



UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS -
ÁREA DE METALOGÊNESE**

Marcelo Antonio Braghin

**UTILIZAÇÃO DAS LÓGICAS *BOOLEANA* E *FUZZY*
PARA ANÁLISE METALOGENÉTICA NA FOLHA PILAR
DO SUL (SP) VIA SISTEMA DE INFORMAÇÕES
GEOGRÁFICAS**

Dissertação apresentada ao Instituto
de Geociências, como parte dos
requisitos para obtenção do grau de
Mestre em Geociências

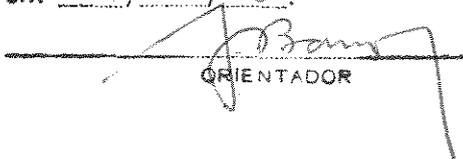
Orientador: Prof. Dr. Ardemírio de Barros Silva

IG-19

CAMPINAS - SÃO PAULO

Fevereiro - 1998

Este exemplar corresponde
redação final da tese defer
por Marcelo Antonio Braghin
e aprovada pela Comissão Julg
em 27/02/98.


ORIENTADOR



UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS -
ÁREA DE METALOGÊNESE**

Marcelo Antonio Braghin

**UTILIZAÇÃO DAS LÓGICAS *BOOLEANA* E *FUZZY*
PARA ANÁLISE METALOGENÉTICA NA FOLHA PILAR
DO SUL (SP) VIA SISTEMA DE INFORMAÇÕES
GEOGRÁFICAS**

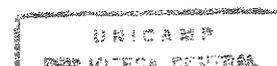
Dissertação apresentada ao Instituto
de Geociências, como parte dos
requisitos para obtenção do grau de
Mestre em Geociências

Orientador: Prof. Dr. Ardemírio de Barros Silva

CAMPINAS - SÃO PAULO

Fevereiro - 1998

064111



UNIDADE	BC
N.º CHEQUE	UNICAMP
V.º	230
IMP.º	34428
PREZ.	395/98
C.º	D <input checked="" type="checkbox"/>
PRECOS	R\$ 11,00
DATA	09/07/98
N.º OPD	

CM-00112882-3

FICHA CATALOGRAFICA ELABORADA
PELA BIBLIOTECA I.G. UNICAMP

B73u	<p>Braghin, Marcelo Antonio</p> <p>Utilização das lógicas booleanas e fuzzy para análise metalogênica na Folha Pilar do Sul (SP) via sistema de Informações Geográficas (SIG): área de metalogênese / Marcelo Antonio Braghin.- Campinas,SP.: [s.n.], 1997.</p> <p>Orientador: Ardemirio Barros Silva Dissertação (mestrado) Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências</p> <p>1. *Sistema de Informação Geográfica (SIG). 2. Processamento Digital de Imagens - Técnicas Analíticas. 3. Lógica Simbólica e matemática. I. Silva, Ardemirio Barros. II. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. III. Título.</p>
------	---



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE
CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS -
ÁREA DE METALOGÊNESE

AUTOR: Marcelo Antonio Braghin

UTILIZAÇÃO DAS LÓGICAS *BOOLEANA* E *FUZZY* PARA ANÁLISE
METALOGENÉTICA NA FOLHA PILAR DO SUL (SP) VIA SISTEMA DE
INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

ORIENTADOR: Prof. Dr. Ardemírio de Barros Silva

Aprovada em: ____/____/____

PRESIDENTE: Ardemírio de Barros Silva
(Orientador)

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Ardemirio", written over a horizontal line.

EXAMINADORES:

Prof. Dr. Bernardino Figueiredo

Two handwritten signatures in black ink. The top one is "Bernardino Figueiredo" and the bottom one is "Clézio Luis Tozzi".

Prof. Dr. Clézio Luis Tozzi

Campinas, de

de 19

Ao meus pais, pelo constante apoio.

AGRADECIMENTOS

À FAPESP pelo apoio concedido para o término desta tese. A GEMPI Informática pelo apoio durante dois anos do desenvolvimento deste trabalho. A ERDAS Inc, em especial a Dolores Lockett, pela concessão de *software*.

Ao Prof. Dr. Ginaldo Adhemar da Cruz Campanha, pelo constante apoio e inegável ajuda, inclusive pela etapa de campo. Ao Prof. Dr. Jorge S. Bettencourt pelas sugestões e apoio durante a etapa de campo.

Aos amigos e geólogos Franco Bazzon, vulgo *Tremidinha*, e Maria Lúcia Maenaka (*Sassá*) pelo apoio a fase de campo inicial.

Aos amigos da GEMPI que me apoiaram, especialmente a Fernando de Arruda Mortara, pela sua incansável ajuda.

Aos professores da UNICAMP que me ajudaram a elaboração deste trabalho, em especial ao meu orientador pela confiança depositada no meu trabalho. Aos Profs. Dr. Carlos Roberto de Souza Filho e Álvaro P. Crósta pelas sugestões.

Aos funcionários do IG-UNICAMP que me ajudaram, em especial a Valdireine que sempre esteve disposta a ajudar.

E não menos importante a Elisa, pela ajuda e ao tempo roubado.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO	1
1. 1. OBJETIVOS.....	1
1. 2. JUSTIFICATIVAS PARA A ESCOLHA DA ÁREA.....	2
1. 3. METODOLOGIA	2
1. 4. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA.....	4
1. 5. DADOS DISPONÍVEIS.....	5
1.6. RECURSOS UTILIZADOS	6

CAPÍTULO 2

2. SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS.....	7
2. 1. INTRODUÇÃO	7
2. 2. DEFINIÇÕES BÁSICAS.....	8
2. 3. DADOS EM SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS.....	10
2. 4. PROCEDIMENTOS	14
2. 5. AQUISIÇÃO DE DADOS	17

CAPÍTULO 3

3. BASE DE DADOS - FOLHA PILAR DO SUL	18
3. 1. INTRODUÇÃO	18
3. 2. GEOLOGIA	19
3. 3. CORRELAÇÕES ENTRE AS SEQÜÊNCIAS SEDIMENTARES.....	25
3. 4. RECURSOS MINERAIS.....	26
3. 5. GEOQUÍMICA	27
3. 5. 1. ZONAS ANÔMALAS - PRÓ-MINÉRIO.....	29
3. 6. GEOFÍSICA	32

