de estimativa. Essas vantagens são salientadas principalmente onde é aplicado controle geológico (2D, ou 3D). As seguintes características do processo de estimativa por krigagem podem ser destacadas, segundo (Houlding, 1987):

- a) suavização: a krigagem suaviza valores estimados na proporção da variabilidade das amostras levando em conta o “ruído aleatório”, quanto mais suavizadas maior a incerteza associada.
- b) desagrupamento (*declustering*): o peso de krigagem atribuído a uma amostra é rebaixado em um grau. Isto ajuda a aliviar o efeito da densidade de amostragem variável causada, por exemplo, pela tendência de super-amostragem (*hot spots*) durante a pesquisa;
- c) anisotropia: as amostras em determinada direção são mais fortemente correlacionadas (menor variabilidade) e a ponderação pela krigagem será maior para essa direção;
- d) precisão: a krigagem estima com maior exatidão os valores possíveis para as amostras, porque o semi-variograma relaciona a representatividade regional dessas amostras. Na prática, isso é apenas uma representação da variabilidade regional;
- e) incerteza: a krigagem estima não só o valor para amostra, mas o grau de incerteza associado a esse valor.

O algoritmo de krigagem supõe um conjunto de dados com distribuição normal; assim, é muitas vezes necessário aplicar uma técnica de transformação no conjunto de dados para transformá-los em um conjunto com distribuição log-normal. Ao final do processo de estimativa, é necessário aplicar uma transformação de retorno para se obter um conjunto estimado de dados reais. As duas principais transformações aplicadas são: transformações logarítmicas e transformações da indicatriz. A transformação da indicatriz consiste em substituir o conjunto de dados por valores de zero ou um, para lugares onde a variável assume valores acima ou abaixo de um valor determinado, respectivamente.

A seleção das relações de variograma, ou do modelo de krigagem são outras variações de transformação de dados que podem ser necessárias para a geração de estimativas espaciais das variáveis que irão definir uma malha 3D. A anisotropia de distribuição espacial dos dados é um fator relevante na modelagem de variáveis geológicas e é determinada a partir da análise variográfica; com essa determinação, a área de influência das células de malha em direções ortogonais, que faz parte da definição do modelo de krigagem, é representada convenientemente. Os modelos de krigagem também são determinados na análise variográfica, de acordo com a sua geometria própria, e são fundamentais na estimativas dos valores da malha 3D. Porém, deve-se, ainda, distinguir

uma outra categoria de processos de krigagem, que tem influência preponderante na modelagem de variáveis geológicas com a geração de malhas 3D; trata-se da distinção entre krigagem pontual e krigagem de blocos.

A krigagem pontual produz valores estimados no centróide da célula da malha 3D, enquanto krigagem de blocos determina valores médios para toda célula da malha. A diferença é geralmente secundária. Contudo, krigagem pontual é mais apropriada para os casos em que os valores estimados são usados para geração de superfície de isovalores, ou linhas de contornos; a krigagem de blocos, por outro lado, é mais apropriada nos casos em que os valores estimados são usados para determinar o conteúdo de blocos pré-definidos (células de uma malha 3D).

Estatisticamente, o valor estimado em um ponto é o valor mais provável; e possui 68% confiança de que esteja dentro do intervalo $\bar{x} \pm \sigma$ em qualquer lugar dentro de um erro padrão e em qualquer lado do valor estimado, e possui 96% confiança de que esteja dentro do intervalo $\bar{x} \pm 2\sigma$ em qualquer lugar dentro de dois erros padrão.

A incerteza produz controle da taxa de risco e auxilia a caracterização em duas áreas: 1) a incerteza associada com estimativa espacial; 2) a incerteza inerente a uma informação interpretada. Se a variabilidade espacial da incerteza é conhecida, pode-se identificar regiões de alta incerteza por meio de inspeção simples; esse conhecimento, junto com outros fatores, permite aperfeiçoar a localização de quaisquer amostras adicionais; amostras novas que são localizadas em regiões de alta incerteza têm, em geral, grande impacto em reduzir a incerteza global da caracterização.

Como se pode notar, o potencial de erro e incerteza resultante da incerteza associada com a estimativa espacial e da incerteza inerente a uma informação interpretada parece ser muito subjetivo e, deste modo, é impossível incorporá-lo ao processo de aproximação computadorizada, a menos que esteja preparado para quantificá-lo durante o processo de interpretação.

2.3.2.6 Análise espacial de blocos

Estimadas as distribuições espaciais das variáveis de interesse e avaliadas as incertezas envolvidas na estimativa dos valores das variáveis, é necessário proceder a interpretação da estrutura geológica e estratigráfica. Assim, esse passo preocupa-se com a análise e a interpretação espacial dos resultados estimados. Os procedimentos de análise e de interpretação dependem dos objetivos da caracterização geológica. Na maioria dos casos, a avaliação envolve a simples determinação de blocos e a análise dos seus conteúdos. Na aproximação convencional, isso pode ser alcançado pelo desenho de contornos, ou de perfis em seções, pela multiplicação dessas áreas pelo espaçamento das seções e pela soma dos resultados para obter uma aproximação dos verdadeiros blocos.

A tecnologia de modelo de blocos e a sua integração com a estimativa de variável produzem um maior alcance de opções para executar análises de blocos mais precisas. Isso inclui a determinação de: 1) blocos com qualquer forma irregular, 2) blocos definidos pela interseção de outras formas irregulares, 3) blocos definidos por uma superfície de isovalores (contorno tridimensional), ou 4) interseção de uma superfícies de isovalores de uma forma irregular. As superfícies de isovalores, ou os limites de valores pré-definidos são determinados por inspeção e interpolação da variabilidade espacial de uma variável armazenada nas estruturas de dados de malha 3D, se for considerado que os limites de blocos geológicos discretos são obtidos diretamente da representação de modelo de bloco em termos da estrutura de dados em bloco. A visualização dos resultados também figura como elemento importante na análise espacial e na caracterização final do ente geológico sob investigação (Houlding, 1987).

Se a caracterização está sendo conduzida sobre um depósito mineral, o objetivo principal pode ser determinar os limites 3D de minério e analisar o bloco definido em termos de seu teor de minério. Nesse caso, os limites de minério são definidos pela superfície de isovalores para um *cut-off*. O bloco delimitado por essa superfície de isovalores é o provável bloco de minério. Como, nesse caso, um grande investimento de capital depende do resultado da caracterização, pode-se repetir essa análise com a

manipulação da incerteza estimada, para obter o melhor caso e os piores blocos de minério para um nível de confiança especificado (Houlding, 1994).

2.4. Análise dos procedimentos de integração de dados em 2D e em 3D

Conforme conceituado anteriormente, a integração de dados é o processo de criar uma forma comum para vários dados (Power *et al.*, 1995), de maneira a inferir um significado aos dados associados por meio de um processo de análise que passa necessariamente pela definição de um modelo de dados previamente definido. Os mecanismos de integração (associação) dos dados para produzir uma imagem unificada das várias fontes de informação, segundo Quadros (2000) são basicamente:

- a) lógica Booleana
- b) sobreposição indexada (index overlay);
- c) lógica difusa (Fuzzy Logic);
- d) Probabilidade bayesiana;
- e) outros

O modelo Booleano envolve a combinação lógica de mapas binários (*grids* 2D) com aplicação de operadores condicionais tipo E (interseção lógica), OU (união lógica), XOU (não interseção lógica) ou não (negação). Os mapas são tratados como condições que podem ser usadas como evidência. Os vários mapas evidência são, então, combinados para dar suporte a uma hipótese, ou a proposição tipo “esta área é favorável para conter depósitos auríferos?”, no caso de um projeto de mapeamento de favorabilidade mineral. Todos os locais da região estudada são testados com relação à satisfação da proposição e recebem valores 1 se verdadeiros (satisfaz a proposição), ou 0, se falso (não satisfaz a proposição). O resultado final é um mapa binário que mostra somente as áreas que satisfazem a proposição. O modelagem Booleana tem seu ponto forte na simplicidade de implementação. Na prática, entretanto, dificilmente se atribui pesos iguais às diferentes evidências que serão combinadas e/ou integrados; ao contrário, as evidências precisam ser ponderadas de acordo com sua significância em relação à proposição. Essa metodologia

representa a modelagem dirigida pelo conhecimento, pois a rede de evidências resultante, também chamada árvore de decisão, é montada por um especialista (Quadros, 2000).

A sobreposição indexada propicia uma combinação de evidências mais flexíveis que os outros métodos, pois permite a atribuição de pesos às evidências de acordo com sua significância. Os pesos são atribuídos de acordo com o julgamento de um especialista; portanto, também é dirigida pelo conhecimento. Os pesos devem ser valores inteiros positivos e números reais. O método pode ser utilizado com mapa de entrada, ou mapa multiclasse. Se os mapas evidência são multiclasse, além dos mapas de entrada, as classes desses mapas também recebem pesos. Nesse caso, é conveniente definir valores para as classes de cada mapa em uma tabela de atributos associada, de maneira que qualquer modificação nos valores das classes poderá ser feita diretamente sem modificar os passos do procedimento de modelagem. Os pesos dos mapas são atribuídos como no processo binário; porém, os pesos das classes de cada mapa são recuperados automaticamente nas tabelas de atributos, de acordo com a classe presente na localização que está sendo analisada (Quadros, 2000).

A modelagem com base na lógica difusa pode minimizar o problema apresentado pela maioria dos sistemas geológicos (complexidade, ou pobremente definidos ou caracterizados). A lógica difusa, em sua essência, trabalha com os dados (padrões, feições e fenômenos) geológicos como variáveis lingüísticas ou conceituais, mais do que numéricas, e ainda consegue estabelecer valores numéricos para esses dados com base no crédito, no uso de possibilidades. A metodologia com base na lógica difusa é, em alguns aspectos, similar às anteriores, pois também é um método dirigido pelo conhecimento. Os valores na lógica difusa são denominados *valores de função-membro* são atribuídos por um especialista com base no julgamento subjetivo da importância das evidências em relação à proposição estabelecida. As regras de combinação, porém, são mais flexíveis e, assim, potencializam sobremaneira o método. Além disso, os valores de *função-membro* de um conjunto de lógica difusa são expressos de uma forma contínua em escala crescente de 0 a 1, o que facilita a análise comparativa. Essa escala de *valores de função-membro* de um conjunto de lógica difusa não precisa necessariamente ser igual a 1. *Valores de função membro* de um conjunto lógica difusa são estabelecidos para cada mapa evidência que será combinado (Quadros, 2000).

Esses mecanismos têm sido de grande importância na tomada de decisões sobre a seleção de áreas alvo em processos de *follow-up* de pesquisa exploratória, desde a escala regional, até a escala de semi-detalle (Bonham-Carter *et al.*, 1988; Bonham-Carter 1994; Agterberg, 1990, entre outros). Os *softwares* que comportam esses mecanismos são usualmente **SIGs** e, em alguns casos, *softwares* de processamento de imagens digitais; são *softwares*, portanto, que operam num espaço 2D.

A pesquisa mineral de detalhe, de um modo distinto das etapas anteriores, já produz um conjunto de dados 3D, que vão desde dados sobre a geologia e a estrutura das rochas mineralizadas e suas encaixantes, dados de prospecção geoquímica (trincheiras, poços, sondagens de diversos tipos, etc...), dados de prospecção geofísica, etc... Essas informações também são passíveis de integração, com o objetivo de definir uma geometria para o corpo de minério e a distribuição espacial de minério; esses elementos são importantes na programação de uma campanha de sondagens que vise a modelagem final e a cubagem do corpo de minério. Porém, a integração desses dados deve necessariamente ser realizada num espaço 3D (Houlding, 1987).

Os *softwares* atualmente disponíveis para tratamento de dados em 3D, conforme amplamente analisado anteriormente, são basicamente dedicados à modelagem geológica e geoestatística de corpos de minério e ao planejamento das operações de lavra. Esses *softwares* não estão estruturados para realizar os processos de integração de dados conforme definidos acima. A introdução desses mecanismos de integração de dados em *softwares* 3D constitui um desafio ainda a ser cumprido na evolução do processamento de dados para a indústria mineral (Power *et al.* 1997) e para vários procedimentos de análise ambiental.

CAPÍTULO III

MODELAGEM E INTEGRAÇÃO DE GEOFÍSICOS E GEOLÓGICOS APLICADOS À PESQUISA DE MINERAIS BÁSICOS Au

A análise integrada de dados geofísicos e geológicos aplicados à pesquisa de minerais básicos Au e Cu, discutida nesse trabalho, é referente ao Prospecto Volta Grande. O Prospecto Volta Grande está situado no município de Lavras do Sul, na porção oeste do Escudo Sul-riograndense. Nessa porção ocorrem vários corpos granitóides intrusivos pós-tectônico e seqüências vulcânicas e vulcano-sedimentares pouco metamorfisadas. Esse prospecto, mais apropriadamente, está situado sobre as rochas vulcano-sedimentares da Formação Hilário (Lima 1985, Lima 1995), a qual é intrudida pelo Complexo Intrusivo Lavras do Sul (Nardi, 1984, Gastal et al. 1992, Gastal & Nardi 1994 e Gastal 1997). O complexo Intrusivo Lavras do Sul é composto por duas fácies petrográficas principais: 1) o núcleo apresenta composição monzogranítica a granodiorítica, tem afinidade shoshonítica e possui idade radiométrica U/Pb de 607 ± 7 Ma; 2) o bordo delgado é composto de pertita granito (k-feldspato granito a sienogranito), que ocorre na forma de pequenas intrusões marginais dispostas segundo um padrão de fraturas anelares e que apresenta idade radiométrica U/Pb de 580 ± 7 Ma (Leite 1995). A Formação Hilário é constituída petrograficamente por: 1) tufos andesíticos a cristal, 2) tufos andesíticos líticos, 3) lápili tufos, 4) brechas piroclásticas, 5) ignimbritos, 6) lavas andesíticas e 7) pequenos *necks* intrusivos de composição ácida em menor proporção. As lavas andesíticas predominam no contato com o Complexo Intrusivo Lavras do Sul; as rochas piroclásticas e sedimentares predominam, respectivamente, nas porções central e extremo leste da área do prospecto. O contato do Complexo Intrusivo Lavras do Sul com as rochas da Fm. Hilário é admitido ser feito por meio de falhas. Nesses locais, ocorrem inúmeras apófises graníticas, além de uma auréola de metamorfismo de contato nas rochas vulcânicas, a qual atinge fácies anfibolito nos primeiros 50m a partir do contato e a fácies xisto-verde nos 450m seguintes (Mexias, 1990).

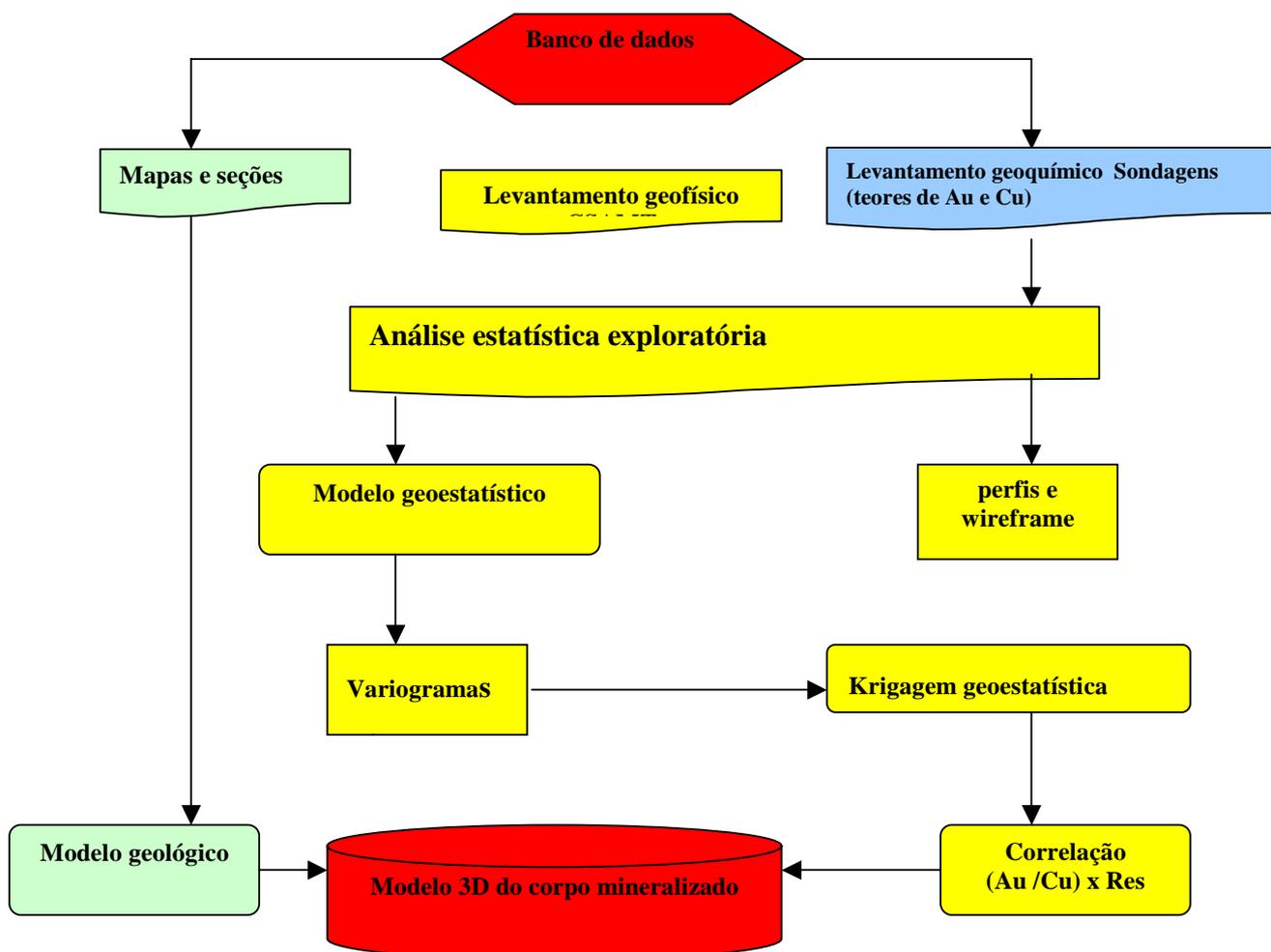


Figura 3.1 - Fluxograma do processo de integração de dados geofísicos e geológicos na pesquisa de metais básicos Au e Cu, no Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS).

O processo de integração de dados geofísicos e geológicos na pesquisa de metais básicos Au e Cu no Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS) apresentado nesse trabalho envolve várias etapas segundo o fluxograma da Figura 3.1. Essas etapas são: a) construção da base de dados espaciais geo-referenciados que consiste na definição da área de estudo e na entrada de dados por meio da digitalização, da *rasterização*, etc.. que nesse trabalho está representada pelo mapa digital do terreno representado na Figura 1.6 ; b) processamento dos dados que consiste na avaliação estatística das populações e sub-populações, análise da variabilidade espacial das variáveis de interesse, correlação de variáveis, etc. que nesse

trabalho são apresentadas e discutidas em 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4; c) modelagem e análise integrada dos dados.. A etapa de modelagem e análise integrada de dados geofísicos e geoquímicos (definição de um mesmo suporte de dados) consistiu na produção de um modelo 3D dos dados geofísicos e geoquímicos e na análise da correlação dessas informações com o objetivo de produzir uma primeira avaliação geral dessas ocorrências minerais.

. 3.1 Apresentação dos dados

Os bancos de dados de resistividade aparentes da área 1, área 2 e área 4 foram estruturados no formato GEO-EAS com mostram as Figuras 5, 6 e 7.

```
resistividade área 1
X
Y
Z
Resistividade|
419922,14    6588392,25    -413    723,9
419922,14    6588392,25    -613    803,2
419940,67    6588452,82    -859    871,6
419940,67    6588452,82    -1164   760,1
419940,67    6588452,82    -1541   599,1
419940,67    6588452,82    -2007   582,1
419940,67    6588452,82    -2583   807,0
419940,67    6588452,82    -3492  1260,0
419940,67    6588452,82     230    883,5
419940,67    6588452,82     205    883,5
```

Figura 3.2 - Estruturação do banco de dados da área 1, no formato GEO-EAS, as coordenadas X, Y, Z e a variável resistividade aparente estão representadas na primeira, segunda , terceira e quarta coluna, da esquerda para a direita, respectivamente.

```

Resistividade área 2
4
X
Y
Z
Resistividade|
4198032018,00 6588512603,00 240 2100,00
4198032018,00 6588512603,00 215 2100,00
4198032018,00 6588512603,00 160 2217,00
4198032018,00 6588512603,00 94 2367,00
4198032018,00 6588512603,00 14 2569,00
4198032018,00 6588512603,00 -82 2829,00
4198032018,00 6588512603,00 -197 2894,00
4198032018,00 6588512603,00 -335 2812,00
4198032018,00 6588512603,00 -502 2630,00
4198032018,00 6588512603,00 -702 2434,00
4198032018,00 6588512603,00 -943 2256,00
4198032018,00 6588512603,00 -1232 2063,00
4198032018,00 6588512603,00 -1581 1779,00
    
```

Figura 3.3 - Estruturação do banco de dados da área 2, no formato GEO-EAS, as coordenadas X, Y, Z e a variável resistividade aparente estão representadas na primeira, segunda, terceira e quarta coluna, da esquerda para a direita, respectivamente.

```

resistividade area 4
4
X
Y
Z
Resistividade
421125,00 6588687,00 269 1059
421125,00 6588687,00 244 1059
421125,00 6588687,00 191 700,5
421125,00 6588687,00 130 411,4
421125,00 6588687,00 61 280,3
421125,00 6588687,00 -17 211,3
421125,00 6588687,00 -105 219,1
421125,00 6588687,00 -205 280,3
421125,00 6588687,00 -319 346,4
421125,00 6588687,00 -448 412,9
421125,00 6588687,00 -594 425
421125,00 6588687,00 -761 397,4
421125,00 6588687,00 -949 357,8
    
```

Figura 3.4 - Estruturação do banco de dados da área 4, no formato GEO-EAS, as coordenadas X, Y, Z e a variável resistividade aparente estão representadas na primeira, segunda, terceira e quarta coluna, da esquerda para a direita, respectivamente.

Os dados geofísicos do levantamento **CSAMT** foram registrados em coordenadas **XY**, cota **Z** do ponto de medida em profundidade e valor da resistividade aparente. Esses dados foram, então, organizados para entrada no *software* Datamine, que se mostrou mais funcional para o processamento e a integração dos dados, conforme princípios definidos

para essa tese de doutoramento. As Figuras 3.5, 3.6 e 3.7 mostram a distribuição espacial desse conjunto de dados, cujas cotas variam de 318m até -6758m, na área 1; variam de 360m até 9259m, na área 2, enquanto variam de 300m até -5550m, na área 4.

Os valores de teores de Au e Cu disponíveis nas campanhas de sondagens realizadas pela Companhia Riograndense de Mineração estão estruturados no fomato de planilha EXCEL (Figuras 3.8, 3.9 e 3.10). Esse é o formato de introdução de dados no *Software* DATAMINE, que necessita de três diferentes arquivos: *ASSAY*, *SURVEY*, *COLLAR*.

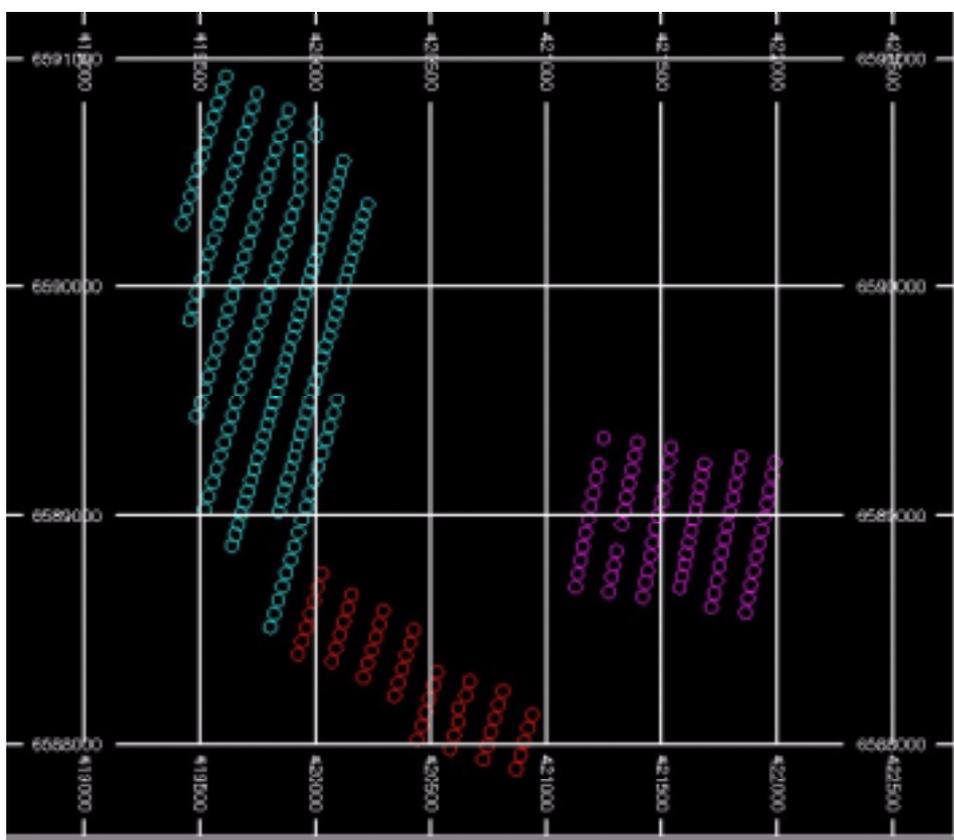


Figura 3.5 - Distribuição em 2D do levantamento CSAMT: área 1 representada na cor vermelha (da esquerda para a direita) as linhas de 14E a 21E; a área 2 está representada em azul claro (da esquerda para a direita) linhas de 7E a 13E enquanto a área 4 está representada com a cor lilás (da esquerda para a direita) as linhas de 1E a 6E.

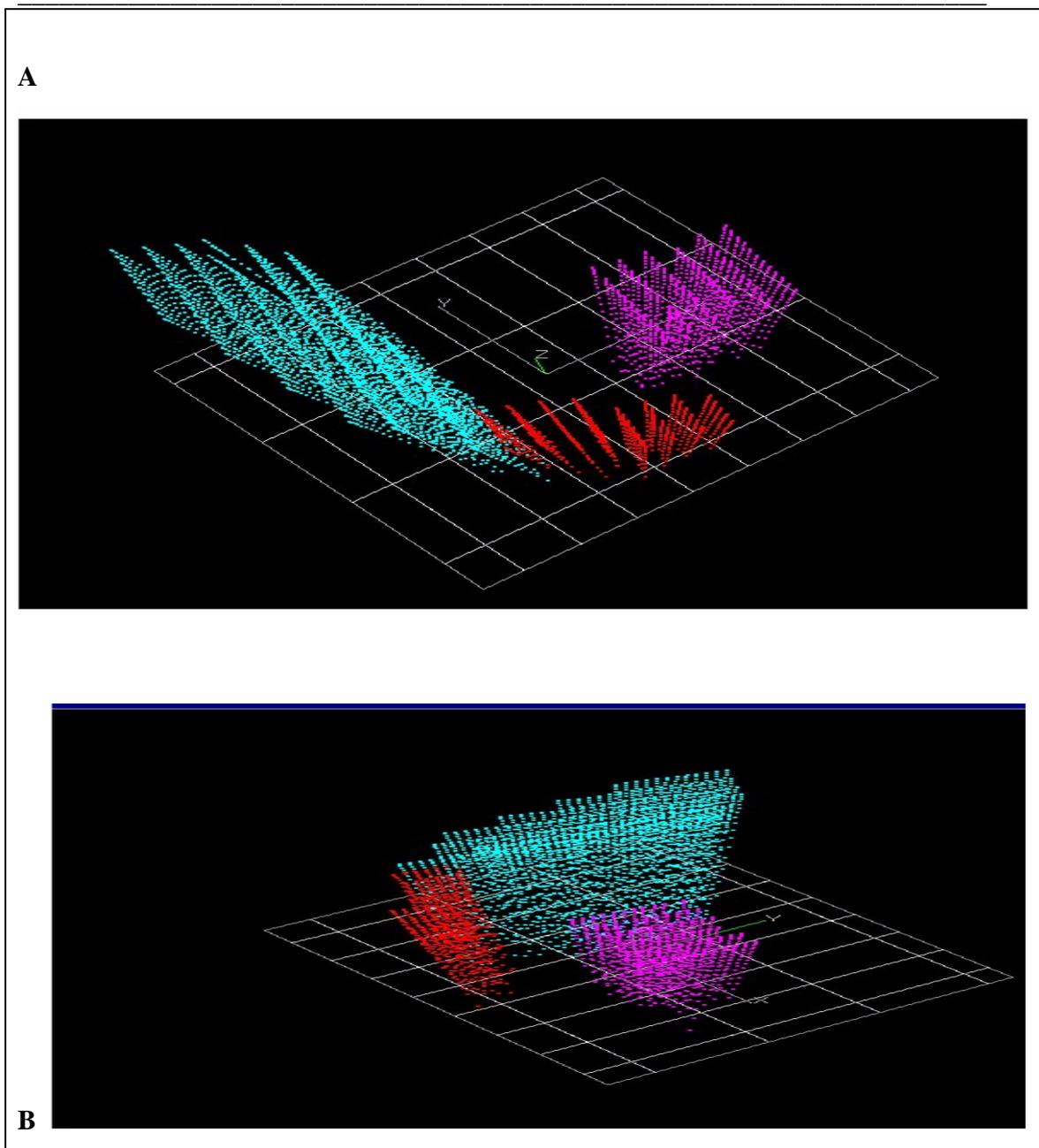


Figura 3.6 - Distribuição em 3D do levantamento CSAMT: a) e b) diferentes ângulos das área 1(em vermelho), área 2 (em azul) e área 4 em lilás.

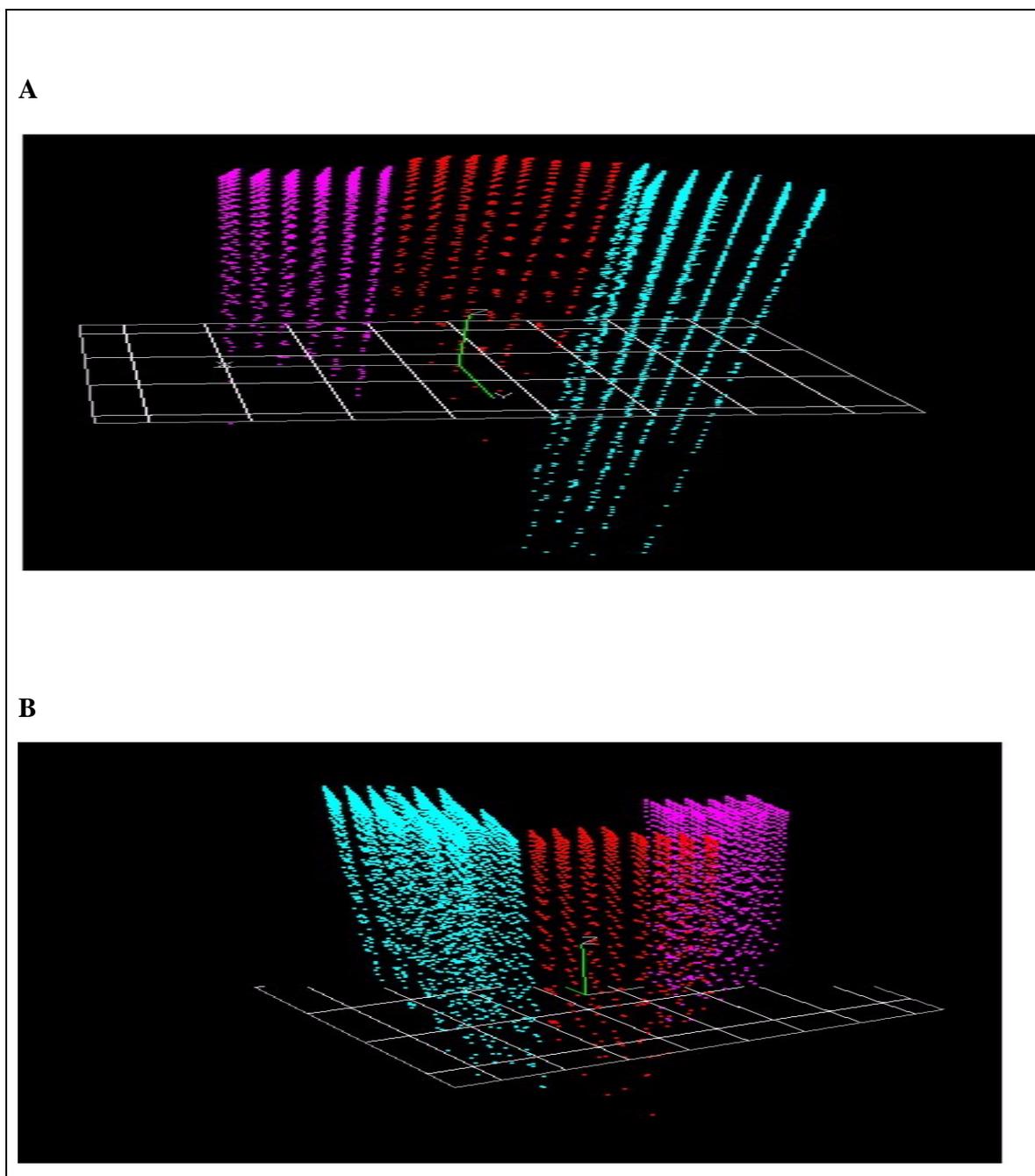


Figura 3.7 - Distribuição em 3D do levantamento CSAMT: a) e b) diferentes ângulos das áreas 1 (em vermelho), 2 (em azul) e 4 em lilás.

A planilha **ASSAY** é o arquivo de dados contendo as amostras ao longo ados furos (descrição dos furos de sondagem). Esse arquivo contém os campos compulsórios **BHID**, **FROM** e **TO** e mais todas as variáveis que são descritas ou analisadas e que identificam os parâmetros estudados. **BHID (Bore Hole identification)** é um campo alfanumérico (ou numérico) que contém informação a respeito do nome do furo de sondagem. **FROM** é campo numérico que contém a informação da posição do início da amostra em um sistema de posicionamento e identificação particular para cada furo de sondagem, começando do 0, no início do furo e aumentando com o comprimento de cada amostra. **TO** é o campo numérico que contém a informação da posição de fim da amostra em um sistema de posicionamento e identificação particular para cada furo de sondagem, começando de 0 comprimento da primeira amostra (início do furo) e aumentando com o comprimento de cada amostra, até o final da última amostra. Frisa-se que os campos **FROM** e **TO** são mostados a partir das descrição das amostras e não são expressos em termos de cotas (elevação) e sim construídos particularmente para cada furo de sondagem de acordo com o procedimento amostral.

A planilha **COLLAR** é o arquivo que contém as coordenadas das bocas dos furos de sondagem, apresentando os campos compulsórios **BHID (Bore Hole identification)** já identificado, **XCOLLAR**, **YCOLLAR**, **ZCOLLAR**, que correspondem às coordenadas xyz das bocas dos furos. A planilha , **SURVEY** é o arquivo que contém as informações de vinculação das amostras com a superfície (coordenadas das bocas dos furos – **COLLAR**) expresso em coordenadas polares, ou seja cada amostra pode ser identificadano espaço a partir das coordenadas da boca do furo à qual pertence em conjunto com as informações constantes nesse arquivo. Os campos compulsórios apresentados nesse arquivo são **BHID**, **BRG**, **DIP**, **DEPTH**, **AT**. **BHID (Bore Hole identification)** já identificado. **BRG** é o campo numérico que expressa o ângulo azimutal onde a amostra está posicionada (0° a 360°); **DIP** é o campo numérioc que expressa o ângulo de mergulho (0° a 90°). **DEPTH** é o campo numérico que identifica o comprimento total de cada furo de sondagem. É importante salientar que os campos Rocha, Au e Cu na planilha **ASSAY** são opcionais e contém a identificação da litologia e os teores de Au e Cu, respectivamente.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Hole	Rocha	Au	Cu	From	To							
2	19V	and	0	0	0	1							
3	19V	and	0	0	1	2							
4	19V	and	0	0	2	3							
5	19V	and	0	0	3	4							
6	19V	and	0	0	4	5							
7	19V	and	0	0	5	6							
8	19V	and	0	0	6	7							
9	19V	and	0	0	7	8							
10	19V	and	0	0	8	9							
11	19V	and	0	0	9	10							
12	19V	and	0	0	10	11							
13	19V	and	0	0	11	12							
14	19V	and	0	0	12	13							
15	19V	and	0	0	13	14							
16	19V	and	0	0	14	15							
17	19V	and	0	0	15	16							
18	19V	and	0	0	16	17							
19	19V	and	0	0	17	18							
20	19V	and	0	0	18	19							
21	19V	and	0	0	19	20							
22	19V	and	0	0	20	21							
23	19V	and	0	0	21	22							
24	19V	and	0	0	22	23							
25	19V	and	0	0	23	24							

Figura 3.8 – Planilha *assay* com o banco de dados dos teores de Au e Cu para as áreas 1, 2 e 4 do Propecto Volta Grande (Complexo Intrusivo Lavras do Sul,RS), no formato EXCEL

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Hole	North	East	Lead											
2	19V	2503	3130	293											
3	F-05-V	2018	2420	241											
4	F-06-V	2057	2908	280											
5	F-09-V	3092	5173	0											
6	F09V	1626	1771	238											
7	F100V	3209	5225	225											
8	F14V	1626	1771	238											
9	F21V	1747	1914	239											
10	F22V	1602	2096	282											
11	F23V	1987	2291	270											
12	F24V	1703	2526	283											
13	F25V	1626	1771	238											
14	F26V	1626	1771	238											
15	F27V	1620	2224	287											
16	F28V	1550	2356	257											
17	F29V	1449	2337	251											
18	F30V	3104	3455	307											
19	F31V	3155	3525	295											
20	F32V	3226	3664	309											
21	F33V	3179	3365	283											
22	F34V	3179	3365	283											
23	F35V	3030	3626	319											
24	F36V	3513	4004	351											
25	F37V	1739	1939	263											
26	F38V	1797	1981	283											
27	F39V	1734	2052	285											

Figura 3.9 – Planilha *collar* com o banco de dados dos teores de Au e Cu para as áreas 1, 2 e 4 do Propecto Volta Grande (Complexo Intrusivo Lavras do Sul,RS), no formato EXCEL

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	BHD	BRG	Dp	FROM	To									
2	F2IV	41	5.33	0	1									
3	F2IV	41	5.33	1	2									
4	F2IV	41	5.33	2	3									
5	F2IV	41	5.33	3	4									
6	F2IV	41	5.33	4	5									
7	F2IV	41	5.33	5	6									
8	F2IV	41	5.33	6	7									
9	F2IV	41	5.33	7	8									
10	F2IV	41	5.33	8	9									
11	F2IV	41	5.33	9	10									
12	F2IV	41	5.33	10	11									
13	F2IV	41	5.33	11	12									
14	F2IV	41	5.33	12	13									
15	F2IV	41	5.33	13	14									
16	F2IV	41	5.33	14	15									
17	F2IV	41	5.33	15	16									
18	F2IV	41	5.33	16	17									
19	F2IV	41	5.33	17	18									
20	F2IV	41	5.33	18	19									
21	F2IV	41	5.33	19	20									
22	F2IV	41	5.33	20	21									
23	F2IV	41	5.33	21	22									
24	F2IV	41	5.33	22	23									
25	F2IV	41	5.33	23	24									
26	F2IV	41	5.33	24	25									
27	F2IV	41	5.33	25	26									

Figura 3.10 –Planilha *survey* com o banco de dados dos teores de Au e Cu para as áreas 1, 2 e 4 do Prospecto Volta Grande (Complexo Intrusivo Lavras do Sul,RS), no formato EXCEL

3.2 Análise estatística dos dados

Essa seção busca analisar os valores de resistividade aparente medidos pelo dispositivo AFMAG e os dos de Au e Cu disponíveis nas sondagens realizadas pela Companhia Riograndense de Mineração (CRM), tendo em vista a a síntese e organização desses conjuntos de valores para compreensão global dos parâmetros estatísticos básicos dessas variáveis. A Análise estatística básica desses valores e a interpretação de seus resultados são realizados para caracterizar e descrever estatisticamente essas distribuições e, dessa forma, melhor entender o comportamento dessas variáveis de interesse (resistividade aparente, teores de Au e Cu). A análise quantitativa dessas variáveis é feita com determinação de medidas de localização, dispersão e forma, calculando, respectivamente, os seguintes parâmetros: média, mediana, valor mínimo, valor máximo, quartil inferior, quartil superior, desvio padrão e coeficiente de variação. A média dos “n” valores obtidos de uma variável aleatória constitui medida de localização ou medida de tendência central

mais utilizada em problemas de engenharia, de geologia e de mineração. Se colocamos os valores das variáveis em ordem, o quartil inferior representa a primeira quarta parte dessa seqüência, a mediana é o elemento que ocupa a posição central da distribuição, enquanto o quartil superior ocupa uma posição intermediária entre a mediana e o valor máximo da variável (terceira quarta parte da seqüência). A variância de uma variável pode ser definida como a média aritmética dos quadrados dos desvios (diferença entre valor observado para a variável e a média da variável no conjunto de dados). O desvio padrão é definido como a raiz quadrada da variância. O coeficiente de variação é a percentagem de variação de uma amostra. É o quociente entre o desvio padrão e a média.

Na análise estatística de um conjunto de dados, é importante que se estude a distribuição das freqüências. Esse estudo descreve como as unidades de uma população normal estão distribuídas dentro de um intervalo possível de valores. As distribuições de freqüência podem ser do tipo simples ou acumulada. A freqüência do tipo simples é construída tabulando-se os dados em intervalos constantes. Os dados assim agrupados podem ser representados graficamente, ao se lançar os intervalos de medidas em abcissa e as freqüências em ordenadas e obtendo-se o histograma de distribuição dos dados. Desenhando-se uma curva suave sobre o histograma obtém-se a distribuição de freqüência, ou função de densidade de probabilidade. A distribuição de freqüência do tipo acumulada é obtida com procedimento semelhante ao anterior, porém agora as freqüências acumuladas dos dados agrupados nos intervalos são plotadas em ordenadas e os intervalos de medidas em abcissa. A união dos pontos sobre a curva acumulativa gera o polígono de freqüências acumuladas. O desenho de uma curva suave sobre esse polígono dá origem à função de distribuição acumulada, que é particularmente útil, pois descreve a proporção da população que é menor que um determinado valor.