CAPÍTULO 4

4. MÉTODOS ESTUDADOS: UMA INTRODUÇÃO TEÓRICA.....	34
4. 1. INTRODUÇÃO	34

4. 2. HISTÓRICOS DAS LÓGICAS <i>BOOLEANA</i> E <i>FUZZY</i>.....	34
4. 2. 1. HISTÓRICO DA LÓGICA <i>BOOLEANA</i>	34
4. 2. 2. HISTÓRICO DA LÓGICA <i>FUZZY</i>	36
4. 3. LÓGICA <i>BOOLEANA</i>	37
4. 3. 1. CONJUNTOS <i>BOOLEANOS</i>	37
4. 3. 2. OPERADORES <i>BOOLEANOS</i>	38
4. 4. LÓGICA <i>FUZZY</i>.....	41
4. 4. 1. SISTEMAS <i>FUZZY</i>	42
4. 4. 2. CONJUNTOS <i>FUZZY</i>	43
4. 4. 3. NÚMEROS <i>FUZZY</i>	46
4. 4. 4. OPERADORES <i>FUZZY</i>	47
4. 4. 5. MODIFICADORES DE CONJUNTOS <i>FUZZY</i>	51
4. 4. 6. CONSTRAINT	52
4. 4. 7. RACIOCÍNIO <i>FUZZY</i>	53
4. 4. 8. APROXIMAÇÃO MONOTÔMICA	54
4. 4. 9. COMPOSIÇÃO DE REGRAS DE INFERÊNCIA <i>FUZZY</i>	56
4. 4. 10. MÉTODOS DE “DEFUZZYFICAÇÃO”	58

CAPÍTULO 5

5. ANÁLISE METALOGENÉTICA	59
5. 1. INTRODUÇÃO	59
5. 1. 1. GUIAS PROSPECTIVOS NA ÁREA	60
5. 1. 3. MODELO GEOLÓGICO ADOTADO.....	62
5. 2. ANÁLISE METALOGENÉTICA USANDO LÓGICA <i>BOOLEANA</i>	63
5. 2. 1. GEOQUÍMICA.....	65
5. 2. 2. GEOFÍSICA.....	69
5. 2. 3. INTEGRAÇÃO DOS DADOS <i>BOOLEANOS</i>	70
5. 3. ANÁLISE METALOGENÉTICA USANDO LÓGICA <i>FUZZY</i>.....	74
5. 3. 1. INTRODUÇÃO.....	74
5. 3. 2. LÓGICA <i>FUZZY</i> EM SIG	75
5. 3. 3. OBJETOS GEOGRÁFICOS DIFUSOS.....	76
5. 3. 4. GEOLOGIA.....	79
5. 3. 5. GEOFÍSICA.....	88
5. 3. 6. GEOQUÍMICA	92
5. 3. 7. INTEGRAÇÃO DOS DADOS	105

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSÕES	108
6. 1. INCERTEZAS DA INTERPOLAÇÃO	108
6. 2. ABORDAGEM <i>BOOLEANA</i>	109
6. 3. ABORDAGEM <i>FUZZY</i>.....	109
6. 4. ANÁLISES PARA PB	111

6. 5. ANÁLISES PARA CU.....	112
6. 3. OBSERVAÇÕES FINAIS.....	113
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	115
ANEXO 1	
ANEXO 2	
ANEXO 3	
ANEXO 4	

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. 1: LOCALIZAÇÃO DA FOLHA PILAR DO SUL	4
FIGURA 1. 2: ARTICULAÇÃO DA FOLHA SF.23 - Y - C - IV - 4.	4
FIGURA 2. 1: ILUSTRAÇÃO DA DIFERENÇA ENTRE PRECISÃO E EXATIDÃO.....	10
FIGURA 2. 2: DIFERENÇAS ESPACIAIS ENTRE AS FEIÇÕES POLÍGONOS E REGIONS.	13
FIGURA 3. 1: MAPA GEOLÓGICO PRODUZIDO PELO PRÓ-MINÉRIO.	20
FIGURA 3. 2: PONTOS DE AMOSTRAGEM GEOQUÍMICA.....	28
FIGURA 3. 3: ZONAS DE ANOMALIAS GEOQUÍMICAS TRAÇADAS PELO PRÓ-MINÉRIO.....	31
FIGURA 3. 4: PONTOS DO LEVANTAMENTO AEROGEOFÍSICO SOBRE A REGIÃO ESTUDADA.	33
FIGURA 4. 1: REPRESENTAÇÃO PELO DIAGRAMA DE VENN, DE UM OPERADOR OR <i>BOOLEANO</i> ..	39
FIGURA 4. 2: REPRESENTAÇÃO PELO DIAGRAMA DE VENN DE UM OPERADOR DE INTERSECÇÃO.	39
FIGURA 4. 3: REPRESENTAÇÃO DO COMPLEMENTO DE UM CONJUNTO.	40
FIGURA 4. 4: REPRESENTAÇÃO DO OPERADOR NOT	40
FIGURA 4. 5: REPRESENTAÇÃO DO OPERADOR XOR.	41
FIGURA 4. 6: UNIVERSO DE DISCURSO PARA UMA ANOMALIA HIPOTÉTICA.	45
FIGURA 4. 7: CONJUNTO <i>FUZZY</i> SEGUNDO UMA FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA LINEAR.	45
FIGURA 4. 8: CONJUNTO <i>FUZZY</i> SEGUNDO FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA DE CURVA S.	46
FIGURA 4. 9: TOMADA DE DECISÃO NUM AMBIENTE DIFUSO.	52
FIGURA 4. 10: COMBINAÇÃO E DECOMPOSIÇÃO DE PROPOSIÇÕES DIFUSAS.	53
FIGURA 4. 11: ANOMALIA PARA CU (HIPOTÉTICO).....	55
FIGURA 4. 12: ANOMALIA RADIOMÉTRICA. CONTAGEM TOTAL (HIPOTÉTICA).	55
FIGURA 4. 13: EXEMPLO DE IMPLICAÇÃO MONOTÔMICA.	56
FIGURA 4. 14: TEOR MÍNIMO CORRELACIONADO ENTRE ANOMALIA DE DOIS ELEMENTOS GEOQUÍMICOS.	57
FIGURA 4. 15: PROCESSO DE INFERÊNCIA E “ <i>DEFUZZIFICAÇÃO</i> ”	58
FIGURA 5. 1: DIAGRAMA GERAL DA INTEGRAÇÃO DE DADOS.	60
FIGURA 5. 2: DIAGRAMA PARA DETERMINAÇÃO DE ÁREAS DE INTERESSE GEOQUÍMICO.	66
FIGURA 5. 3: ÁREAS DE CONTRIBUIÇÃO DOS PONTOS CONSIDERADOS COMO DE ANOMALIA (CU)	67
FIGURA 5. 4: ÁREAS DE CONTRIBUIÇÃO DOS PONTOS CONSIDERADOS COMO DE ANOMALIA (PB).	68
FIGURA 5. 5: ÁREAS DE ANOMALIAS AERORADIOMÉTRICAS <i>BOOLEANAS</i>	70
FIGURA 5. 6: ÁREAS DE INTERESSE PARA CU (<i>BOOLEANAS</i>).....	72
FIGURA 5. 7: ÁREAS DE INTERESSE PARA PB (<i>BOOLEANAS</i>).....	73
FIGURA 5. 8: REPRESENTAÇÕES POR CONJUNTOS <i>FUZZY</i> DE CONTATOS LITOLÓGICOS.....	79
FIGURA 5. 9: DEMONSTRAÇÃO DA DIFERENÇA DE <i>FUZZINESS</i> E INCERTEZA EM MAPEAMENTO DE SOLOS	80
FIGURA 5. 10: INCERTEZA ENTRE DUAS LITOLOGIAS.....	85
FIGURA 5. 11: INTERSECÇÃO DE DOIS CONJUNTOS <i>FUZZY</i>	86
FIGURA 5. 12: FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA DESCREVENDO A INTERSECÇÃO DOS DOIS CONJUNTOS <i>FUZZY</i>	86
FIGURA 5. 13: DETALHE DO MAPA GEOLÓGICO DIFUSO CONSIDERANDO AS RELAÇÕES DE CONTATO	87
FIGURA 5. 14: DEFINIÇÃO DO CONJUNTO <i>FUZZY</i> PARA U.....	89
FIGURA 5. 15: DEFINIÇÃO DO CONJUNTO <i>FUZZY</i> PARA K.....	89
FIGURA 5. 16: ANOMALIAS <i>FUZZY</i> PARA U.....	90
FIGURA 5. 17: ANOMALIAS <i>FUZZY</i> PARA K.....	91
FIGURA 5. 18A / B: HIPOTÉTICAS ANOMALIAS GEOQUÍMICAS <i>FUZZY</i>	92
FIGURA 5. 19: CONJUNTO <i>FUZZY</i> PARA A DEFINIÇÃO DE ANOMALIAS GEOQUÍMICAS DE PB	93
FIGURA 5. 20: CONJUNTO <i>FUZZY</i> PARA A DEFINIÇÃO DE ANOMALIAS GEOQUÍMICAS DE CU.	94
FIGURA 5. 21: FLUXOGRAMA PARA GERAÇÃO DE ANOMALIAS GEOQUÍMICAS DIFUSAS.....	95
FIGURA 5. 22: CONJUNTO <i>FUZZY</i> DE REPRESENTATIVIDADE ESPACIAL DE AMOSTRAS GEOQUÍMICAS.....	98
FIGURA 5. 23: EXEMPLO DA REPRESENTATIVIDADE ENTRE DUAS AMOSTRAS GEOQUÍMICAS.	99
FIGURA 5. 24: CONJUNTO <i>FUZZY</i> DE CADA ÁREA DE ABRANGÊNCIA DE AMOSTRA PARA A ANOMALIA DE CU.	101
FIGURA 5. 25: CONJUNTO <i>FUZZY</i> DE CADA ÁREA DE ABRANGÊNCIA DE AMOSTRA PARA A ANOMALIA DE PB.	102
FIGURA 5. 26: RESULTADO DA INTERSECÇÃO <i>FUZZY-ZADEH</i> DOS POLÍGONOS DE ÁREA DE ABRANGÊNCIA COM O CONJUNTO DE GRAU DE PERTINÊNCIA AO CONJUNTO <i>FUZZY</i> ANÔMALO PARA CU.	104
FIGURA 5. 27: RESULTADO DA INTERSECÇÃO <i>FUZZY-ZADEH</i> DOS POLÍGONOS DE ÁREA DE ABRANGÊNCIA COM O CONJUNTO DE GRAU DE PERTINÊNCIA AO CONJUNTO <i>FUZZY</i> ANÔMALO PARA PB.....	105
FIGURA 5. 28: ÁREAS DE INTERESSE ANÔMALO PARA CU BASEADO NA ABORDAGEM <i>FUZZY</i>	106
FIGURA 5. 29: ÁREAS DE INTERESSE ANÔMALO PARA PB BASEADO NA ABORDAGEM <i>FUZZY</i>	107

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 2.1: FAIXA DE RESOLUÇÃO ESPACIAL DEPENDENDO DA ESCALA DA ANÁLISE.....	8
TABELA 2.2: COMPARAÇÃO ENTRE POLÍGONOS E <i>REGIONS</i>	12
TABELA 2.3: COMPARAÇÃO DOS FORMATOS <i>RASTER</i> E VETORIAL.....	14
TABELA 2.4: PADRONIZAÇÃO DE NOMENCLATURA PARA OS SISTEMAS UTILIZADOS.....	15
TABELA 2.5: ALGUMAS PADRONIZAÇÕES DE TEMAS PARA NOMENCLATURA DE ARQUIVOS.....	16
TABELA 2.6: ALGUMAS OPERAÇÕES PARA NOMENCLATURA DE ARQUIVO.....	16
TABELA 3.1: Base de dados inicial utilizada para a pesquisa na folha Pilar do Sul.....	18
TABELA 3.2: Parâmetros estatísticos para Cu e Pb na Folha Pilar do Sul.....	30
TABELA 4.1: REPRESENTAÇÃO DE UM OPERADOR <i>BOOLEANO OR</i>	39
TABELA 4.2: REPRESENTAÇÃO DE UM OPERADOR <i>BOOLEANO AND</i>	39
TABELA 4.3: REPRESENTAÇÃO DE UM OPERADOR <i>BOOLEANO NOT</i>	40
TABELA 4.4: REPRESENTAÇÃO DE UM OPERADOR <i>BOOLEANO XOR</i>	41
TABELA 4.5: OPERADORES COMPENSATÓRIOS ALGÉBRICOS DE INTERSEÇÃO E UNIÃO.....	50
TABELA 4.6: OPERADORES COMPENSATÓRIOS DE UNIÃO E INTERSEÇÃO DE YAGER.....	50
TABELA 5.1: RELAÇÕES DE CONTATO DIFUSO QUANTIFICADAS PARA OS CONTATOS DESCRITOS NA ÁREA.....	83
TABELA 5.2: PARÂMETROS ESTATÍSTICOS PARA A DEFINIÇÃO DAS ANOMALIAS <i>FUZZY</i> (CANALIS U E K).....	88
TABELA 5.3: RESULTADO DA 2ª DERIVADA TRADUZIDO PARA O CUSTO PONDERADOR.....	100
TABELA 6.1: COMPARAÇÃO DO TOTAL DE ÁREAS DE INTERESSE PARA Pb ATRAVÉS DAS DUAS ABORDAGENS ESTUDADAS.....	112
TABELA 6.2: COMPARAÇÃO DO TOTAL DE ÁREAS DE INTERESSE PARA Cu ATRAVÉS DAS DUAS ABORDAGENS ESTUDADAS.....	113