Na análise dos dados geológicos existem duas distribuições, particularmente importantes: a distribuição normal e a distribuição lognormal. A distribuição normal ou gaussiana é a mais comumente usada em estatística. É a forma segundo a qual se distribuem um grande número de variáveis aleatórias em muitos campos de aplicação, inclusive na geologia. Se uma variável apresenta distribuição normal, significa que aproximadamente

68% de seus valores estão no intervalo entre a média mais um desvio padrão e a média menos um desvio padrão, e que 95% da população estão no intervalo média mais dois desvios padrão e média menos dois desvios padrão. Se uma variável apresenta distribuição lognormal, isso significa que os dados apresentam assimetria à direita. Os dados geológicos que não apresentam distribuição normal, muitas vezes, são do tipo lognormal. Isso é, mediante uma transformação do tipo $y = \log x$ é possível gerar um novo conjunto de valores que satisfaça condição de normalidade e isso facilitará a análise dos dados.

Na análise estatística dos valores de vários conjuntos de dados, muitas vezes é importante testar a hipótese H_0 de que as médias são iguais, isso é testar a existência significativa entre duas médias. A análise do banco de dados de resistividade aparente, em suas respectivas áreas, mostra que grande maioria dos valores distribuem-se em torno da média ($média \pm \sigma$). Na área 1, situam-se nesse intervalo 87,20% dos valores de resistividade aparente, na área 2 são 82,46% desses valores, enquanto na área 4 a percentagem de valores de resistividade aparente situados no referido intervalo é de 76,14%.

Os histogramas de frequência dos valores aritméticos da resistividade aparente nas áreas 1, 2 e 4 estão representados pelas Figuras 3.11a, 3.12a e 3.13a, respectivamente, enquanto os histogramas de frequência acumulada desses valores estão representados pelas Figuras 3.11b, 3.12b e 3.13b, respectivamente. Os histogramas dos logaritmos dos valores de resistividade aparente nas áreas 1, 2 e 4 (Figuras 3.14a, 3.15a, 3.16a, respectivamente) têm forma que se aproxima da curva de Gauss, o que sugere que estes conjuntos de dados se ajustam a uma distribuição do tipo lognormal. Os histogramas de frequência acumulada desses logaritmos (Figuras 3.14b, 3.15b, 3.16b , respectivamente) sugerem que esses dados se ajustam a uma distribuição do tipo lognormal.

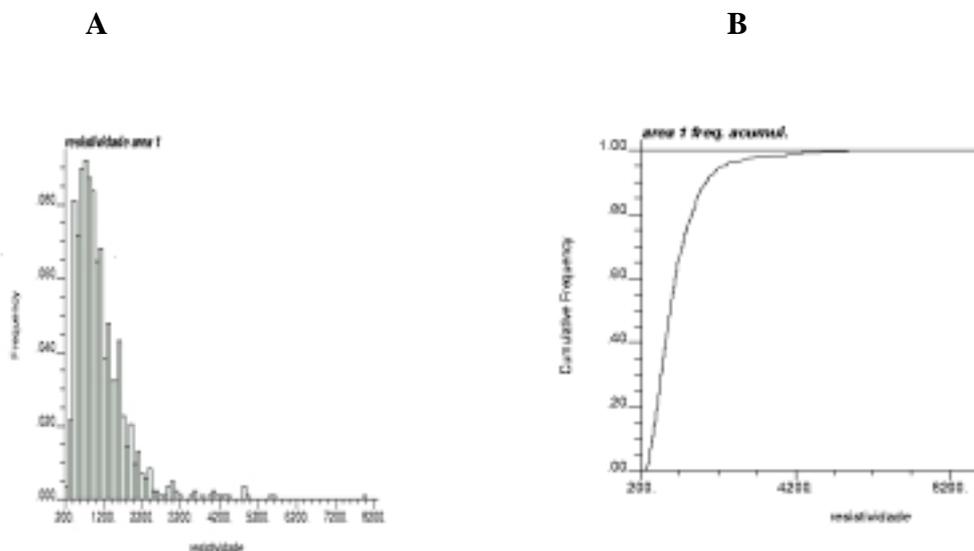


Figura 3.11 - Histogramas de resistividade aparente da área 1, Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS): A) freqüência valores aritméticos; B) freqüência acumulada dos valores aritméticos .

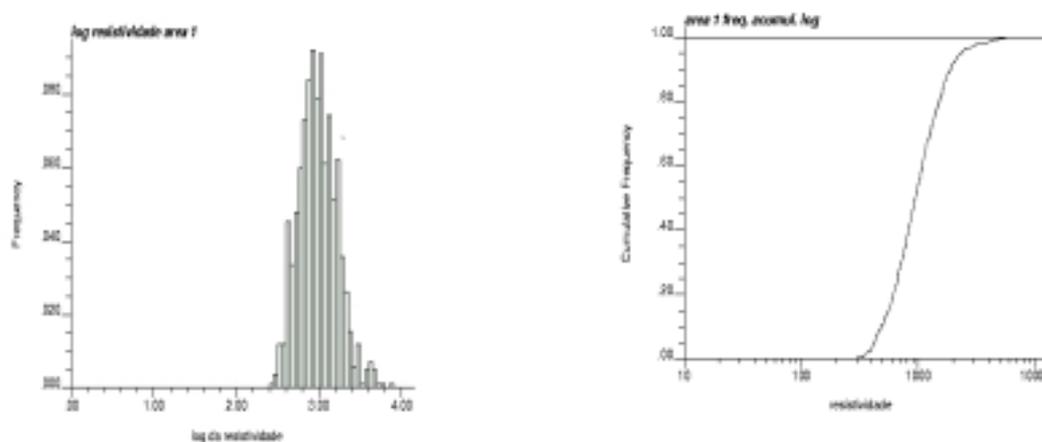


Figura 3.12 - Histogramas de resistividade aparente da área 1 Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS): A) freqüência do logaritmo dos valores de resistividade aparente; B) freqüência acumulada dos logaritmos dos valores de resistividade aparente.

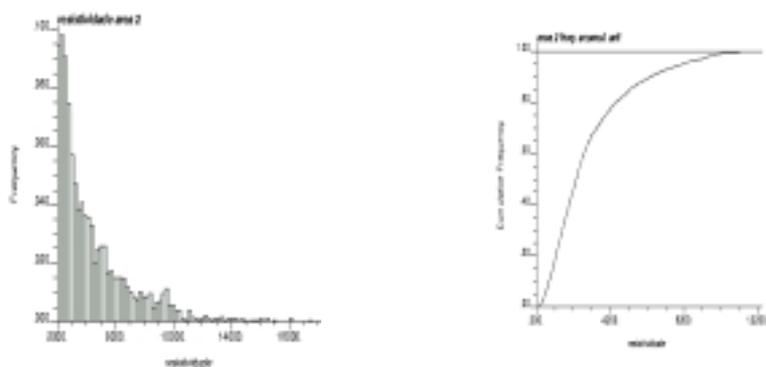


Figura 3.13 - Histogramas de resistividade aparente da área 2, Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS): A) freqüência valores aritméticos; B) freqüência acumulada dos valores aritméticos .

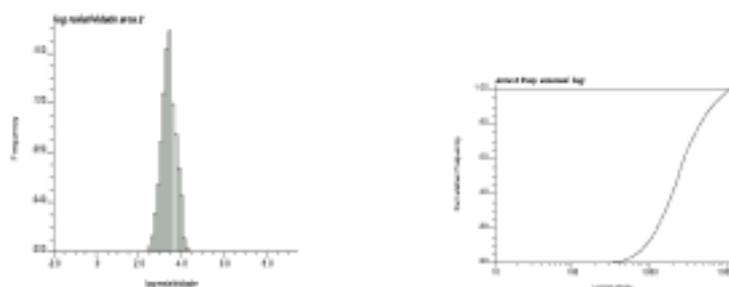


Figura 3.14 - Histogramas de resistividade aparente da área 2 Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS): A) freqüência do logaritmo dos valores de resistividade aparente; B) freqüência acumulada dos logaritmos dos valores de resistividade aparente.

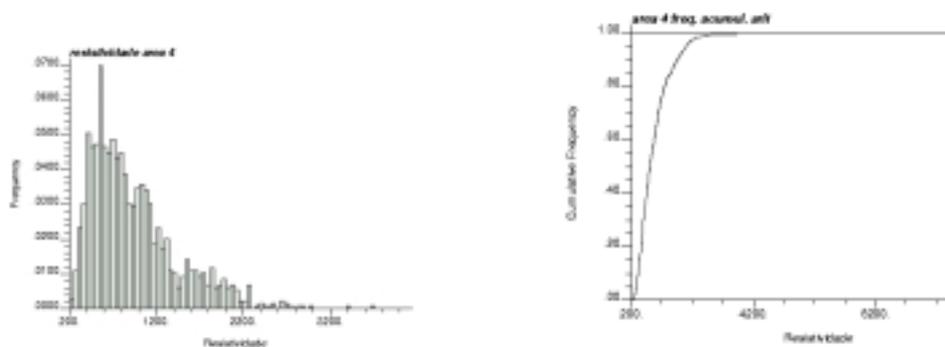


Figura 3.15 - Histogramas de resistividade aparente da área 4, Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS): A) freqüência valores aritméticos; B) freqüência acumulada dos valores aritméticos .

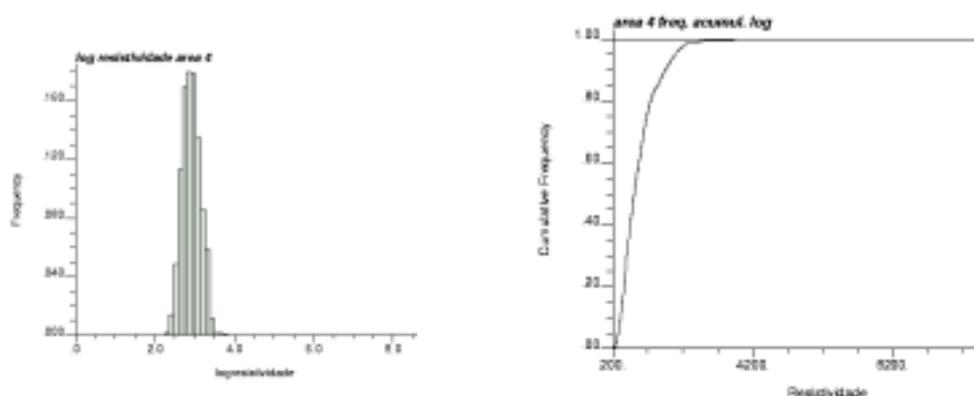


Figura 3.16 - Histogramas de resistividade aparente da área 4, Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS): A) freqüência do logaritmo dos valores de resistividade aparente; B) freqüência acumulada dos logaritmos dos valores de resistividade aparente.

Tabela 3.1- Resumo estatístico dos dados de resistividade aparente: distribuição dos valores aritméticos e de seus respectivos logaritmos, nas áreas 1, 2 e 4 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS).

	Área 1		Área 2		Área 4	
	Dist. Aritim.	Dist. Logarít.	Dist. Aritim.	Dist. Logarít.	Dist. Aritim.	Dist. Logarít.
No de dados	836	836	3101	3101	1291	1291
Valor mínimo	275,50	2,4401	214,80	2,3320	211,30	2,5249
Quartil inferior	666,10	2,8235	1423,22	3,1533	561,40	2,7493
Mediana	941,80	2,9740	2384,97	3,3775	809,80	2,9084
Quartil superior	1370,01	3,1367	4031,80	3,6055	1160,74	3,0647
Valor máximo	7914	3,8984	19394	4,2877	5642	3,7514
Média	1128,4	2,9857	3161,53	3,3785	945,48	2,9157
Desvio padrão	746,38	0,2312	2559	0,3298	537,45	0,2257
Coef. de variação	0,66	0,775	0,81	0,0976	0,57	0,0774

A observação do resumo estatístico dos dados de resistividade aparente das áreas 1, 2 e 4 (tabela 2) sugere a existência de diferença significativa entre os três conjuntos de dados. Porém há a necessidade de quantificar essas diferenças e, assim demonstrar a sua existência. O procedimento estatístico comparação múltipla das médias descreve esta investigação. O Método de Duncan (*Studentized Range*) foi utilizado para este fim e constou das seguinte etapas:

a) Escrever as médias em ordem crescente:

Tabela 3.2 Relação das médias (em ordem crescente) dos valores de resistividade aparente da área 1, área 2, e área 4 do prospecto Volta Grande (Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS)

Área	4	1	2
Média	945,48	1128,47	3161,53

b) Determinar o desvio padrão das médias

$$S_x = S / (n_h)^{1/2}$$

Onde,

$$S = (MQR)^{1/2} = [SQR/(N-K)]^{1/2}$$

MQR média dos quadrados dos resíduos

SQR soma dos quadrados dos resíduos

N número de elementos dos grupos (total)

K número de grupos

r_k valor de tabela e depende de K grupos, graus de liberdade e nível de significância.

$R_k = r_k \cdot S_x$ representa a diferença máxima admitida entre as médias para considerá-la “ diferença não significativa” , em caso contrário é considerada “diferença significativa”.

$SQR = \sum x^2_{ij} - (\sum T^2_j / n_j) \quad \sum x^2_{ij}$ soma dos quadrados dos valores das variáveis

$\sum T^2_j / n_j$ soma dos valores de cada grupo elevados ao quadrado dividido pelo número de dados de cada grupo.

Como n depende das colunas, usa-se um valor aproximado (n_h) a média harmônica dada pela expressão:

$$1/n_h = (\sum 1/n_i) / K = [(1/1291) + (1/836) + (1/3101)] / 3$$

Então, $S_x = S / (n_h)^{1/2}$ $S = (MQR)^{1/2} = [SQR/(N-K)]^{1/2}$ $SQR = \sum x^2_{ij} - \sum T^2_j / n_j$;

$$SQR = 6,43 \times 10^{10} - 4139,26; \quad N = 5228; \quad K = 3; \quad (N-K) = 5225$$

$$S = 3508,84 \quad n_h = 1308,19 \quad (n_h)^{1/2} = 36,17 \quad S_x = 97,01$$

- c) Com a tabela de “*Studentized Range*” , determina-se o valor r_k que depende do número de grupos ($k=3$), dos graus de liberdade ($gdl = \cdot$), do desvio padrão S e do nível de significância ($\alpha = 0,05$).

Tabela 3.3 - Relação dos R_k em função do número de grupos e dos graus de liberdade dos dados de resistividade das áreas 1, 2 e 4 do prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS)

Número de grupos	2	3
$R_k (gdl = \alpha)$	2,77	2,92

- d) Determina-se o valor $R_x = S_x \cdot r_k$

Tabela 3.4 - Determinação do valor R_x em função do valor R_k dos dados de resistividade da área 1, área 2, e área 4 do prospecto Volta Grande (Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS)

Número de grupos	2	3
------------------	---	---

$R_x = S_x \cdot r_k = 97,01$	$2,77 \times 97,01 = 268,72$	$2,92 \times 97,01 = 282,23$
-------------------------------	------------------------------	------------------------------

e) Comparando-se as diferenças entre as médias ordenadas, denominados $X_{(j)}$, com os valores R_k da seguinte maneira.

- $X_{(3)} - X_{(1)} \dots\dots\dots R_3$
- $X_{(3)} - X_{(2)} \dots\dots\dots R_2$
- $X_{(2)} - X_{(1)} \dots\dots\dots R_2$

Como no caso em análise

- $X_{(3)} - X_{(1)}$ é $(3161,53) - (945,48) = 2216,05 > R_3 (282,23)$ Diferença significativa.
- $X_{(3)} - X_{(2)}$ é $(3131,53) - (1128,47) = 2033,06 > R_2(268,73)$ Diferença significativa.
- $X_{(2)} - X_{(1)}$ é $(1128,47) - (945,48) = 182,99 < R_2(268,73)$ Diferença não significativa.

O procedimento estatístico de comparação múltipla de médias mostrou que a área 2 difere significativamente das áreas 1 e 4, em termos de resistividade aparente. Essa diferença significativa das médias dos valores de resistividade da área 2 em relação às médias dos valores de resistividade aparente pode estar relacionada a dois aspectos:

i) a percentagem de dados da área 2 com baixos valores de resistividade é muito menor do que nas áreas 1 e 4 . 75% os valores estão abaixo de $1370\Omega m$, na área 1; enquanto 75% dos valores estão abaixo de $1160\Omega m$, na área 4, e, na área 2, apenas 25% dos valores estão abaixo de $1423\Omega m$.

ii) se consideramos os mais altos valores de cada conjunto são considerados, observa-se que, 25% dos valores variam de $1370\Omega m$ até $7914\Omega m$, na área 1; 25% dos valores variam de $1160\Omega m$ até $5642\Omega m$, na área 4; enquanto 25% dos valores variam de $4031\Omega m$ até $19394\Omega m$, na área 2.

As observações indicadas acima permitem formular as seguintes hipóteses:

1^a) a diferença significativa entre o conjunto de dados de resistividade pode estar relacionada com a dimensão do corpo da alteração hidrotermal (associado à mineralização);

2^a) a diferença significativa entre o conjunto de dados de resistividade pode estar associada a diferenças litológicas.

A influência das dimensões do corpo de alteração das dimensões do corpo de alteração hidrotermal no comportamento estatístico da variável resistividade aparente pode ser avaliada por meio da observação da figura 3.18. Esta Figura mostra os pontos cujos

valores de resistividade aparente são menores do que $600\Omega\text{m}$. Estes pontos foram selecionados experimentalmente, uma vez que na superfície eles estão visualmente relacionados com os teores de Au e Cu, identificados nos furos de sondagem. A área 1 ocupa a porção média da Figura 3.17 e apresenta dois corpos perfeitamente distintos: onde os valores de resistividade são menores do que 600 Ohm : um dos conjuntos ocupa a parte média superior da figura, enquanto o outro conjunto ocupa a porção média inferior da Figura 3.17. A área 2 está localizada no lado esquerda da Figura 3.17 e possui número de pontos com valores de resistividade aparente menor que $600\Omega\text{m}$ muito menor do que na área 1. A área 4, no lado direito da Figura 3.17, apresenta um conjunto de dados que se destaca em relação dados das demais áreas, tanto quanto ao número de pontos, como quanto a sua continuidade no plano horizontal e vertical.

A influência da litologia no comportamento estatístico da variável resistividade aparente, por outro lado, pode ser avaliada a partir da observação do resumo estatístico dessa variável nas áreas de ocorrência do granito, monzogranito e rochas vulcanoclásticas mostrados na Tabela 6. O conjunto de dados correspondentes às litologias é obtido a partir da aglutinação dos valores de resistividade aparente de cada estação de aquisição de dados,

conforme a sua localização (Figura 3.18).

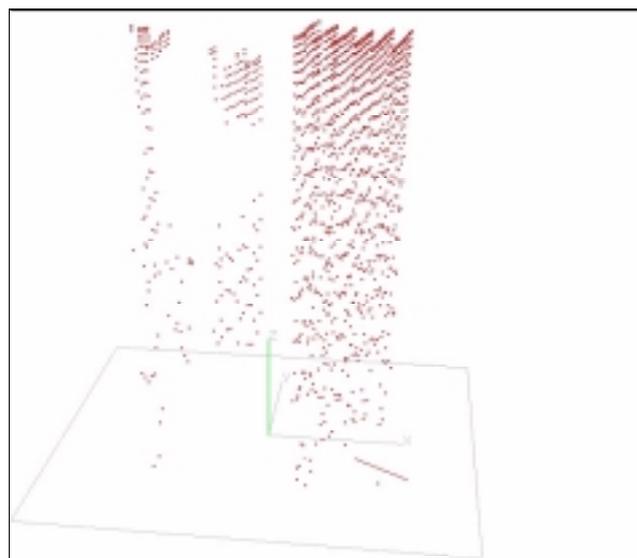


Figura 3.17 - Pontos cujos valores de resistividade aparente são menores do que $550 \Omega m$ (estão visualmente relacionados com os teores de Au e Cu disponíveis nos furos de sondagem)

Os histogramas (Figuras 3.19a, 3.20a, 3.21a) apresentam com clareza a assimetria e a multimodalidade da distribuição dos valores aritméticos nas áreas de ocorrência das litologias (granito, monzogranito e rochas vulcanoclásticas). Os histogramas de distribuição dos logaritmos dos valores de resistividade aparente (Figuras 3.22a, 3.23a e 3.24a), como no caso anterior (Figuras 12a, 13a e 14a), mostram uma curva mais próxima da curva de distribuição normal, apesar de ainda sugerirem bimodalidade.

Tabela 3.5- Resumo estatístico dos valores da variável resistividade aparente nas áreas de ocorrência de granito, monzogranito e rochas vulcanoclásticas, área 2 do Prospecto Volta (Lavras do Sul, RS).

	granito		monzogranito		vulcanoclástica	
	Dist. Aritim.	Dist. Logarít.	Dist. Aritim.	Dist. Logarít.	Dist. Aritim.	Dist. Logarít.
No de dados	1642	1642	341	341	886	886
Valor mínimo	214	2,3320	477	2,6793	308	2,4886
Quartil inferior	1542	3,1879	1225	3,0881	1271,5	3,1005
Mediana	2635,5	3,4208	1775	3,2492	2103,5	3,3115
Quartil superior	4387	3,6422	2765,8	3,6055	3627	3,0647
Valor máximo	10283	3,9998	8399	4,2877	11905	3,9985
Média	3258,7	3,4116	2240,3	3,3785	2839,1	3,3082
Desvio padrão	2220,2	0,3030	1483,7	0,3298	2322,3	0,3431
Coef. de variação	0,7	0,08905	0,7	0,0976	0,8	0,1087

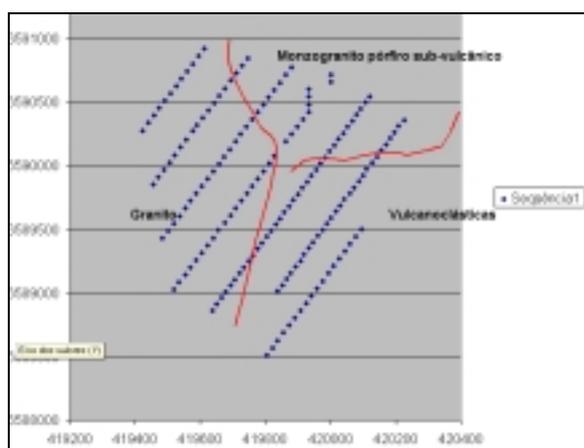


Figura 3.18 - Croqui da área 2 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS), mostrando a ocorrência das diferentes litologias e os pontos de localização das estações de leitura de dados de resistividade aparente.

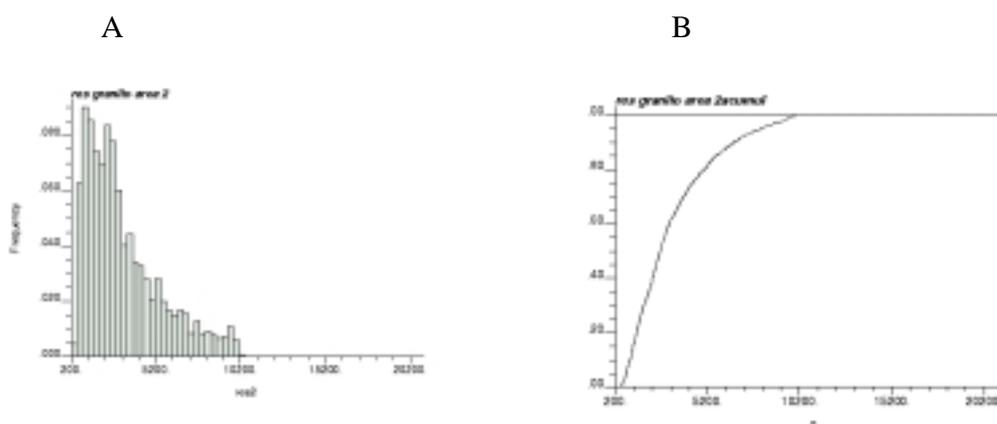


Figura 3.19 - Histogramas de resistividade aparente na área de ocorrência de granito, na área 2 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS): A) frequência dos valores

aritméticos de resistividade aparente; B) frequência acumulada dos valores aritméticos de resistividade aparente.

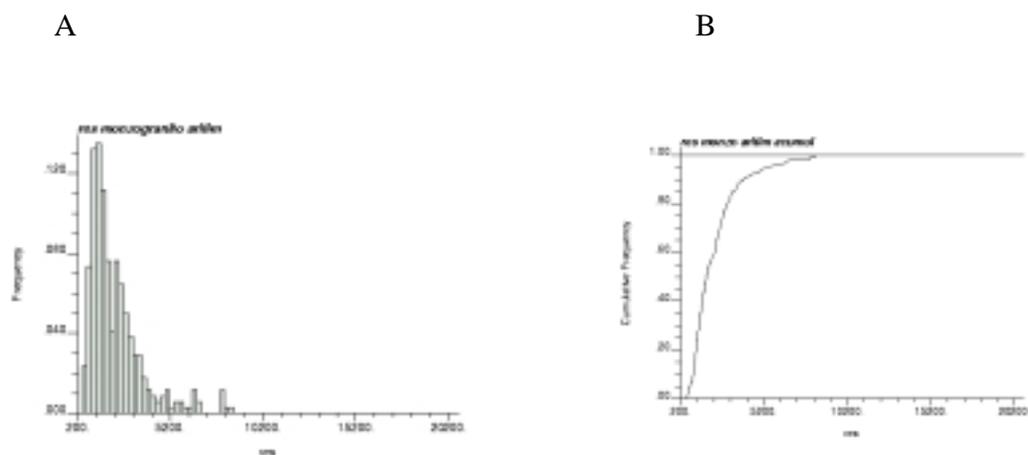


Figura 3.20 - Histogramas de resistividade aparente na área de ocorrência de monzogranito, na área 2 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS): A) frequência dos valores aritméticos de resistividade aparente; B) frequência acumulada dos valores aritméticos de resistividade aparente.

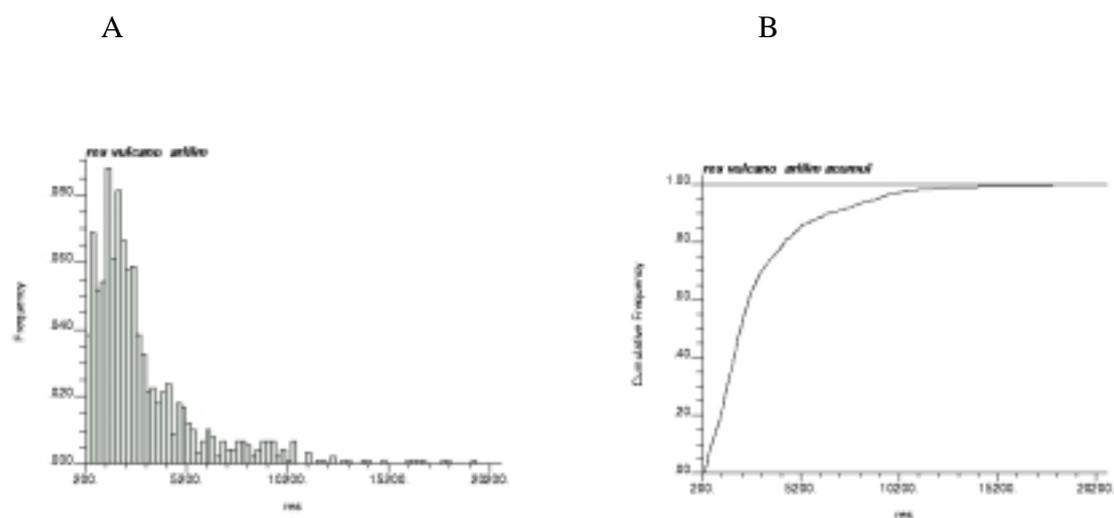


Figura 3.21 - Histogramas de resistividade aparente na área de ocorrência de rochas vulcanoclásticas, na área 2 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS): A) frequência dos valores aritméticos de resistividade aparente; B) frequência acumulada dos valores aritméticos de resistividade aparente.

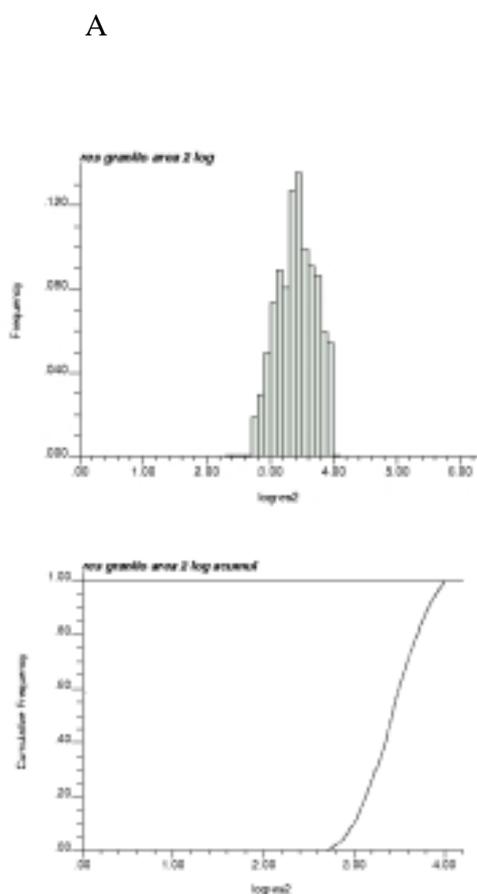


Figura 3.22 - Histogramas de resistividade aparente na área de ocorrência de granito, na área 2 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS): A) frequência dos logaritmos dos valores de resistividade aparente; B) frequência acumulada dos logaritmos dos valores de resistividade aparente.

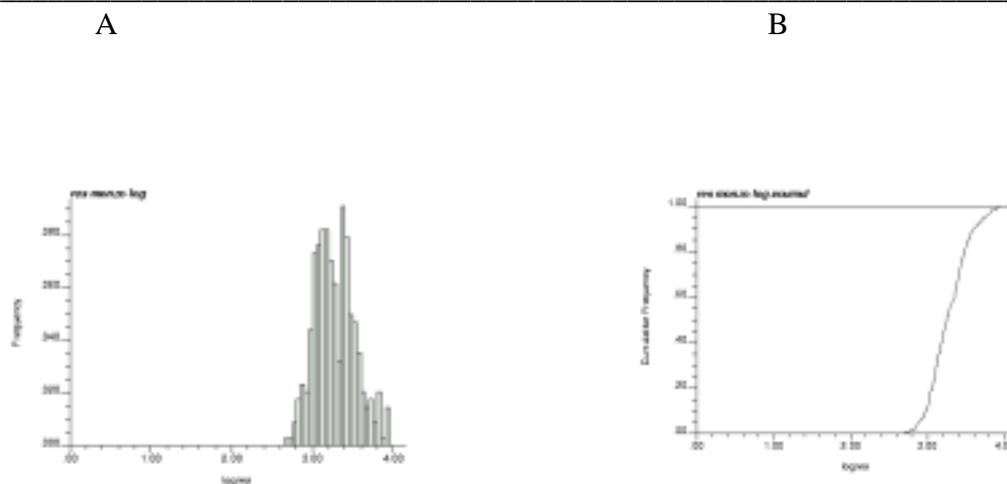


Figura 3.23 - Histogramas de resistividade aparente na área de ocorrência de monzogranito, na área 2 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS): A) frequência dos logaritmos dos valores de resistividade aparente; B) frequência acumulada dos logaritmos dos valores de resistividade aparente.

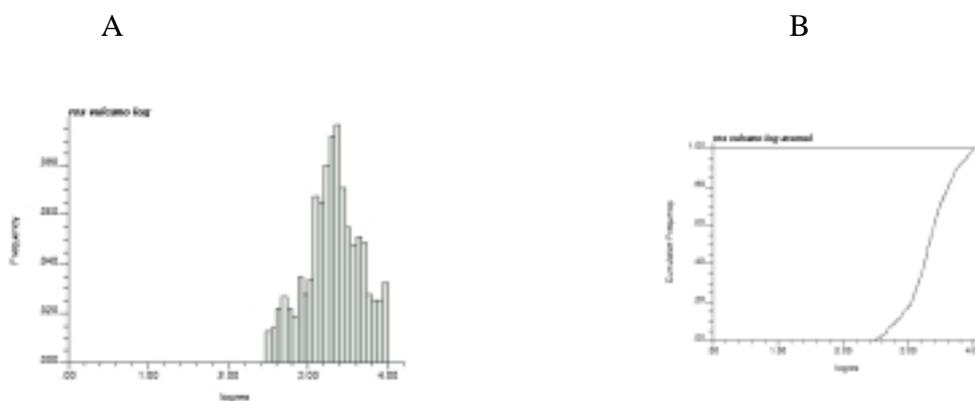


Figura 3.24 - Histogramas de resistividade aparente na área de ocorrência de rochas vulcanoclásticas, na área 2 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS): A) frequência dos logaritmos dos valores de resistividade aparente; B) frequência acumulada dos logaritmos dos valores de resistividade aparente.

O procedimento estatístico comparação múltipla das médias , agora considerando os dados de resistividade aparente da área 2 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul,RS) com três diferentes tipos de rocha (granito, monzograito e vulcanoclásticas), é utilizado para analisar a influência da componente litológica. Assim as etapas do Método de Duncan são:

a) Escrever as médias em ordem crescente:

área	4	1	monzograito	vulcanoclástica	granito
média	945.48	1128.47	2240.3	2839.1	3258.7

Tabela 3.6 - Relação das médias (em ordem crescente) dos valores de resistividade da área 1, área 2, e área 4, no Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul,RS)

b) Determinar o desvio padrão das médias

$$S_x = S / (n_h)^{1/2}$$

$$S = (MQR)^{1/2} = [SQR/(N-K)]^{1/2}$$

Onde,

MQR média dos quadrados dos resíduos

SQR soma dos quadrados dos resíduos

N número de elementos dos grupos (total) K número de grupos

$SQR = \sum x^2_{ij} - \sum T^2_j / n_j$ e $\sum x^2_{ij}$ soma dos quadrados dos valores das variáveis

$\sum T^2_j / n_j$ soma dos valores de cada grupo elevados ao quadrado dividido pelo número de dados de cada grupo.

Como n depende das colunas, usa-se um valor aproximado, n_h , a média harmônica dada pela expressão:

$$1/n_h = (\sum 1/n_i) / K = [(1/1291) + (1/836) + (1/1667)+(1/341)+(1/888)] / 5 = 0,0013$$

Então,

$$S_x = S / (n_h)^{1/2}$$

$$S = (MQR)^{1/2} = [SQR/(N-K)]^{1/2}$$

$$SQR = \sum x^2_{ij} - \sum T^2_j / n_j ;$$

$$SQR = 38.651.777.888; \quad N = 5228; \quad K = 5; \quad (N-K) = 5223$$

$$S = 2720,3496 \quad n_h = 754,2248 \quad (n_h)^{1/2} = 27.4632$$

$$S_x = 99,0545$$

c) Usando a tabela de “*Studentized Range*”, determina-se os valores r_k que depende do número de grupos ($k=5$), dos graus de liberdade ($gdl = \infty$), do desvio padrão S e do nível de significância ($\alpha = 0,05$).

Número de grupos	2	3	4	5
Rk (gdl = α)	2,77	2,92	3,02	3,09

Tabela 3.8 - Relação dos R_k em função do número de grupos e graus de liberdade dos dados de resistividade da área 1, área 2, e área 4, no Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul,RS)

Determina-se o valor $R_x = S_x \cdot r_k$

Número de grupos	2	3	4	5
Rk (gdl = α)	2,77x 99,0545 = 274,3810	2,92x99,0545= 289,392	3,02x99,0545= 299,1447	3,09x99,0545= 306,0785

Tabela 3.9 - Determinação do valor R_x em função do valor R_k dos dados de resistividade da área 1, área 2, e área 4, no Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul,RS)

e) Comparando-se as diferenças entre as médias ordenadas, que chamaremos de $X_{(j)}$, com os valores R_k da seguinte maneira:

- $X_{(5)} - X_{(1)} \dots\dots\dots R_5$
- $X_{(5)} - X_{(2)} \dots\dots\dots R_4$
- $X_{(5)} - X_{(3)} \dots\dots\dots R_3$
- $X_{(5)} - X_{(4)} \dots\dots\dots R_2$
- $X_{(4)} - X_{(1)} \dots\dots\dots R_4$
- $X_{(4)} - X_{(2)} \dots\dots\dots R_3$
- $X_{(4)} - X_{(3)} \dots\dots\dots R_2$
- $X_{(3)} - X_{(1)} \dots\dots\dots R_3$
- $X_{(3)} - X_{(2)} \dots\dots\dots R_2$
- $X_{(2)} - X_{(1)} \dots\dots\dots R_2$

Disso resulta que:

- $X_{(5)} - X_{(1)} \dots\dots\dots R_5 (3258,7) - (945,48) = 2313,22 > 306,0785$ D. S.
- $X_{(5)} - X_{(2)} \dots\dots\dots R_4 (3258,7) - (1128,47) = 2130,23 > 299,1447$ D. S.
- $X_{(5)} - X_{(3)} \dots\dots\dots R_3 (3258,7) - (2240,3) = 1018,40 > 189,392$ D. S.
- $X_{(5)} - X_{(4)} \dots\dots\dots R_2 (3258,7) - (2839,1) = 419,6 > 274,3810$ D. S.
- $X_{(4)} - X_{(1)} \dots\dots\dots R_4 (2839,1) - (945,48) = 1893,62 > 299,1447$ D. S
- $X_{(4)} - X_{(2)} \dots\dots\dots R_3 (2839,1) - (1128,47) = 1710,63 > 289,392$ D. S
- $X_{(4)} - X_{(3)} \dots\dots\dots R_2 (2839,1) - (2240,3) = 598,8 > 274,3810$ D. S
- $X_{(3)} - X_{(1)} \dots\dots\dots R_3 (2240,3) - (945,48) = 1294,82 > 289,392$ D. S.
- $X_{(3)} - X_{(2)} \dots\dots\dots R_2 (2240,3) - (1128,47) = 1111,83 > 274,3810$ D. S.
- $X_{(2)} - X_{(1)} \dots\dots\dots R_2 (1128,4) - (945,48) = 182,2 < 274,3810$ D.N. S.

O procedimento estatístico comparação múltipla das médias mostra que os valores dos dados de resistividade pertencem a quatro diferentes grupos:

-
- 1) valores cujas médias estão entre 945,48 e 1128,47 (áreas 1 e 4)
 - 2) valores cuja média vale 2240,3 (monzogranito da área 2)
 - 3) valores cuja média vale 2839,1 (rochas vulcanoclásticas da área 2)
 - 4) valores cuja média vale 3258,7 (granito da área 2)

Os resultados obtidos a partir do procedimento estatístico “comparação múltipla das médias” nos permite fazer as seguintes observações

- Os valores de resistividade aparente têm distribuições que se ajustam a o tipo de distribuição normal ou lognormal.

- As áreas 1 e 4 têm valores de resistividade próximos. Eles representam condições geológicas semelhantes: i) mesma litologia (rochas vulcanoclásticas) e ii) estruturas hidrotermais correspondentes (associadas a pulsos de hidrotermalismo do tipo Aurora com superposição de hidrotermalismo do tipo Valdo Teixeira, conforme Strieder *et al.*, em preparação). Na área área 1 as estruturas hidrotermais têm orientação NW, enquanto na área 4 as estruturas hidrotermais têm orientação NE.

- A área 2 apresenta valores de resistividade aparente que forma três diferentes grupos. Eles representam diferentes condições geológicas: i) diferentes litologia (granito, granodiorito e vulcanoclásticas) e ii) estruturas hidrotermais predominantemente associadas a pulsos de hidrotermalismo do tipo Aurora. As estruturas hidrotermais têm orientação NW.

Os resumos estatísticos para as variáveis Au e Cu, nas áreas 1, 2 e 4 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS) são apresentados na Tabela 3.10. A análise desses parâmetros destaca dois importantes: 1^o) os baixos valores dos teores de Au e Cu; 2^o) a grande variabilidade do conjunto de dados evidenciadas pelos altos coeficientes de variação.

Os histogramas de frequência dos valores aritméticos dos teores de Au e Cu nas áreas 1, 2 e 4 (Figuras 3.25a, 3.27a e 3.29a para Au, enquanto as figuras Figuras 3.31a, 3.33a e 3.35a para Cu, respectivamente), apresentam-se assimétricos. Além disso, os histogramas mostram quebras em seus perfis, os quais sugerem multi-modalidade. Os

histogramas de frequência acumulada desses valores (Figuras 3.25b, 3.27b e 3.29b, respectivamente) mostram pontos de inflexão que também sugem multi-modalidade. Os histogramas dos logaritmos dos valores de Au e Cu nas áreas 1, 2 e 4 (Figuras 26a, 3.28a e 3.30a) para Au, enquanto para Cu as figuras têm forma que se aproxima da curva de Gauss (Figuras 3.33a, 3.35a e 3.37a, respectivamente), o que sugere que estes conjuntos de dados se ajustam a uma distribuição do tipo lognormal. Os histogramas de frequência acumulada desses logaritmos (Figuras 3.26 b, 3.28 b e 3.30b, para Au e para Cu as figuras 3.33b, 3.35b, 3.37b, respectivamente), também sugerem que esses dados se ajustam a uma distribuição do tipo lognormal, embora persistam os pontos de inflexão nas curvas de distribuição, indicativos de multimodalidade.

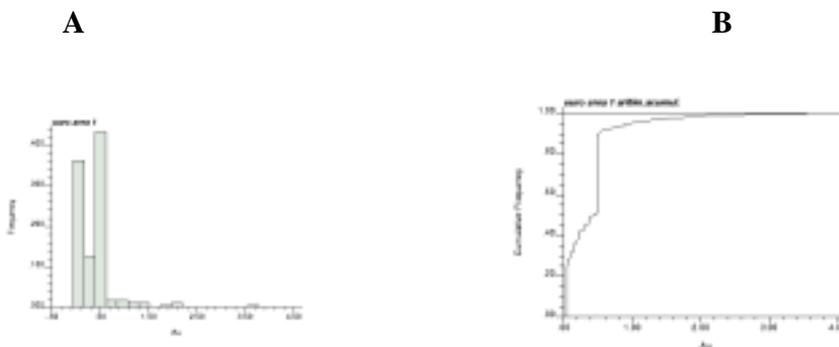


Figura 3.25 - Histogramas de teores de Au da área 1, Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS): A) frequência dos valores aritméticos; B) frequência acumulada dos valores aritméticos .