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE
CAMPINAS/
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS/DEPTO

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS -
ÁREA DE METALOGÊNESE

UTILIZAÇÃO DAS LÓGICAS BOOLEANA E *FUZZY* PARA ANÁLISE
METALOGENÉTICA NA FOLHA PILAR DO SUL (SP) VIA SISTEMA DE
INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

RESUMO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Marcelo Antonio Braghin

Esta tese descreve aplicações do uso da lógica *booleana* e *fuzzy* para uma análise metalogenética na Folha Pilar do Sul, SP. Para tanto, tais metodologias são desenvolvidas utilizando-se ferramentas de um Sistema de Informações Geográficas. Uma das maiores diferenças entre as lógicas estudadas é justamente a possibilidade de considerar as incertezas inerentes aos dados geológicos. Isto torna-se importante, haja visto as diversas fontes de incerteza numa base de dados espaciais com informações geológicas. A lógica *booleana* que permite apenas definir o que é verdadeiro ou falso pode gerar algumas dúvidas que podem ser melhor tratadas com o uso de uma abordagem da lógica *fuzzy*.

As análises efetuadas mostraram que a definição das incertezas nos resultados é um fator importante neste tipo de análise espacial. Com a lógica *fuzzy* houve um aumento nas áreas de interesse mas principalmente pôde ser definidas as prioridades de uma forma mais segura.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE
CAMPINAS/
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS/DEPTO

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS -
ÁREA DE METALOGÊNESE

UTILIZAÇÃO DAS LÓGICAS BOOLEANA E *FUZZY* PARA ANÁLISE
METALOGENÉTICA NA FOLHA PILAR DO SUL (SP), VIA SISTEMA DE
INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

ABSTRACT

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Marcelo Antonio Braghin

This work aims to describe methodological procedures to implement the use of Boolean and fuzzy logic applied to metallogenetical analysis. The study area is located in São Paulo state (Pilar do Sul quadricule) and focus to identify target areas for Cu and Pb. The use of Geographical Information Systems (GIS) is essential to achieve good results and sophisticated logical operations produces maps and reports which no longer necessarily represent a single integration.

The main difference between the Boolean and fuzzy logics is the possibility to handle uncertainties, the former shows sharp contrasts, the later shows diffuse limits. The use of GIS and non-cumulative algebra on geological data set, with inherent uncertainties, provided the definition of target areas. Target areas defined by the fuzzy logic are better spatial distributed than those defined by the Boolean logic.

1. Introdução

Uma pesquisa metalogenética utiliza uma grande quantidade e variedade de dados que são gerenciados e analisados por uma equipe de geólogos de diferentes especialidades. Sob este aspecto, a utilização de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) se ajusta perfeitamente, tanto por sua capacidade de gerência de dados espaciais como pela manipulação dos mesmos.

Entretanto, é necessário definir procedimentos para se obter o melhor resultado possível, abrangendo a manipulação dos dados, a metodologia de trabalho e principalmente as análises a serem executadas.

Além desses aspectos, toda a pesquisa depende da disponibilidade e da confiabilidade dos dados a serem utilizados. A etapa de entrada e conversão dos mesmos é uma das mais dispendiosas, em termos de tempo e custo, sendo necessário já nesta fase, a definição dos objetivos da aplicação desenvolvida para a correta modelagem de dados.

Para se levar a cabo tais análises, é mister considerar os erros propagados durante todo o processo e procurar uma forma de tratamento dos mesmos bem como das incertezas inerentes aos dados. Entende-se como incerteza, não necessariamente como um erro, mas a falta de conhecimento, a imprecisão que pode ter uma origem conceitual ou de medida. Para essas considerações, é feito neste trabalho uma comparação de abordagens, utilizando-se as lógicas *fuzzy* e *booleana*. Obteve-se, então, uma modelagem mais apropriada dos dados para avaliar as imprecisões, mais representativa do mundo-real, uma vez que a modelagem tradicional de dados em SIG é simplificada.

1. 1. Objetivos

O objetivo primordial deste trabalho foi o estudo metodológico da aplicação de análises lógicas *booleana* e *fuzzy*, em pesquisa metalogenética regional usando SIG. Sendo assim, teve como resultado a formulação de metodologias para definição de áreas de interesse metalogenético na folha Pilar do Sul (SF - 23 - Y - C - IV - 4) usando duas abordagens diferentes, que poderão ser facilmente adaptadas para outras áreas.

1. 2. Justificativas para a escolha da área

A folha do Pilar do Sul apresenta rochas correlacionáveis com formações mineralizadas no Vale do Ribeira ao Sul dessa folha, Stein *et al* (1986), tornando-se assim uma área interessante sob o ponto de vista metalogenético.

A área em estudo apresenta também uma grande quantidade de dados originados do PRÓ-MINÉRIO e que por ocasião do início deste trabalho já foram disponibilizados em meio digital. Vale lembrar que a entrada de dados é uma das etapas mais onerosas num projeto baseado em SIG o que torna esta área muito interessante para os objetivos deste trabalho.

1. 3. Metodologia

Este trabalho foi subdividido nas seguintes etapas, que são basicamente as mesmas de uma análise tradicional de dados em SIG:

Levantamento dos dados

Obtenção dos dados de interesse da folha Pilar do Sul levantados no programa PRÓ-MINÉRIO, junto a instituições depositárias, como o IPT, bem como a autorização da manipulação dos mesmos junto à Secretaria de Ciência e Tecnologia e Desenvolvimento do Estado de São Paulo (SCTDE/SP). O mesmo procedimento foi feito com relação aos dados aerogeofísicos, dos quais a CPRM é detentora.

Padronização dos dados

Tendo em vista a grande quantidade de dados envolvidos neste projeto, foi necessário estabelecer alguns procedimentos práticos de operação, como um relatório diário padrão, a nomenclatura dos dados gerados e demais passos padronizados. Tudo isto, prevendo que a base de dados deveria estar disponível para três sistemas (ArcInfo, Idrisi, GRASS). Estes controles foram feitos principalmente com a capacidade dos sistemas (ArcInfo e GRASS) de gravar os comandos bem como as respostas aos mesmos. Trata-se de uma etapa metodológica importante para qualquer projeto baseado em SIG.

Conversão de dados

Digitalização dos dados vetoriais, como os mapas geológicos, pontos de amostragem geoquímica, altimetria, entre outros. Inclui-se também a incorporação de dados *raster* e a conversão dos dados alfanuméricos em um padrão compatível com as plataformas a serem utilizadas.

Associado a esta etapa, foi necessário averiguar a confiabilidade dos mesmos através de vários procedimentos: verificação da metodologia de amostragem dos dados geoquímicos e geofísicos e do RMSE (*Root Mean Square Error* ou erro médio quadrático) dos mapas gerados.

Tratamento inicial dos dados

Após a entrada de dados e antes de se efetuar as análises propriamente ditas, foi necessário conhecer os dados disponíveis e gerar subprodutos para serem usados. Estes são vários: interpolação para geração de superfícies contínuas, extração de sub-bacias, extração automática de drenagens além de se fazer uso de ferramentas inerentes ao SIG, como a estatística, o processamento digital de imagens e a geoestatística. Esta última teve fundamental importância para a escolha do método de interpolação mais adequado.

Pesquisa das metodologias envolvidas

Esta etapa envolveu o estudo teórico e de aplicações das duas metodologias a serem utilizadas, através da pesquisa bibliográfica pormenorizada. Foi desenvolvida em paralelo às outras etapas.

Levando-se em conta que o surgimento de algumas das metodologias não esteve envolvida diretamente com pesquisa metalogenética utilizando SIG, houve a necessidade da adaptação das metodologias ao propósito deste trabalho.

Definição dos modelamentos e procedimentos

Com o conhecimento acumulado das análises a serem efetuadas, dos dados levantados e do conhecimento geológico da área foram estabelecidos os modelamentos a serem processados, bem como os procedimentos correspondentes.

Definições metodológicas

Baseando-se em todos os passos anteriores foram feitos processamentos dos dados

num SIG. Esta etapa foi feita de forma a ser personalizada para futuras pesquisas metalogenéticas com uma base de dados semelhante. Esta personalização poderá ser feita de preferência por uma linguagem de programação comum a todos os sistemas como o compilador C. Eventualmente, serão elaborados em linguagens específicas como o AML™ (*Arc Macro Language*) do ARC/INFO™.

1. 4. Localização da área

A Folha Pilar do Sul é delimitada pelos paralelos 23°45'e 24°00' de latitude sul e pelos meridianos 47°30' e 47°45' de longitude oeste, tendo aproximadamente uma área de 675 km². Sua localização no estado de São Paulo pode ser vista na Fig. 1.1. Localiza-se a sudoeste da cidade de São Paulo, distante aproximadamente 140 Km. A articulação da folha em estudo é mostrada na Fig. 1.2.

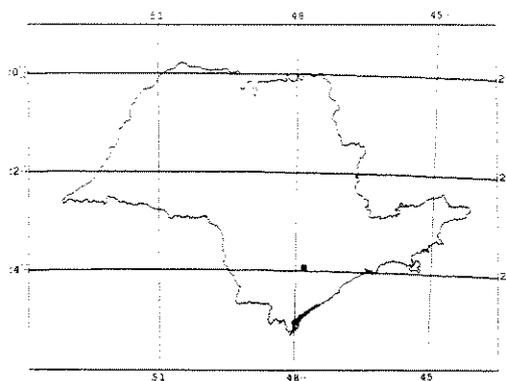


Figura 1.1: Localização da Folha Pilar do Sul.

Sarapuí	Salto de Pirapora	Sorocaba
São Miguel	Pilar do Sul	Jurupará
São José	Foz do Açungui	Pedro Barros

Figura 1.2: Articulação da Folha SF.23 - Y - C - IV - 4.

1. 5. Dados disponíveis

Os dados disponíveis junto a SCTDE/SP compreenderam:

- relatório gerado no programa PRÓ-MINÉRIO, contendo:
 - mapa geológico-estrutural (1:50.000);
 - mapa de pontos de amostragem geoquímica (1:50.000);
 - mapa de pontos de descrição de afloramentos (1:50.000);
 - resultados das análises geoquímicas de 30 elementos;
 - mapa das anomalias geoquímicas traçadas durante o programa (1:50.000).

Com amparo no programa PRÓ-MINÉRIO, também foi gerado, por parte do Instituto de Geociências da USP, um relatório do mapeamento geológico na escala 1:25.000, na porção NW da folha.

Os dados disponíveis junto a CPRM foram de levantamentos aerogeofísicos:

aeromagnetometria e
aerorradiometria.

Para este trabalho foi construído um banco de dados sobre a geologia do estado de São Paulo em Sistema de Informações Geográficas utilizando a folha Pilar do Sul como projeto-piloto (Campanha *et al.*, 1995). Esta base de dados é listada a seguir:

Ocorrências minerais para a região da folha Pilar do Sul, extraído do banco de dados IDEM, com base no mapa geológico da Folha São Paulo em escala 1:250.000 (SF . 23 - Y - C);

Mapa geológico digitalizado da referida folha produzida pelo PRÓ-MINÉRIO, no formato DXF;

Mapa estrutural digitalizado, também produzido pelo PRÓ-MINÉRIO, e no mesmo formato anterior;

Resultados de análises geoquímicas realizadas durante o referido programa de levantamentos de recursos básicos, este arquivo foi recuperado no formato DBF;

Imagens LANDSAT-TM nas bandas 1, 2, 3, 4, 5, e 7, cortadas para a referida área e registradas. Foram recuperadas como imagens do formato IDRISI;

Afloramentos descritos durante os trabalhos de campo do PRÓ-MINÉRIO este arquivo foi recuperado no formato DBF;

Mapa da base plani-altimétrica do IBGE na escala 1:50.000.

Em se tratando de uma pesquisa geológica, foi acrescentado um trabalho de campo para um controle maior de precisão e averiguação dos resultados. Foi feito um levantamento de pontos de controle (via GPS) para se verificar a precisão dos dados já levantados.

1.6. Recursos utilizados

Em se tratando de um projeto baseado em SIG foram necessários os seus cinco componentes básicos, quais sejam:

- dados, já descritos anteriormente;
- metodologia, também já descrito;
- sistemas;
- equipamentos e
- trabalhos de campo.

Sistemas

Foram necessários, além de sistemas operacionais básicos, compiladores em linguagem C, Sistemas de Informações Geográficas como o ARC/INFO™ (*Workstation*), GRASS (*Workstation* ou PC), IDRISI (PC). Neste caso, apesar da base de dados estar disponível para os três sistemas, optou-se para a utilização de um único sistema (ARC/INFO) para as duas análises a fim de obter uma comparação mais lícita entre as metodologias estudadas.

Programas de CAD, que no caso foi usado o AutoCAD™, pacotes estatísticos, geoestatísticos (ISATIS e GSLIB) e de processamento digital de imagens (ERDAS-Imagine™), também foram necessários.

Optou-se por usar compiladores em linguagem C pela portabilidade desta para as plataformas utilizadas.

Equipamentos

São os recursos computacionais necessários para dar suporte aos sistemas em operação, isto engloba tanto um ambiente em *workstations* como em PC e respectivos periféricos.

Trabalhos de campo

Foram feitos dois trabalhos de campo para levantamento de dados complementares e averiguação de resultados.