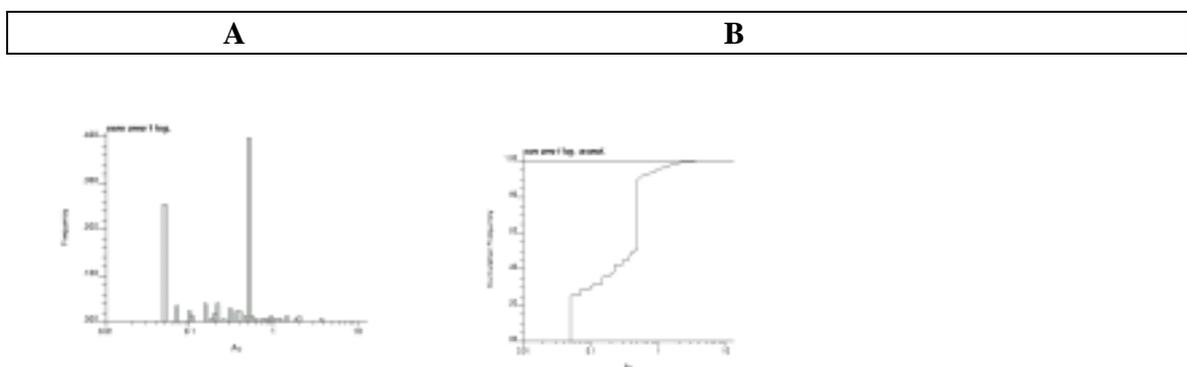


Figura 3.26 - Histogramas de teores de Au da área 1, Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS): A) freqüência dos logaritmos dos valores; B) freqüência acumulada dos logaritmos dos valores.



Figura 3.27 - Histogramas de teores de Au da área 2, Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS): A) freqüência dos valores aritméticos; B) freqüência acumulada dos valores aritméticos .



Figura 3.28 - Histogramas de teores de Au da área 2, Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS): A) freqüência dos logaritmos dos valores; B) freqüência acumulada dos logaritmos dos valores aritméticos .

A B

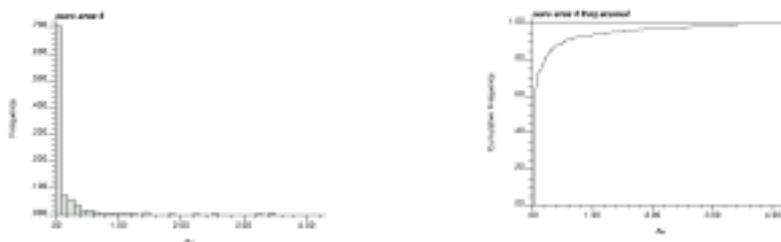


Figura 3.29 - Histogramas de teores de Au da área 4, Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS): A) frequência dos valores aritméticos; B) frequência acumulada dos valores aritméticos .

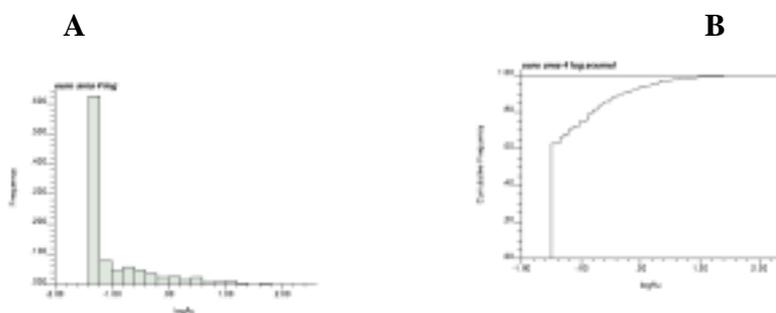


Figura 3.30 - Histogramas de teores de Au da área 2, Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS): A) frequência dos logaritmos dos valores; B) frequência acumulada dos logaritmos dos valores aritméticos .

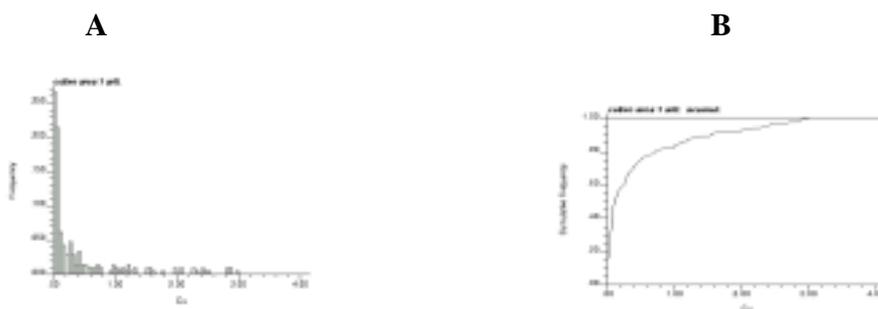


Figura 3.31 - Histogramas de teores de Cu da área 1, Prospecto Volta Grande (do Sul, RS): A) frequência dos valores aritméticos; B) frequência acumulada dos valores aritméticos.

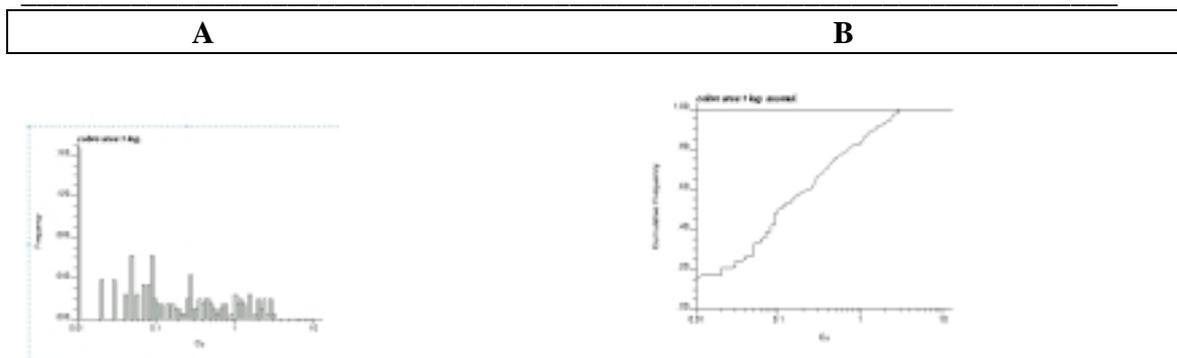


Figura 3.32 - Histogramas de teores de Cu da área 1, Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS): A) frequência logaritmos dos valores; B) frequência acumulada dos logaritmos valores.

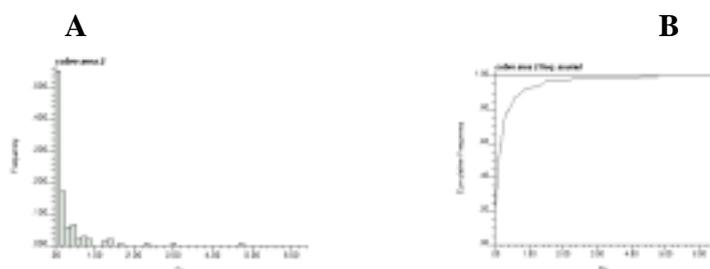


Figura 3.33- Histogramas de teores de Cu da área 2, Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS): A) frequência dos valores aritméticos; B) frequência acumulada dos valores aritméticos .

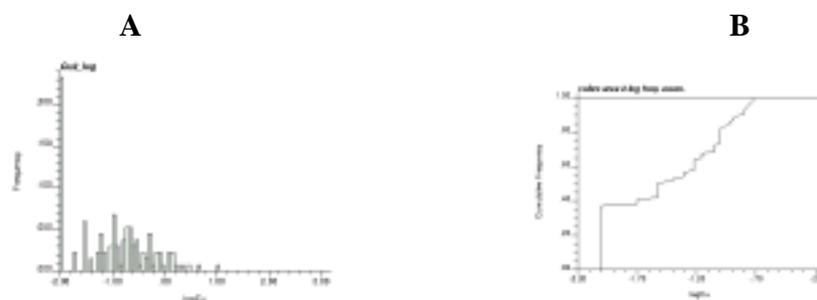


Figura 3.34 - Histogramas de teores de Cu da área 2, Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS): A) freqüência dos logaritmos dos valores; B) freqüência acumulada dos logaritmos dos valores.

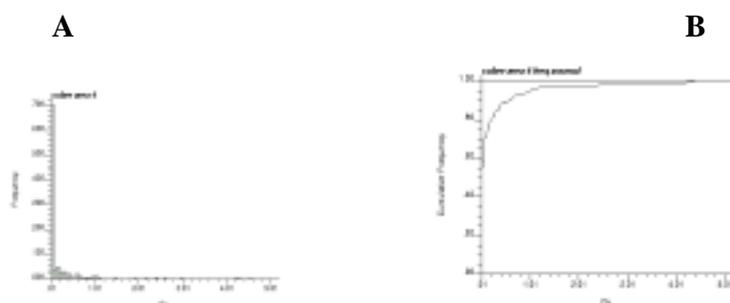


Figura 3.35- Histogramas de teores de Cu da área 4, Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS): A) freqüência dos valores aritméticos; B) freqüência acumulada dos valores aritméticos .

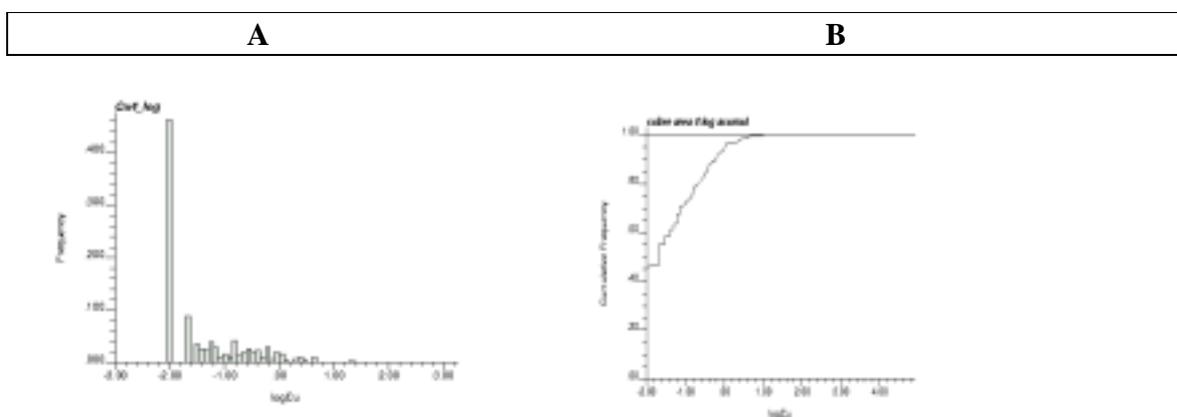


Figura 3.36 - Histogramas de teores de Cu da área 4, Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS): A) freqüência dos logaritmos dos valores; B) freqüência acumulada dos logaritmos dos valores.

Tabela 3.10 Resumo estatístico das variáveis teores de Au e Cu nas áreas 1, 2 e 4 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS).

	área 1		área 2		Área 4	
	Teores Au	Teores Cu	Teores Au	Teores Cu	Teores Au	Teores Cu
No de dados	181	210	133	133	534	306
Valor mínimo	0.1	0.01	0.05	0.01	0.01	0.01
Quartil inferior	0.1	0.04	0.05	0.02	0.05	0.01
Mediana	0.4	0.1	0.05	0.1	0.05	0.02
Quartil superior	0.5	0.48	0.05	0.28	0.15	0.14
Valor máximo	3.6	3	0.3	4.8	3.45	4.52
Média	0.4	0.45	0.66	0.30	0.24	0.21
Desvio padrão	0.40	0.70	0.048	0.59	0.54	0.57
Coef. de variação	1.1	1.58	0,73	1.95	2.26	2.89

3. 3 Modelamento geoestatístico da variável resistividade aparente nas área 1, 2 e 4

O alojamento das rochas do CILS (Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS) provocou a formação de uma série de falhas com orientação geral predominante nas direções N50-80W e N80E, responsáveis pelo controle das ocorrências minerais. Essas falhas apresentam-se, em grande parte, preenchidas por veios de espessura, comprimento e paragenese variada, acompanhados muitas vezes, de intensa brechação hidráulica. Em algumas situações, essas estruturas são deslocadas por falhas de direções N10-30W e N40-60W, conforme observações de campo (Andrade & Strieder 1997). A continuidade espacial dos corpos mineralizados controlados pelas falhas deve estar refletida no estudo variográfico. Há, porém que se observar a disposição e a extensão dos perfis do levantamento *CSAMT*, bem como a penetrabilidade do método. Os perfis de resistividade aparente levantados possuem pequena extensão (2,225 km x 2,789 km = 6,02 km²) e cobrem pequenas áreas (área1, 2 e 4), pois foram planejadas inicialmente para avaliação do dispositivo e para investigar as estruturas principais no Prospecto Volta Grande (Lavras do

Sul, RS); do outro lado, o dispositivo *CSAMT* mostrou penetrabilidade máxima de 9259 m. Desse modo, em função da maior distância vertical do levantamento *CSAMT*, pode-se esperar um alinhamento verticalizado para os dados de resistividade no caso das fraturas controladoras dos corpos minerais terem grande continuidade em profundidade. É possível estudar a continuidade espacial de um determinado atributo geológico e assim determinar a direção preferencial de mineralização de uma jazida. O semivariograma é a ferramenta que nos permite descrever fenômenos geológicos com modelos matemáticos, representando quantitativamente a variação do fenômeno regionalizado. Nesse trabalho o estudo da continuidade espacial dos dados de resistividade aparente busca a determinação de um modelo de variograma e a distância máxima de correlação entre as amostras circunvizinhas para diferentes direções. A partir do estabelecimento dos modelos variográficos, busca-se estimar os valores de resistividade para as diferentes áreas (área 1, área 2 e área 4), na tentativa de se obter os valores de resistividade nos pontos onde há determinação de teores de Au e de Cu. Isso permitirá estabelecer a correlação entre os de teores amostrados de Au e de Cu e os valores de resistividade, para validar os sólidos construídos a partir de intervalos de resistividade estabelecidos experimentalmente.

Toda a análise variográfica foi realizada utilizando o *software* GSLIB (Geostatistical Software Library - Deutsch & Journel, 1996) combinado o módulo Gamv com o *software* Varfit. O *software* Varfit, desenvolvido no DEMIN (Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul), foi criado em C++ para calcular o semivariograma experimental e proporcionar o ajuste ao semivariograma teórico com praticidade e rapidez. O procedimento de ajuste não é direto e automático, como no caso de uma regressão, por exemplo, mas sim interativo, pois nesse processo precisa-se fazer um primeiro ajuste e verificar a sua adequação do modelo teórico. Dependendo do ajuste obtido, pode-se ou não redefinir o modelo, até obter um que seja considerado satisfatório. As tabelas 3.20, 3.21 e 3.22 mostram os parâmetros utilizados na análise variográfica: *Az* é o azimute; *Atol* é a tolerância angular do azimute; *Banda* é largura da banda medido que refere-se a um valor de ajuste a partir do qual se restringe o número de pares de observações para o cálculo do semivariograma, é medido no plano horizontal; *Dip* ângulo com o plano horizontal para aquele azimute; *Dtol* é a tolerância angular do *Dip*; *Bandv* extensão vertical da banda; *Lag* sep refere-se a distância pré-

determinada que é utilizada para o cálculo do semivariograma; n lag refere-se ao número de *lags*; *nugget* (C_0) ou efeito pepita revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que as distâncias entre as amostras sendo que parte dessa descontinuidade pode ser também devido a erros de medição, mas é impossível quantificar qual contribui mais, se os erros de medição ou a variabilidade em uma escala menor do que aquela amostrada; *range* ou alcance (a) é a distância a partir da qual a variação média entre os pares de amostras não depende mais da distância entre os pontos, é o limite do estado de dependência entre as amostras e o estado de ausência de correlação espacial; *sill* ou patamar é valor $Y(h)$ correspondente ao alcance e é aproximadamente igual a variância a priori dos dados amostrais. Esses parâmetros são utilizados para: 1) a construção do semivariograma omnidirecional; 2) a construção dos semivariogramas com azimute igual a 0 e *Dip* assumindo valores iguais a 0^0 , 45^0 e 90^0 para identificar a característica de verticalidade das estruturas. 3) construção dos semivariogramas direcionais com azimute assumindo valores de 90^0 a 270^0 para identificar a orientação dos eixos intermediários e menor do elipsóide de continuidade espacial.

A análise estatística dos valores de resistividade aparente, nas áreas 1, 2 e 4 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS) mostrou que a área 1 e a área 4 têm valores de resistividade aparente que não diferem entre si estatisticamente. Por outro lado, os dados de resistividade aparente da área 2 formam três subconjuntos que diferem entre si e das outras duas áreas. Esses subconjuntos estão associados as diferentes litologias com ocorrência na área (granito, monzogranito e rochas vulcanoclásticas).

3.3.1 Estudo variográfico

Esse trabalho optou por tratar os dados como um conjunto unitário para cada uma das áreas tradicionalmente individualizadas (áreas 1, 2 e 4), uma vez que representam a expressão superficial de estruturas mineralizadas e que não são áreas perfeitamente contíguas no sentido lateral; a falta de uma perfeita continuidade lateral, caso os dados

fossem todos tratados num único conjunto, pode duplicar na justaposição de estruturas mineralizadas distintas, na identificação de estruturas variográficas com disposição espacial não relacionadas com estruturas controladoras e/ou na aparição de artefatos durante a produção de mapas.. Na área 2, contudo a mistura de diferentes populações conferiu ao conjunto de dados um elevado desvio padrão e, como consequência, uma variância elevada. Este trabalho entende necessário fazer um corte no banco de dados original da área 2, buscando identificar uma subpopulação com os valores mais baixos de resistividade aparente. A figura 3.37 indentifica a população de valores de resistividade abaixo de 3200 Ω m, à qual pertencem aproximadamente 68% dos dados de resistividade da área 2. Essa será a população utilizada para o modelamento da resistividade para a área 2, uma vez que valores de alta resistividade correspondem a rochas ácidas sem qualquer indício de mineralização sulfetada.

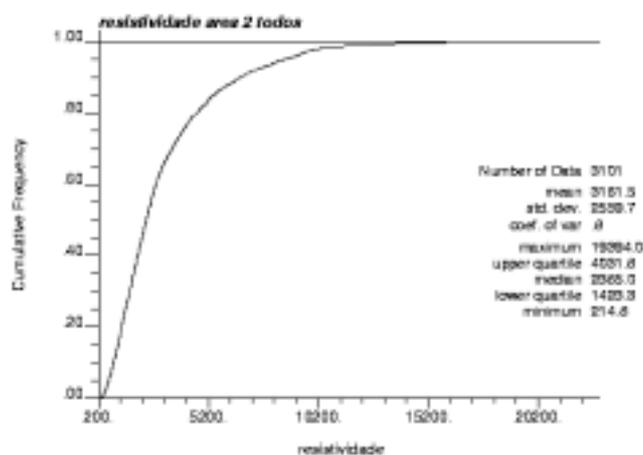


Figura 3.37 - Histograma de frequência cumulativa plotada com todos os valores de resistividade aparente correspondentes à área 2 (granito, monzogranito e rochas vulcanoclásticas). A linha reta que vai da origem do sistema até o ponto de coordenadas (3200, 0.68) identifica a subpopulação utilizada no modelamento geoestatístico.

O semivariograma é uma ferramenta básica de suporte às técnicas de krigagem, que permite representar quantitativamente a variabilidade de um fenômeno regionalizado. É uma ferramenta que nos permite descrever fenômenos geológicos com modelos matemáticos. Deste modo, é possível estudar a continuidade espacial de um determinado atributo geológico e assim, como no nosso estudo, definir direções preferenciais de mineralização em estruturas hidrotermais controladas por falhas.

Tabela 3.11 - Parâmetros básicos da subrotina Gamv-GSLIB e dos modelos gerados no *software* Varfit para o semivariograma omnidirecional que contém duas estruturas esféricas, dados da área 1 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS).

Semivariograma Omnidirecional							
Az/Atol/Banda/Dip/Dtol/Bandv	Lagsep/Lagtol	Nº lag	Nugget	Sill C1	Sill C2	Range	Range 2
						1	
0/90/1120/0/0.1/6	100/50	10	3000	127000	430000	722	929

Tabela 3.12 - Parâmetros básicos da subrotina Gamv-GSLIB e dos modelos gerados no *software* Varfit para os semivariogramas direcionais e contém duas estruturas esféricas (área 1 do Prospecto Volta Grande).

Investigação da característica vertical das estruturas							
Az/Atol/Banda/Dip/Dtol/Bandv	Lagsep/Lagtol	Nº lag	Nugget	Sill C1	Sill C2	Range	Range 2
						1	
0/25/200/0/0.1/6	200/100	10	3000	127000	430000	1337	1445
0/25/200/45/0.1/6	200/100	10	3000	127000	430000	1378	1897
0/25/200/90/0.1/6	200/100	10	3000	127000	430000	1395	4024

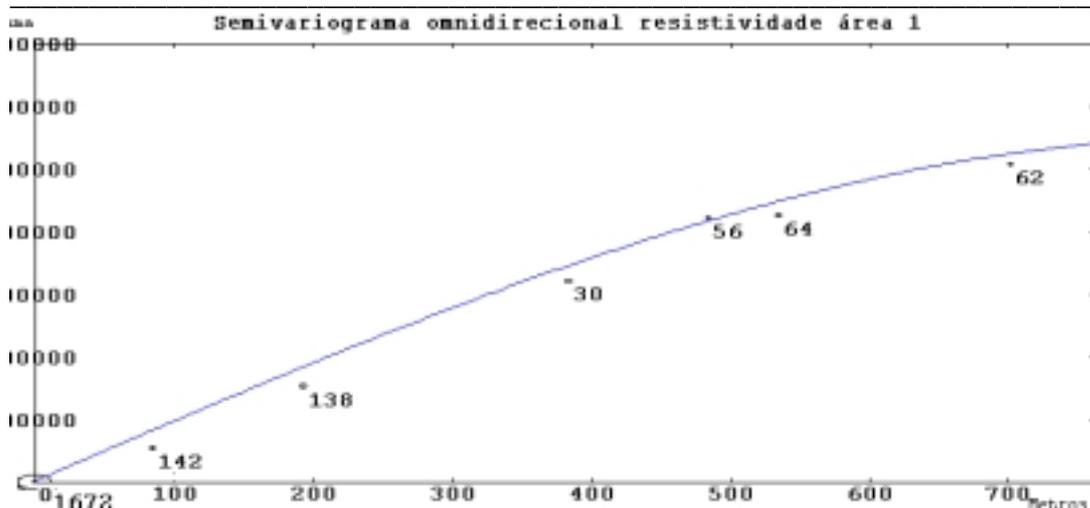


Figura 3.38 - Semivariograma omnidirecional resistividade aparente área 1 do Prospecto Volta Grande.

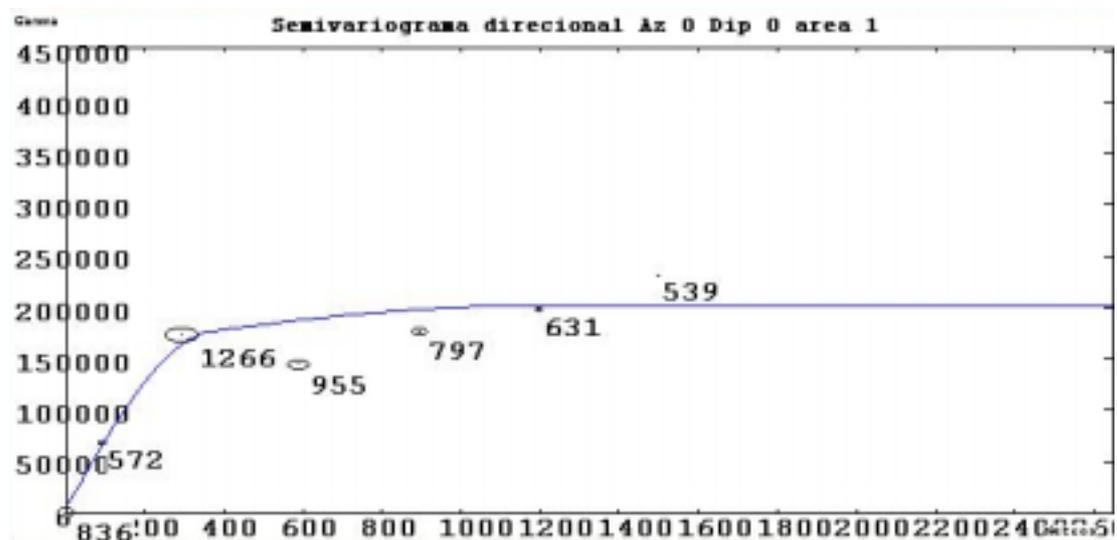


Figura 3.39 - Semivariograma resistividade aparente área 1 do Prospecto Volta Grande, azimute 0 e Dip 0.

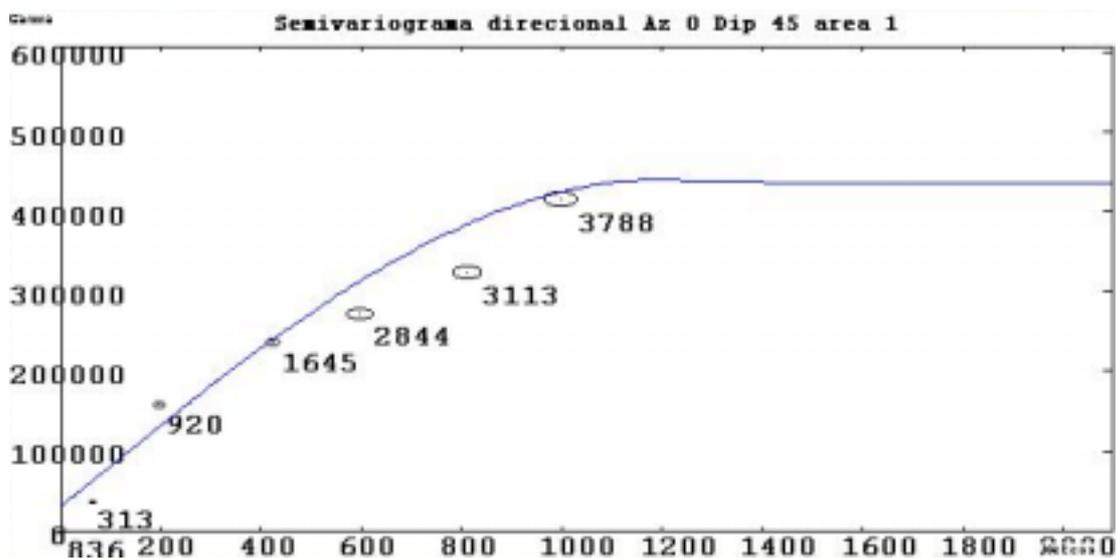


Figura 3.40- Semivariograma resistividade aparente área 1 do Prospecto Volta Grande, azimute 0° e Dip 45° .

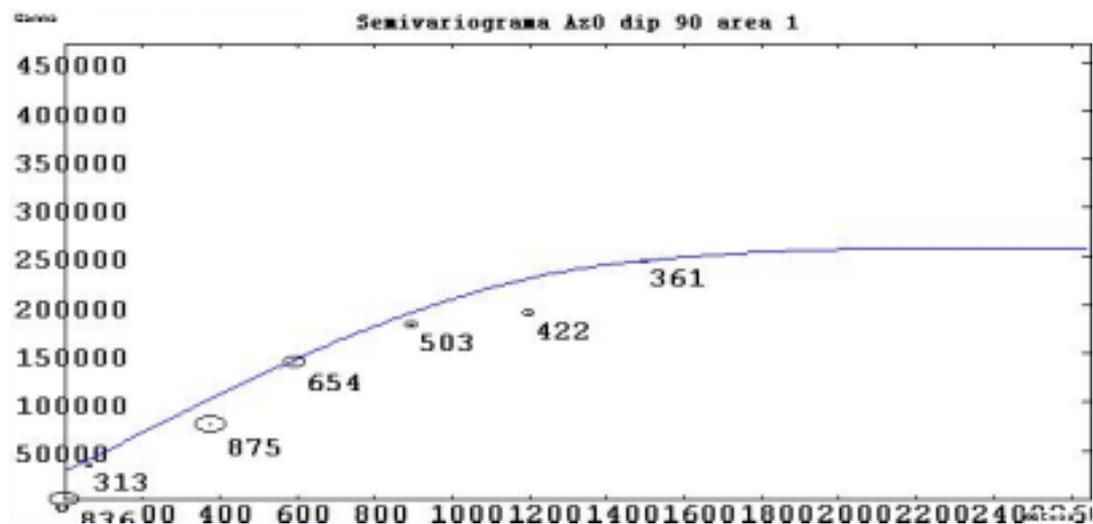


Figura 3.41 - Semivariograma resistividade aparente área 1 do Prospecto Volta Grande, azimute 0° e Dip 90° .

Tabela 3.13 - Parâmetros básicos da subrotina Gamv-GSLIB e dos modelos gerados no *software* Varfit para todos os semivariogramas direcionais que contêm duas estruturas esféricas (área 1 do Prospecto Volta Grande).

Az/Atol/Banda/Dip/Dtol/Bandv	Lagsep/Lagtol	Nº lag	Nugget	Sill C1	Sill C2	Range 1	Range 2
90/25/200/90/22/1120	200/100	10	3000	127000	430000	1087	2230
120/25/200/90/22/1120	200/100	10	3000	127000	430000	1095	3340
150/25/200/90/22/1120	200/100	10	3000	127000	430000	1280	3808
180/25/200/90/22/1120	200/100	10	3000	127000	430000	1551	3299
210/25/200/90/22/1120	200/100	10	3000	127000	430000	1077	2999
240/25/200/90/22/1120	200/100	10	3000	127000	430000	1000	1798
270/25/200/90/22/1120	200/100	10	3000	127000	430000	887	1621

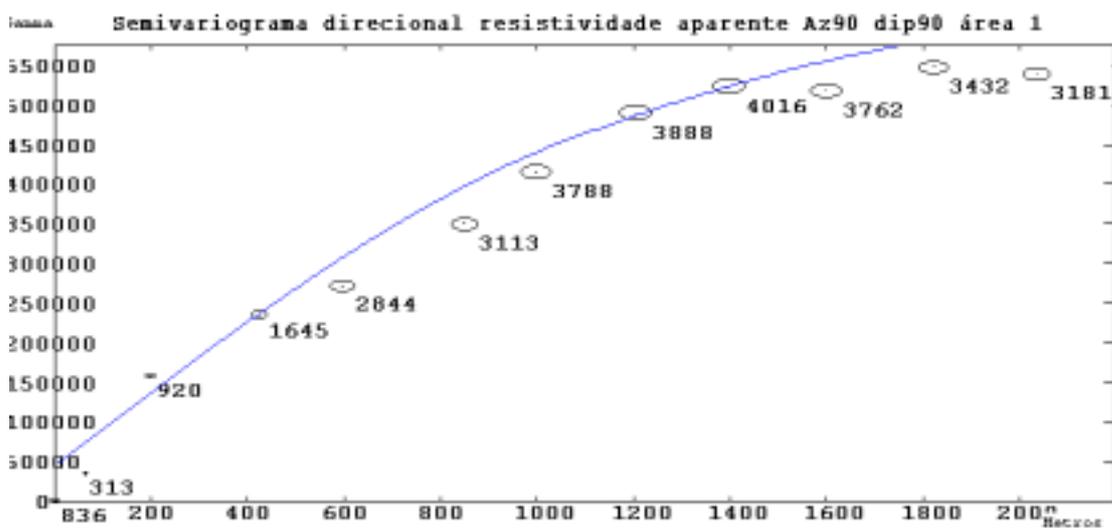


Figura 3.42 - Semivariograma resistividade aparente área 1 do Prospecto Volta Grande, azimuth 90° e Dip 90° .

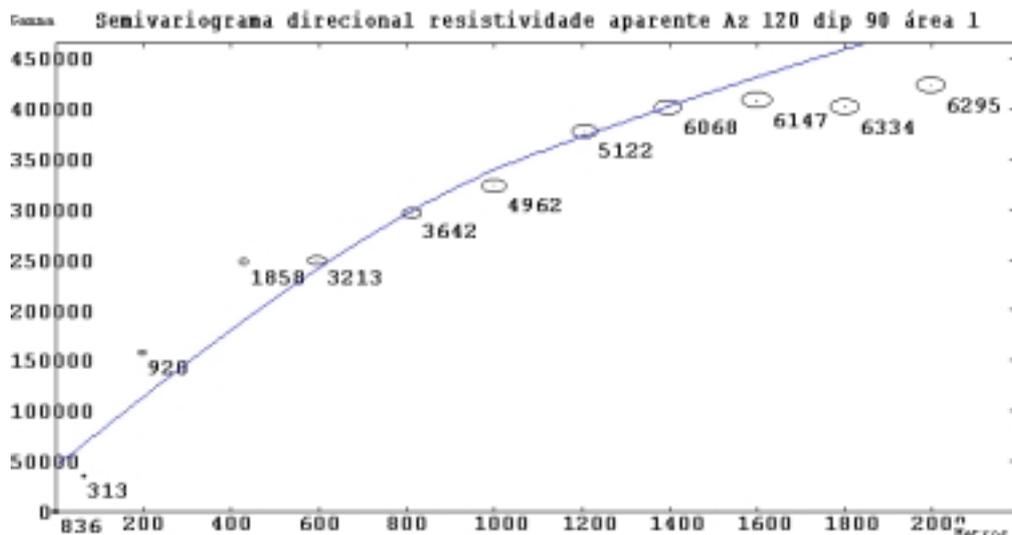


Figura 3.43 - Semivariograma resistividade aparente área 1 do Prospecto Volta Grande, azimute 120° e Dip 90° .

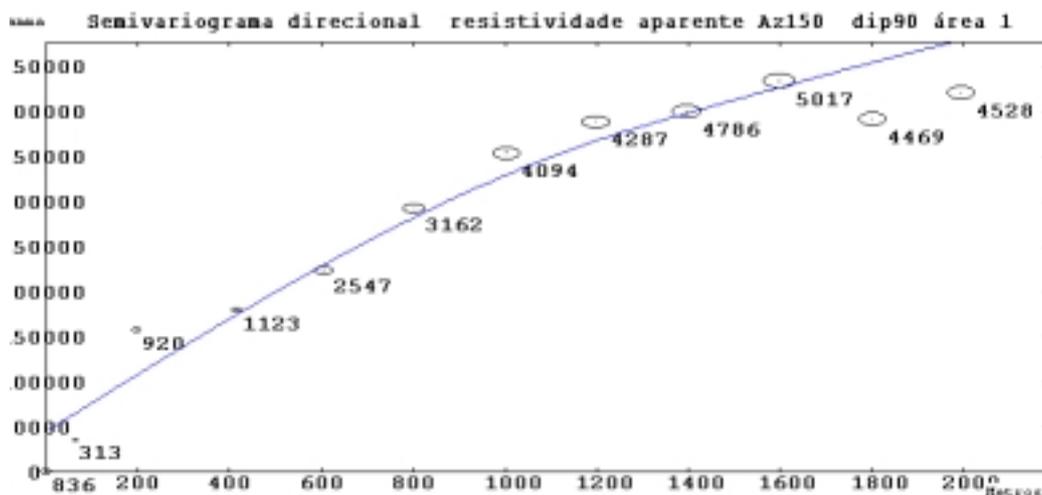


Figura 3.44 - Semivariograma resistividade aparente área 1 do Prospecto Volta Grande, azimute 150° e Dip 90° .

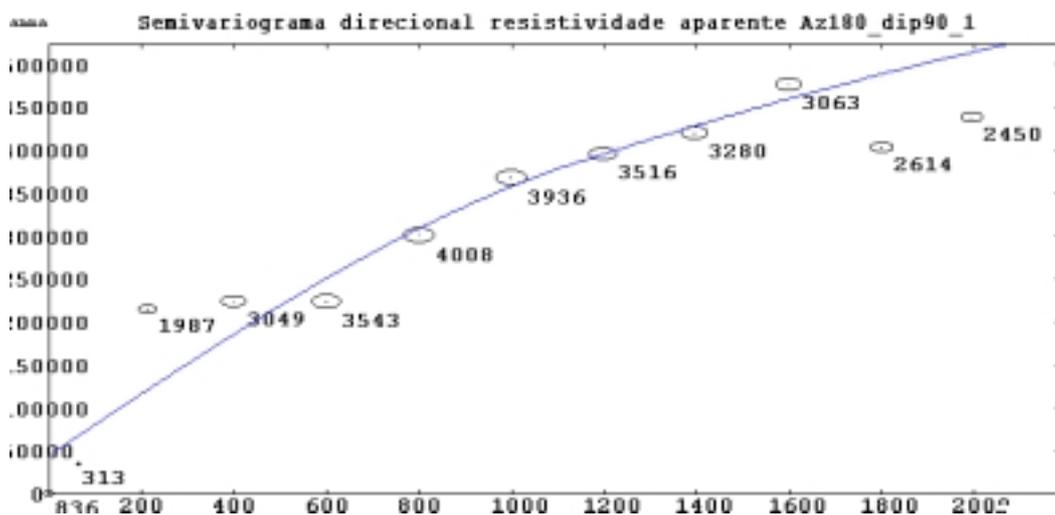


Figura 3.45 - Semivariograma resistividade aparente área 1 do Prospecto Volta Grande, azimute 180° e Dip 90°

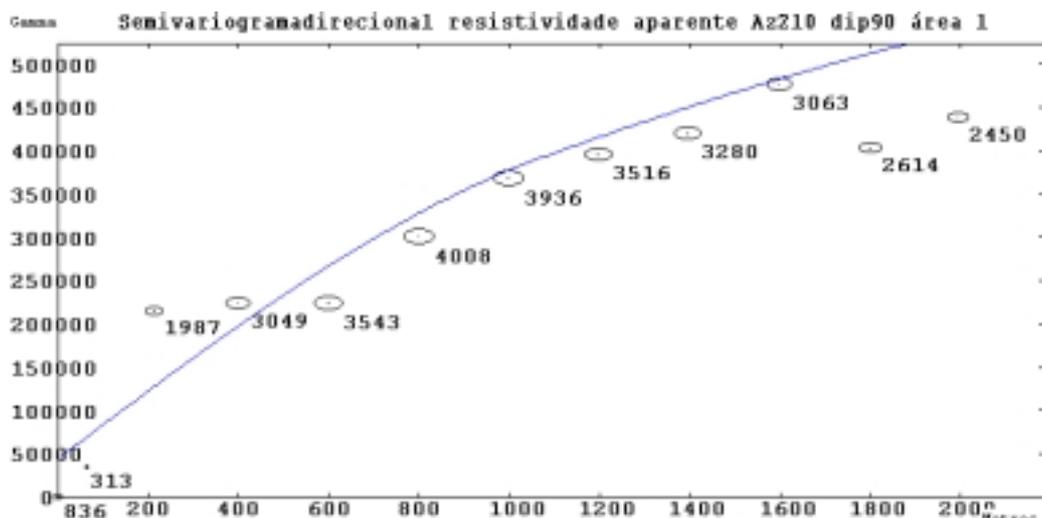


Figura 3.46 - Semivariograma resistividade aparente área 1 do Prospecto Volta Grande, azimute 210° e Dip 90°

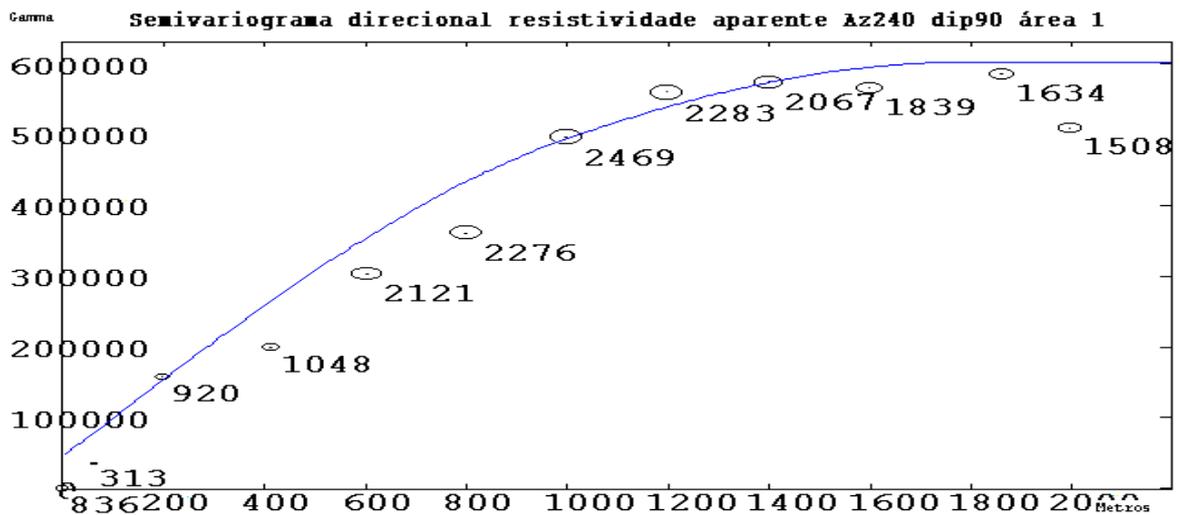


Figura 3.47 - Semivariograma resistividade aparente área 1 do Prospecto Volta Grande, azimute 240° e Dip 90°

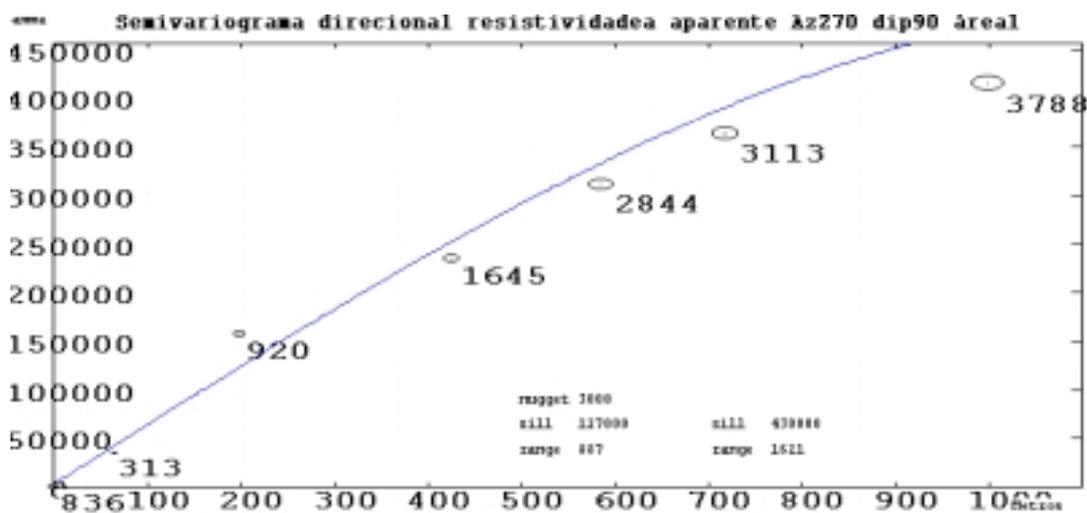


Figura 3.48 - Semivariograma resistividade aparente área 1 do Prospecto Volta Grande, azimute 270° e Dip 90°

Tabela 3.14 - Parâmetros básicos da subrotina Gamv-GSLIB e dos modelos gerados no *software* Varfit para o semivariograma omnidirecional que contém duas estruturas esféricas (área 2 do Prospecto Volta Grande).