2. Sistema de Informações Geográficas

2. 1. Introdução

A maneira mais simples para se definir um SIG seria dizer que é um sistema para gerenciar e/ou analisar dados com uma componente espacial. Estes são georreferenciados de acordo com um sistema de coordenadas. Os SIGs atuais têm a capacidade de gerenciar dados bi-dimensionais e também tratar informações com algum atributo 3D relacionado (profundidade de uma sondagem, por exemplo) e fazer análises em 2,5D, como visualização de um terreno com a litologia sobreposta. Análises reais em 3D, utilizando o conceito de *voxel*, ainda é um tema restrito para a maior parte dos SIGs.

A utilidade básica de um SIG é apoiar um processo de tomada de decisão baseado em informações georreferenciadas. Entretanto, esta utilidade é permeada por diversas outras, segundo Bonham-Carter (1994): organização, visualização, pesquisa, combinação, análise e predição.

A organização é essencial para um bom andamento de projeto baseado em SIG. A criação de um dicionário de dados, baseado num modelo de dados, é o primeiro passo para o referido projeto. Em se tratando de um dado em SIG, deve-se levar em conta na modelagem que a informação é definida por sua localização e por diversos atributos relacionados. A visualização dentro de um SIG tem sua importância relevada quando é possível criar diversas formas de visualização para um mesmo dado. Isto, obviamente, levando-se em conta a possibilidade de se estabelecer procedimentos para uma produção cartográfica automatizada. A consulta espacial, envolve tanto o fato de se aproveitar a informação georreferenciada propriamente dita como pela consulta através de algum atributo relacionado. A combinação é a capacidade de se juntar base de dados espaciais de diferentes fontes podendo oferecer novos dados para futuras análises espaciais. Numa comparação muito simples, pode ser entendido como o processo digital de utilização de uma mesa de luz. A análise é o processo de se extrair algum significado do dado. Esta utilidade é executada por medidas, estatísticas, modelamentos de dados e outras operações. A predição é uma das principais utilidades de um SIG em prospecção mineral, podendo-se definir um mapa de favorabilidade de certos bens minerais e que servirá de apoio a tomada de decisões às diversas etapas do processo exploratório.

A exploração mineral é um processo demorado de pesquisa geológica em diversas etapas, partindo de uma pequena escala até grandes escalas quando do detalhamento das áreas de interesse. Para pequenas escalas, é possível definir zonas gerais de potencial mineral para algum tipo de depósito, baseado em conhecimento geológico regional. Para

escalas médias, partes destas zonas gerais são selecionadas para próximas explorações minerais em campo, baseado em alguma evidência do mapeamento geológico, levantamentos geoquímicos e geofísicos e na localização de ocorrências minerais. Ainda assim, com estas zonas escolhidas podem ser definidas áreas-alvo para prospecção de detalhe. Soma-se a isso, para a definição de pontos de sondagem, a necessidade de levar em conta outros dados espaciais como a dificuldade de acesso, tipo de sondagem requerida, litologia e custo para a tomada de decisão final.

Os procedimentos para a seleção de áreas podem ser ditados pela adoção de um modelo metalogenético para a área. Com a utilização de um SIG, é possível refinar diversos modelos para uma mesma região de estudo dentro de um tempo hábil. Um SIG é uma excelente ferramenta para aprimorar a integração de dados e ainda auxiliar nas análises subseqüentes. Numa primeira visão, estas análises são feitas com cruzamento de diferentes informações resultando áreas que contém atributos condizentes com o modelo de depósito adotado.

Aplicações do SIG para prospecção mineral podem ser encontradas em Silva (1991), Bonham-Carter (*op cit*) e Perotta (1996). Guimarães Filho (1994) apresenta diversos aspectos sobre a manipulação de dados espaciais em formato digital para exploração mineral.

2. 2. Definições básicas

A **resolução** é o menor valor de uma medida que um instrumento ou sistema de medição pode oferecer. Em se tratando de análises espaciais é importante ter o controle da resolução na qual está sendo feita a operação, principalmente em relação a dados *raster* e a escala em que está sendo feita a análise, conforme se verifica na Tab. 2.1.

Escala do mapa	Faixa de resolução espacial (m)
1:5.000	3 a 8
1:10.000	7 a 15
1:15.000	9 a 22
1:20.000	15 a 30
1:25.000	18 a 40
1:30.000	23 a 45

TABELA 2.1: FAIXA DE RESOLUÇÃO ESPACIAL DEPENDENDO DA ESCALA DA ANÁLISE (SILVA, 1995).

Outro fator a ser observado para a determinação da resolução do dado é o Erro Médio Quadrático verificado durante a entrada de dados para o meio digital, pois a localização geográfica fica imprecisa abaixo do erro de digitalização.

A **precisão** de um experimento é a medida de quanto corretamente o resultado foi determinado, sem referência ao seu valor verdadeiro. Está relacionada a um conceito de reprodutibilidade. Toda medida física está sujeita a um grau de incerteza já que os instrumentos estão sujeitos a isto, correspondendo a influências externas e internas. Isto afeta inclusive os instrumentos de alta precisão. Estas imprecisões são compensadas por diversas medidas até chegar numa estimativa estatisticamente plausível para quantificar o valor verdadeiro. A precisão absoluta indica a incerteza em termos da fração do valor do resultado. Sendo assim a precisão é dependente dos erros aleatórios.

A **exatidão** é a medida de quão próximo o resultado da medida está para o valor verdadeiro, portanto é a forma de avaliar o quanto o resultado é correto. É o grau de que uma medida corresponde ao valor padrão da incógnita. Ou seja, é a diferença entre as medidas experimentais e o valor padrão para uma incógnita. Incertezas em uma medida podem afetar a exatidão, mas a precisão não é afetada já que está baseada na escala do dispositivo.

A imprecisão intrínseca está associada com uma descrição das propriedades do fenômeno e não com a medida das propriedades usando algum dispositivo externo. Em geral, o tipo de imprecisão e inexatidão que os modelos difusos usam são independentes dos sistemas de medidas associados com suas variáveis de solução e controle. Este tipo de imprecisão não é diminuída pelo aumento da precisão métrica.

A exatidão está diretamente relacionada aos erros sistemáticos, ou seja, aqueles que farão os resultados diferentes dos valores “verdadeiros” com diferenças reproduzíveis. Erros deste tipo não são fáceis de serem analisados pela estatística. Uma representação esquemática da diferença entre estes os conceitos de precisão e exatidão pode ser visto na Fig. 2.1.

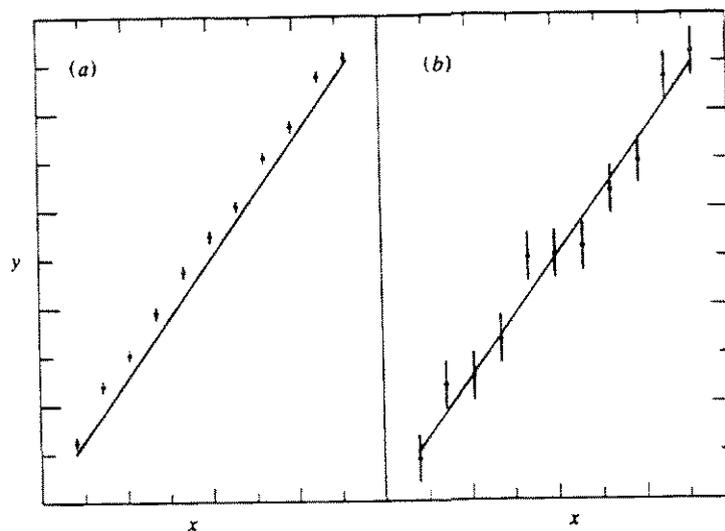


Figura 2.1: Ilustração da diferença entre precisão e exatidão. Dado preciso mas inexato (a), e dado exato mas impreciso (b). Bevington & Robinson (1992).

2. 3. Dados em Sistema de Informações Geográficas

Em qualquer projeto de SIG, a entrada e modelagem de dados ocupam grande parte do tempo e dinheiro. Processos automatizados tem tornado esta etapa de entrada de dados cada vez menor, mas ainda assim custosa.

No que se refere a dados para um SIG, há dois componentes básicos que, dependendo da abrangência da modelagem, podem ser independentes, uma vez que um SIG, idealmente, trabalha integrado a um RDBMS (*Relational DataBase Manangement System* ou Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados Relacional). Estes componentes são: dados espaciais onde as informações são localizadas representativamente às feições de mundo real; e os dados não-espaciais, que correspondem aos atributos relacionados aos dados espaciais.

Como um Sistema de Informação, o SIG tem como funcionalidade básica o gerenciamento e análise de um tipo de informação, no caso espacial. Como informação, entende-se “qualquer coleção de símbolos ou sinais, produzidos tanto pela observação de fenômenos artificiais ou naturais, ou pela atividade humana cognitiva, que pode ser usada para entender o mundo que nos cerca, ajudar na tomada de decisão ou para comunicação entre várias pessoas”, Dubois *et al* (1997). Esta definição pode ser aplicada tanto à informação espacial como à informação de atributos.

Nos últimos anos tem havido um grande desenvolvimento de técnicas para se obter o máximo de proveito na relação entre os humanos e o computador para usar todas os tipos de informações disponíveis para a solução de problemas. Neste aspecto, Dubois

et al (op cit) definem três componentes básicos para o que se chama de engenharia da informação: esclarecimento, recuperação e exploração.

O esclarecimento de uma informação seria o processo de levantamento primário da informação de uma forma que possa ser compreendida. Este componente básico vai desde a avaliação, filtragem, redução de dados redundantes ou errados, interpolação até o modelamento dos mesmos. Dentro deste contexto, podem ser aplicadas técnicas de classificação da informação, que pode ser feita com o agrupamento.

A recuperação equivale a extrair, baseado em certos critérios já existentes, partes da informação, possivelmente escondidas. Isto pode incluir a visualização dos dados em diferentes modos, bem como a fusão de diferentes informações. Formas sofisticadas de pesquisa e consulta às informações também estão embutidas neste conceito.

A exploração da informação entende-se como sendo as análises para suporte a tomada de decisões. Geralmente a informação é usada para suporte ao modelamento. Neste aspecto, a capacidade de SIG que pode combinar diversos tipos de informação (espacial, alfanumérica, numérica, lógica) é o grande trunfo na análise da informação.

Os dados espaciais se constituem na base das operações num SIG. Podem ser representados conforme sua dimensão, em 0D por um ponto, em 1D por uma linha, em 2D por uma área fechada (polígono, *region*), 2,5D por superfície contínua ou modelo de elevação digital e 3D por uma entidade sólida.

Os pontos correspondem a representação em 0D de um dado espacial. É armazenado um par de coordenadas dentro do sistema de projeção adotado, no caso de um dado vetorial. Se for um dado *raster* pode ser representado por um único *pixel* ou célula.

Linhas representam em 1D uma entidade espacial do mundo real. São armazenadas um conjunto de coordenadas de pontos que formam a linha representada. Em se tratando de dados com topologia de nós e arcos, o primeiro e o último pontos assumem grande importância pois são considerados os nós, respectivamente o nó inicial e o nó final. Ou seja, é o início ou fim de uma linha, ou a intersecção de duas linhas.

As áreas representam em 2D as feições de mundo real que têm área fechada. Em sua forma tradicional são representadas por um ou mais arcos que fecham uma área formando um polígono. Este pode ter arcos compartilhados por dois polígonos, neste caso, os arcos são chamados cadeias. Se for completo por apenas um único arco, fechado em si mesmo, é também chamado de polígono ilha. Numa modelagem de dados em SIG também é constituído por um ponto que armazena os atributos relacionados ao polígono definido pelos arcos.

A partir da versão 7.0 do Arc/Info foi disponibilizada uma nova relação topológica de área em que é permitido tratar dados que haja sobreposição, não-contínuas ou regiões com áreas vazias internas, chamada *REGIONS*. É organizada como uma

subclasse de uma cobertura utilizando a topologia arco-polígono já construída, porém de forma diferente. A subclasse *REGION* é definida como uma camada temática com o mesmo esquema de atributos, contendo uma ou mais feições. Estas tem um único conjunto de valores de atributos e podem ser compostas por um ou mais polígonos. A Tab. 2.2 apresenta as diferenças entre as duas topologias de áreas disponíveis.

POLÍGONOS	REGIONS
Não permite sobreposição.	Permite sobreposição.
Área contínua simples.	Áreas múltiplas não-contínuas.
Repartimento da área da classe em grande número de polígonos e um polígono universal.	Áreas vazias são permitidas, não apresentando o polígono universal.
Não podem ser 'aninhados' (áreas com bordas comuns sendo compartilhadas).	Pode ter feições 'aninhadas'.
Uma classe por cobertura.	Muitas classes por cobertura, com geometria compartilhada.

TABELA 2.2: COMPARAÇÃO DAS CLASSES DE FEIÇÕES GEOGRÁFICAS DE POLÍGONOS E *REGIONS*, BOYD (1995).