Semivariograma omnidirecional							
Az/Atol/Banda/Dip/Dtol/Bandv	Lagsep/Lagtol	Nº lag	Nugget	Sill C1	Sill C2	Range 1	Range 2
0/90/1200/0/0.1/6	50/25	3	25000	267932	295881	237	412

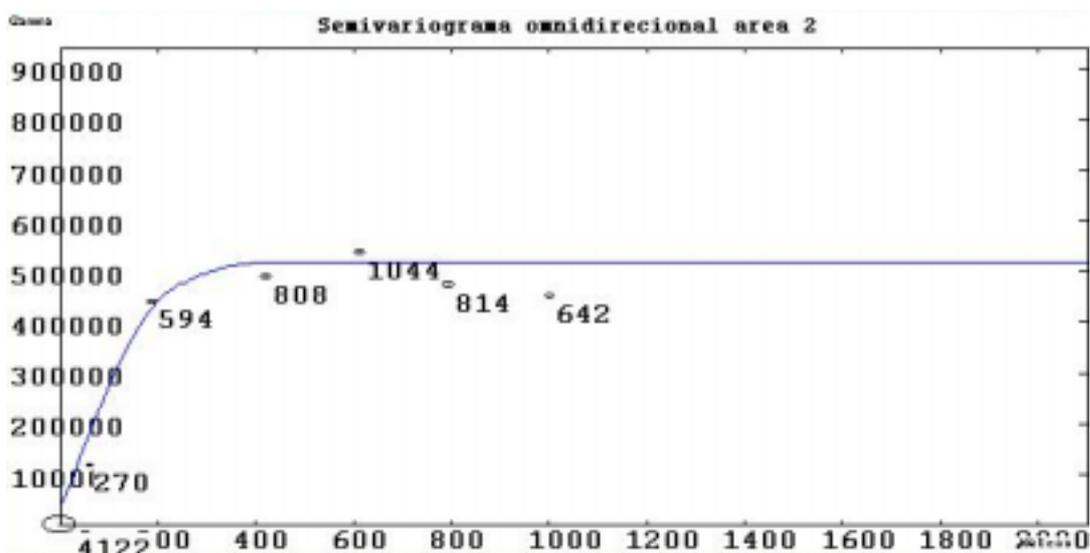


Figura 3.49 - Semivariograma omnidirecional resistividade aparente área 2 do Prospecto Volta Grande.

Tabela 3.15 - Parâmetros básicos da subrotina Gamv-GSLIB e dos modelos gerados no *software* Varfit para o semivariograma que contém duas estruturas esféricas (área 2 do Prospecto Volta Grande).

Investigar a característica de verticalidade das estruturas							
Az/Atol/Banda/Dip/Dtol/Bandv	Lagsep/Lagtol	Nº lag	Nugget	Sill C1	Sill C2	Range 1	Range 2
0/25/1200/0/0.1/6	50/25	3	25000	267932	295881	299	1020
0/25/1200/45/0.1/6	50/25	3	25000	267932	295881	437	785
0/25/1200/90/0.1/6	50/25	3	25000	267932	295881	649	2461

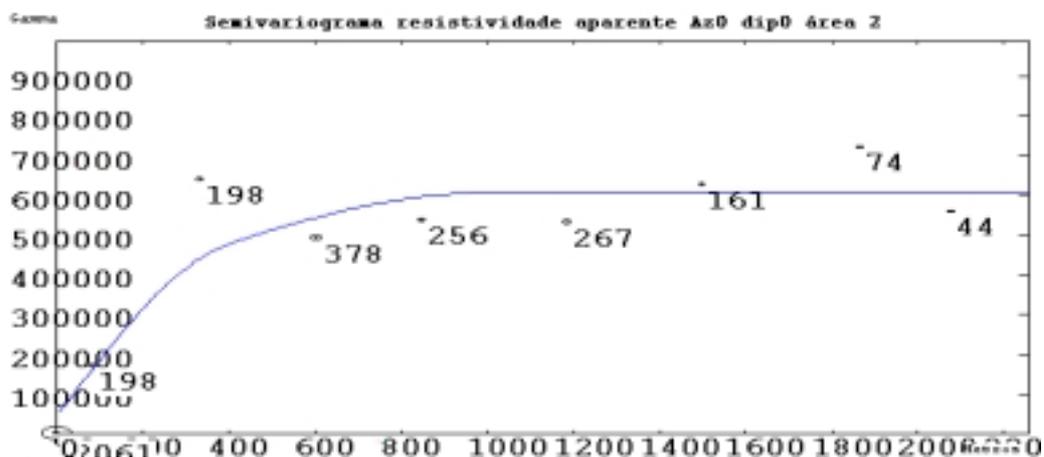


Figura 3.50 - Semivariograma resistividade aparente área 2 do Prospecto Volta Grande, azimuth 0° e Dip 0°

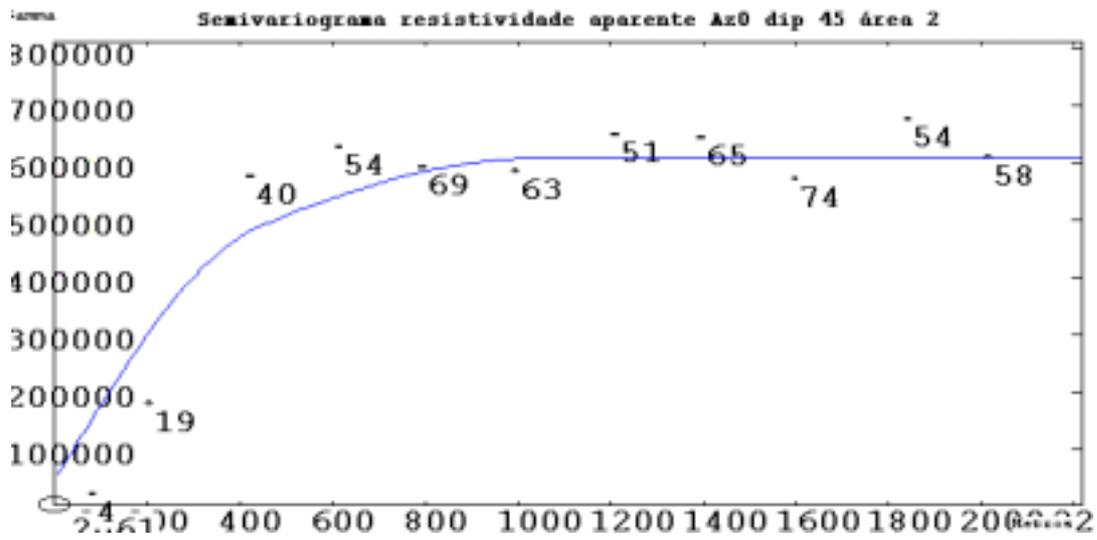


Figura 3.51- Semivariograma resistividade aparente área 2 do Prospecto Volta Grande, azimute 0° e Dip 45°

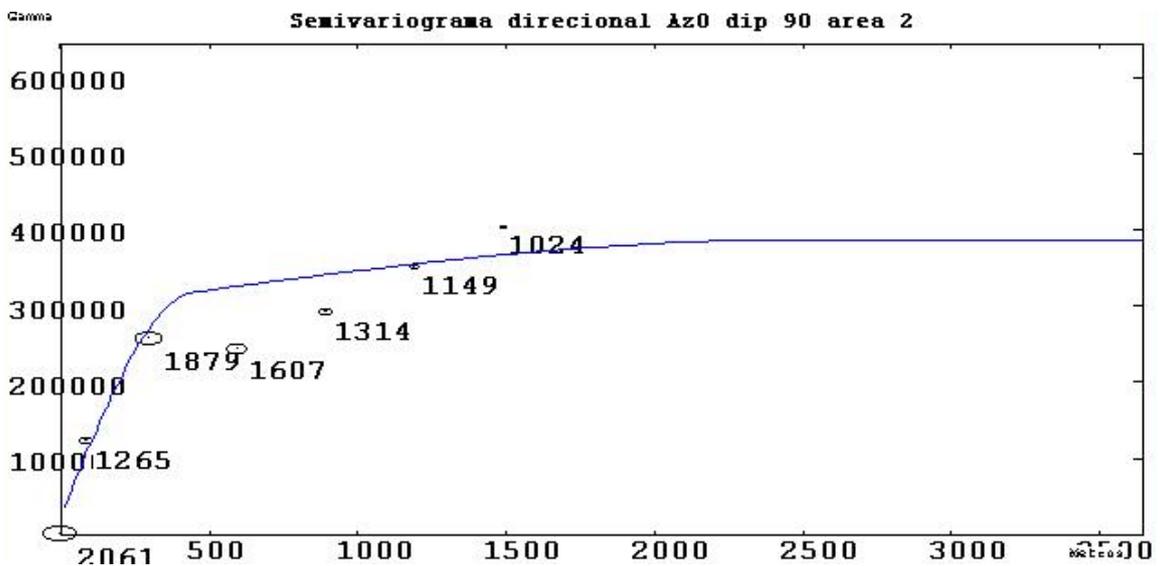


Figura 3.52 - Semivariograma resistividade aparente área 2 do Prospecto Volta Grande, azimute 0° e Dip 90°

Tabela 3.16 - Parâmetros básicos da subrotina Gamv-GSLIB e dos modelos gerados no *software* Varfit para todos os semivariogramas direcionais que contêm duas estruturas esféricas (área 2 do Prospecto Volta Grande).

Az/Atol/Banda/Dip/Dtol/Ban dv	Lagsep/Lagtol	Nº lag	Nugget	Sill C1	Sill C2	Range	
						1	Range 2
90/25/50/90/25/1000	50/25	5	25000	267932	295881	389	994
120/25/50/90/25/1000	50/25	10	25000	267932	295881	448	1095
150/25/50/90/25/1000	50/25	10	25000	267932	295881	518	1475
180/25/50/90/25/1000	50/25	10	25000	267932	295881	414	1180
210/25/50/90/25/1000	50/25	10	25000	267932	295881	330	851
240/25/50/90/25/1000	50/25	10	25000	267932	295881	276	684
270/25/50/90/25/1000	50/25	10	25000	267932	295881	377	772

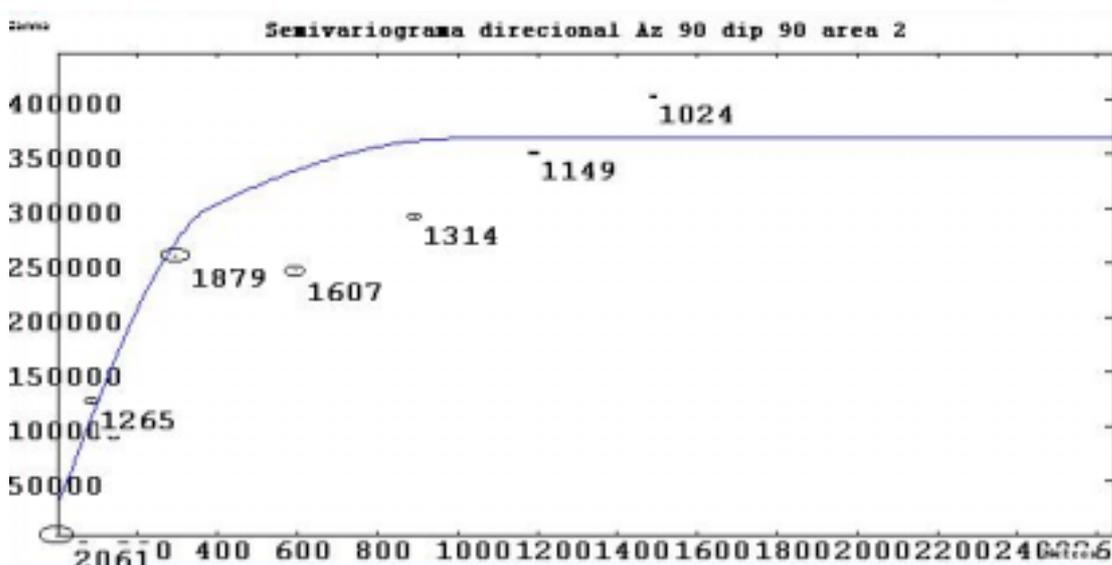


Figura 3.53 - Semivariograma resistividade aparente área 2 do Prospecto Volta Grande, azimute 90° e Dip 90°

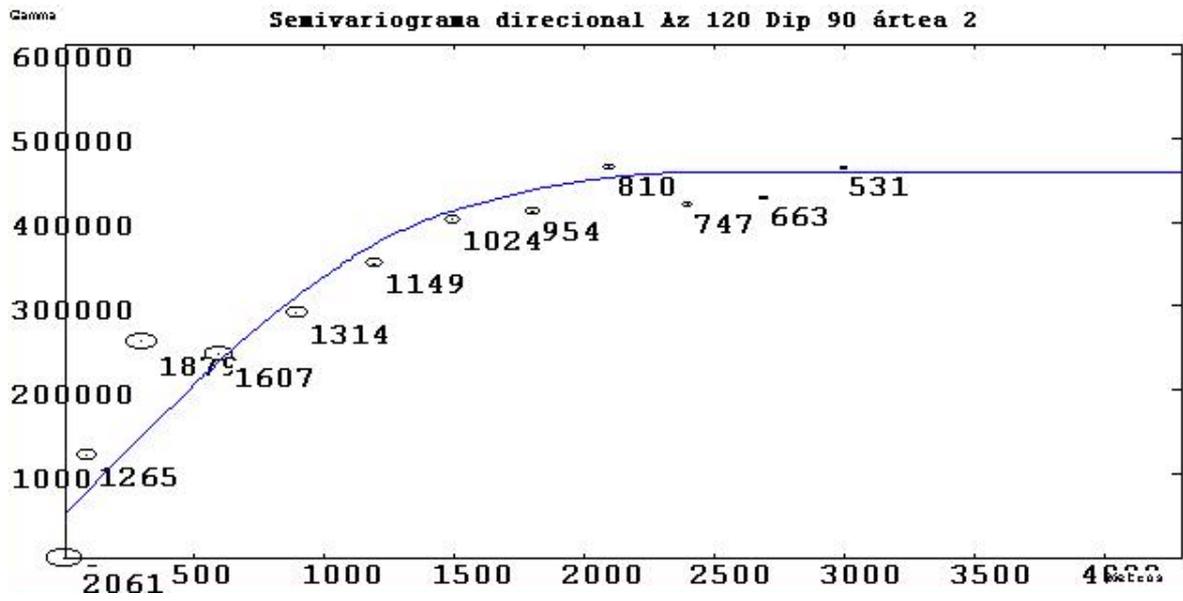


Figura 3.54 - Semivariograma resistividade aparente área 2 do Prospecto Volta Grande, azimute 120° e Dip90°

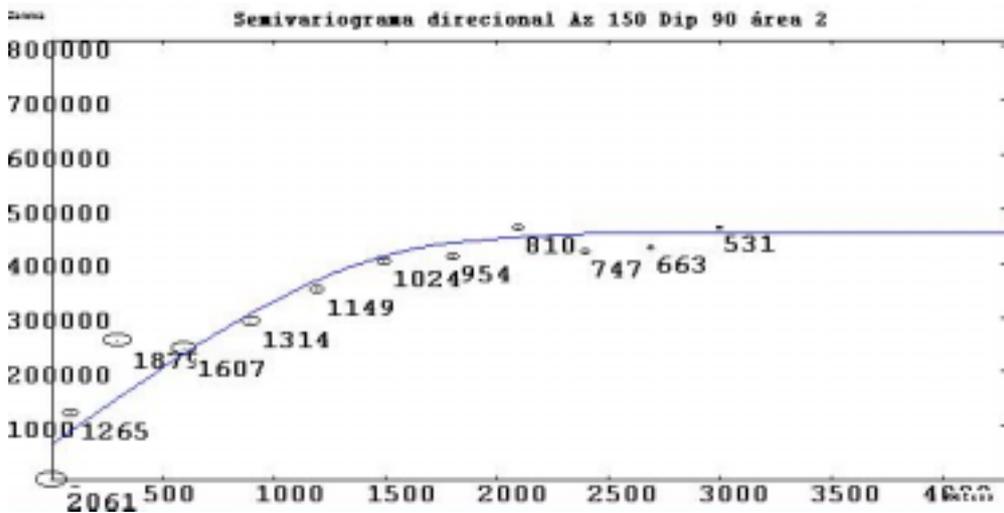


Figura 3.55 - Semivariograma resistividade aparente área 2 do Prospecto Volta Grande, azimute 150° e Dip 90°

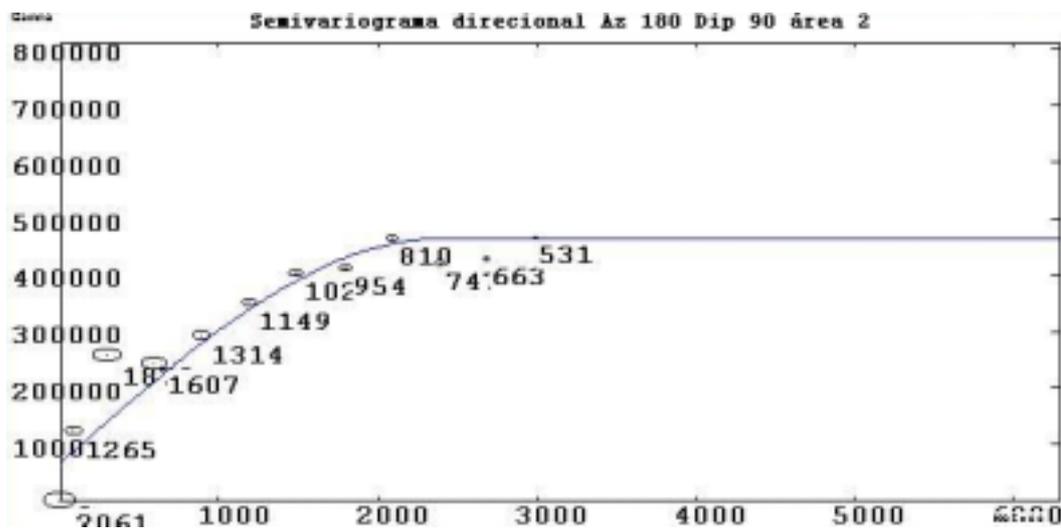


Figura 3.56 - Semivariograma resistividade aparente área 2 do Prospecto Volta Grande, azimute 180° e Dip 90°

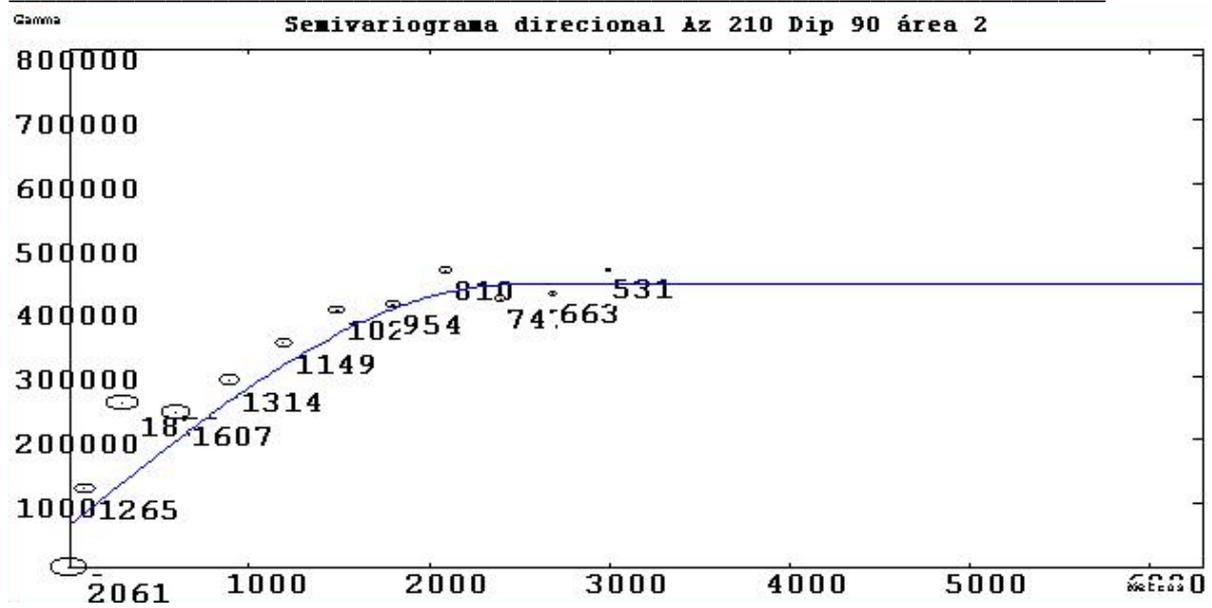


Figura 3.57 - Semivariograma resistividade aparente área 2 do Prospecto Volta Grande, azimute 210° e Dip 90°

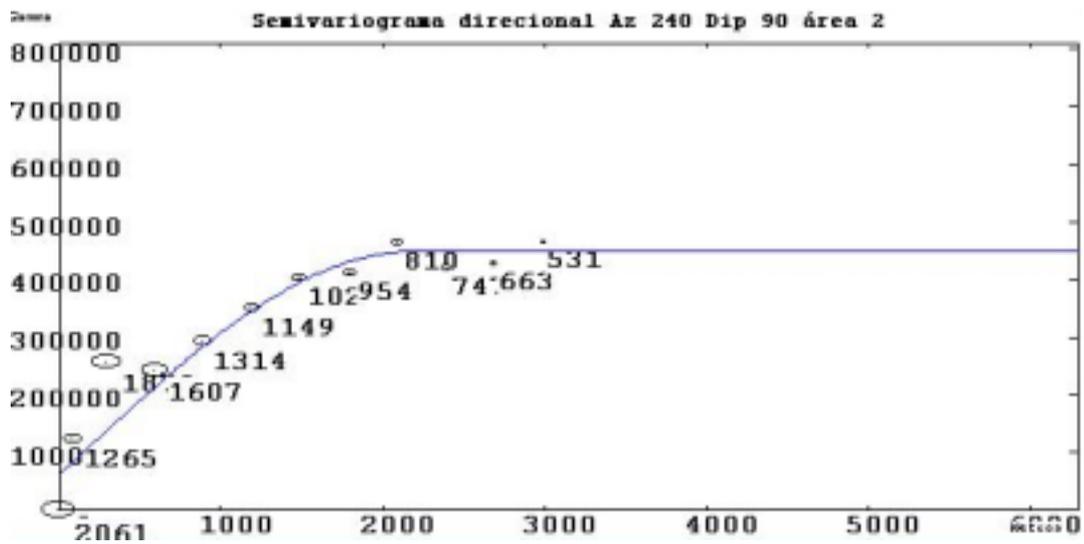


Figura 3.58 - Semivariograma resistividade aparente área 2 do Prospecto Volta Grande, azimute 240° e Dip 90°

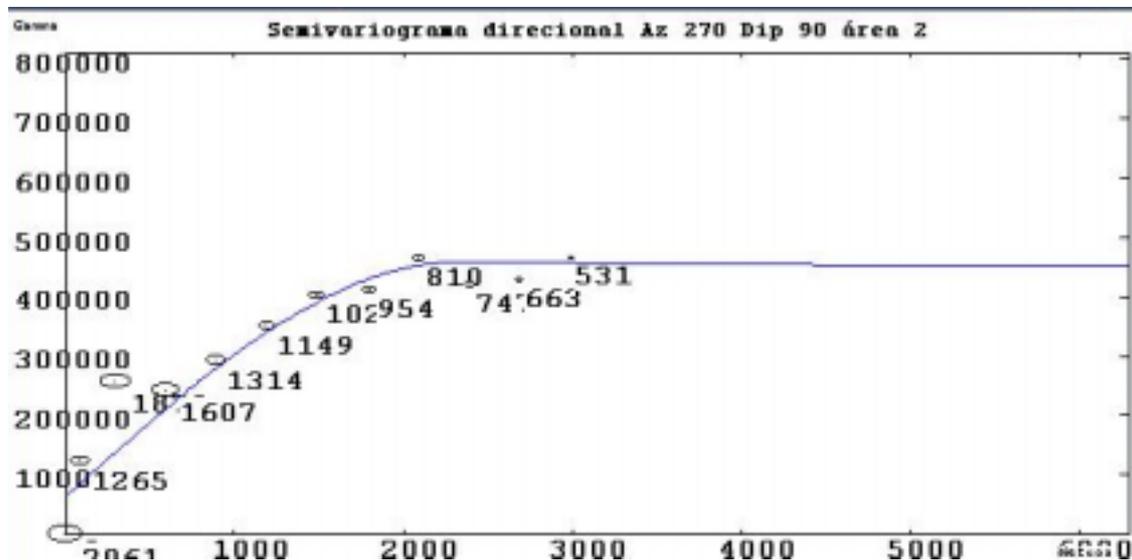


Figura 3.59 - Semivariograma resistividade aparente área 2 do Prospecto Volta Grande, azimuth 270° e Dip 90°

Tabela 3.17 - Parâmetros básicos da subrotina Gamv-GSLIB e dos modelos gerados no *software* Varfit para o Semivariograma omnidirecional e contém duas estruturas esféricas (área 4 do Prospecto Volta Grande).

Semivariograma omnidirecional					
Az/Atol/Banda/Dip/Dtol/Bandv	Lagsep/Lagtol	N° lag	Nugget	Sill C1	Range 1
0/90/900/0/0.1/6	100/50	10	25000	288000	1094

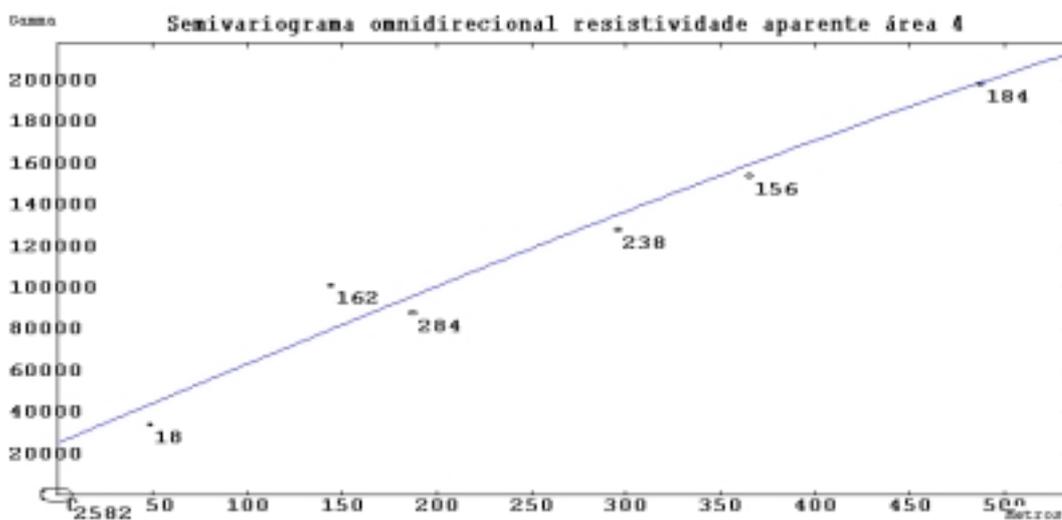


Figura 3.60 - Semivariograma omnidirecional resistividade aparente área 4 do Prospecto Volta Grande.

Tabela 3.18 - Parâmetros básicos da subrotina Gamv-GSLIB e dos modelos gerados no *software* Varfit para todos semivariogramas e contêm duas estruturas esféricas (área 4 do Prospecto Volta Grande).

Investigar a característica de verticalidade das estruturas					
Az/Atol/Banda/Dip/Dtol/Bandv	Lagsep/Lagtol	Nº lag	Nugget	Sill C1	Range 1
0/25/200/0/0.1/6	100/50	10	25000	288000	858
0/25/200/45/0.1/6	100/50	10	25000	288000	993
0/25/200/90/0.1/6	100/50	10	25000	288000	3726

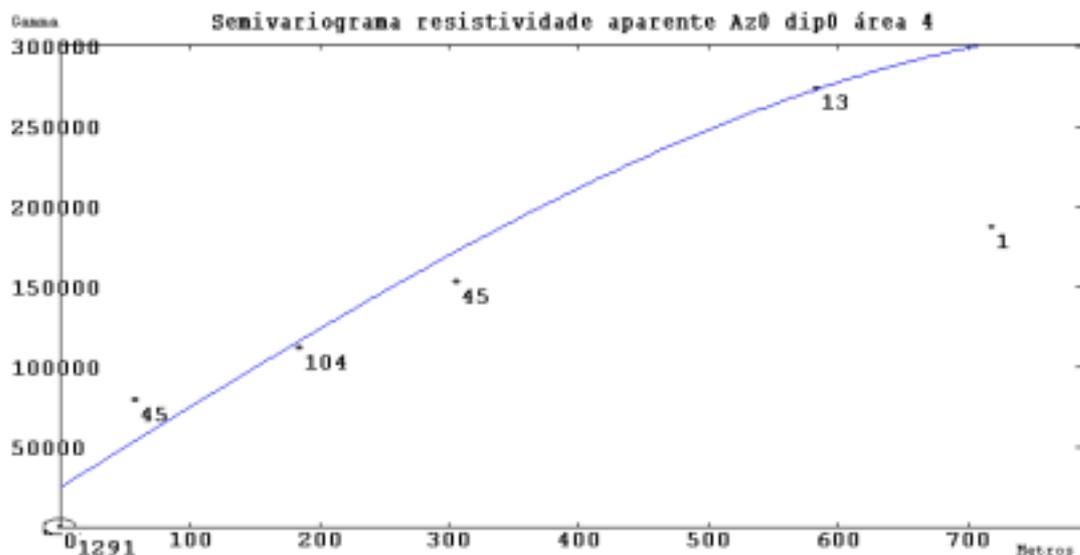


Figura 3.61 - Semivariograma resistividade aparente área 4 do Prospecto Volta Grande, azimute 0° e Dip0°

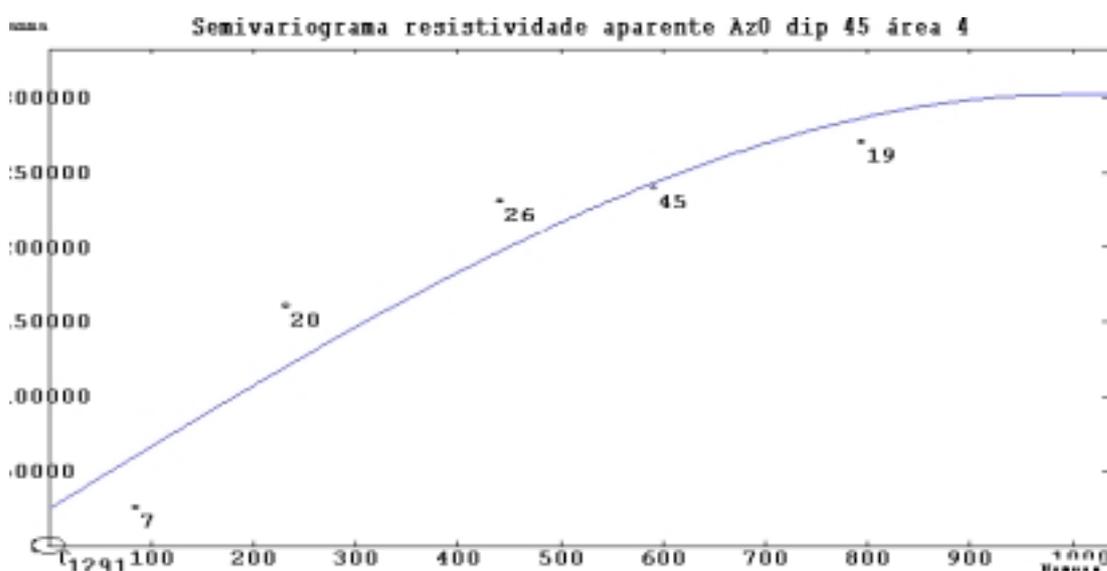


Figura 3.62 - Semivariograma resistividade aparente área 4 do Prospecto Volta Grande, azimute 0° e Dip45°

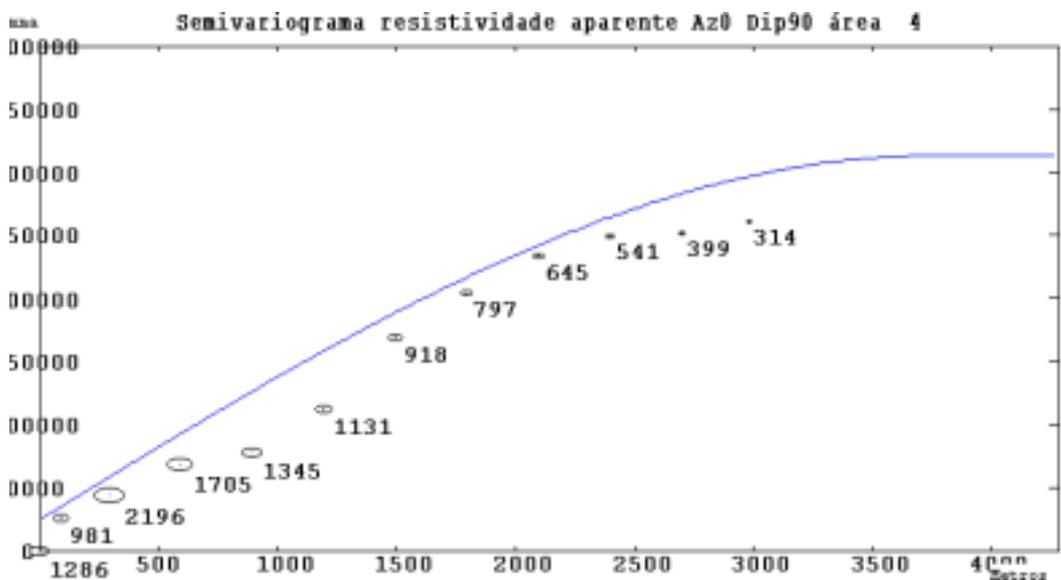


Figura 3.63 - Semivariograma resistividade aparente área 4 do Prospecto Volta Grande, azimute 0° e Dip90°

Tabela 3.19 - Parâmetros básicos da sub rotina Gamv-GSLIB e dos modelos gerados no *software* Varfit para todos os semivariogramas direcionais e contêm duas estruturas esféricas, (área 4 do Prospecto Volta Grande).

Az/Atol/Banda/Dip/Dtol/Bandv	Lagsep/Lagtol	Nº lag	Nugget	Sill C1	Range 1
90/25/50/90/25/1000	300/150	10	25000	288000	2301

120/25/50/90/25/1000	300/150	10	25000	288000	2190
150/25/50/90/25/1000	300/150	10	25000	288000	2373
180/25/50/90/25/1000	300/150	10	25000	288000	2406
210/25/50/90/25/1000	300/150	10	25000	288000	2988
240/25/50/90/25/1000	300/150	10	25000	288000	2700
270/25/50/90/25/1000	300/150	10	25000	288000	2498

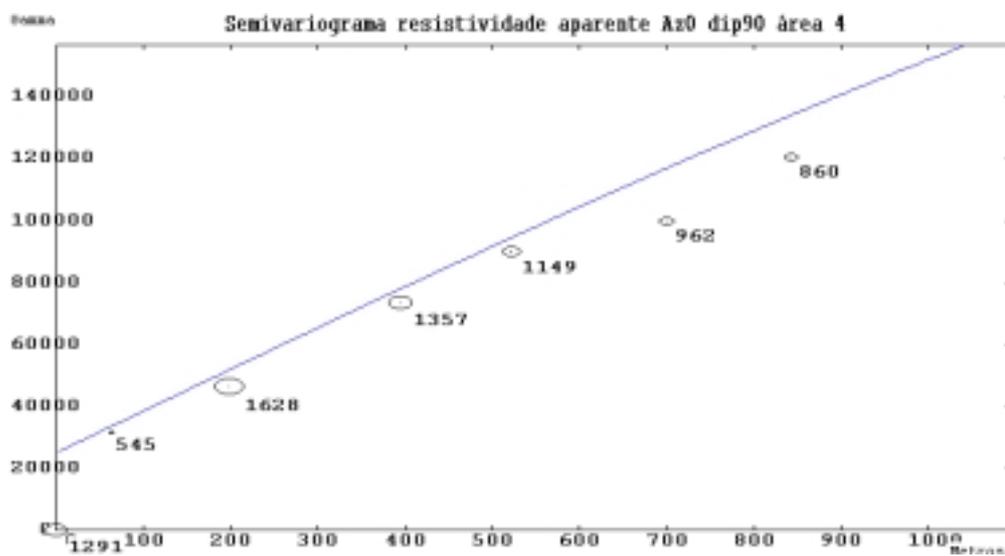


Figura 3.64 - Semivariograma resistividade aparente área 4 do Prospecto Volta Grande, azimute 0° e Dip90°

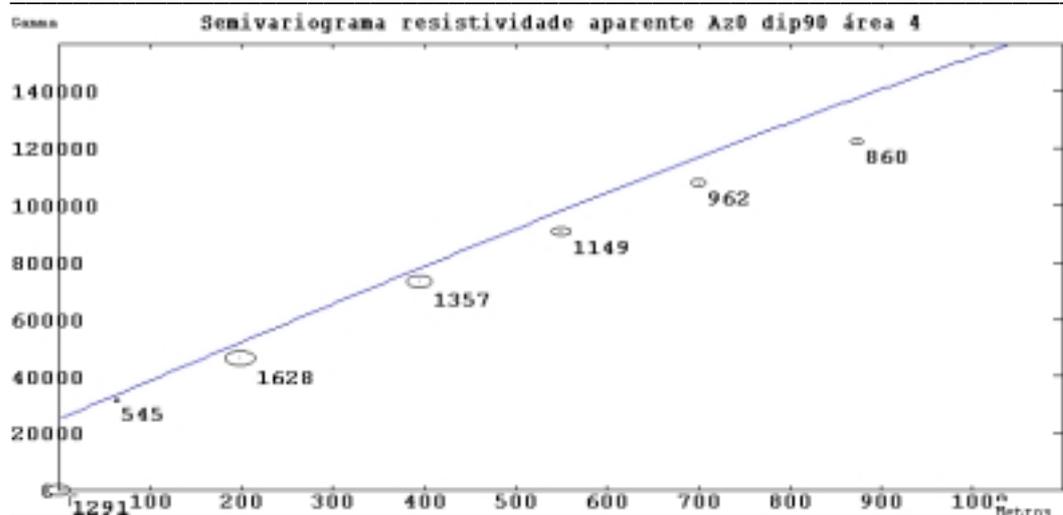


Figura 3.65 - Semivariograma resistividade aparente área 4 do Prospecto Volta Grande, azimuth 90° e Dip90°

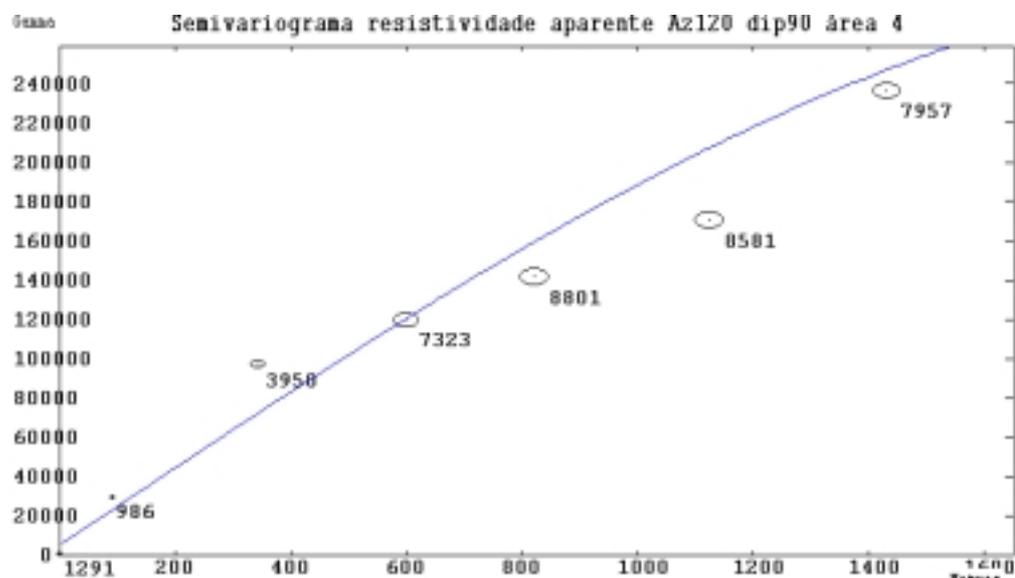


Figura 3.66 - Semivariograma resistividade aparente área 4 do Prospecto Volta Grande, azimuth 120° e Dip90°

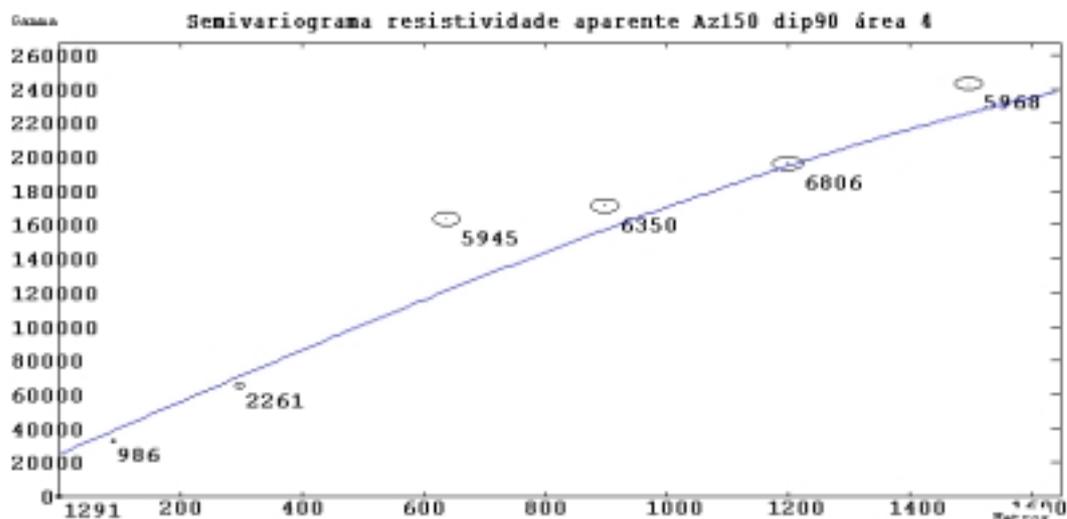


Figura 3.67 - Semivariograma resistividade aparente área 4 do Prospecto Volta Grande, azimute 150° e Dip 90°

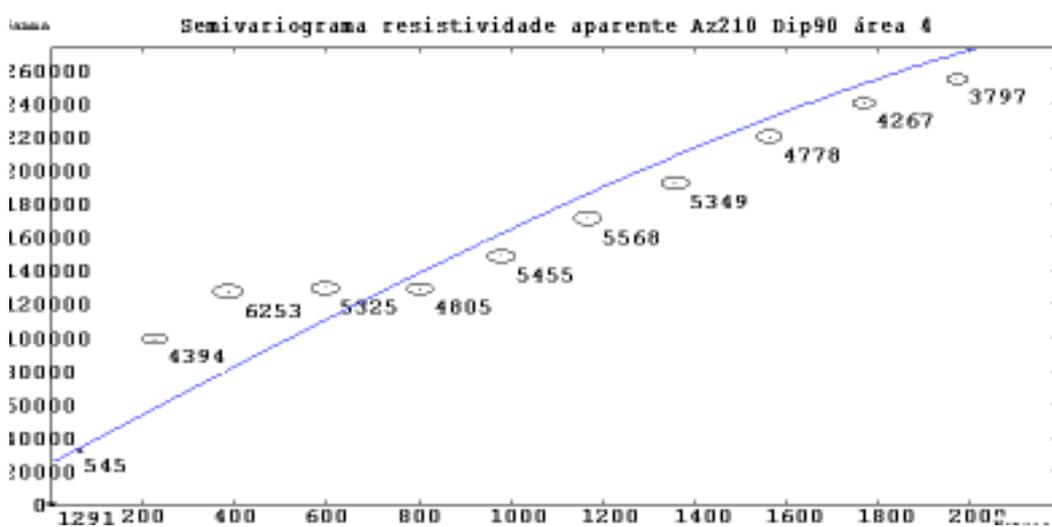


Figura 3.68 - Semivariograma resistividade aparente área 4 do Prospecto Volta Grande, azimute 180° e Dip 90°

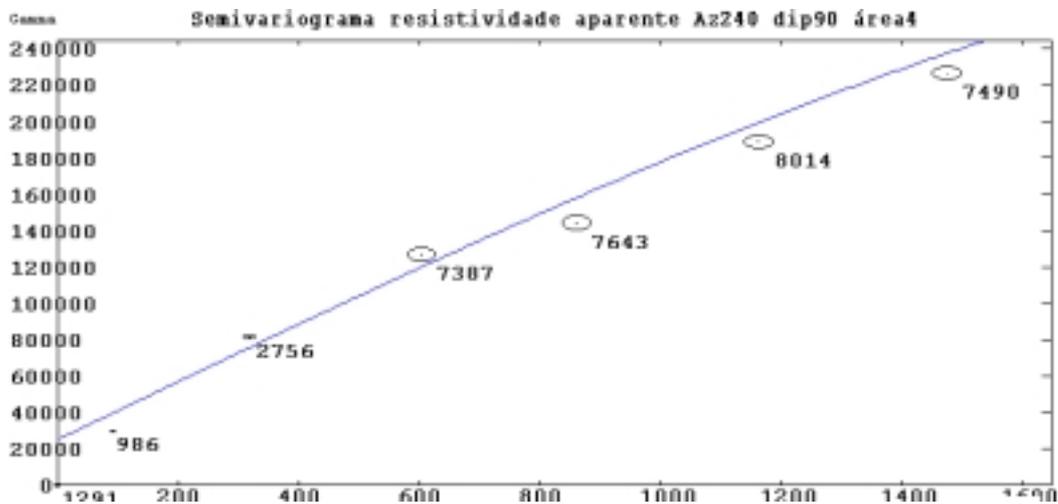


Figura 3.69 - Semivariograma resistividade aparente área 4 do Prospecto Volta Grande, azimute 240° e Dip90°

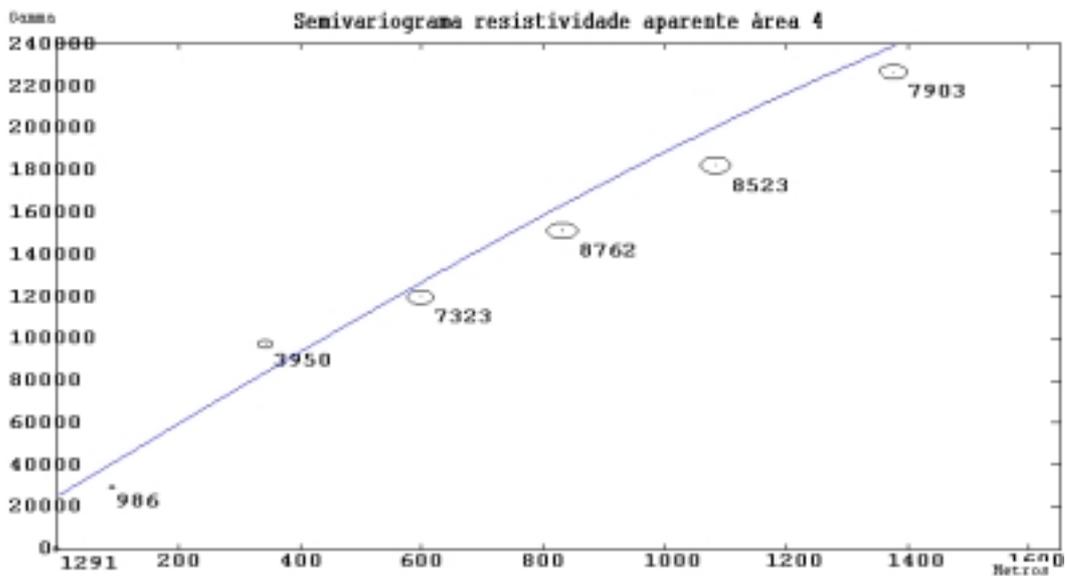


Figura 3.70 - Semivariograma resistividade aparente área 4 do Prospecto Volta Grande, azimute 270° e Dip90°

Os modelos de semivariograma experimental pode ser ajustado por qualquer curva conhecida. Os modelos mais usuais são: esférico, exponencial, gaussiano, potência. Dentre os modelos variográficos básicos, o modelo empregado neste trabalho que melhor exprimiu a variabilidade espacial da variável resistividade aparente foi o modelo esférico cuja equação é:

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

O modelo esférico é denominado por Isaaks e Sirivastava 1986 de modelo isotrópico com patamar. Modelos desse tipo são referenciados em geostatística como modelos transitivos. Os parâmetros básicos dos modelos são C_0 , C e a . Nesse trabalho buscou-se estabelecer o modelo de ajuste mais simples para cada semivariograma experimental, de forma que o modelo ajustado pudesse representar a tendência de $\gamma(h)$ em relação a h , sem dar importância excessiva a pequenas flutuações que podem ser artefatos referentes a um pequeno número de dados para aquele ponto especificamente. A variável resistividade aparente, nas áreas 1 e 2 do Prospecto Volta Grande (Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS), mostrou claramente modelos de semivariogramas ajustados com duas estruturas, ou seja, mais de um patamar e mais de um alcance. Esses resultados são mostrados nas tabelas 3.11, 3.12 e 3.13 para a área 1 e tabelas 3.14, 3.15 e 3.16 para área 2. Eles são obtidos a partir dos variogramas das figuras 3.38 até 3.48 para área 1 e figuras 3.59 para área 2. Análise variográfica com dupla estrutura acontece quando há diferentes escalas de variabilidade no conjunto de dados. No caso em estudo, essas diferenças na escala de variabilidade estão associadas a existência de duas ou mais estruturas mineralizadas, localizadas em diferentes profundidades. Modelos como os apresentados para as áreas 1 e 2 denominados modelos aninhados. Existem determinados fenômenos em que são necessários modelos mais complexos de semivariograma para explicar suas

variações espaciais. Estes modelos são combinações de modelos simples, nas áreas 1 e 2 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS) o modelo é chamado duplo esférico semelhante ao estudo de McBratney et al. (1982), cuja equação de ajuste pode ser representada por:

$$\gamma(\mathbf{h}) = \begin{cases} C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{|\mathbf{h}|}{a_1} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{|\mathbf{h}|}{a_1} \right)^3 \right] = \gamma_1(\mathbf{h}) , & 0 < |\mathbf{h}| \leq a_1 \\ C_0 + C_2 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{|\mathbf{h}|}{a_2} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{|\mathbf{h}|}{a_2} \right)^3 \right] = \gamma_2(\mathbf{h}) , & a_1 < |\mathbf{h}| \leq a_2 \\ C_0 + C_2 , & |\mathbf{h}| > a_2 \\ 0 , & |\mathbf{h}| = 0 \end{cases}$$

Onde a_1 e C_1 correspondem aos parâmetros de alcance e contribuição, respectivamente, do primeiro modelo esférico ($\gamma_1(\mathbf{h})$) e a_2 e C_2 correspondem aos parâmetros de alcance e contribuição, respectivamente, do segundo modelo esférico ($\gamma_2(\mathbf{h})$).

O efeito pepita ou *nugget* (C_0) que reflete a variabilidade existente em pequenas distâncias e que também incorpora erros analíticos vale 3000, 25000 e 25000 para as áreas 1, 2 e 4 respectivamente. O patamar ou *sill* ($C_0 + C$) que é o valor onde a função semivariograma se estabiliza e tem valor próximo à variância dos valores de resistividade aparente nas áreas do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS) vale: área 1, 557000 ($C_1=127000$ e $C_2=430000$), área 2, 563813 ($C_1=267932$ e $C_2=295881$), e na área 4 vale 288000. O *range* ou alcance (a) é que indica a distância além da qual os valores passam a não apresentar mais correlação. Observa-se que na direção vertical ($Dip = 90$) o *range* atinge seus maiores valores (4024 na área 1, 2461 na área 2 e 3726 na área 4. Essa característica de verticalidade das estruturas investigada determina, como consequência, que o eixo maior do elipsóide de continuidade espacial ocorra segundo o eixo Z.

As estimativas segundo os modelos variográficos ajustados para de valores de resistividade aparente das áreas 1, 2 e 4 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS) produziram novos conjuntos de valores dessa variável que, quando analisados

estatisticamente, não diferem significativamente dos conjuntos de valores originais. Um aspecto importante observado em todos os conjuntos de dados gerados por estimativa é menor diferença entre seus valores extremos e uma menor variabilidade evidenciado pelo menor desvio padrão e menor coeficiente de variação, em cada novo conjunto gerado a partir dos valores originais, nas áreas 1, 2 e 4 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul), mostrados nas tabelas 3.24, 3.26 e 3.27, respectivamente.

3.3.2 Análise e interpretação dos resultados do modelamento geoestatístico

Os semivariogramas com azimute igual a 0^0 e com *dip* variável confirmaram o caráter vertical das estruturas condutivas, uma vez que o maior alcance desses semivariogramas está num mergulho de 90^0 , para todas as três áreas (1, 2 e 4) do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS). Como as estruturas condutivas são verticais, o eixo maior do elipsóide aparece em verdadeira grandeza com *dip* igual a 90^0 , e o seu valor será o valor do alcance encontrado nessa orientação. Os eixos intermediários e eixo menor formam com o eixo maior do elipsóide de continuidade espacial um sistema ortogonal tridimensional, isto é, todos os ângulos de interseção medem 90^0 . Nessa situação, os outros eixos do elipsóide aparecerão em verdadeira grandeza quando se mantiver o *dip* igual a 90^0 e se fizer variar o azimute. O maior valor de alcance encontrado é o eixo intermediário enquanto o menor valor corresponde ao eixo menor. Com esse procedimento encontramos os valores dos três eixos do elipsóide de continuidade espacial e suas respectivas. Por comodidade construímos os semivariogramas direcionais com azimute que variam de 30^0 fazendo varredura do azimute 90^0 ao azimute 270^0 .

A análise variográfica da área 1 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS) mostra duas estruturas que estão definidas por dois elipsóides verticais (eixo principal segundo Z) com eixo intermediário com azimute 150^0 . O elipsóide associado a estrutura maior tem eixo maior, intermediário e menor que medem 4024, 3808 e 1798 respectivamente, enquanto o elipsóide associado a menor estrutura tem eixos que medem 1395, 1280 e 1000, respectivamente (figuras 3.38 até 3.48, construído a partir da observação das tabelas 3.11, 3.12 e 3.14).

A análise variográfica da área 2 do Prospecto Volta Grande (Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS) mostra duas estruturas que estão definidas por dois elipsóides verticais (eixo principal segundo Z) com eixo intermediário com azimute 150° . O elipsóide associado à estrutura maior tem eixo maior, intermediário e menor que medem 2461, 1475 e 684 respectivamente, enquanto o elipsóide associado a menor estrutura tem eixos que medem 649, 518 e 276, respectivamente (figura 3.50 até 3.60, construído a partir da observação das tabelas 3.13, 3.14 e 3.15).

A análise variográfica da área 4 do Prospecto Volta Grande (Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS) mostra uma única estruturas que estão definidas por um elipsóide verticais (eixo principal segundo Z) e eixo intermediário com azimute 210° . O elipsóide associado a essa estrutura tem eixo maior, intermediário e menor que medem 3726, 2988 e 2190 (figura 3.60 até 3.70 , construído a partir da observação das tabelas 3.23, 3.24 e 3.25).

Tabela 3.20 - Parâmetro para sub-rotina KT3d-GSLIB para validação do modelo variográfico dos valores de resistividade aparente da área 1 do Prospecto Volta Grande (Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS)

res1.dat	<i>-file with data</i>
0 1 2 3 4 0	<i>-columns for DH,X,Y,Z,var,sec var</i>
200 8000	<i>- trimming limits</i>
1	<i>option:0=grid,1=cross,2=jackknife</i>
xvkres1.dat	<i>-file with jackknife data</i>
1 2 3 4 0	<i>-columns for X,Y,Z,vr and sec var</i>
1	<i>-debugging level: 0,1,2,3</i>
Kt3dres1.dbg	<i>-file for debugging output</i>
Kt3dres1.out	<i>-file for kriged output</i>
20 419922.1 50	<i>-nx,xmn,xsiz</i>
21 6587894 40	<i>-ny,ymn,ysiz</i>
70 -6758 100	<i>-nz,zmn,zsiz</i>
9 9 9	<i>-x,y and z block discretization</i>
1 8	<i>-min, max data for kriging</i>
0	<i>-max per octant (0-> not used)</i>
3808 1798 4024	<i>-maximum search radii</i>
150 90 0.0	<i>-angles for search ellipsoid</i>
1 2.302	<i>-0=SK,1=OK,2=non-st SK,3=exdrift</i>
0 0 0 0 0 0 0 0 0	<i>-drift: x,y,z,xx,yy,zz,xy,xz,zy</i>
0	<i>-0, variable; 1, estimate trend</i>
Vaziot.dat	<i>-gridded file with drift/mean</i>
0	<i>- column number in gridded file</i>
2 0	<i>- nst, nugget effect</i>
1 127000 150 90 0	<i>- it, cc, angl1, ang2, ang3</i>
3808 1798 4024	<i>- a_hmax, a_hmin, a_vert</i>
1 430000 150 90 0	<i>- it, cc, angl1, ang2, ang3</i>
1280 1000 1395	<i>- a_hmax, a_hmin, a_vert</i>

Tabela 3.21 - Parâmetro para sub-rotina KT3d-GSLIB para validação do modelo variográfico dos valores de resistividade aparente da área 2 do Prospecto Volta Grande (Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS)

Res2.dat	<i>-file with data</i>
0 1 2 3 4 0	<i>-columns for DH,X,Y,Z,var,sec var</i>
200 8000	<i>- trimming limits</i>
1	<i>- option:0=grid,1=cross,2=jackknife</i>
Xvkres2<3200.dat	<i>-file with jackknife data</i>
1 2 3 4 0	<i>-columns for X,Y,Z,vr and sec var</i>
1	<i>-debugging level: 0,1,2,3</i>
Kt3d res2<3200.dbg	<i>-file for debugging output</i>
Kt3d res2<3200.out	<i>-file for kriged output</i>
20 419423 50	<i>-nx,xmn,xsiz</i>
21 6588513 40	<i>-ny,ymn,ysiz</i>
70 -9259 100	<i>-nz,zmn,zsiz</i>
9 9 9	<i>-x,y and z block discretization</i>
1 8	<i>-min, max data for kriging</i>
0	<i>-max per octant (0-> not used)</i>
1475 684 2461	<i>-maximum search radii</i>
150 90 0.0	<i>-angles for search ellipsoid</i>
1 2.302	<i>-0=SK,1=OK,2=non-st SK,3=exdrift</i>
0 0 0 0 0 0 0 0 0	<i>-drift: x,y,z,xx,yy,zz,xy,xz,zy</i>
0	<i>-0, variable; 1, estimate trend</i>
Vaziot.dat	<i>-gridded file with drift/mean</i>
0	<i>- column number in gridded file</i>
2 2500 0	<i>- nst, nugget effect</i>
1 267932 150 90 0	<i>- it, cc, ang1, ang2, ang3</i>
1475 684 2461	<i>- a_hmax, a_hmin, a_vert</i>
1 430000 150 90 0	<i>- it, cc, ang1, ang2, ang3</i>
518 276 649	<i>- a_hmax, a_hmin, a_vert</i>

Tabela 3.22- Parâmetro para sub-rotina KT3d-GSLIB para validação do modelo variográfico dos valores de resistividade aparente da área 4 do Prospecto Volta Grande (Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS)

Res4.dat	<i>-file with data</i>
0 1 2 3 4 0	<i>-columns for DH,X,Y,Z,var,sec var</i>
200 8000	<i>- trimming limits</i>
1	<i>option:0=grid,1=cross,2=jackknife</i>
Xvkres4.dat	<i>-file with jackknife data</i>
1 2 3 4 0	<i>-columns for X,Y,Z,vr and sec var</i>
1	<i>-debugging level: 0,1,2,3</i>
Kt3dres4.dbg	<i>-file for debugging output</i>
Kt3dres4.out	<i>-file for kriged output</i>
8 421125 100	<i>-nx,xmn,xsiz</i>
7 6588687 100	<i>-ny,ymn,ysiz</i>
19 -5550 300	<i>-nz,zmn,zsiz</i>
9 9 9	<i>-x,y and z block discretization</i>
1 4	<i>-min, max data for kriging</i>
0	<i>-max per octant (0-> not used)</i>
2988 2190 3726	<i>-maximum search radii</i>
210 90 0.0	<i>-angles for search ellipsoid</i>
1 2.302	<i>-0=SK,1=OK,2=non-st SK,3=exdrift</i>
0 0 0 0 0 0 0 0 0	<i>-drift: x,y,z,xx,yy,zz,xy,xz,zy</i>
0	<i>-0, variable; 1, estimate trend</i>
Vaziot.dat	<i>-gridded file with drift/mean</i>
0	<i>- column number in gridded file</i>
1 0	<i>- nst, nugget effect</i>
1 288000 210 90 0	<i>- it, cc, ang1, ang2, ang3</i>
2988 2190 3726	<i>- a_hmax, a_hmin, a_vert</i>

3.5 Validação cruzada

A técnica de validação cruzada é usada para testar o modelo nos pontos amostrais do banco de dados, isto é, testar o modelo para valores reais. Consiste em retirar um valor real do banco de dados e estimar o seu valor através do modelo estimado pela variografia. Este procedimento é repetido para todos os valores do banco de dados. A validação é feita comparando os valores estimados com os valores reais. A estimativa é realizada usando o módulo “KT3D” do *software* GSLIB (*Geostatistical Software Library*) com os parâmetros mostrados nas tabelas 3.20, 3.21 e 3.22 para as três áreas do Prospecto Volta Grande (áreas 1, 2 e 4). Nesse sentido comparamos o histograma de frequência dos valores reais de resistividade aparente com os histogramas dos valores estimadas para suas respectivas áreas; analisamos a distribuição do erro da estimativa, isto é a distribuição dos valores da diferença (valor real – valor estimado); analisamos o comportamento do gráfico *scatterplot* dos valores reais *versus* valores estimados e observando a correlação entre eles.

Os modelos variográficos definido para as áreas 1, 2 e 4 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS) geram conjuntos de valores estimados de resistividade aparente. Esses valores estimados têm características estatísticas muito próximas das características dos dados originais, como pode ser visto pela comparação dos seus respectivos resumos estatísticos dos dados (tabelas 3.23, 3.24 e 3.25) e histogramas de distribuição de frequência mostrados nas figuras 3.71; 3.73 e 3.75 para as áreas 1, 2 e 4 do Prospecto Volta Grande, respectivamente.

Os histograma de distribuição das frequência do erro (valor real – valor estimado) para as área 1, área 2 e área 4 apresentam forma muito semelhante à distribuição gaussina. Isso é os valores de erro distribuem-se de maneira uniforme em torno do valor da media do erro, que está próxima de zero. Esses valores são: 3.4 na área 1; 13 na área 2 e 11 na área 4, respectivamente. e com desvio padrão muito baixo (201.1na área 1; 343.4 na área 2 e 184 na área 4). Os coeficientes de correlação altos (89.6 % na área 1; 84.4 % na área 2 e 84.4 % na área 4) indicam a acuracidade do modelo variográfico definido a plena

possibilidade de sua aceitação como modelo de estimativa dos valores de resistividade nas respectivas áreas.

Tabela 3.23. Resumo estatístico dos dados de resistividade da área 1, valores reais e valores estimados.

	Área 1 dados reais	Área 1 valores estimados
No de dados	836	836
Valor mínimo	275,50	347,40
Quartil inferior	666,10	702,07
Mediana	941,80	982,60
Quartil superior	1370,01	1368,90
Valor máximo	7914	4983,07
Média	1128,47	1111,61
Desvio padrão	746,38	588,93
Coef. de variação	0,66	0,53

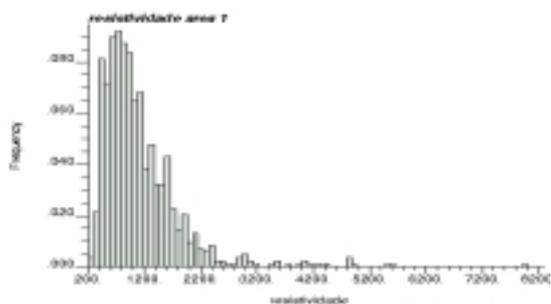
Tabela 3.24. Resumo estatístico dos dados de resistividade da área 2, valores reais e estimados.

	Área 2 dados reais	Área 2 valores estimados
No de dados	2060	2051
Valor mínimo	214	327
Quartil inferior	1147,5	1256,57
Mediana	1727,5	1711,45
Quartil superior	2376	2165,98
Valor máximo	3199	3164,22
Média	1751,4	1716,52
Desvio padrão	750,6	583,90
Coef. de variação	0,4	0,34

Tabela 25. Resumo estatístico dos dados de resistividade da área 4, valores reais e valores estimados.

	Área 4 dados reais	Área 4 valores estimados
No de dados	1291	1291
Valor mínimo	211,30	272,93
Quartil inferior	561,40	588,04
Mediana	809,80	827,18
Quartil superior	1160,74	1141,15
Valor máximo	5642	2916,76
Média	945,48	937,43
Desvio padrão	537,45	453,320.6
Coef. de variação	0,57	0,48

A



B

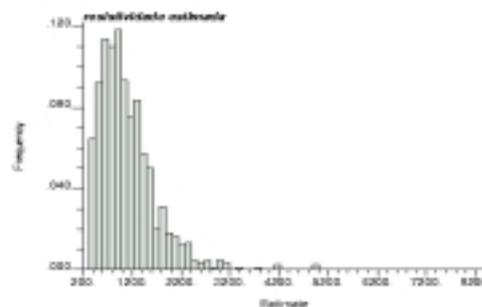


Figura 3.71 - histograma de frequência resistividade, área 1 do Prospecto Volta Grande : A) valores aritméticos reais; B) valores estimados

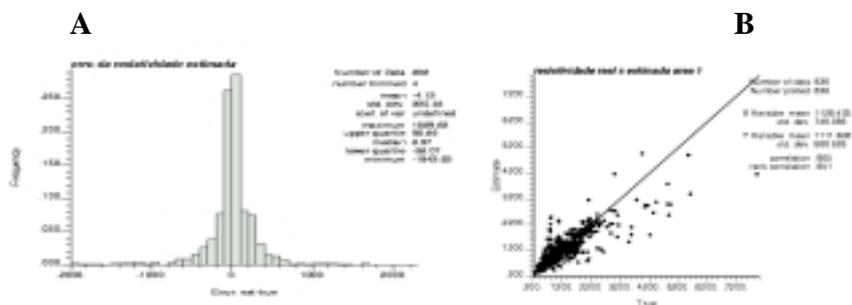


Figura 3.72 - A) histograma de frequência do erro (resistividade aparente real – resistividade aparente estimada), área 1 do Prospecto Volta Grande; B) *scatterplot* valor real x valor estimado, área 1 do Prospecto Volta Grande.

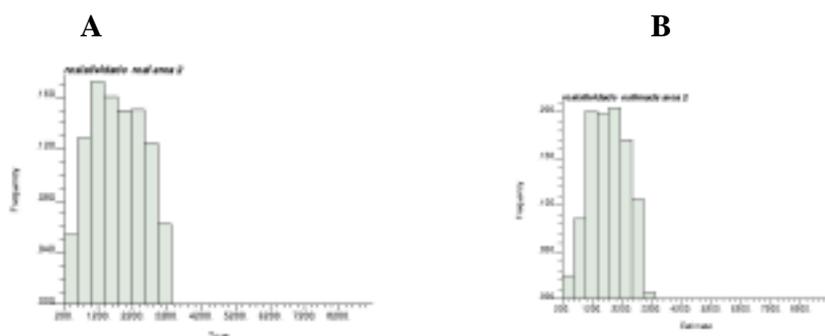


Figura 3.73 - Histograma de frequência resistividade, área 2 do Prospecto Volta Grande: A) valores aritméticos reais; B) valores estimados



Figura 3.74 - A) histograma de freqüência do erro (resistividade aparente real – resistividade aparente estimada), área 2 do Prospecto Volta Grande; B) *scatterplot* valor real x valor estimado, área 2 do Prospecto Volta Grande.

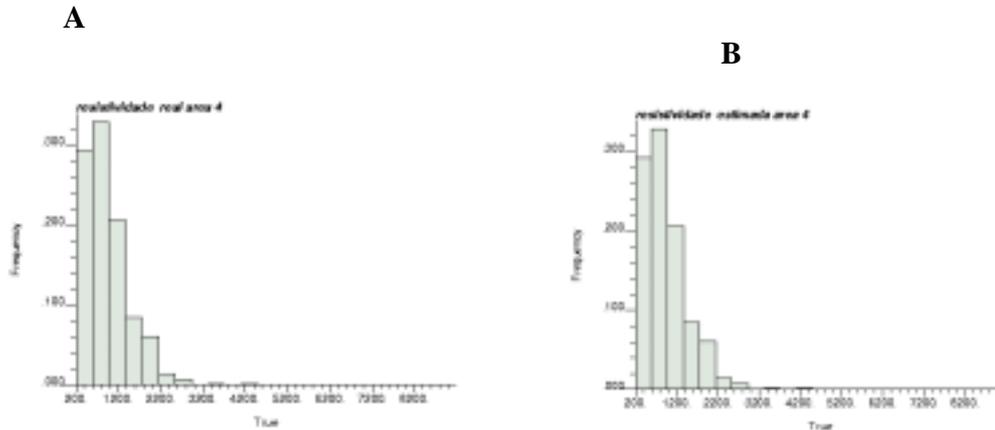


Figura 3.75 - Histograma de freqüência resistividade, área 4 do Prospecto Volta Grande: A) valores aritméticos reais; B) valores estimados

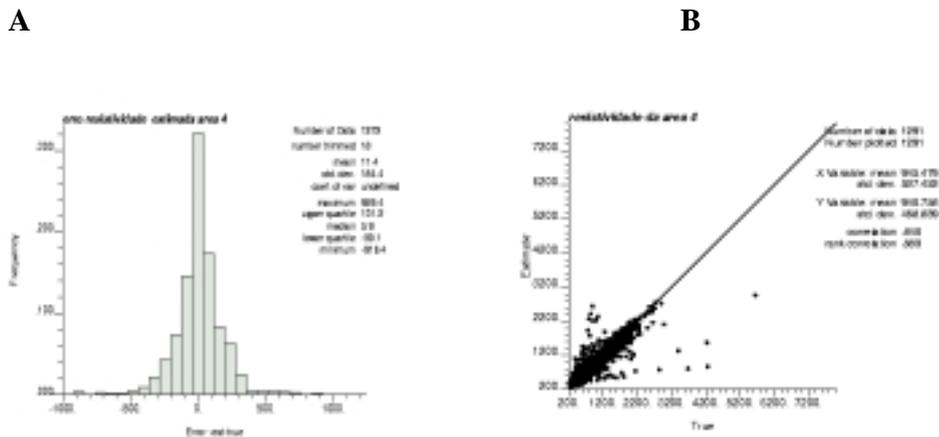


Figura 3.76 - A) Histograma de freqüência do erro (resistividade aparente real – resistividade aparente estimada), área 4 do Prospecto Volta Grande; B) *scatterplot* valor real x valor estimado, área 4 do Prospecto Volta Grande.

3.5 Correlação entre resistividade aparente e teores de Au e Cu no Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS)

Duas variáveis medidas no mesmo espaço 3D, com pontos de amostragem coincidentes, podem mostrar algum grau de semelhança na variação de valores. Essa semelhança é expressa pela correlação entre as duas variáveis. A correlação linear entre duas variáveis (x,y) é uma média numérica, não dimensional, da relação linear entre duas variáveis aleatórias; isto é, “ x ” e “ y ” são ambas aleatórias, geralmente com distribuição normal. A regressão linear entre uma variável dependente “ y ” e outra independente “ x ” é uma relação obtida com dados de uma amostra de pares de valores (x,y) , onde os valores de x são escolhidos de antemão, x não é uma variável aleatória, e os valores de y , para cada um de x , são aleatórios e geralmente com distribuição normal. O coeficiente de correlação linear “ r ” fornece uma medida da relação existente entre duas variáveis aleatórias, (x, y) ; “ R ” varia de -1 a $+1$. Os valores de “ r ” igual a $+1$ ou a -1 correspondem ao caso de uma relação perfeita entre “ x ” e “ y ”. Nas geociências, freqüentemente algumas variáveis são relacionadas com outras, e é possível utilizar essa vantagem. Nesse trabalho, busca-se estabelecer a correlação entre a variável independente “resistividade aparente” e as variáveis dependentes “teores de Au e teores de Cu”. Sabe-se de antemão que os dados da prospecção geofísica (valores de resistividade aparente) são mais abundantes do que os dados da prospecção geoquímica (teores de Au e teores de Cu). Assim, pode-se usar a correlação cruzada entre as variáveis e estimar o volume das estruturas condutivas projetando valores de teores de Au e Cu em cada estrutura.

A base teórica para correlação entre os teores de Au e Cu (variável geoquímica) e os valores de resistividade aparente (variável geofísica) está ligada ao processo geológico de mineralização do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS). O Au e o Cu das ocorrências relacionadas ao Complexo Intrusivo Lavras do Sul estão ligados à minerais sulfetados em zonas de alteração hidrotermal hospedados em rochas graníticas e vulcânicas –vulcanoclásticas (Mexias, 1990; Mexias *et al.*, 1990a; Mexias *et al.*, 1990b; Strieder *et al.*, 2001). Essa condição garante um contraste significativo de resistividade entre zonas

hidrotermalizadas e as rochas hospedeiras, na medida em que os sulfetos disseminados na zona hidrotermalizada imprimem condições de maior condutividade(menor resistividade).

O levantamento geofísico, realizado pela *Zonge Engineering and Research Organization*, é apresentado nas figuras 1.6 e 3.2 a 3.7 e a campanha de sondagem é apresentada nas figuras 3.8 a 3.10. O estabelecimento de pontos cujos valores de resistividade aparente e teores de Au e Cu tenham mesmas coordenadas (XYZ) exigem procedimentos tais como: a) estimativa dos valores de resistividade aparente para blocos de pequenas dimensões; b) cálculos das coordenadas (XYZ) do centróide de cada amostra com teores de Au e Cu, considerando os valores azimuth, ângulo de mergulho e das coordenadas da boca-do-furo de sondagem ; c) cálculo da média dos teores de Au e Cu cujas coordenadas XYZ estejam dentro de cada bloco de resistividade.

A estimativa dos valores de resistividade aparente em seus respectivos blocos foi realizada com uso da subrotina kt3d do *software* GSLIB, cujos parâmetros estão definidos nas tabelas 3.19, 3.20 e 3.21. A amostragem nos furos de sondagem foi feita com o espaçamento regular de um metro. Em consequência disso, para representação 3D, considera-se como coordenadas XYZ das amostras as coordenadas de seus respectivos centróides com os valores de teores de Au e Cu correspondentes.

O estabelecimento das coordenadas do centróide de cada amostra de Au e Cu leva em conta: a) a distância da boca-do-furo até o centro da amostra (d_A); b) a projeção da distância da boca-do-furo até o centro da amostra no plano horizontal (d_H); c) as componentes de d_H segundo os eixos X e Y (d_{Hx} , d_{Hy}) e d) a projeção da distância da boca-do-furo até o centro da amostra no plano vertical. As coordenadas de cada amostra, representadas pelas coordenadas dos seus respectivos centróides, são definidas pelas coordenadas da boca-do-furo e pelas projeções das distâncias da boca-dos-furos até o centro das amostras sobre os eixos XYZ:

$$\mathbf{X}_{\text{amostra}} = \mathbf{X}_{\text{boca-do-furo}} + \mathbf{d}_{Hx} \quad 3.3$$

$$\mathbf{Y}_{\text{amostra}} = \mathbf{Y}_{\text{boca-do-furo}} + \mathbf{d}_{Hy} \quad 3.4$$

$$\mathbf{Z}_{\text{amostra}} = \mathbf{Z}_{\text{boca-do-furo}} - \mathbf{d}_v \quad 3.5$$

onde,

d_A é a distância da boca do furo até o centro de cada mostra

d_H é projeção de d_A sobre o plano horizontal dada por: $d_H = d_A \times \cos \text{dip}$

d_V é projeção de d_A sobre o plano vertical dada por: $d_V = d_A \times \cos (90 - \text{dip})$

Os valores de d_{Hx} e d_{Hy} são positivos ou negativos de acordo com o quadrante em que se localiza o azimute do furo de sondagem. Desse modo, d_{Hx} é positivo no I e no II quadrantes (azimutes que variam de 0° a 90° e variam de 90° a 180° , respectivamente); ainda, d_{Hx} é negativo no III e IV quadrantes (azimutes que variam de 180° a 270° e de 270° a 360° , respectivamente). Por outro, os valores de d_{Hy} são positivos no I e IV quadrante e negativos no II e III quadrantes. Assim, os cálculos das coordenadas XY dos centróides das amostras, como indicados acima, podem ser realizados como segue:

a) Azimute no I^o Quadrante ($0^\circ - 90^\circ$)

$$X_{\text{amostra}} = X_{\text{boca-do-furo}} + d_H \times \cos (90 - Az) \quad 3.6$$

$$Y_{\text{amostra}} = Y_{\text{boca-do-furo}} + d_H \times \cos \quad 3.7$$

b) Azimute no II^o Quadrante ($90^\circ - 180^\circ$)

$$X_{\text{amostra}} = X_{\text{boca-do-furo}} + d_H \times \cos(Az - 90) \quad 3.8$$

$$Y_{\text{amostra}} = Y_{\text{boca-do-furo}} - d_H \times \cos (180^\circ - Az) \quad 3.9$$

a) Azimute no III^o Quadrante ($180^\circ - 270^\circ$)

$$X_{\text{amostra}} = X_{\text{boca-do-furo}} - d_H \times \cos(270^\circ - Az) \quad 3.10$$

$$Y_{\text{amostra}} = Y_{\text{boca-do-furo}} - d_H \times \cos (Az - 180^\circ) \quad 3.11$$

a) Azimute no IV^o Quadrante ($270^\circ - 360^\circ$)

$$X_{\text{amostra}} = X_{\text{boca-do-furo}} + d_H \times \cos(Az - 270^\circ) \quad 3.12$$

$$Y_{\text{amostra}} = Y_{\text{boca-do-furo}} + d_H \times \cos (360^\circ - Az) \quad 3.13$$

A análise integrada dos furos de sondagem com os dados de teores de Au e Cu com os blocos estimados de resistividade aparente, permite a identificação dos valores de resistividade aparente correspondentes a cada furo de sondagem. Como um mesmo bloco de resistividade aparente tem mais de uma amostra com diferentes valores de teores de Au

e Cu, faz-se a médias dos teores de Au e Cu. Desse modo, tem-se pontos com coordenadas (XYZ), com resistividade aparente e com teores de Au e Cu correspondentes. É importante destacar que o suporte amostral para resistividade aparente é diferente do suporte amostral para teores de Au e Cu. Enquanto para resistividade aparente construímos blocos de 100 x 100 x 300 (m³) para teores de Au e Cu as amostras são tomadas com comprimento de um metro ao longo do furo de sondagem. Outro aspecto de notável destaque, quando compara-se esses dois conjuntos de dados, se refere à extensão da área coberta pela amostragem. Enquanto a resistividade aparente é o resultado da amostragem da estrutura condutiva em toda sua extensão, a amostragem para teores de Au e Cu é feita através de furos de sondagem que atingem as estruturas condutivas apenas tangencialmente. Estes fatores não invalidam a discussão da correlação entre essas variáveis a partir dos dados disponíveis. Pelo contrário, reforçam a necessidade de detalhamento da pesquisa, com amostragem para teores de Au e Cu que, por um lado, sejam mais representativas das estruturas condutivas e cubram uma maior extensão das mesmas e analise o comportamento dessa variável ao longo das zonas de menor continuidade identificadas pela análise variográfica e, por outro, contenham o maior número de pontos com coordenadas (XYZ) coincidentes com aquelas do levantamento de resistividade aparente.

As figuras 3.77 a 3.82 são obtidas a partir da utilização do módulo gráfico da planilha Excel. Os ajuste feitos eliminam as amostras com valores altos erráticos para teores de Au e Cu. Essas figuras mostram a correlação entre a variável resistividade aparente e teores de Au e Cu nas áreas 1, 2 e 4 do Prospecto Volta Grande (Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS) através da reta de regressão, coeficiente de correlação linear “r” e pares de valores utilizados para o ajuste.

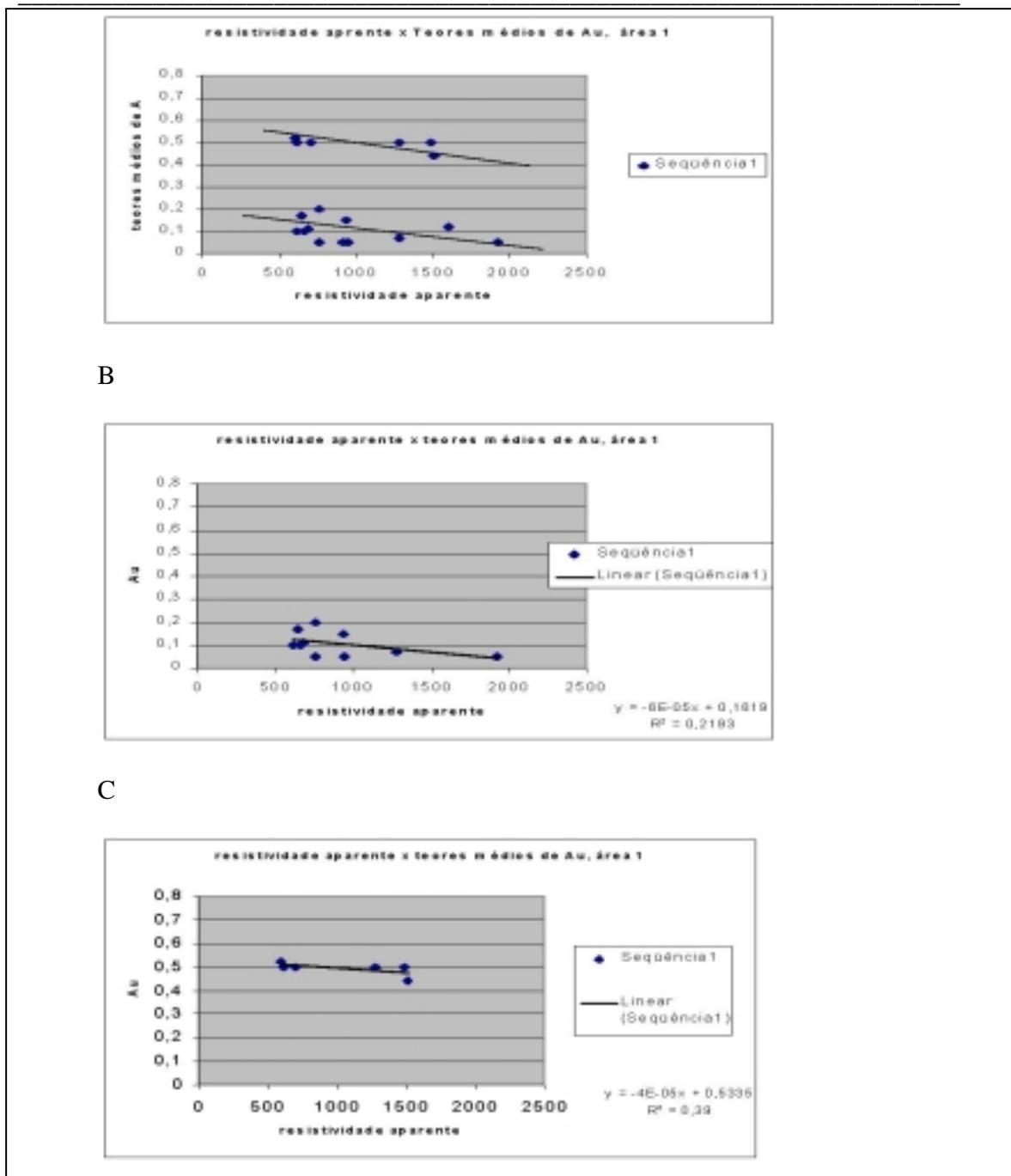


Figura 3.77 - Gráfico da correlação da resistividade aparente x Teores de Au, na área 1 do Prospecto Volta Grande : A) retas de regressão sugeridas para ajuste dos pontos de correlação; B) regressão linear para ajuste dos pontos do conjunto inferior; regressão linear para ajuste dos pontos do conjunto superior.

A

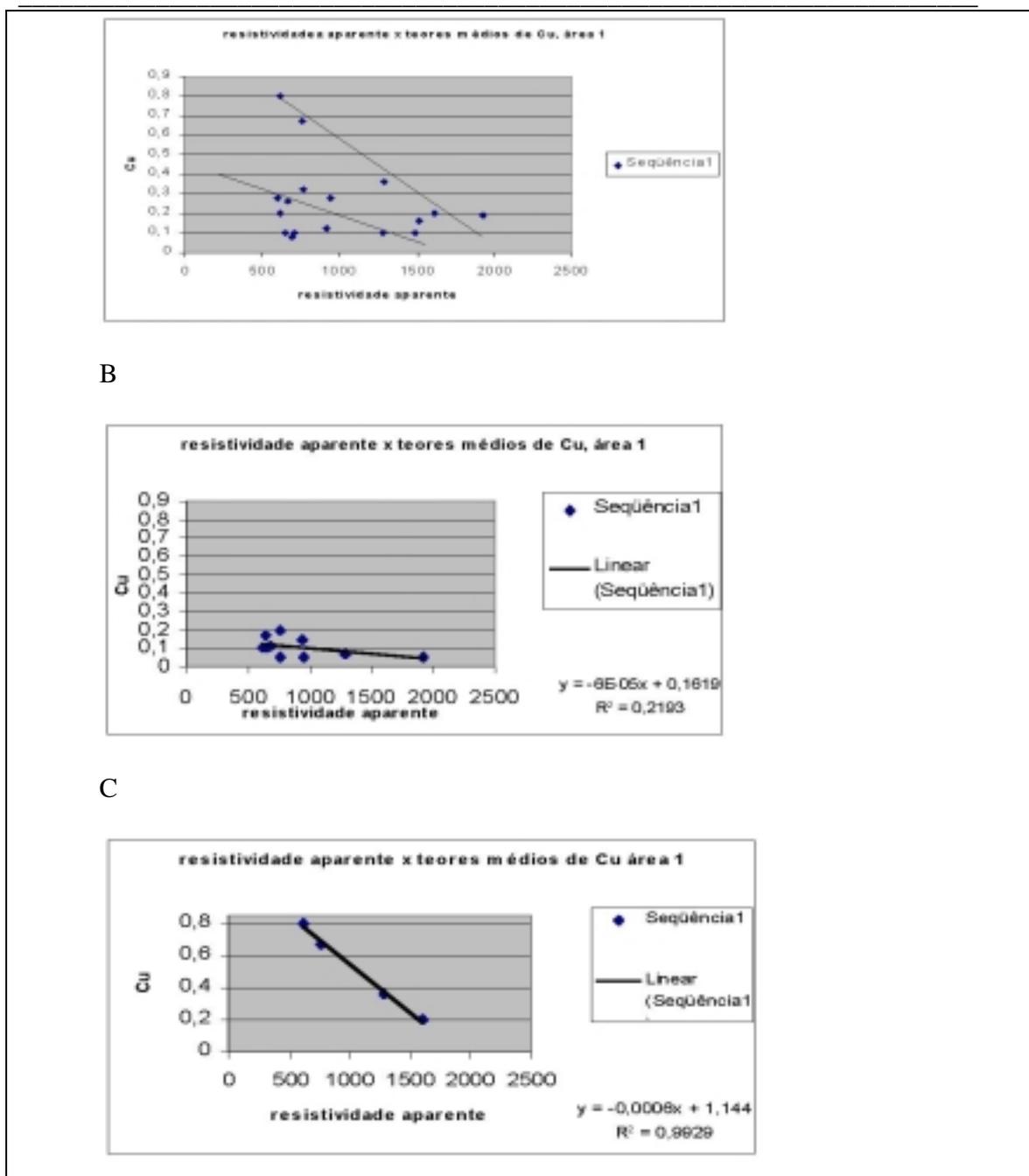


Figura 3.78 - Gráfico da correlação da resistividade aparente x Teores de Cu, na área 1 do Prospecto Volta Grande: A) retas de regressão sugeridas para ajuste dos pontos de correlação; B) regressão linear para ajuste dos pontos do conjunto inferior; C) regressão linear para ajuste dos pontos do conjunto superior.

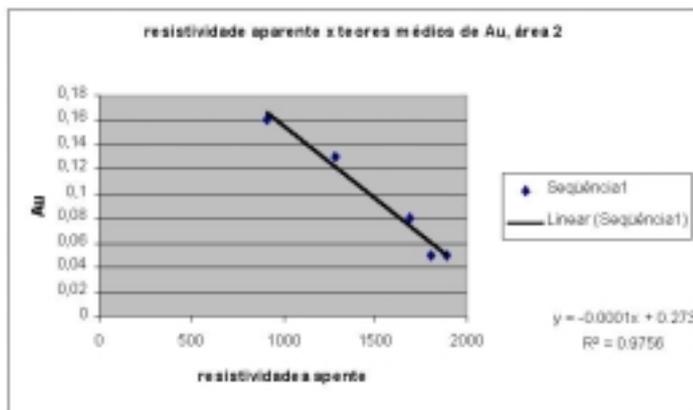


Figura 3.79 - Gráfico da correlação da resistividade aparente x Teores de Au, na área 2 do Prospecto Volta Grande (Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS)

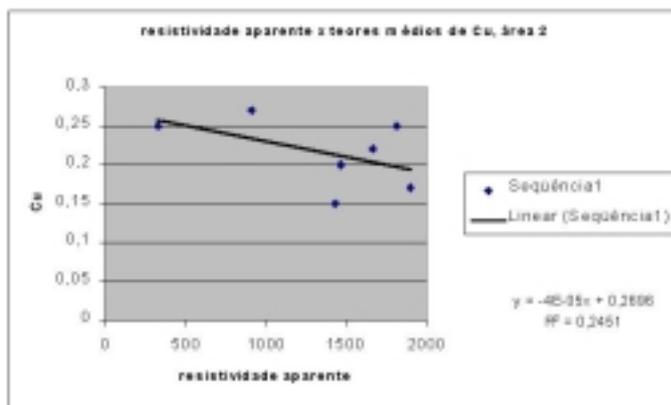


Figura 3.80 - Gráfico da correlação da resistividade aparente x Teores de Cu, na área 2 do Prospecto Volta Grande (Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS)

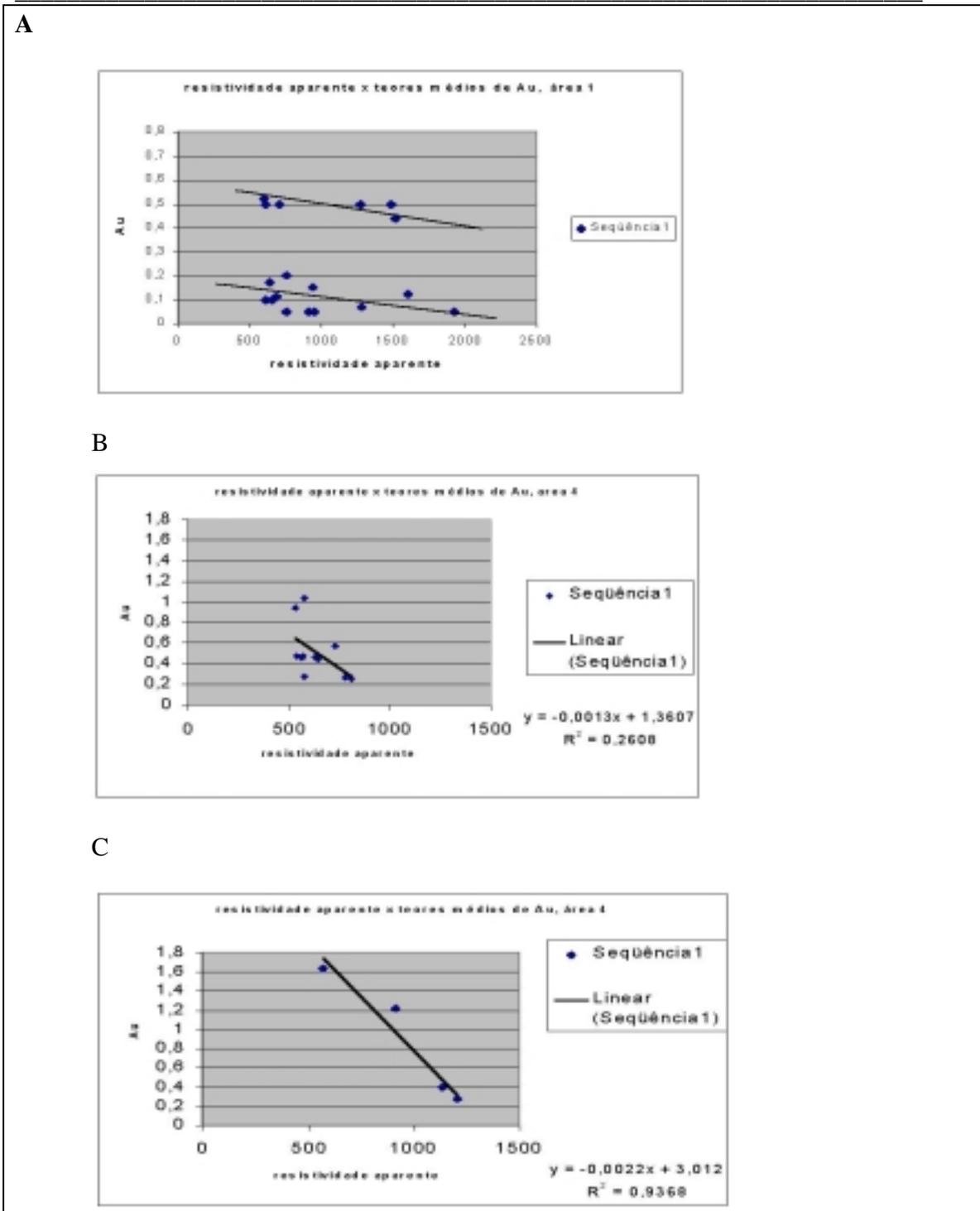


Figura 3.81 - Gráfico da correlação da resistividade aparente x Teores de Au, na área 4 do Prospecto Volta Grande: A) retas de regressão sugeridas para ajuste dos pontos de correlação; B) regressão linear para ajuste dos pontos do conjunto inferior; C) regressão linear para ajuste dos pontos do conjunto superior.

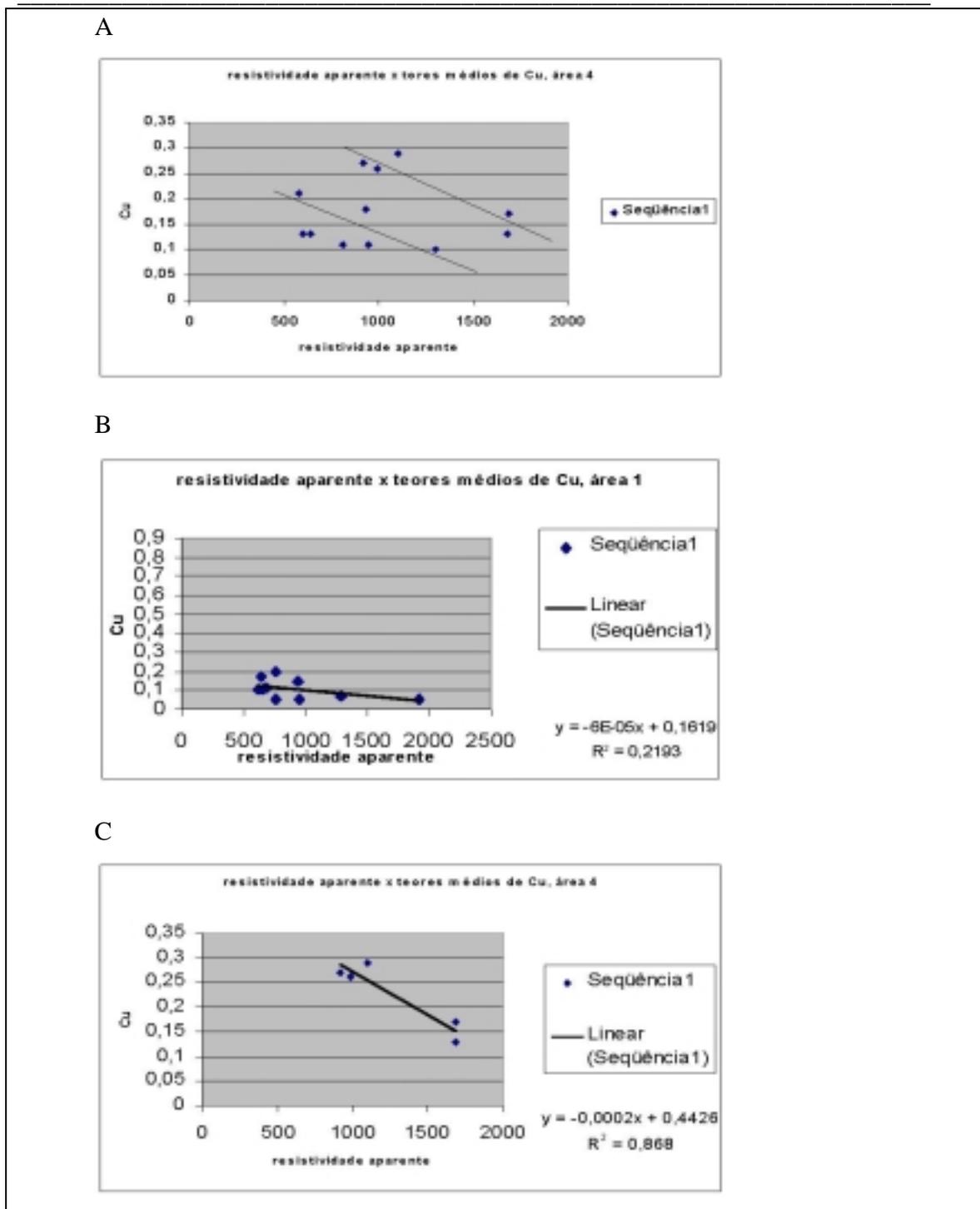


Figura 3.82 - Gráfico da correlação da resistividade aparente x Teores de Cu, na área 4 do Prospecto Volta Grande: A) retas de regressão sugeridas para ajuste dos pontos de correlação; B) regressão linear para ajuste dos pontos do conjunto inferior; C) regressão linear para ajuste dos pontos do conjunto superior.

O coeficiente de correlação linear “r” fornece uma medida da relação existente entre as variáveis resistividade e teores de Au (figuras 3.78, 3.80 e 3.82) e resistividade x teores de Cu (figuras 3.79, 3.81 e 3.83), nas áreas 1, 2 e 4 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS). Essas figuras sugerem a existência de duas retas de regressão linear para ajustar as relações entre as variáveis nas áreas 1 e 4 e, apenas uma reta para a regressão entre as variáveis na área 2. Os gráficos de correlação linear mostram que as retas de regressão linear são melhores ajustados para o caso das variáveis resistividade aparente x teores de Au, o que está expresso pelo coeficiente de correlação linear “r”. Porém o aspecto mais importante desses gráficos está no fato de ser possível identificar, após a modelagem de variáveis com suportes amostrais muito distintos, pelo menos dois agrupamentos de dados. Esse aspecto está, necessariamente, ligado com toda a análise e discussão dos parâmetros estatísticos básicos (item 3.2) na medida que os histogramas de frequências revelaram, em menor ou maior grau, uma tendência a bi-modalidade. O aparecimento de dois diferentes conjuntos de valores médios para os teores de Au e Cu nas áreas 1 e 4 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS), indica a existência de duas populações dentro do mesmo espaço amostral. Essas duas populações são distinguidas por diferentes teores de Au e Cu para um mesmo intervalo de valores de resistividade; indicam, portanto, a existência de fenômenos/processos de mineralização superpostos, mas cada qual enriquecido distintamente em sua carga metálica (Au e Cu). A definição de dois teores de Au, ou de Cu para um mesmo valor de resistividade aparente (variável independente) sugere que o aumento de condutividade nas zonas de alteração hidrotermal não está relacionado com a carga metálica (metais básicos e Au) de interesse econômico, mas com mudanças nas propriedades elétricas das rochas alteradas hidrotermalmente, quer seja a própria ganga silicificada e/ou carbonatada, quer seja pela presença de sulfetos disseminados com e sem metais de interesse econômico (por exemplo, pirita). A existência de duas curvas de ajuste para correlação da resistividade aparente e dos teores de Au e Cu nas áreas 1 e 4 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS) destaca a ocorrência de pelo menos dois pulsos hidrotermais. A superposição de pulsos hidrotermais com diferentes características composicionais, de temperatura e/ou pressão parcial de voláteis numa mesma estrutura geológica (zona de fratura, por exemplo) é um fato usual, principalmente com relação a ocorrências minerais ligadas à intrusão granítica do tipo Complexo Intrusivo Lavras do Sul

®. Esse tipo de situação (superposição de pulsos hidrotermais numa mesma estrutura de controle de depósito mineral) é usualmente conhecida como telescopagem Guilbert & Park, 1996; Augustithis, 1995; Jensen & Alan, 1981). Essa situação também é caracterizada pela telescopagem sucessiva de pulsos de menor temperatura, como decorrência da perda de calor da intrusão granítica adjacente. As ocorrências de Au e Cu no Complexo Intrusivo Lavras do Sul (RS) estão associadas às estruturas do tipo *lode-Au-quartz* e relacionados à expressivas de alteração hidrotermal. Strieder *et al.*, em preparação, identifica dois tipos distintos de zonas de alteração no CILS: i) zona hidrotermal do tipo Aurora; ii) zona hidrotermal do tipo Valdo Teixeira. A zona hidrotermal do tipo Aurora representa uma fase do tipo mesotermal. Os principais minerais dessa fase são: anfibólio, calcita, quartzo, e calcedônia, pirita, calcopirita, magnetita, galena e, raro, esfalerita. A zona hidrotermal do tipo Valdo Teixeira representa diminuição na temperatura e mudança na composição do fluido de mineralização (fase epitermal). Os minerais dessa fase são principalmente sericita, quartzo, pirita e, raro, galena. A alteração registrada na área 2 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS) é do tipo Aurora (Strieder *et al.*, em preparação), enquanto nas áreas 1 e 4 a alteração é caracterizada pela superimposição dos dois tipos identificados (Mexias, 1990).

3. 6 Análise integrada de dados na pesquisa de metais básicos Au e Cu no Prospecto Volta Grande (Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS)

A pesquisa de metais básicos e Au no Prospecto Volta Grande (Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS), como toda pesquisa mineral, em qualquer nível de exploração, está baseada na identificação e na análise de “zonas anômalas”. Para os métodos indiretos (prospecção geofísica – valores de resistividade aparente adquiridos *pelo Dispositivo Controlled Source Audio-frequency Magneto-telluric - CSAMT*). Essas “zonas anômalas” são áreas (2D) ou volumes (3D) que representam pontos onde a variável de interesse assumem valores abaixo (anomalias negativas) de um determinado valor de referência. (resistividade aparente $\leq 600\Omega m$). Nesse trabalho de modelagem, essa definição, no entanto, não pretende ter implicação econômica, mas objetiva desvendar a estrutura 3D dos corpos mineralizados e a correlação entre os métodos diretos e indiretos na prospecção mineral.

36.1 Definição da geometria das estruturas condutivas (mineralizadas)

Nessa seção buscamos identificar os valores de resistividade aparente determinados na prospecção geofísica que tenham correlação com os valores significativos de Au e Cu (teores $>0\text{ppm}$ e teores $>0\%$, respectivamente). A explicitação das respostas esperadas frente às estruturas condutivas (estruturas mineralizadas) é fator importantíssimo nos processos de integração de dados para garantir a interpretação adequada das respostas e das correlações. Os dados de prospecção geofísica são particularmente susceptíveis às influências de outros fatores que não sejam, ou estejam diretamente relacionados com as estruturas mineralizadas, pois, a depender do método, várias podem ser as fontes para a geração de “zonas anômalas”. A interpretação dos dados geofísicos, portanto, pode requerer a análise conjunta (integração) com dados diretos (teores de Au e Cu) para garantir confiabilidade. Para entender o comportamento da variável nas áreas estudadas, foram construídos perfis com as curvas de isovalores que mostram as distribuições dos valores de resistividade aparente em profundidade nas áreas 1, 2 e 4 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS). As Figuras 3.83, 3.84 e 3.85 são perfis verticais construídos ao longo das linhas que contêm as estações de aquisição dos dados. A análise dos valores de resistividade aparente nesses planos dá uma melhor compreensão da continuidade das estruturas condutivas. Cada linha de localização das estações de aquisição se constituiu num banco de dados para construção do seu perfil. O intervalo de valores de resistividade aparente $\leq 600\Omega\text{m}$, encontrado experimentalmente, é aquele intervalo que apresenta correlação com os maiores valores de teores de Au e Cu. As configurações das curvas nas diferentes áreas (área 1, área 2 e área 4) mostram a característica de verticalidade das estruturas condutivas. Para melhor visualização desta importante característica geológica, estabelecemos uma legenda de cores associada a alguns intervalos de valores de resistividade. Estes intervalos foram estabelecidos, de modo que o menor intervalo esteja associado aos teores de Au e Cu identificados nos furos de sondagem (Figuras 3.78 a 3.83) e de modo que os outros intervalos possam dar uma idéia do comportamento da variável resistividade.. Os intervalos estabelecidos foram : valores menores do que $600\Omega\text{m}$; $600\text{-}800\Omega\text{m}$; $800\text{-}1200\Omega\text{m}$; $1200\text{-}1600\Omega\text{m}$; $1600\text{-}2000\Omega\text{m}$; $2000\text{-}2400\Omega\text{m}$.

Modelagem e avaliação de dados geofísicos e geoquímicos aplicada na pesquisa de metais básicos e Au no Prospecto Volta Grande
(Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS, Brasil).

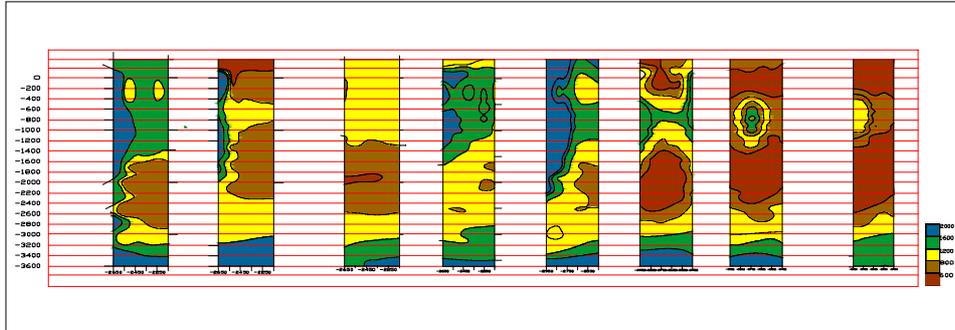
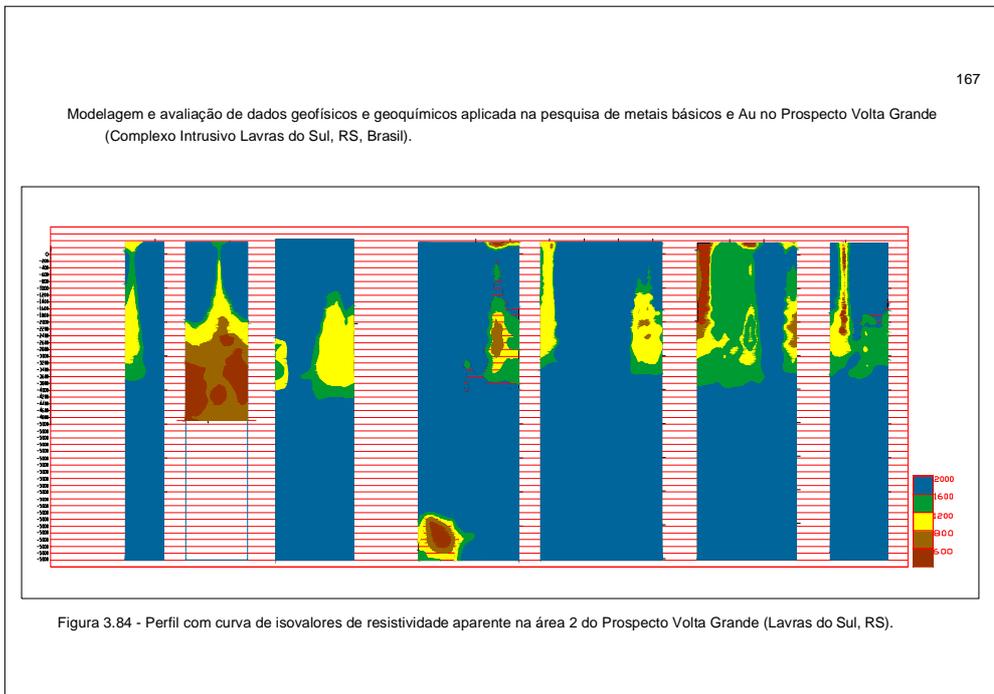
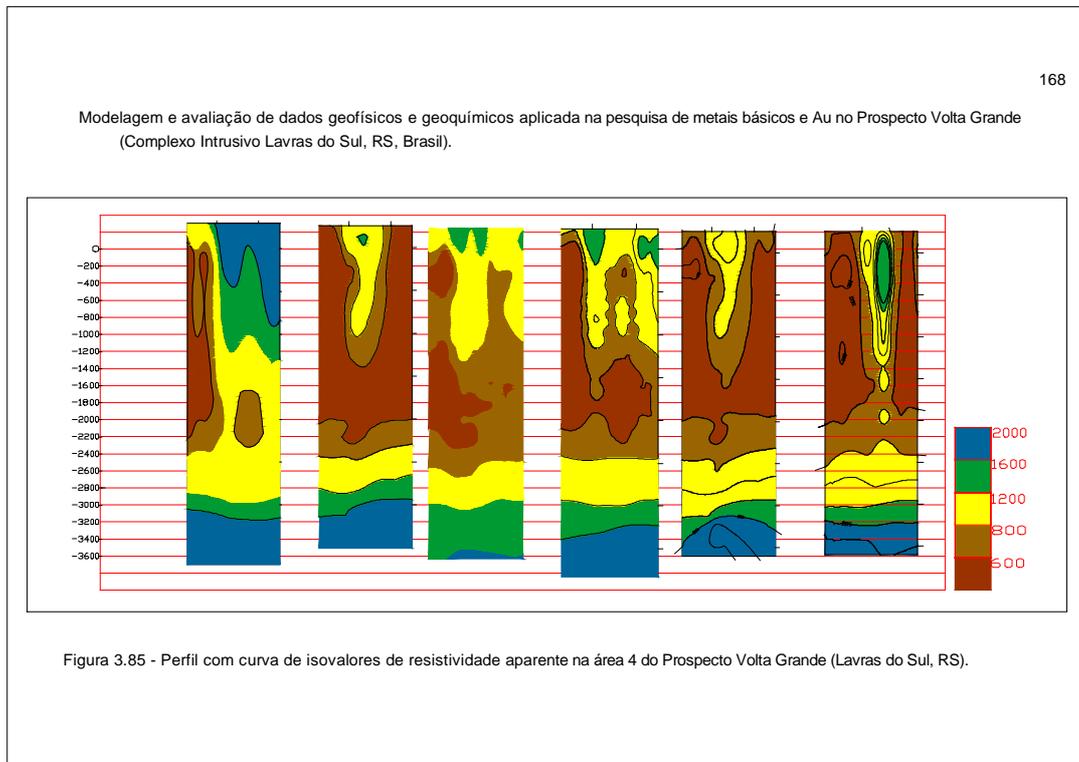


Figura 3.83 - Perfil com curva de isovalores de resistividade aparente na área 1 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS).





CAPÍTULO IV

4. Resultados obtidos na integração de dados geofísicos e geológicos

A indicação para a continuidade dos trabalhos de exploração no Prospecto Volta Grande apontam para a necessidade de desenvolvimento de um bom modelo interpretativo para elucidar a disposição tridimensional das estruturas mineralizadas e, a partir daí, elaborar sugestões para o planejamento de sondagens exploratórias de detalhe no Distrito Mineiro de Lavras do Sul. Esse modelo é um processo de interpretação, previsão e visualização que pode ser identificado como caracterização geológica de recurso. A caracterização de recurso pode ser definida como a determinação da forma, limites e variabilidade de uma entidade geológica. Nesse trabalho, a entidade geológica é representada pelos valores de resistividade aparente $\leq 600\Omega\text{m}$, que têm correlação com valores de teor de Au > 0 ppm e Cu > 0 %. Essas informações são integradas para definir a geometria das estruturas condutivas (estruturas mineralizadas), que serão elementos importantes na programação de novas campanhas exploratórias, com sondagens que vise o modelamento final e a cubagem das estruturas mineralizadas. A integração dos dados é realizada num espaço 3D. A modelagem usada nesse trabalho é classificada por Wheeler & Stoackes (1988) como modelo *Wireframe*. Esses *wireframe* que podem originar um modelo sólido 3D ou modelo de superfícies (Holding & Stoackes, 1990).

O modelo *wireframe* é construído nesse trabalho, com a utilização do software DATAMINE. Esse software é produzido e comercializado pela *Mineral Industries Computing Limited – MICL*, especializada em software e serviços para indústria mineral. O software DATAMINE compreende basicamente três interfaces distintas em funcionamento mas completamente interligadas: 1) DATAMINE propriamente dito que corresponde a uma interface de processamento de cálculos matemáticos; 2) o GUIDE que representa interface gráfica, basicamente para visualização dos arquivos gerados pela interface DATAMINE e edição de arquivos digitalizados e 3) GVP que é uma interface de visualização 3D, disponível dentro do interface GUIDE que permite uma completa visualização tridimensional dos arquivos abertos em GUIDE.

Modelar o *wireframe* consistem em construir perímetros (strigs) que contornam os pontos cujos valores de resistividade aparente estão dentro de um determinado intervalo, situados nos planos verticais ao longo de cada alinhamento de estações de aquisição de dados. O *wireframe* é construído pela união dos perímetros definidos nos planos verticais, gerando para cada intervalo de valores da variável de interesse um sólido 3D ou uma superfície em 3D que delimita a estrutura mineralizada.

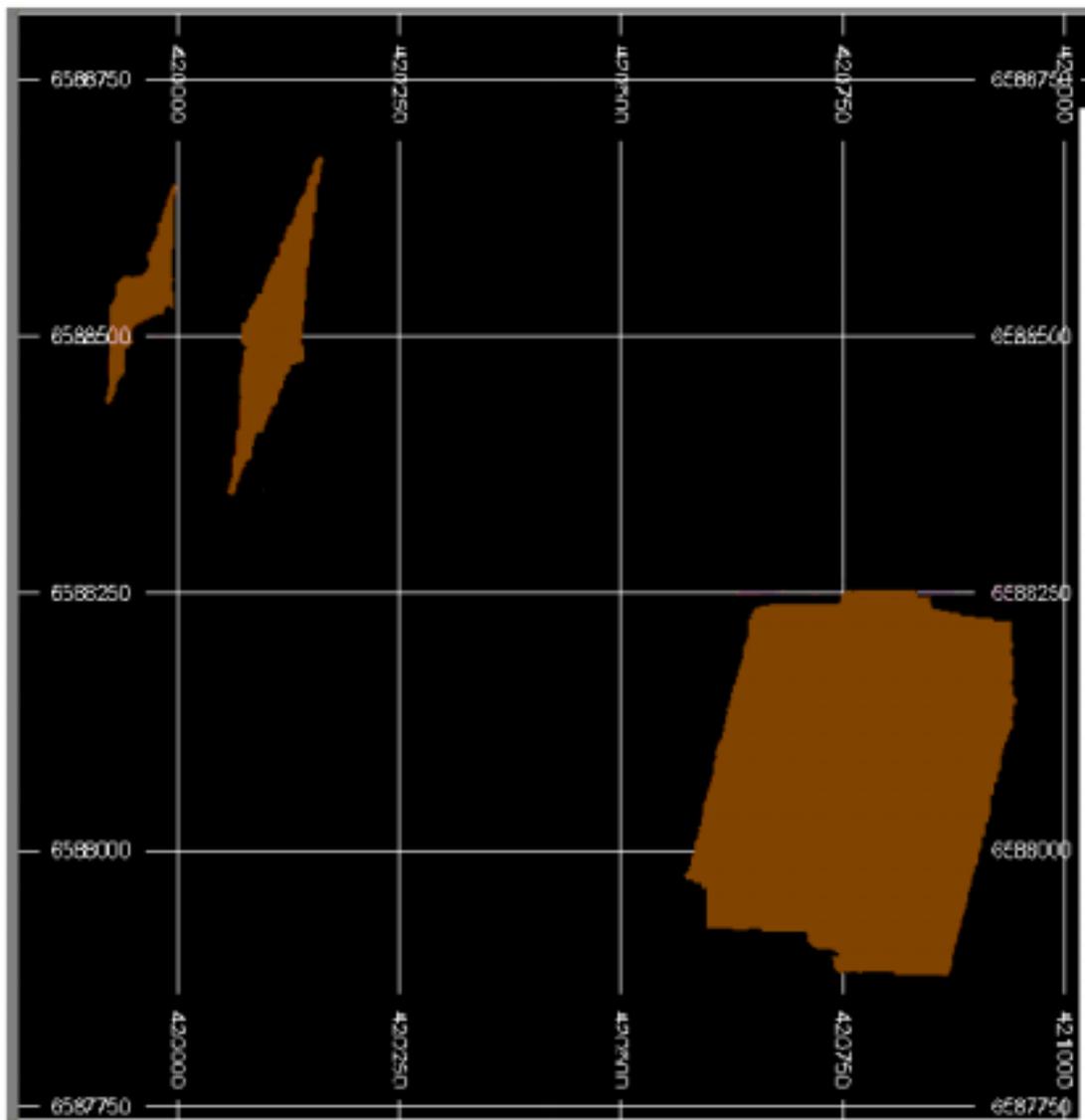


Figura 4.1- Vista em planta (2D) dos wireframe para resistividade aparente $\leq 600\Omega\text{m}$, área 1.

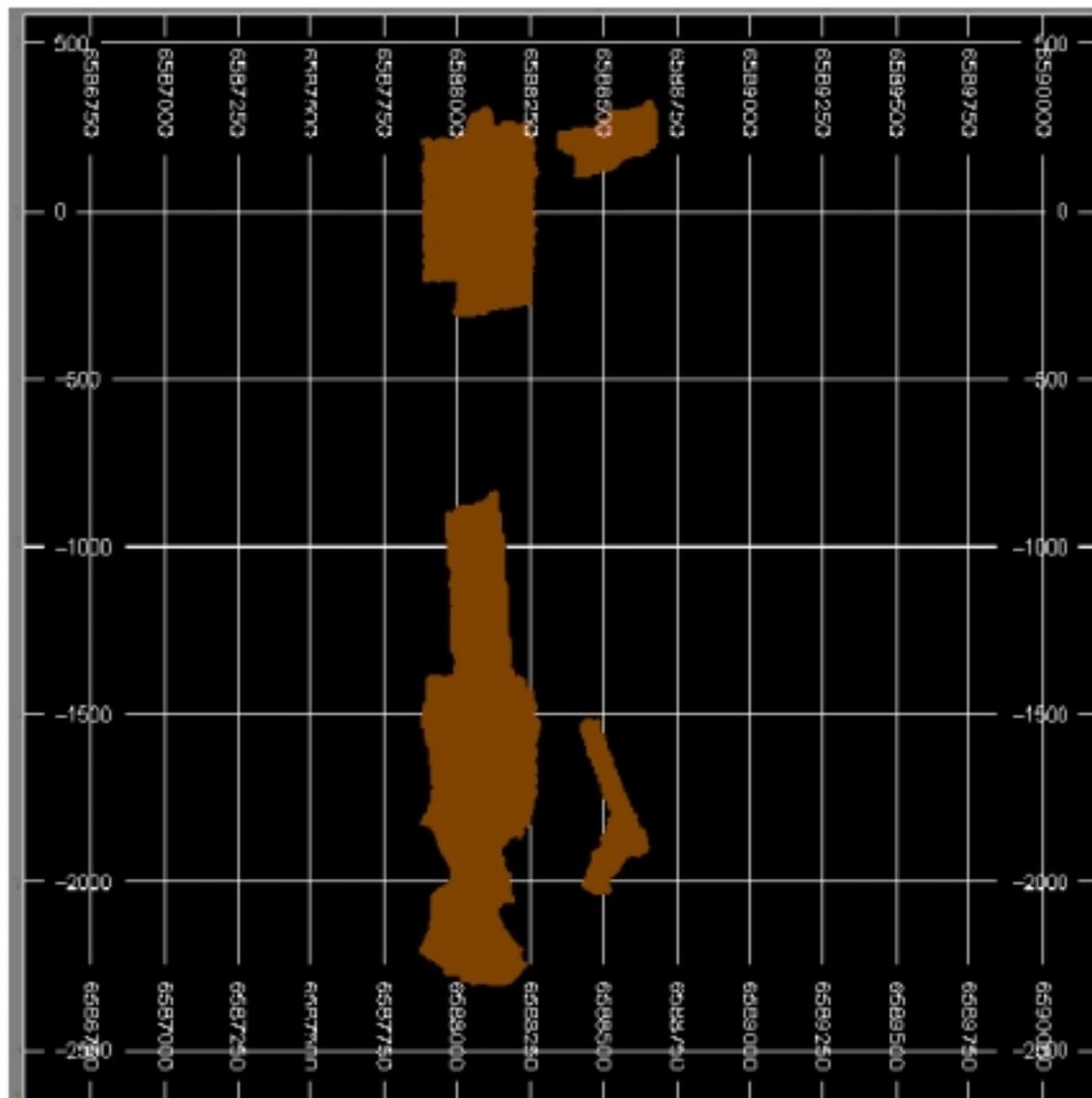


Figura 4.2- Vista em perfil vertical YZ (2D) do wireframe para resistividade aparente $\leq 600\Omega\text{m}$, área 1.

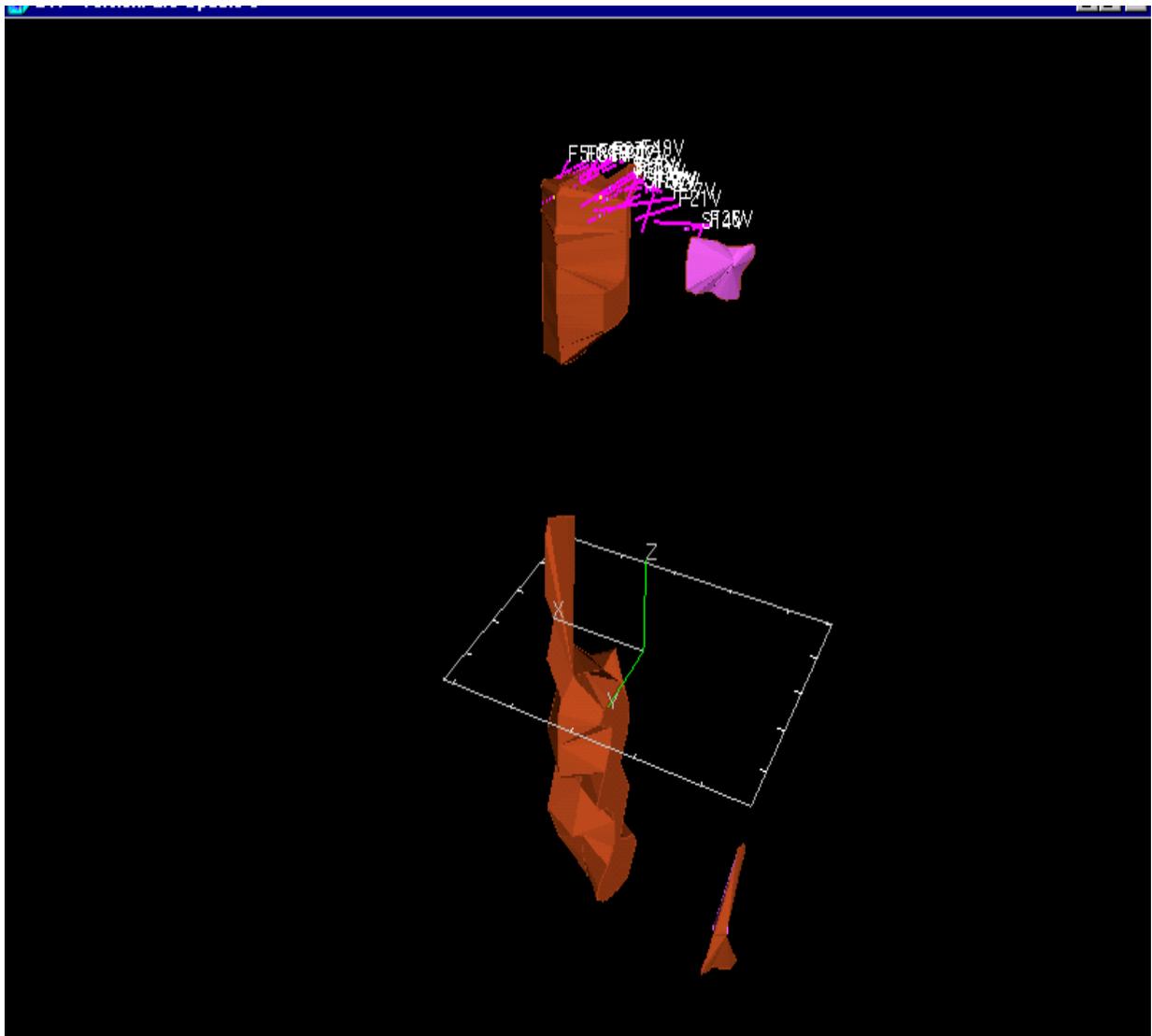


Figura 4.3 - Vista (3D) dos wireframe para resistividade aparente $\leq 600\Omega\text{m}$, área 1.

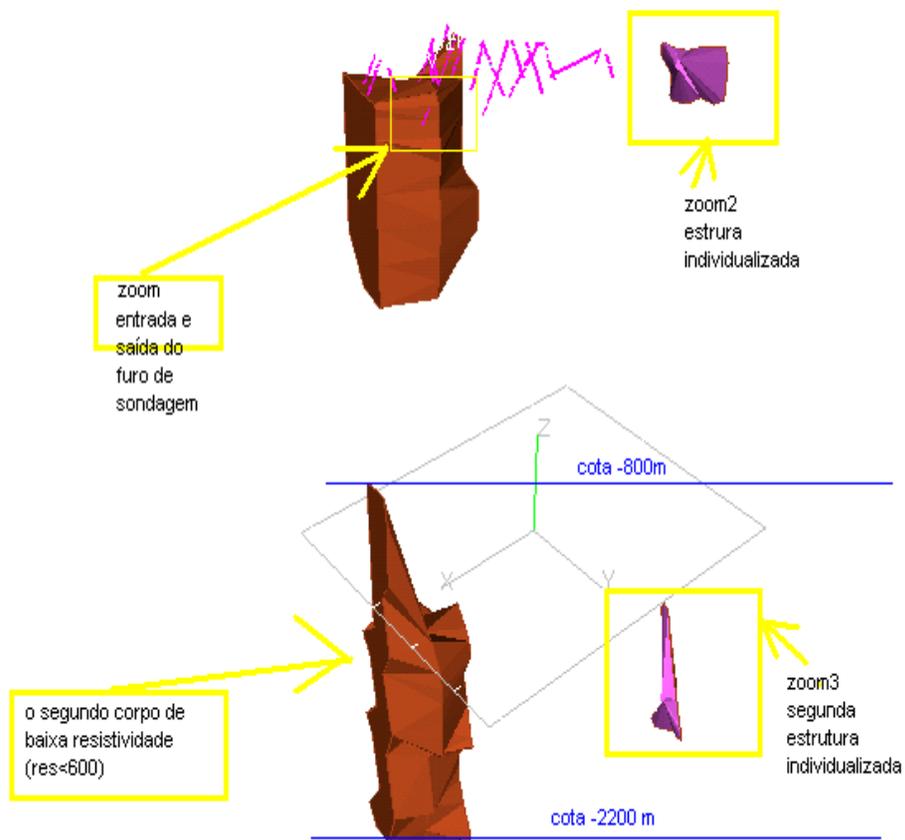


Figura 4.4 - Corpo com valores de resistividade menor do que 600 ohm/m e furos de sondagem, na área 1

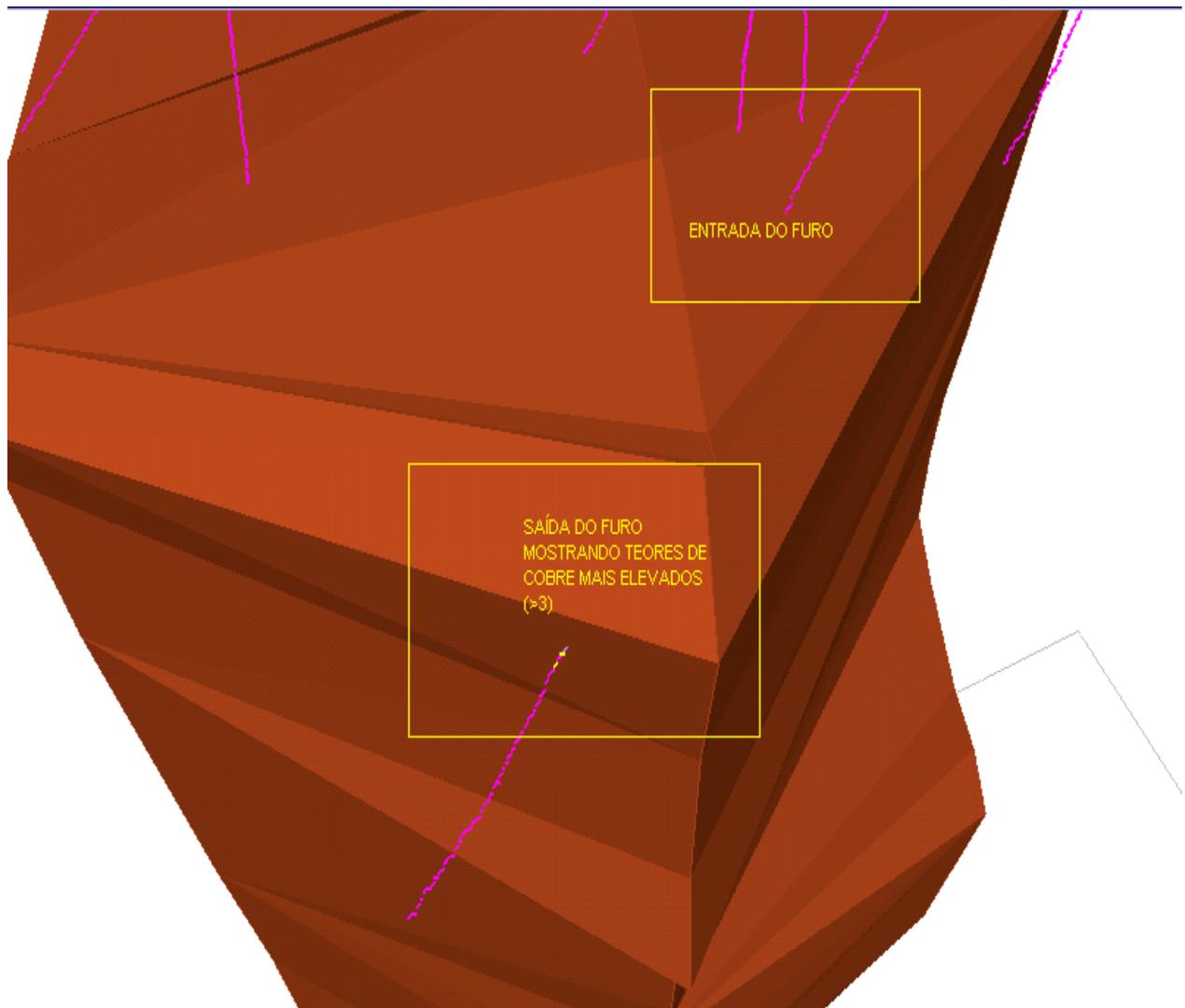


Figura 4.5 - Zoom, mostrando teores elevados de cobre associados com a superfície do corpo de baixa resistividade aparente,aa área 1.

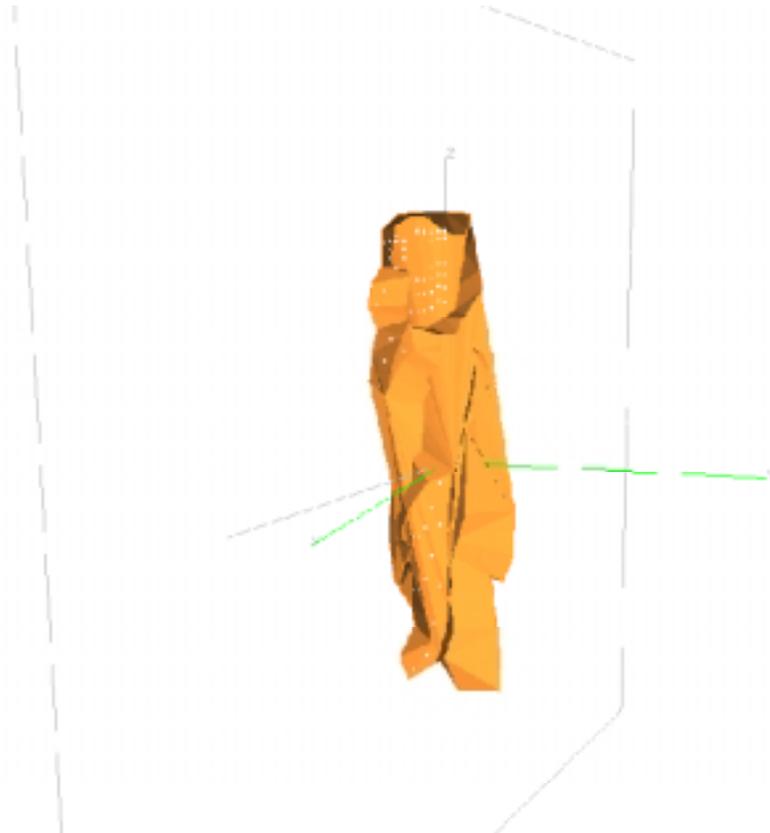


Figura 4.6 - Vista (3D) dos wireframe para resistividade aparente no intervalo 600 - 800 Ω m, área 1.

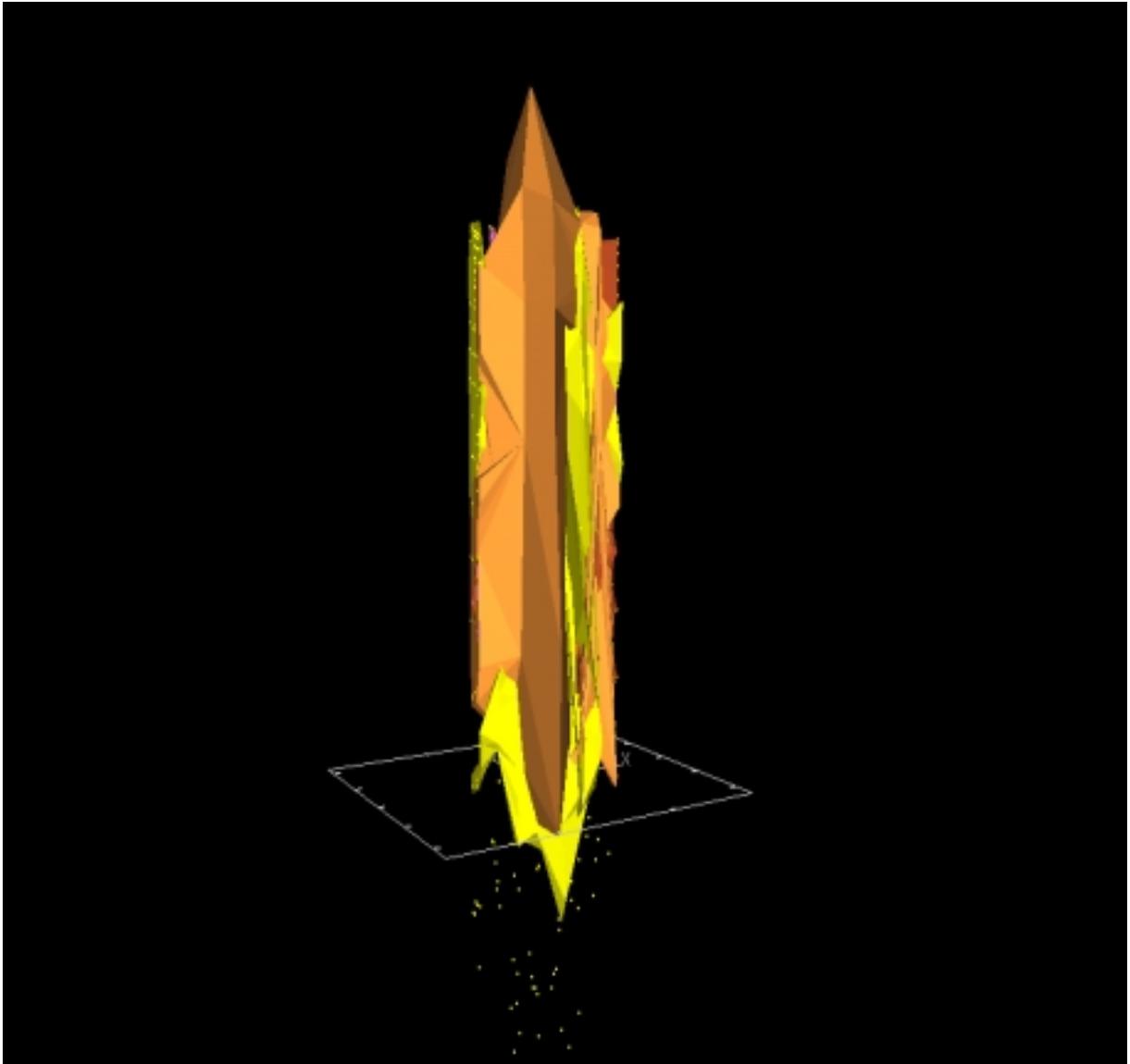


Figura 4.7 - Visão em 3D dos *wireframes* dos intervalos de resistividade aparente $\leq 600\Omega\text{m}$; $600\text{-}800\Omega\text{m}$ e $800\text{-}1200\Omega\text{m}$, na área 1.

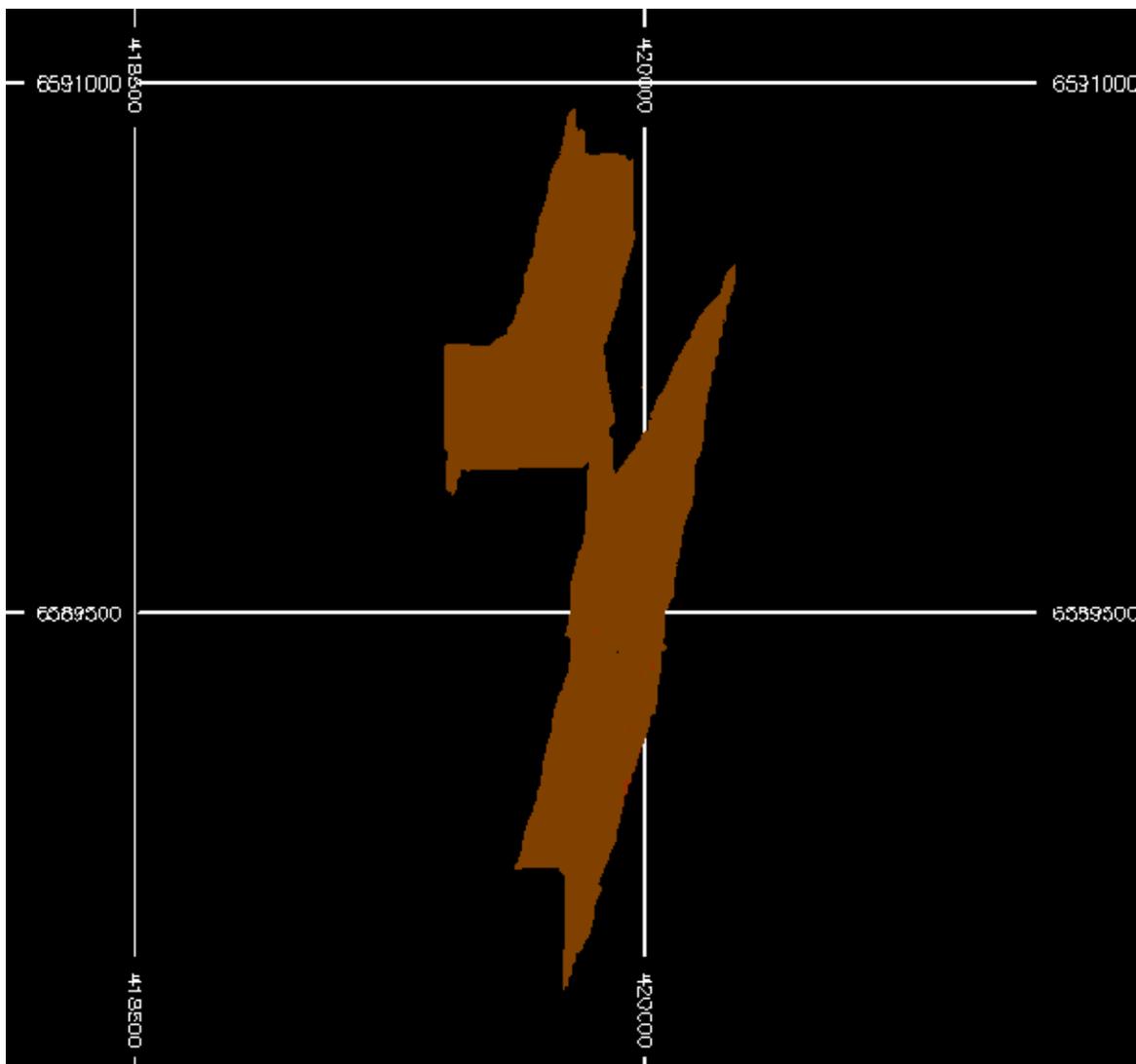


Figura 4.8 - Vista em planta (2D) do *wireframe* da resistividade aparente $\leq 600 \Omega m$ na área 2 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS).

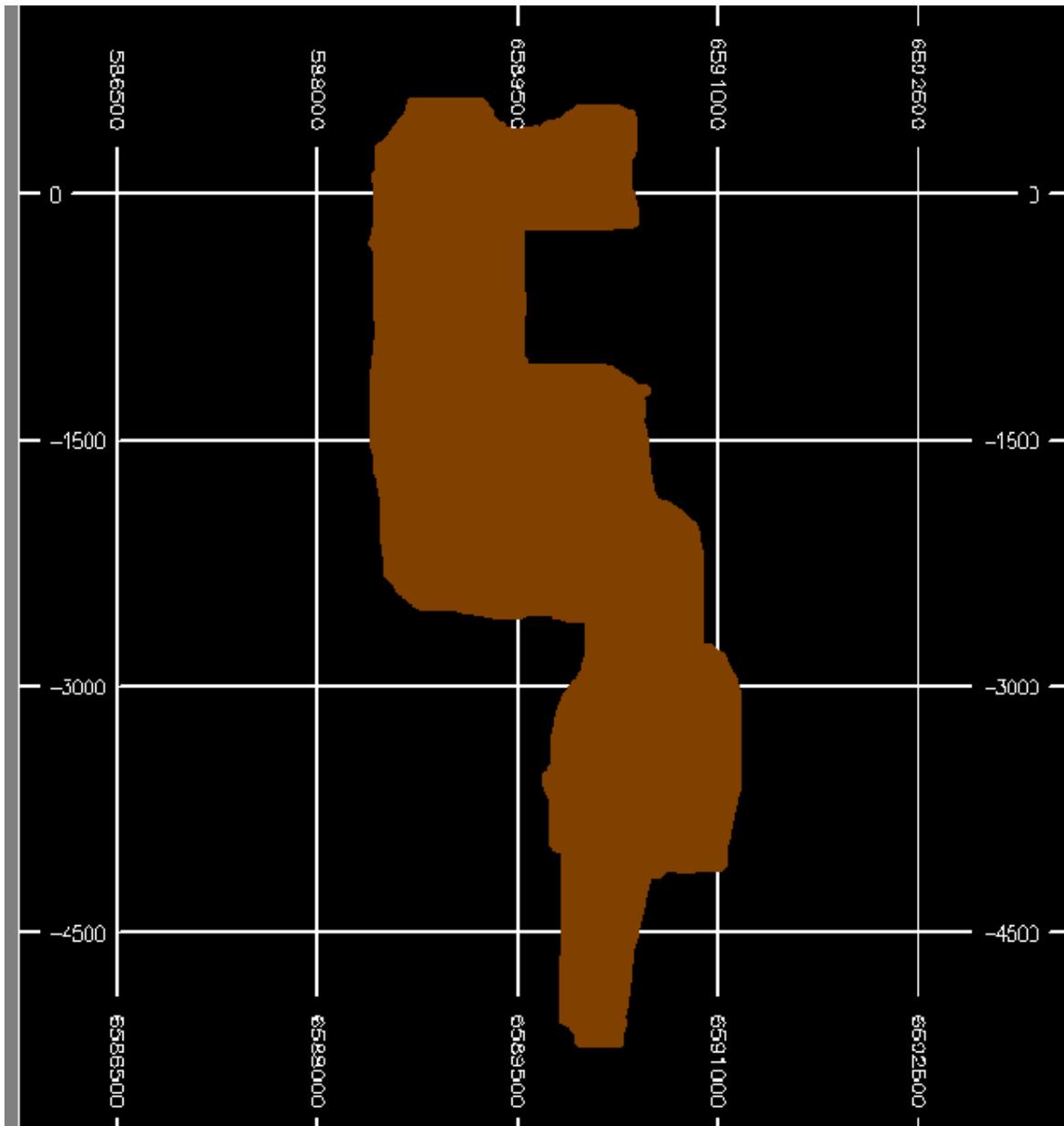


Figura 4.9 - Vista em perfil vertical YZ (2D) do *wireframe* da resistividade aparente ≤ 600 Ωm na área 2 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS).

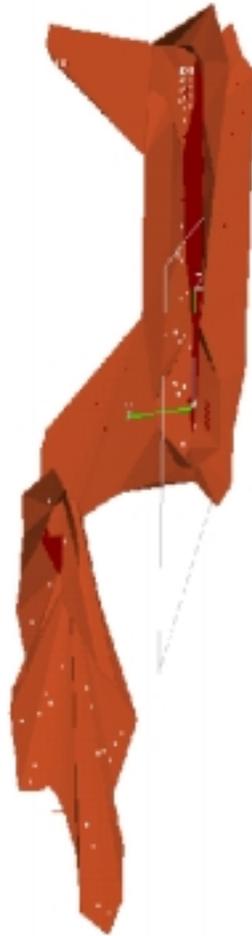


Figura 4.10 - Vista (3D) do *wireframe* de resistividade aparente $\leq 600 \Omega\text{m}$ na área 2 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS).

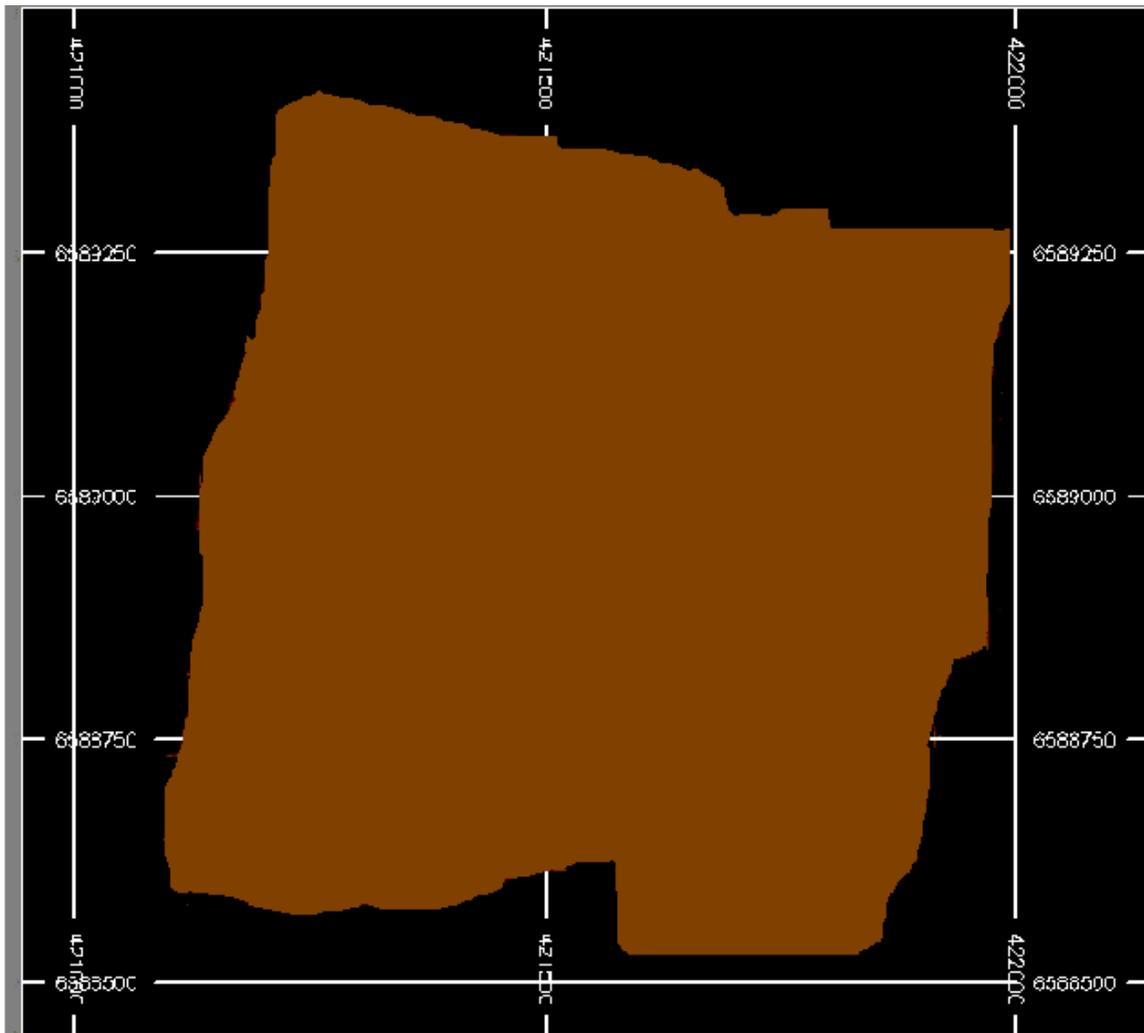


Figura 4.11 - Vista em planta (2D) do *wireframe* da resistividade aparente $\leq 600 \Omega m$ na área 4 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS).

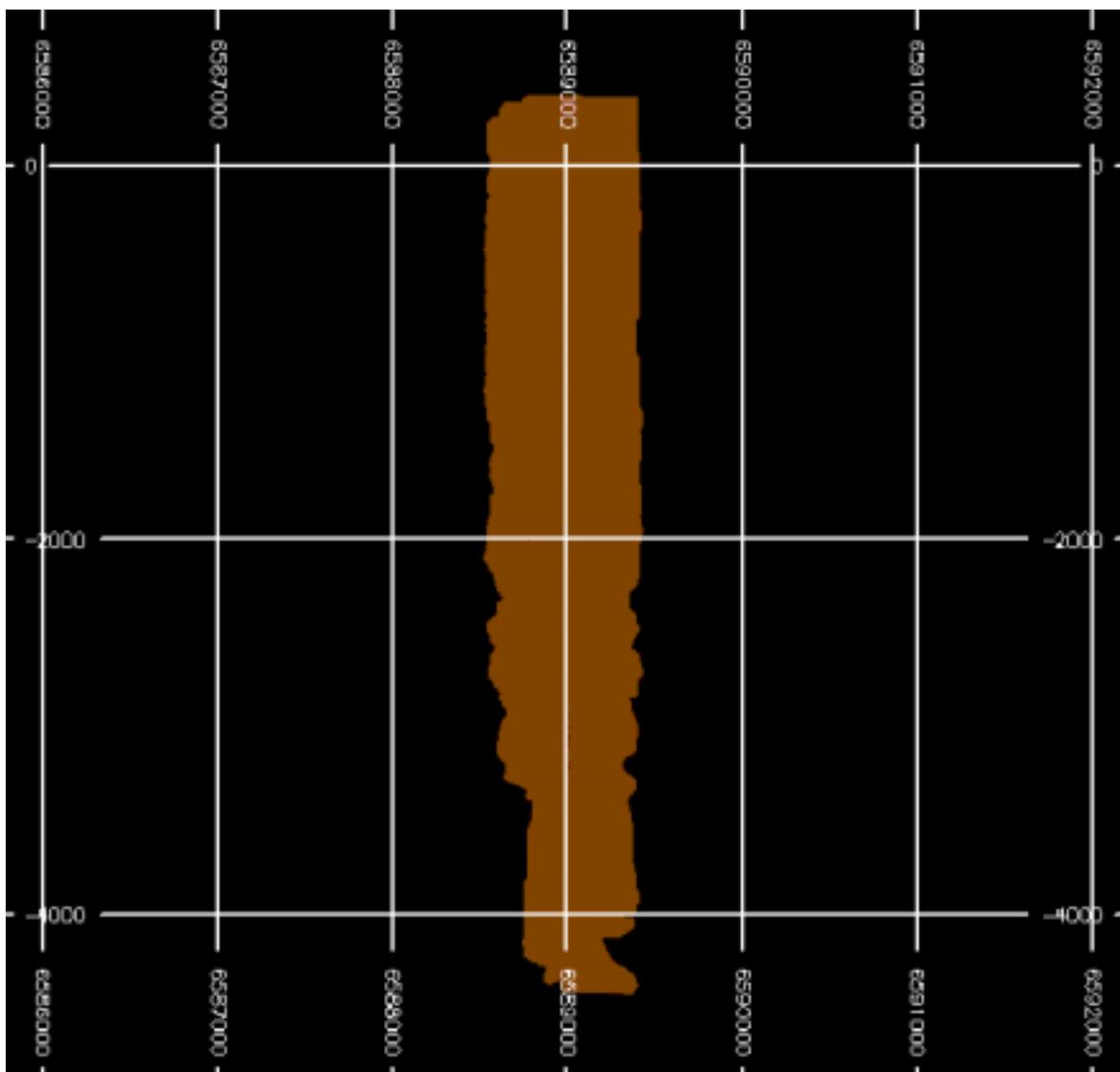


Figura 4.12 - Vista em perfil vertical YZ (2D) do *wireframe* da resistividade aparente $\leq 600 \Omega m$ na área 4 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul).

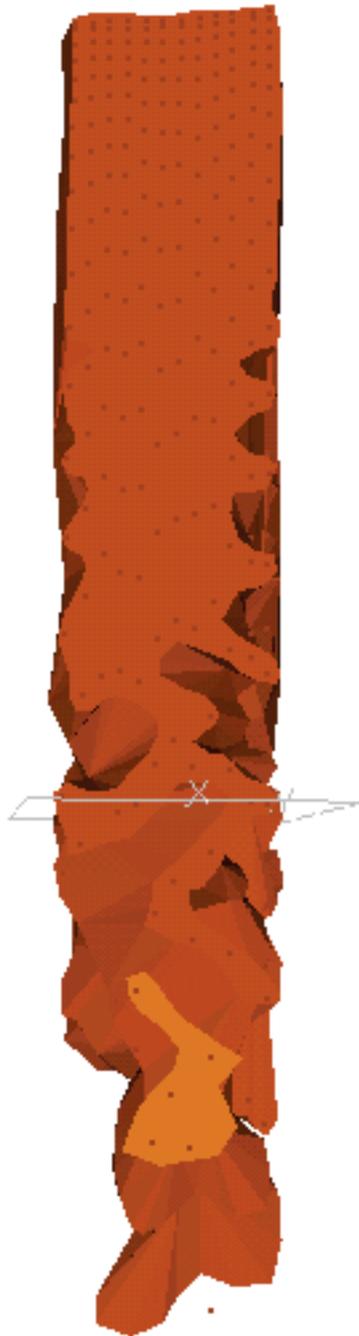


Figura 4.13 - Vista (3D) do *wireframe* de resistividade aparente $\leq 600 \Omega\text{m}$ na área 4 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS).

4.2 Cálculo do volume da estruturas mineralizadas, médias dos valores de resistividade aparente associadas e teores de Au e Cu

A utilização dos parâmetros definidos nas tabelas 3.20, 3.21 e 3.22 permite que se calcule o volume das estruturas condutivas, uma vez que se defina a dimensão de cada bloco. A sub-rotina kt3d do *software* GSLIB fornece o número de blocos gerados por krigagem (krigagem de blocos) e o valor médio da resistividade aparente contida nesses blocos, com a respectiva variância (desvio padrão). Esse procedimento, quando aplicado no banco de dados das áreas 1, 2 e 4 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS) conduziu aos resultados sintetizados pela Tabela 3.25.

A tabela 4.1 mostra que as estruturas de maior porte são aquelas identificadas nas áreas 2 e 4 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS).. Um outro aspecto importante mostrado por essa tabela é que os valores de resistividade aparente nas estruturas condutivas são muito próximos nas três áreas, embora as áreas 1 e 4 tenham valores de resistividade próximos e a área 2 apresente valores de resistividade aparente que formam três grupos, discriminados pela litologia (monzogranito, anfibólio-k-feldspato granito e vulcanoclásticas), que são diferentes entre si e diferentes das áreas 1 e 4. Isso mostra que nas estruturas condutivas a resistividade aparente assume valor em torno de 500 Ωm (abaixo de 600 Ωm) e com desvio padrão próximo de 50 Ωm em qualquer uma das áreas, independente da litologia.

As equações das retas de correlação permitem estabelecer dois intervalos de valores aproximados para os teores de Au e Cu a partir dos valores de resistividade aparente nas áreas 1 e 4, e apenas um valor aproximado para os teores de Au e Cu na área 2. Esses cálculos são realizados como segue:

- Valores de Au da Área 1 do Prospecto Volta grande (Lavras do Sul, RS):

$$\text{Mínimo: } y = -0,00006x + 0,1619 \quad y = 0,13 \quad \mathbf{4.1}$$

$$\text{Máximo: } y = -0,00004x + 0,5335 \quad y = 0,51 \quad \mathbf{4.2}$$

- Valores de Cu da área 1 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS):

$$\text{Mínimo: } y = -0,00006x + 0,1619 \quad y = 0,13 \quad \mathbf{4.3}$$

$$\text{Máximo: } y = -0,00006x + 1,144 \quad y = 0,83 \quad \mathbf{4.4}$$

- Valores de Au da área 2 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS):

$$y = - 0,001x + 0,273 \quad y = 0,22 \quad \mathbf{4.5}$$

- Valores de Cu da área 2 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS):

$$y = - 0,004x + 0,2696 \quad y = 0,24 \quad \mathbf{4.6}$$

- Valores de Au da Área 4 do Prospecto Volta grande (Lavras do Sul, RS):

Mínimo: $y = - 0,0013x + 0,3607 \quad y = 0,73 \quad \mathbf{4.7}$

Máximo: $y = - 0,0022x + 3,012 \quad y = 1,94 \quad \mathbf{4.8}$

- Valores de Cu da área 4 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS):

Mínimo: $y = - 0,00008x + 0,2035 \quad y = 0,24 \quad \mathbf{4.9}$

Máximo: $y = - 0,00008x + 0,4426 \quad y = 0,35 \quad \mathbf{4.10}$

Tabela 4.1 - Cálculo de volume das estruturas condutivas das áreas 1, 2 e 4 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS), médias, variâncias e desvio padrão da resistividade aparente associada, bem como teor de Au e teor Cu (por correlação).

	Área 1	Área 2	Área 4
Dimensões dos blocos (m)	100x100x300	100x100x300	100x100x300
Volume unitário de bloco (m³)	3×10^6	3×10^6	3×10^6
Número de blocos gerados por krigagem	800	2990	2490
Volume das estruturas condutivas (m³)	$2,4 \times 10^8$	$8,7 \times 10^9$	$7,42 \times 10^9$
Média da resistividade aparente nas estruturas condutivas	522,21 Ωm	519,23 Ωm	485,01 Ωm
variância	2765,55	1614,93	4005,41
Desvio padrão	52,59	40,19	63,29
Au (por correlação)	0,13- 0,51 ppm	0,22 ppm	0,73-1,94 ppm
Cu ((por correlação)	0,13 - 0,83 %	0,24 %	0,24- 0,35 %

CAPÍTULO V

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

As ocorrências minerais de Au e Cu relacionadas ao Complexo Intrusivo Lavras do Sul (RS) estão ligadas a minerais sulfetados em zonas de alteração hidrotermal hospedadas em rochas graníticas e vulcanoclásticas. Os sulfetos

A modelagem de dados geofísicos e geoquímicos na pesquisa de metais básicos e Au aplicada nas áreas 1, 2 e 4 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS) auxilia a interpretação mais precisa dos resultados da prospecção geofísica (*CSAMT*), define métodos de pesquisa mineral mais adequados e indica operações exploratórias adicionais para a região do prospecto.

O procedimento estatístico comparação múltipla das médias aplicados aos conjuntos de dados do levantamento *CSAMT* mostra que os valores dos dados de resistividade pertencem a quatro diferentes grupos: a) valores cujas médias estão entre $945,48\Omega\text{m}$ e $1128,47\Omega\text{m}$ (áreas 1 e 4); b) valores cuja média é $2240,3\Omega\text{m}$ (anfíbólio k-felspató granito da área 2); c) valores cuja média é $2839,1\Omega\text{m}$ (rochas vulcanoclásticas da área 2) e d) valores cuja média é $3258,7\Omega\text{m}$ (monzogranito da área 2). Esses resultados permitem fazer as seguintes observações: 1) os valores de resistividade aparente ajustam-se melhor ao tipo de distribuição lognormal; 2) As áreas 1 e 4 têm valores de resistividade aparente próximos entre si e 3) a área 2 apresenta valores de resistividade aparente que formam três grupos, discriminados pela litologia (monzogranito, anfíbólio k-feldspato granito e vulcanoclásticas), que são diferentes entre si e diferentes das áreas 1 e 4.

A variável resistividade aparente nas áreas 1 e 2 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS) mostrou diferentes escalas de variabilidade. Os modelos de semivariogramas são ajustados com duas estruturas e estão associadas à existência de diferentes estruturas mineralizadas, com diferentes cotas. Dentre os modelos variográficos testados, o modelo que melhor expressa a variabilidade espacial dos dados de resistividade aparente nas áreas 1, 2 e 4 do Prospecto Volta Grande é o modelo esférico, que nas áreas 1 e 2 é chamado duplo esférico por ajustar duas estruturas. O procedimento de validação do modelo esférico

utilizado na modelagem dos corpos condutores utilizou a técnica de validação cruzada, a qual mostrou que as novas populações de dados geradas pela estimativa não diferem significativamente dos dados originais. Isso confirma a acuracidade do modelo definido para interpolação e modelagem dos corpos condutores nas áreas 1, 2 e 4 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS)..

A análise estatística básica dos dados de resistividade aparente e o estudo da variabilidade espacial 3D dessa variável permite concluir que a geometria, a forma e as dimensões das estruturas condutivas estão condicionadas por fatores litológicos e estruturais. Nas áreas 1 e 2 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS), as condicionantes estruturais determinam a continuidade espacial por meio de elipsóides verticalizados (eixo maior segundo Z) cuja direção do eixo intermediário está no azimute 150° . Na área 4, por outro lado, a continuidade espacial também está orientada segundo um elipsóide verticalizado, mas o eixo intermediário está no azimute 210° . Nesses casos, verificou-se que as estruturas condutoras são concordantes com os padrões de fraturas hidrotermalmente alteradas de suas respectivas áreas.

A modelagem, a correlação e análise dos dados geofísicos (resistividade aparente CSAMT) e geoquímicos (teores de Au e Cu de sondagens) nas áreas 1, 2 e 4 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS) enfrentaram alguns problemas, que podem ser contornados em outras campanhas de detalhamento da região, desde que completamente compreendidos. Em primeiro lugar, deve-se notar que o dispositivo **CSAMT** está pojetado para investigação de grande profundidade, mas cuja resolução espacial é pequena frente ao tamanho das estruturas mineralizadas identificadas no Prospecto Volta Grande (zonas de fraturas hidrotermalizadas com espessura <15 cm: Strieder, 2001). Essas características das estruturas mineralizadas indicam que malhas geofísicas > 15 cm não poderão discriminar adequadamente as estruturas mineralizadas e podem criar artefatos de interpretação. No caso do **CSAMT**, particularmente, a grande separação fonte-receptores implica um “alongamento” das zonas condutoras; ou seja, o fluxo EM perpassa um grande volume de rochas e pequenos corpos condutores têm seu volume/tamanho aumentado às expensas dos corpos resistivos encaixantes. Em segundo lugar, a malha de levantamento **CSAMT** contou com linhas espaçadas de 150 m e estações separadas de 50 m em cada linha. Nessas condições estruturais dos corpos de minério do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul,

RS), então, o espaçamento da malha de prospecção geofísica e as características do dispositivo **CSAMT** implicam numa ampliação do corpo condutivo, predominantemente com relação à grande espessura. Além disso, o tamanho da malha geofísica implicou na modelagem de blocos de grande tamanho (100 x 100 x 300) e um suporte amostral muito distinto daquele da prospecção geoquímica (teores de Au e Cu amostrados em intervalos de 1 m ao longo dos furos de sondagem). A diferença de suporte amostral requereu alguma forma de compatibilização de suporte. O pequeno número de sondagens nas áreas do Prospecto Volta Grande não permitiu a utilização de métodos geoestatísticos para modelagens de blocos de teores de Au e Cu. Assim, o número de pares de resistividade + Au ou resistividade + Cu no espaço 3D das áreas do Prospecto Volta Grande foi sensivelmente diminuído para que fosse realizada a correlação dessas variáveis.

A modelagem, a correlação e a análise dos dados geofísicos e geoquímicos no Prospecto Volta Grande permitiu, apesar das limitações impostas pelas informações disponíveis, definir uma correlação negativa entre resistividade e os teores de metais, além de distinguir a superposição de pulsos hidrotermais. Dessa forma, abre-se uma grande possibilidade para a pesquisa mineral na região de Lavras do Sul (RS), por meio de prospecção geofísica de detalhe aliada com prospecção geoquímica e com levantamento geológico. A utilização de métodos geofísicos adequadamente projetados em termos de resolução espacial das estruturas mineralizadas podem contribuir decisivamente na delimitação de corpos de minério, de modo semelhante ao realizado por Oldenburg *et al.* (1997).

A modelagem de dados de resistividade e cargabilidade gerados no domínio da frequência e do tempo por meio dos dispositivos de Polarização Induzida (IP spectral) podem prover importantes caminhos que ajudam a definir a distribuição e o controle geoquímico dos corpos de minério no Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS). Porém, há que se notar que a modelagem de dados geofísicos (IP, magnetometria, EM) e geoquímicos no espaço 3D requer um processo aprofundado de integração de dados para controle de minério.

Os *wireframes* de resistividade aparente $\leq 600 \Omega\text{m}$ estão relacionadas às estruturas NW (nas áreas 1 e 2) e relacionadas com as estruturas e NE (na área 4). Em sub-superfície,

esses *wireframes* apresentam-se com estruturas verticais formadas pelo alargamento ou justaposição das estruturas NW (nas áreas 1 e 2) e NE (na área 4) identificadas na superfície e têm correlação com os teores de Au e Cu disponíveis nos furos de sondagens das campanhas realizadas pela CRM. Na área 1, os *wireframes* de resistividade aparente $\leq 600 \Omega\text{m}$ apresentam-se como quatro diferentes corpos. Os dois maiores e mais significativos podem ser considerados como resultantes de uma mesma estrutura vertical descontínua nos pontos de cotas de -250 m até -850 m . As outras duas estruturas menores parecem ser descontinuidades das outras duas estruturas maiores. Na área 2, os sólidos com a resistividade aparente $\leq 600 \Omega\text{m}$ apresentam-se como quatro estruturas que parecem estar conectadas entre si:

- a primeira estrutura é orientada NW, e está possivelmente relacionada à Mina Aurora. Ela inicia no extremo sul da linha 7E e se prolonga-se para leste até a linha 12E. A amostragem de resistividade aparente nessa área não produz dados que permitam investigar a continuidade dessa estrutura para oeste da linha 7E e nem para leste da linha 12E. Pode-se apenas observar que é a estrutura mais consistente no conjunto de dados dessa área (2);
- a segunda estrutura também está orientada NW e parece estar conectada à estrutura anterior na linha 12E. O extremo leste dessa estrutura não pode ser identificado uma vez que a linha 13E não tem prolongamento para norte;
- a terceira estrutura também é NW que, na cota -1500 m atinge as linhas 10E, 11E, 12E e 13E;
 - a quarta estrutura NW, aparece abaixo da cota -2000 m e atinge as linhas 11E, 12E e 13E.

A área 4 é representada por uma única estrutura contínua vertical. As dimensões reais dessa estrutura condutiva não podem ser identificadas, porque os limites da estrutura estão além dos limites do espaço amostrado. É necessária uma amostragem complementar para identificar a continuidade NS e EW dessa estrutura condutiva. Essa é a mais significativa de todas as estruturas identificadas pelo levantamento geofísico CSAMT realizado no Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS).

Os teores de Au e Cu disponíveis nos furos de sondagens da campanha realizada pela CRM no Prospecto Volta Grande (Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS) são de baixo valor. No entanto dois aspectos importantes merecem destaque: i) os teores de Au e Cu disponíveis nos furos de sondagens foram obtidos em campanhas realizadas em 1966 e no período de 1974-1978 e, ii) o método preferido para análise foi o método de absorção atômica. No entanto, deve-se notar que o aprimoramento dos equipamentos com fornos de grafite melhorou, em muito, a capacidade de detecção de metais por absorção atômica (prof. Érico Flores, Chefe do Departamento de absorção atômica – UFSM, informação verbal). Dessa forma., é interessante avaliar adequadamente os resultados obtidos até então para programas que visem avaliação mais precisa das reservas no Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS).

Outra verificação importante obtida a partir da modelagem dos corpos condutores diz respeito ao posicionamento das sondagens nesses corpos. Observou-se que os teores de Au e Cu disponíveis são obtidos a partir de amostras de furos de sondagens que apenas tangenciam superficialmente as estruturas condutoras. Isso pode ser verificado quando se considera que as menores cotas nas estruturas condutoras estão abaixo de -2200 m , enquanto as menores cotas das amostras dos furos de sondagens estão em torno de 80 m (Figuras 4.3 e 4.4); isto é, se for considerada a amostragem segundo o eixo Z, ela não representa 5% da extensão do corpo de minério segundo aquela direção. Além disso, alguns furos estão posicionados fora da estrutura condutora principal.

Os resultados desse trabalho permitem, enquadrar a pesquisa de metais básicos e Au no Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS) na representação esquemática seqüencial da classificação das Nações Unidas para Reservas/Recursos de combustíveis sólidos e minérios (ENERGY/WY.1/R.77). Além disso, permite apontar as ações para detalhamento das características geológicas das estruturas mineralizadas e estudar a viabilidade técnica e econômica de um (possível e/ou eventual) empreendimento mineiro. A classificação-quadro das Nações Unidas tem como principal função a manutenção dos termos utilizados em nível nacional, tornando-os comparáveis entre si e comparáveis com a terminologia internacional. Essa classificação-quadro permite, ainda, um melhor conhecimento teórico e prático das reservas/recursos disponíveis, tornando-os mais seguros e atrativos os investimentos no domínio. O objetivo principal da Classificação-quadro das Nações Unidas

é a criação de um instrumento que permita a classificação de reservas/recursos de combustível sólido e de minério por meio de um sistema internacional uniformizado, baseado em critérios de economia de mercado. Esse novo sistema de classificação é concebido de modo a incorporar os termos já existentes, e a torná-los comparáveis e compatíveis, melhorando, assim, a comunicação internacional. Ainda essa classificação busca a criação de um sistema simples, de fácil compreensão e utilização, que considere os procedimentos usados na prática da investigação e da avaliação de reservas/recursos e que é capaz de incorporar os resultados da investigação e da avaliação. A classificação-quadro das Nações Unidas é uma tentativa de criar de um sistema flexível que satisfaça às necessidades das empresas e/ou instituições e que sirva, genericamente, para comunicações nacionais e internacionais e para inquéritos globais.

As pesquisas de metais básicos e Au no Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS) no momento atual, inclusive com a realização desse trabalho, situa-se no quadro pesquisa geral. Nessa fase, tem-se a delimitação de um depósito já identificado (estruturas mineralizadas identificadas nas áreas 1, 2 e 4 (conforme Figuras 3.87 a 3.103). Os métodos utilizados nesse trabalho são aqueles preconizados pelo grupo de trabalho das Nações Unidas, a saber: cartografia de superfície; sondagens (furos de sondagens) que servem para avaliação preliminar da quantidade e da qualidade do minério Au e Cu e, por fim, interpolações limitadas dos resultados obtidos e integração com métodos indiretos (prospecção geofísica).

O objetivo principal dessa fase da pesquisa é a determinação das principais características geológicas do depósito (das estruturas mineralizadas), para fornecer indicações adequadas quanto à sua continuidade e uma primeira avaliação das suas dimensões, configuração, estrutura e teor de minério. Além de indicar as ações para detalhamento das características geológicas das estruturas mineralizadas, pode-se realizar o estudo de viabilidade técnica e econômica de um (possível e/ou eventual) empreendimento mineiro, que é discutido na seção Conclusão e Recomendações.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES RECOMENDAÇÕES

As ocorrências minerais de Au e Cu relacionadas ao Complexo Intrusivo Lavras do Sul(RS) estão ligadas a minerais sulfetados em zonas de alteração hidrotermal hospedadas em rochas graníticas e vulcânicas-vulcanoclásticas. Os sulfetos disseminados nas zonas hidrotermais imprimem condições de maior condutividade. A análise integrada dos teores de Au e Cu dos furos de sondagem com os blocos estimados de resistividade aparente permitiu a avaliação da correlação entre as variáveis geofísicas e geoquímicas. A resistividade aparente correlaciona-se negativamente com os teores de Au e Cu, como seria, teoricamente, de se esperar para esse tipo de depósito mineral. Assim, levantamentos geofísicos adequados e detalhados, uma vez que devidamente calibrados com teores de metais (Au e Cu), podem ser usados como elemento adicional de avaliação de depósito.

Os gráficos de correlação das variáveis resistividade aparente e os teores de Au e Cu nas áreas 1 e 4 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS) mostram duas retas de regressão para ajuste dos pontos para a correlação, enquanto a área 2 mostra apenas uma reta para o ajuste dos pontos. A definição de duas retas de ajuste mostra a existência de duas populações de valores médios de Au e Cu nas áreas 1 e 4 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS) e indica a existência de fenômenos/processos de mineralização superpostos, cada qual enriquecido distintamente em sua carga metálica (Au e Cu).

A modelagem de dados geofísicos e geoquímicos na pesquisa de metais básicos e Au aplicada nas áreas 1, 2 e 4 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS) permite, a partir da utilização Classificação-quadro das Nações Unidas para Reservas/Recursos –de combustível sólidos e minérios, enquadrar a pesquisa na representação esquemática sequencial daquela classificação como fase de pesquisa geral. Assim, pode-se apontar as ações para detalhamento das características geológicas das estruturas mineralizadas de

modo a estudar de viabilidade técnica e econômica de um (possível e/ou eventual) empreendimento mineiro. Esses detalhamentos incluem as seguintes recomendações:

- a) campanha de geofísica complementar de detalhe por IP espectral no domínio do tempo para avaliar a continuidade lateral e vertical das estruturas mineralizadas identificadas nessa pesquisa nas áreas 1, 2 e 4 do Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS);
- b) prospecção geoquímica complementar (sondagem), com amostragem representativa das estruturas condutivas verticalizadas (Figuras 3.80 a 3.103), cujas direções de maior/menor continuidade estão identificadas pela variografia apresentada e modelamento geoestatístico da variável resistividade aparente discutido na seção 3.3 desse trabalho e/ou nas estruturas condutivas que venham a ser identificadas em pesquisas subseqüentes;
- c) campanha de prospecção geofísica e prospecção geoquímica (teores de Au e Cu) sejam realizadas de modo que a aquisição de valores de resistividade aparente e teores de Au e Cu tenha o máximo de pontos coincidentes (mesmas coordenadas XYZ) e que, a partir do estabelecimento das correlações estatísticas entre a variável resistividade aparente e teores de Au e Cu, e do conhecimento dos semivariogramas das variáveis em estudo e dos seus semivariogramas cruzados, seja utilizada co-krigagem (*colocated co-kriging*) na estimativa de teores de Au e Cu para as estruturas mineralizadas mostradas nesse trabalho. Essa recomendação decorre do fato de que os valores de resistividade aparente (prospecção geofísica) são mais fáceis e menos dispendiosos de serem medidos, além do método de aquisição ter maior alcance em profundidade do que os métodos de prospecção geoquímica.

CAPÍTULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIGRÁFICAS

AMARO, V. E., & STRIEDER A. J, 1994. **Análise de fotolineamento e de padrões estruturais em imagens de satélite.** In Resumo, Congresso Brasileiro de Geologia. 38., 1:443- 444 Balneário Camboriú, SC, Brasil.

ANDRADE, M. S ; STRIEDER, A.J, 1997 - **Análise de fotolineamentos aplicada à intrusões de Lavras do Sul e Jaguari: ênfase no controle de mineralizações do prospecto de Volta Grande (RS).** In Resumo, Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos. 6., 371-372 Pirenópolis (GO).

ANDRADE, M.S.; STRIEDER, A.J.; GASTAL, M.C.P. 1998 **Controle geotectônico, magamático e estrural das ocorrências minerais de Cu-Au na região de Lavras do Sul(RS).** XL Congresso Brasileiro de Geologia. Anais, ..., BH, SBG-MG, pg 132.

ANDRIOTTI, J.L.S., 1988 - **Introdução à Geoestatística** – Acta Geológica Leopoldensia, São Leopoldo, Volume XI, p 5-81.

AGTERGERG, F.P. 1976– **Developmente in Geomathematics**, Amsterdam/ London/ New York, V1. Geomathematics, Mathematical Background and Geo-Science, pp 491.

AHRENS, J.H.; WARD, D.M. – 1983 – **Calibration of gamma logs for equivalent uranium grade determinations, Fond – Du – Lac Deposit** – CIM Bulletin 76: (852) 55 – 62p.

ASHRY, H.A.; KHAZBAK A.E.; SOLIMAN, F.A.S.; IBRAHIM, M.A. - 1995– **Of Uranium and Thorium content in various estages of monazite upgrading** – Applied Radiation and Isotopes 46: (8) 735 – 739p.

AUGUSTITHIS, S.S 1995– **Atlas of textural patterns of ore minerals and metallogenic processes** – Stylians – Savvas P. Augustithis- Berlin, New York - 659p.

BAK, P. R.; CRAM, D.L.; PRISSANG, R. 1992. **Iterative evaluation of linear octree ecoded deposits models**. Proc. XXIII Symp. Application computers and operations research in mineral industry, Tucson pp 691.

BARBOSA ,A.F.; CONSTANTINO,W. 1961.– **A mineralização de cobre de Volta Grande e sua relação com o granito de Lavras, Estado do Rio Grande do Sul**, Boletim da sociedade Brasileira de Geologia, São Paulo 10.

BARCHI, M. 1992 - **Computer modeling of surfaces structural geology applications**. In: Pflug R, Harbaugh J W (eds) Computer Graphics Geology. Lecture Notes in Earth Sciences 41, Springer, Berlin Heidelberg New York pp 89.

BARROS, C.E. 1992. - **Petrografia e Litoquímica do Monzogranito Santo Antônio-Dom Pedrito, RS**. Porto Alegre, Curso de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dissertação (Mestrado), 139p.

BENJAMIN, J.R; CORNELL, C.A. 1970. – **Probalility, statistics and decision for civil engeneers**. New York/ St. Francisco/ Düsseldorf/ London/ Mexico/ Panama/ Sydney/ Toronto. Mc Graw-Hill Book Company,.

BONHAM-CARTER, G.F. 1994 **Geographic information systems for geocientists: modeling with GIS**. Canada, Pergamon, 1st ed., 398p.

BOYLE, I. 1988 – **Differenctiation of ecological zones in the Oravango Delta, Botswana by classification and contextural analysis of LANDSAT MSS DATA**. PHOTOPROGRAMM EN. REMOTE SENS., v.54 p 601-608.

BURNS, K.L. 1992. **Three-dimensional modeling and geothermal process simulation** In: Pflug R, Haraugh J W (eds) Computer Graphics in Geology. Lecture Notes in Earth Science 41, Springer, Berlin Heidelberg New York pp271.

CHEMALE Jr, F.; HARTMANN, L.A ; SILVA, L.C. 1994a. **Stratigraphy and Tectonism of the Precambrian to early Paleozoic units in southern Brazil and Urugai.** Exursion Guidbook, Acta Geol. Peop. (no prelo).

CHEMALE Jr, F.; HARTMANN, L.A ; SILVA, L.C. 1995. **Stratigraphy and Tectonism of Brasilian Cicle in Southern Brazil.** In Mcniall, M. (Ed.) Proceedings Volume on proterozoic Crust and Metallogenic Evolution. Geol. Soc. Namibia (in press).

CLARK, I. –1977 – **Pratical Geostatistics.** London, Applied Science Publishers, 129p.

CLARK, I. - 1979 – **The semivariogram Geostatistics Part 1.** Engeneering and Minning ournal, July, Mac Graw-Hill, New York, p 90-94.

CRÓSTA, A.P.; MOORE, J.M.C 1989 **Enchancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais States: a propecting case history in greenstone belt terrain.** In: 7th Thematic Conference: Remote Sensing for Exploration Geology. Proceedings, ERIM, Calgary, USA, p 1173-1187.

DABLE DE MELLO, 1995 – **Relatório consolidado sobre a pesquisa geológica em Lavras do Sul (RS),** Relatório Interno CRM (inédito), 74p.

DAVID, M. 1977- **Geostatistics Ore Reserve Estimation** – Elsevier, Amsterdam 364p.

DAVIS, J.C. –1996- **Statistics and Data Analysis in Geology.** New York, John Wiley & Sons 550p.

ENERGY/WP.1/R.77 – document [September 1997] – **UNITED NATIONS INTERNACIONAL FRAMEWORK CLASSIFICATION FOR RESERVES/RESOURCES – Solid Fuel and Mineral Commodities.** Genebra.

FERNADES, L.A.D., MENEGAT, R.;COSTA,A F.U.; KOESTER,E.; PORCHER,C.C.; TOMMASI, A ; KRAEMER,G.; RANGRAB,G.E. & CAMOZZATO,E. 1995 **Evolução tectônica do Cinturão Dom Feliciano no Escudo Sul-riograndense: Parte I – uma contribuição a partir do registro geológico.**Ver. Brás. Geoc., 25 (4):351-374.

FERNADES, L.A.D ; TOMMASI A. & PORCHER,C.C. 1992a – **Deformations patterns in the Southern brazilian Branch of Dom Feliciano Belt: A reappraisal.** J.South Am. Earth Sci., 5: 77-96

FERNADES, L.A.D., TOMMASI, A. & PORCHER, C.C.; KOESTER,E.; PORCHER; SCHERER, C.M.S. & MENEGAT, R.1992b. **Granitóides Brasilianos precoces do Cinturão Don Feliciano. Caracterização geoquímica e discussão estratigráfica.** Porto Alegre. Pesquisa, 19(2): 195-215.

FERREIRA JR., L.G AND MENEZES, P.R. 1994 **Description of hidrotermaly altered zones through visibile/near-infered epectometry and multispectral image processing.** Proceeding 10th Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, Texas, USA, v1, 127-137.

ERREIRA, F.J.F.; SILVA, F.V.; MORO, R.P.X.; FORLIN, M.; STEVANATO, R.; FORNAZZARI NETO, L.; ARTUR, P.C; SOARES, P.C. 1995 **Aplicação do método “Analytic Signal”no mapeamento das soleiras de diabásio da Região de Fartura (SP-PR).** In: Cong. Intern. Soc. Bras. De Geofís., Rio de Janeiro v.1, p 226-229.

FERREIRA, F.J.F; FORLIN,M.; DONATTI, L.M.; ROSTIROLLA, S.P.; STEVANATO, R.; SOARES, P.C. 1996 **Assinatura magamática de estruturas dômicas da Região de Fartura.** In: 39^o Cong. Bras. De Geol. Anais,....., Salvador (SBG).

FISHER, T.R. 1992 **Use of 3d geographic information systems in hazardous waste site investigations.** In: Goodchild M.F., Parks B Steyaert L.T. (eds) Environmental modeling with GIS. Oxford University Press, New York.

FRAGOSO CESAR, A.R. S. 1991 **Tectônica de Placas no ciclo Brasileiro: As Orogenias dos Cinturões don Feliciano e Ribeira no Rio Grande do Sul.** São Paulo.Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Tese(Doutoramento), , 367p

FRAGOSA CESAR, A R.; FACCINI, .U.F.; PAIM, P.S.G.; LAVINA, E.L.; ALTAMIRO, J.R.F. 1985. **Revisão da estratigrafia das Molassas do ciclo brasileiro no Rio Grande**

do Sul. In: Simp. Sul. Bras. Geol.,2., Florianópolis, atas... Florianópolis: SBG. V.1, p. 477-491.

FREITAS, J.C.F. 1985 - **Métodos de avaliação de reservas**, Departamento Nacional de Produção Mineral, Rio de Janeiro, 223p.

GASTAL, M.C.P & NARDI, L.V.S.1992 – **Petrogênese e evolução do Granito Jaguari. Um tipo representante da suíte intrusiva Saibro, RS.** Geochim. Brasil., 6(1): 169-189.

GASTAL, M.C.P.; SCHIMITT, R.S. & NARDI, LV.S. 1992. **Granitóide da parte centro/sudoeste do Escudo Sul-rio-grandense. Novos dados e discussão sobre gênese e tipologia do magmatismo alcalino.**Porto Alegre, Pesquisa, 19(2): 174-182.

GASTAL, M.C.P. 1997- **Suíte Saibro, RS: Avaliação de um modelo petrográfico** – Curso de Pós-Graduação em Geociências Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Tese (Doutoramento). Porto Alegre, , 365p.

GIACOMELLI, M.R. 1998- **A Organização do Espaço no Município de Lavras do Sul.** Santa Maria, UFSM, Curso de Pós-Graduação em Geociências, CCNE, , 51p.

GÕNI, J.C. 1961– **O Rapakivi Lavras, jazidas metalíferas associadas, Rio Grande do Sul Brasil.** Bol. Escola de Geologia, UFRGS,. Porto Alegre, 7: 91p.

GÕNI, J.C. 1962a – **Origine dès roches ultrabasiqes et serpentineuses du précabrien de Rio Grande do Sul (Brésil). Mode de gisement et minéralisations.** Bol. Escola de Geologia, UFRGS,. Porto Alegre, 12: 84p.

GÕNI, J.C. 1962b– **Genèse dún Rapakivi par transformation de grès arkosiens Lavras: Rio Grande do Sul Brasil.** Bull. Soc. Franç. Minér. Crist. . LXXXV, 95-96.

GROSSI SAD, J.H.; QUADE, H.-1986- **Fundamentos sobre a Variabilidade dos Depósitos Minerais.** Rio de Janeiro DNPM/CPRM-GEOSOL, 141pp.

GRUPTA,R. 1991 – **Remote sensing geology.** New York, Spring-Verlag, cap3 19-34.

GUARASCIO, M.; DAVID, M.; HUIJBREGTS, CH. -1979– **Advanced geostatistics in the Mining Industry**, D. Reidel 491pp.

GUERRA, P. A. G. 1988– **Geoestatística Operacional**, Departamento Nacional de Produção Mineral, Brasília, 145pp.

GUILBERT, J. M.; PARK, C.F. – 1996 – **The geology of ore deposits**. Freeman & Co. New York (USA), 985pp.

HARTMANN, L. A , 1987– **Isócrona Sm-Nd de 2,1 Ga em minerais de duas amostras do complexo Granulítico Santa Maria Chico, RS**.In: Cong. Brás. Geoq., 1 Porto Alegre, Anais..., SBGQ. V.1, p.105-111.

HARTMANN, L.A. 1998- **Deepest Exposed Crust of Brazil – Geochemistry of Paleoproterozoic depleted Santa Maria Chico Granulites**. Gondwana Research, 1 (3/4), 331-341.

HARTMANN, L. A; PORCHER, C. C.; REMUS, M.V.D. , 2000 – **As rochas metamórficas do Rio Grande do Sul**. In: Holtz, M. & De Ros, L.F. (eds) Geologia do Rio Grande do Sul, Editora da UFRGS (em preparação).

HAYES, W.; KOCH, G. 1984 “ **Constructing and analyzing area-of-influence polygons by computer,**” Computers and Geosciences, vol. 10, pp.441-431.

HEISING, C.D.; ZAMORA REYES, J.A. – 1996 – **On a Bayesian estimation procedure for determining the average ore grade of a uranium deposit** – Annals of Nuclear Energy 23: (7) 543 – 552p.

HERNADES, G.L.S.; CRÓSTA, A.P. 1994 **Realce espectral de imagens Geoscan MK-II para mapeamento de minerais de alteração hidrotermal na área do depósito aurífero de Riacho dos Machados (MG)**. 38^o Congres. Brasil. de Geol., Baleário de Camburiú, SC. Anais,...., 476-477.

HOULDING, S.W. 1987. **3D comuter modeling of geology and mine geometry**. Mining Mag March: 226-231.

ISAAKS, E. H.; SIRIVASTAVA, M. 1989 – **Introduction to applied geostatistics**. New York, Oxford University P, Press, 561p.

JENSEN, M.L.; ALAN, M.B. – 1981 – **Economic minerals deposits** – Johnwiley & Son. Inc. New York – Toronto – 593pp.

JOST, H. & WILLWOCK, J.A 1966 – **Contribuição à estratigrafia do Pré-Cambriano do Rio Grande do Sul**. Notas e Estudos, Escola de Geologia UFRGS, 1 (1): 13-26.

JOUNEL, A.G.; HUIJBREGTS, CH.-1976– **Minning Geostatistics**, London, Academic Press, 600p.

JOUNEL, A.G.- 1979- **Geostatistical Simulation Methods for Exploration and Minning Planning**. Engeneering and Minning Journal, December, Mac Graw-Hill, New York, pp86-91.

KALSE, P.C.; PANDEY, A. K.; IYER, R.H. – 1995 – **Application of gamma-ray espectrometry for the assay of uranium in crude UF₄ – na input material used for proceducing nuclear grade U-metal at the natural Uranium conversion plants** – Jounal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry – Letters 201: (2) 165 – 170p.

KAUL, P.F.T. & RHEINHEIMER, D. 1974 - **Projeto Ouro do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**, Departamento Nacional de Produção Mineral – Convênio DNPM/CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – Diretoria de Operações. Porto Alegre, Relatório Final, 290p.

KIM,C.Y.; KNUDSEN, H.P. – 1977- **Geostatistical Ore Reserve Estimation for Roll Front Type Urnaium Deposit** (Prationner’s Guide) University of Arizona, 46p.

KOCH Jr; LINK, R.F. 1971–**Statistical Analysis of Geological Data**. New York, John Wiley, , 438p.

KRAEMER, G.; FERNADES, L.A.D.; KOESTER, E. E TOMASI, A 1993. **Evolução geológica do Complexo Cambai na Região de Lavras do Sul, RS**. In: Simp. Sul Brasileiro de Geol., 5, Anais... Curitiba: SBG. Pg. 7.

KRIGE, D.G.; MAGRI, E.J. 1982b **Studies of the Effects of Outliers and Data transformations on Variogram Estimates for a Base Metal and Gold Ore Body.** Journal of International Association for Mathematical Geology, V.14, nº 6, , pp557-564.

LANDIM, P.M.B. 1985 **Introdução a Geoestatística.** Rio Claro: UNESP. Laboratório de Geomatématica, (publicação didática nº 2)

LANDIM, P.M.B.; SOARES,P.C.; PUMPUTIS , 1988 **Cálculo de reserva de uma jazida de carvão por metodologia geostatística – GEOCIÊNCIAS, UNESP, V.2. p211-230.**

LANDIM, P. M. B; STURARO, J.R.; MONTEIRO, R.C. , 1995 **O coeficiente de correlação na utilização da cokrigagem.** In: Simp. Quant. Geociências, 6 UNESP Rio Claro, Bol. Res. Expandido, p 1-4.

LANDIM, P.M.B. 1998 **Análise estatística de dados geológicos.** Rio Claro: UNESP. Fundação Editora da UNESP 226p.

LASSETER, T.J. 1992. **Na interactive 3D modeling system for integrated interpretation in hydrocarbon reservoir exploration and production.** In: Pflug R, Harbaugh J W (eds) Computer Graphics in Geology. Lecture Notes in Earth Science 41, Springer, Berlin Heidelberg New York pp189.

LEDUC, L.C.; FERRONI, G.D.; BELCOURT, D. – 1987 – **Liquid scintillation – counting as a means of measuring Uranium leached from low- grade ores by Thibacillus – Ferrooxidans – Hidrometalurgy 18: (2) 255- 263p.**

LEGG, K.O. 1992 **Opportunities for innovation: advanced surface engineering – Ed William D. Sproul, Lancaster, 186p.**

LEINZ, V.; BARBOSA, A F; TEIXEIRA, G.A 1941. **Mapa Geológico Caçapava-Lavras.** Bol. Div. Prod. Min., Séc. agr. Ind. E Com., 90:1-39.

LEITE, J. A D. ; HARTMANN, L.A. E CHEMALE Jr., F. 1993. **A evolução tectono-metamórfica da seqüência máfica-ultramáfica, Cerro Mantiqueira, Lavras do Sul, RS.** In: Simp. Sul-bras. Geol., 5, Curitiba. Anais... SBG p.6.

LEITE, J.A D. 1995 **Datação SHRIMP U/Pb em zircões e o exemplo de dois corpos graníticos contrastantes no Escudo Sul-Riograndense**. In: Simp. Sul-bras. Geol, 6, Porto Alegre. Boletim... SBG. P 5-12.

LE METRE, R.W. -1982- **Numerical Petrology, Statistical Interpretation of Geochemical Data**. Amsterdam, Elsevier, 282p.

LIMA, E.F. 1985 – **Petroquímica e Prospecção Litogeoquímica da Área da Merita, Região de Volta grande, Lavras do Sul, RS**. Curso de Pós-Graduação em Geociências – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dissertação (Mestrado), Porto Alegre, , 162p.

LIMA, E. F.& NARDI, L.V.S. 1992 - **O magmatismo shoshonítico do Estado do Rio Grande do Sul**. Uma revisão. Porto Alegre, Pesquisa, 19(2): 190-194.

LIMA, E.F. 1995 – **Petrologia das rochas vulcânicas e Hipobissais da Associação Shoshonítica de Lavras do Sul-ASLS, RS**. . Curso de Pós-Graduação em Geociências – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Tese (Doutorado), Porto Alegre, 338p.

LIPMAN, P.M. 1976. **Caldera-collapse breccias in the western San Francisco Mountains, Colorado**. Geo. Soc. Am. Bull., 87(10): 1397-1410.

LIPMAN, P.M. 1984. **The roots of ash flow calderas in western North América: windowns into the tops of granitic batholiths**. J. Geophys. Res., 89(B10): 8801-8841.

LYNX GEOSYSTEMS INC 1993. – **THE LYNX GMS: geoscience modeling system: user documentation**. Lynx Geosystems Inc, Vancouver pp. B2.1, B3.1, D1.3, E1.1

MACHADO, M.; KOPPE, J.C.; HARTMANN, L.A . 1990. **Upper Proterozoic U-Pb age for Bossoroca Belt, Rio Grande do Sul, Brazil**. J. South Am. Earth Sci., 3 (2/3): 87-90.

MARANHÃO, R.J.L. 1982 - **Introdução a Pesquisa Mineral**. Fortaleza: BNDS., 680p.

MATHERON, G. 1962 – **Traité de Geoestatistique Appliquée**. Paris, Editions Tecnip, 333p. (Mémoires du BRGM, 14)

MATHERON, G. – **Les variables regionaliséés et leur estimation**. Paris: Masson, , 306p.

MATHERON, G. 1972 – **Traité d’informatique géologique**. Paris: Masson,: *Traité d’informatique géologique*:306-307.

MAURICE, Y. T. CARBONNEAU, B.W. – 1987 – **U and Th Concentration Processes in Canadian Granitoid, their Detection by Airborne Gamma – Ray spectrometry and their Relationship to Granophile Mineralization**. In: International Symposium on Granites and Associated mineralizations: (ISGAM). *Ver. Geoc. 17 (4): 644- 646p.*

MENEGOTO, E. MEDEIROS, E. 1976. - **Contribuição ao estudo das rochas ígneas ácidas da Serra Tupancy, RS**. In: Cong. Brasil. Geol., 29, Ouro Preto. Resumos...SBG.v.2, p 425-432.

MENEZES, P.R. AND PORTO, S.G., 1992 - **O uso de sensoriamento remoto na caracterização do depósito de lateritas níquelíferas de Barro Alto-GO**. *Proceedings 37th Cong. Brasil. de Geologia. São Paulo.Brasil (SBG), v 1, 153-155.*

MEXIAS, A.S 1990. – **O sistema Hidrotermal Fóssil de Volta Grande – Lavras do Sul/RS**. Curso de Pós-Graduação em Geociências, UFRGS,. *Dissertação (Mestrado), 149p.*

MEXIAS, A.S. ; FORMOSO, M.L.L; MEUNIER, A. ; BEAUFORT, D. 1990a– **O sistema Hidrotermal Fóssil de Volta Grande – Lavras do Sul/RS.- Parte I – Petrografia do Hidrotermalismo**. *Geochim. Brasil, 4(2):139-157.*

MEXIAS, A. S. ; FORMOSO; M.L.L; MEUNIER; A. ; BEAUFORT; D. 1990b.– **O sistema Hidrotermal Fóssil de Volta Grande – Lavras do Sul/RS.- Parte II – Geoquímica das Cloritas das Cloritas** - *Geochim. Brasil, 4(2):159-174.*

MEYER,P.L. 1972– **Probabilidade: Aplicações à Estatística**. Belo Horizonte: UFMG, , 304p.

NAIME, R.H. 1987 – **Geologia do Complexo Granítico Ramada e do Granito Cerro da Cria**. Porto Alegre, Curso de Pós-Graduação em Geociências Universidade Federal do Rio Grande do Sul, *dissertação (Mestrado), 184p.*

NAIME, R.H. & NARDI, L.V.S. 1991. **O Granito Ramada, porção oeste do Escudo Sul Rio-grandense**; Geologia, Petrologia e geoquímica. Ver. Bras. Geoc., 21(3): 266-274.

NANNI, L. F. 1983– **Programas Computacionais Para Processamento estatísticos de dados** – Caderno Técnico nº 8, curso de Pós- Graduação em Engenharia Civil – UFRGS, , 108p.

NANNI, L.F. 1986– **Análise estatística de dados com uso de técnicas computacionais** – Caderno Técnico nº 30, curso de Pós- Graduação em Engenharia Civil – UFRGS, , 108p.

NANNI, L.F.; RIBEIRO, J.L 1991– **Planejamento e Avaliação de Experimentos**. Porto Alegre: Técnico nº 30- Curso de Pós-Graduação em engenharia Civil, , 181p.

NARDI, L.V.S. 1984– **Geochemistry and petrology of the Lavras granite Complex, RS, Brasil**. Londres.. Tese(Doutorado) . Universidade de Londres. 268p.

NARDI, L.V.S. & LIM A, E.F. 1985 - **A Associação Shoshonítica de Lavras do Sul, RS**. Re. Bras. Geoc. , 15:139-146

NARDI, L.V.S. & HARTMANN, LA 1979– **O Complexo Granulítico Santa Maria Chico no Escudo Sul-riograndense**. Acta Geol. Leop. , 10(6): 45-75.

NARDI, L.V.S & BONIN, B. 1991. **Post-orogenic and non-orogenic alkaline granite associations: the Saibro intrusive suite, southern Brazil. A case study**. Chem. Geol. , 92 (3): 197-211.

NARDI, L.V.S.; LIMA, E.F. & GASTAL, M.C.P. 1992 – **Magmatismo do Grupo Bom Jardim: afinidade geoquímica e significado geotectônico**. In: Workshop sobre Bacias Molássicas Brasileiras, 1 , Acta.... UNISINOS. P. 82-89.

NAUMANN, M.P.; HARTMANN, L.A ; KOPPE, J.C. & CHEMALE Jr. 1984. **Sequência supracrustais, gnaisses graníticos, granulitos e granitos intrusivos da região de Ibaré-Palma, RS. Geologia, aspectos estratigráficos e considerações geotectônicas**. In: Congr. Bras.Geoc.,33, Rio de JaneiroAnais..., SBG. V.5, p.2417-2425.

NAUMANN, M. P. 1985 – **O Complexo vulcano-sedimentar Ultramáfico e Granitóides da Região de Ibaré, RS.** Porto Alegre. Curso de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dissertação (Mestrado), 161p.

NIR-EL, Y. – 1997 – **Traceability in the amount-of-substance analysis of natural potassium, thorium and uranium by the method of passive gamma-ray spectrometry – Accreditation and quality assurance 2: (4) – 193-198p.**

OKUJENI, C.D.; FUNTUA, I.I. – 1994 – **Geochemical and gama-espectrometric analysis of ore and hostocks of The Kanawa Uranium occurrence in NE Nigeria – Journal od Radioanalytical and Nuclear Chemistry – Articles 178: (2) 375 – 385p.**

OLDENBURG, D. W.; LI, Y.; ELLIS, R.G. 1997 – **Inversion of geophysical data over a copper gold porphyry deposit: A case history for Mt Milligan.** Geophysics, VOL. 62, NO. 5 (September - October); p. 1419 - 1431.

PIMENTEL, J.; JACQUES, P.D.; BRANCO, P.C.A. 1997 **Sistema de Informações Geográficas – Aplicação em Geociências – Utilização do Software Explorer.** Rio de Janeiro. CPRM: Departamento de Informações Institucionais – Divisão de Geoprocessamento., 62p.

PIRES, C. A. F., 1994 – **Jazida Carbonífera do Iruí-RS: uma tentativa de avaliação de reservas mediante o uso de análise estatística.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e do dos Materiais, Porto Alegre. Dissertação de Mestrado, 95p.

POPOV, C. 1966 **Computing Reserves of Mineral Deposits: Principles and Convencional Methods,** Washington: Burreau of Mines, Information Circular 8283, United States Department of Interior. Bereau of mine.

POWER, W.L.; LAMB, P.; HOROWITZ, F.G. 1995 **From Databases To Visualisation – data transfer Standards and Data Structures for 3D Geological Modelling – APCOM XXV Conference, Bnsbane, 9-14 July 1995, p65-70.**

QUADROS, T.F.P 2000 **Integração de dados em Mapeamento de Favorabilidade Mineral para ouro na Ilha Cristalina de Rivera – Porto Alegre – PPGEM – UFRGS**, Tese (Doutoramento), 215p.

QUEIROS, C.L.; KUYUMJIAN, R.M; GUIMARÃES, E.R. 1994 **Um estudo de Lineamentos Morfoestruturais Extraídos de Imagens TM-Landatsat do Greenstone Belt de Crixás e Parte do Bloco da Anta**. IV Simp. Geol. Centro-Oeste Brasil. – DF, Anais..., pp 88-90.

REEVES, C. V. 1992 – **New horizons for airborne geophysical mapping**. Exploration Geophysics 23, 273 – 280p.

REMUS, M.V.D.; MCNAUGHTON, N.J.; HARTMANN, L.A & FLETCHER, I.R. 1997a - **Zircon SHRIMP U/Pb and Nd isotope data of granitoids of the São Gabriel block, southern Brazil: evidence for a Archaean/paleoproterozoic basement**. In: International Symposium on granites and Associated Mineralizations – ISGAM, 2, Salvador, Extended abstract and Program ..., p 271-272.

REMUS, M.V.D. 1999– **Metalogênese dos depósitos hidrotermais de metais-base de Au do ciclo Brasileiro no Bloco São Gabriel, RS** – Curso de Pós-Graduação em Geociências- Universidade Federal do Rio grande do Sul, Tese (doutoramento). Porto Alegre, 170p.

RIBEIRO, M. & FONTINEL, L.M. 1978. **Associações Petrotectônicas do Escudo Sul-rio-grandense: I Tabulação e distribuição das associações petrotectônicas do escudo do Rio Grande do Sul**. Iheringia, Ser. Geol., 5: 13-54.

ROBERTSON, J.F. 1966. **Revision of Stratigraphy and nomenclature of rocks units in Caçapava- Lavras Region. State of Rio Grande do sul, Brasil**. Notas e Estudos Escola de Geologia, UFRGS, Porto alegre. V.1 n.2, p 41-54.

ROISENBERG, A.; LOSS, E.LL ; ALTAMIRO, J.A.F. & FERREIRA- 1983. **Aspectos Petrológicos e Geoquímicos do vulcanismo Pré-Cambriano-Eo-paleozóico do R.G.S.,**

com base em elementos maiores. In: **Simp. Sul-bras. Geol., 1, Porto alegre. Atas...SBG. p 273-285.**

ROSTIROLLA, S. P. 1996. – **Avaliação de favorabilidade em exploração: um enfoque metodológico.** Rio Claro, Tese (Doutoramento) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

ROSTIROLLA, S.P. 1997. **Alguns aspectos da avaliação de favorabilidade em geologia exploratória.** Revista Brasileira de Geociências. São Paulo: SBG, V.27, no. 4, p313-324,

SILVA, F.V. ; FERREIRA, F.J.F **Aplicação combinada dos métodos sinal analítico e devolução de Euler e dados aeromagnéticos residuais da Região de Fartura (SP- PR)** (inédito).

STEVANATO, R. FERREIRA, F.J.F.; SOARES, P.C.; SILVA, F.V. 1997 **Desempenho dos métodos de interpolação espacial na composição de mapas aerogeofísicos.** V Cong. Intern. De Geol. , v.1 pp252-255.

SALOMÃO NETO, J. 1976. **Mapa geológico da região de Lavras do Sul – Área I. DOCEGEO. Escala 1:10.000** (inédito).

SANTOS, E.L.; BECKEL, J.; MACEDO, P.M.; GONZÁLES, E.F.; CHABAN, M. 1978. **Divisão litoestratigráfica do Eo-Cambriano-Pré-Cambriano Superior do Escudo Sul-Rio-grandense.** In: Cong. Bras. Geol., 30, Recife, SBG. Anais...Recife: SBG. V.2, p 670-684.

SANTOS, E.L.; MACIEL, L.A C.; ZIR FILHO, J.A. 1998 –**Distritos Mineiros do Estado do Rio Grande do Sul.** 1º Distrito do DNPM Porto Alegre, 35p.

SANTOS, E.L.; RAMGRAB, G.E.; MACIEL, L.A & MOSMANN, R. 1988.– **Mapa geológico do Estado do Rio Grande do Sul,** DNPM, Porto Alegre. Escala (1: 1.000.000)

SARTORI, P.L.P. **Petrologia do Complexo Granítico São Sepé, RS.** São Paulo, Instituto de Geociências , Universidade de São Paulo, Tese (Doutoramento), 195p.

SARTORI, P.L.P & KAVASHITA, K. 1985. **Petrologia e geocronologia do batólito granítico de Caçapava do Sul, RS.** In:Simp. Sul-bras. Geol., 2, Florianópolis, Anais,... SBG.p 102-115.

SIDES, E.J. 1992. **Reconciliation studies and reserve estimation.** In: Annels A. E. (ed) Case histories and methods in mineral resource evaluation. Geological Society Spec. Publ. Nº 63, 197p.

SILVA FILHO, B.C. 1984. **Geology of the polyphase deformed Precambrian terrane of the Vila Nova region, state of Rio Grande do Sul, Southern Brasil. Parte I: petrogenesis.** Acta Geol. Leop. , 27(17):35-152.

SILVA FILHO, B. C. & SOLIANI Jr., E. 1987. **Origem e evolução dos gnaisses Cambai: exemplo de estudo integrado de análise estrutural, petroquímica e geocronologia.** In: Simp. Sul-bras. Geol.,3, Curitiba, Anais...SBG. v.2, p743-751.

SOLIANI Jr., E. 1986. **Os dados Geocronológicos do Escudo sul-rio-grandense e suas Implicações de Ordem Geotectônica.** São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Tese (doutoramento), 340p.

SOMMER, C. A; LIMA, E.F. & NARDI, L.V.S. 1993 - **O vulcanismo ácido alcalino no Platô do Taquarembó, Dom Pedrito, RS.** Simpósio internacional Del Neoproterozóico-Cámbrico en la Cuenca del Plata, 1, Uruguay, Extended abstrat, nº 40, 5p.

SOMMER, C.A 1994 – **O Vulcanismo Ácido Alcalino da Porção Sul do Platô do Taquarembó, Dom Pedrito, RS.** Porto Alegre. Curso de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Dissertação (Mestrado), 149p.

STEVANATO, R. 1998 **Modelo Exploratório para Depósitos de Chumbo e Zinco na Faixa Itaiacoca –PR/SP.** Curso de Pós-Graduação em Geologia, UFP, Dissertação (Mestrado),

STRIEDER, A. J. 1992. **Serpentinização e metassomatismo em rochas ultramáficas: discussao das características e recomendacoes para o tratamento petroquimico.** In Revista Brasileira de Geociencias, no. 3, 22:329-337. São Paulo - Sp - Brasil.

STRIEDER, A. J., & NILSON, A. A.. 1992. **Estudo petrologico de alguns fragmentos da melange ofiolitica em abadiania (GO): iii - texturas e composicoes quimicas dos corpos máficos.** IN REVISTA BRASILEIRA DE GEOCIENCIAS, NO. 3, 22:363-371. S<O PAULO - SP - BRASIL.

STRIEDER, A. J., & NILSON, A. A.. 1992. **Melange ofiolitica nos metassedimentos araxa de abadiânia (GO) e implicações técnicas regionais.** In Revista Brasileira de Geociencias, no. 2 , 22:204-215. São Paulo.

STRIEDER, 1996 – **Processos de Gridagem e Filtragem Aplicados no Processamento de Dados Geofísicos Gamaespectométrios e Magnetométricos.** Anotações da disciplina “Integração de dados” - PPGEM (inédito).

STRIEDER, A. J., F. J. FERREIRA, AND M. C. P. GASTAL. 1999. **Aspectos petrológicos gerais do Complexo Granítico Lavras do Sul - RS: re-interpretação das fácies graníticas e a gênese de depósitos de Cu-Au.** In: Boletim de Resumos, Simpósio Sobre Vulcanismo e Ambientes Associados I, Gramado, 1999.

Strieder, A. J.; Roldão D. G.. 1999. **Análise estrutural da seqüência vulcano-sedimentar da Palma RS.** In Extended Abstracts, Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, Lençóis, 1999, 1:44-47.

STRIEDER, A. J. , 2001. **Relatório Técnico de Pesquisa Mineral Aplicada aos Depósitos tipo (Cu-Au)- lode na região de Lavras do Sul.** FAPERGS (Processo nº 96/0383-2), Porto Alegre (RS), 253p (inédito).

STRIEDER, A. J. ; FERREIRA, F. J. F.; BUFFON, S. A.; FORLIN, M.; PALMA, P. S., 2001 – **Geophysical Signatures of lode Au-Quartz Vein Type Deposits Related to Lavras do Sul Intrusive Complex (RS, Brazil)** – 4p (inédito)

TEIXEIRA, W. 1982 **Folhas SH.22 – Porto Alegre, SI 22. Lagoa Mirim e SH.21 Uruguaiana. Interpretação dos dados radiométricos e evolução geocronológica.** Projeto RADAMBRASIL, Florianópolis (relatório interno).

TIPPER, J.C 1992. **Surface modeling for sedimentary basin simulation**. In: Hamilton, D. E. , Jones T. A. (eds) Computer modeling for geologic surface and volume. AAPG Computer Applications in Geology nº 1 93 p.

TOMMASI, A 1991 – **Evolução Cimenática do Cinturão Dom Feliciano durante o Ciclo Brasileiro**. Porto Alegre. Curso de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dissertação (Mestrado) 207p.

VALENTE, J. 1982– **Lições de Geoestatística**. Ouro Preto, Minas Gerais, Fundação Gorceix, 2173p.

YAMAMOTO, J.K. 1991 **Comparação de Métodos Computacionais para Avaliação de Reservas. Um Estudo de Caso na jazida de Cobre de Chapada, GO – São Paulo, USP**, 175p. Tese (Doutoramento) Instituto de Geociências.

WILDNER, W.; RAMGRAB, G.; SANDER, A.; PORCHER, C.; CAMOZZATO, E. 1990 – **Características litoquímicas dos Complexos Graníticos Caçapava do e São Sepé na Folha Passo do Salsinho (Rio Grande do Sul)**, In: Cong. Geol. Uruguay, 1, Montevideo Atas..., 1: 123-130.

WILDER, W. LIMA, E.F. 1992. **Considerações sobre os depósitos vulcanogênicos do Grupo Bom Jardim nas Regiões de Lavras do Sul, RS**. In: Workshop sobre as Bacias Molássicas Brasileiras, 1, São Leopoldo. Resumo Expandido... São Leopoldo: UNISINOS. P 137-142.

WOODCOCK, N. H.; FISCHER, M. 1986 **Strike-slip duplexes**. Journal of Struct. Geol. Vol8: 725-735.