Esta nova subclasse abre uma nova possibilidade de representação mais próxima do mundo-real, bem como de novas análises espaciais. Dentre estas, pode-se efetuar funções de sobreposição com mais de duas subclasses. Ao contrário da topologia de polígonos que permite apenas duas a duas; pode ser feita seleção *booleana* com várias subclasses onde as regiões de saída são geradas por uma combinação de produto cartesiano das regiões de entrada. Um exemplo esquemático dentre estas duas topologias de áreas pode ser vista na próxima Fig. 2.2.

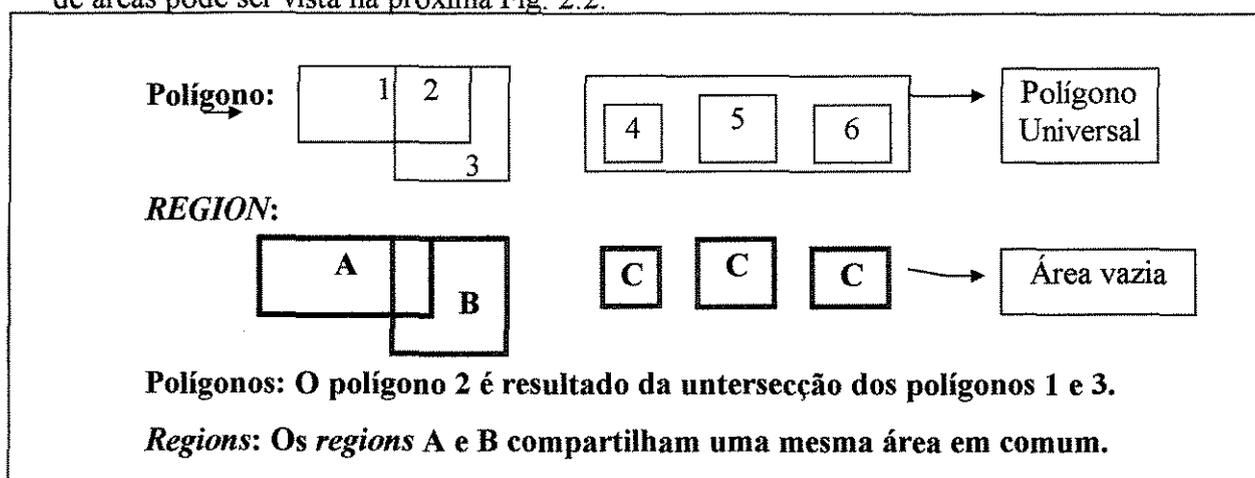


Figura 2.2: Diferenças espaciais entre as feições POLÍGONOS e *REGIONS*.

Uma das grandes vantagens desta nova modelagem é uma maior facilidade de analisar dados espaciais bem como, torná-los mais próximos da realidade. Essas análises informam, por exemplo, a porcentagem de área sobreposta, a área total de uma subclasse que corresponde a determinados critérios etc.

Uma explanação teórica mais aprofundada a respeito desta topologia, por ora tratada, pode ser encontrada em Egenhofer *et al* (1994), onde é descrita as relações topológicas entre duas regiões com bordas conectadas e o caso das relações topológicas entre dois objetos com áreas vazias.

As superfícies contínuas, também conhecidas por sua dimensão 2,5D são um tipo de dado *raster* que apresentam uma variação espacial contínua e não definida como o caso dos itens anteriores. O exemplo mais comum deste dado num SIG, é Modelo de Elevação Digital, onde cada *pixel* do *grid* interpolado corresponde a uma elevação do terreno. Em princípio, todo processo de interpolação gera este tipo de dado. É um dado muito usado em aplicações ambientais e de prospecção mineral. O valor dos *pixels* normalmente são números reais, ao contrário de *grid* temáticos onde o valor dos mesmos é um número inteiro.

Os dados não espaciais correspondem aos atributos que podem estar relacionados ou não aos dados espaciais. São os componentes alfanuméricos nos dados em SIG. Por exemplo, a caracterização de ponto de amostragem geoquímica não teria sentido sem os teores dos elementos amostrados. Estes teores estariam atribuídos a um mesmo ponto que conteria informações de diversos elementos analisados.

Dependendo do tipo de análise a ser efetuada, poderá ser empregada ou o dado raster ou o dado vetorial. Numa situação ideal deve-se operar com os dois formatos num mesmo sistema.

Os dados *raster* por ocuparem muito mais espaço (em disco e memória) do que a estrutura vetorial, têm diversas formas de manipulação e armazenamento, tais como RLE (*run length encoding*), VPE, QUADTREE etc.

As operações em dados matriciais, ou *raster*, são de maior facilidade de implantação e mais rápidas. Há uma grande vantagem em se trabalhar com este tipo de dado, pois se disponibiliza todas as operações algébricas, tratando cada dado como se fosse uma variável.

Já para as operações vetoriais, há uma maior precisão do dado espacial, porém exige-se mais em termos computacionais.

A Tab. 2.3 apresenta uma comparação entre os dados *raster* e vetorial.

<i>Raster</i>	<i>Vetorial</i>
Dado possui estrutura simples, porém ocupando mais espaço em disco e memória.	Estrutura de dados mais compacta, porém mais complexa.
Operações de superposição são mais facilmente implementadas.	Operações que necessitem de relações topológicas complexas.
Altas variabilidades espaciais são eficientemente representadas.	A representação da alta variabilidade espacial não é eficaz.
Permite operações matemáticas com precisão, porém ocorre “efeito escada” na representação dos dados espaciais.	Representa os dados espaciais de uma forma mais correta.
Operações de modelagem e simulação são facilitadas.	Em se tratando de relações topológicas espaciais, é o modelo ideal.

TABELA 2.3: COMPARAÇÃO DAS VANTAGENS E DESVANTAGENS DESTES DOIS FORMATOS, SILVA (1995).

Congalton (1997) apresenta diversas considerações para a conversão *raster-vetor* e vice-versa, sugerindo técnicas para atenuação dos erros nestes processos.

2. 4. Procedimentos

Em se tratando de um projeto com uma base de dados pequena, utilizando-se apenas uma folha geológica em escala 1:50.000, não foi necessário definir diversos procedimentos necessários para uma operação multiusuário da base de dados. Neste caso, seria utilizado uma estrutura de banco de dados mais complexa do que a utilizada aqui, definindo usuários com diferentes níveis de acesso a base de dados, gerência das modificações na base, execução de operações espaciais e integração com outros bancos de dados.

Apesar da sua simplicidade, exige muitos cuidados na manipulação dos dados criados, editados e analisados. Para o armazenamento dos dados foi utilizado a estrutura de diretórios padronizada a seguir:

ARC/INFO

workspace: .../dados/pilar/ai

IDRISI

(para importação de DOS, exportação para UNIX)

dir (no PC): ... \dados\pilar\idr

dir (na workstation): .../dados/pilar/export

Como basicamente foi utilizado o ARC/INFO para análises a partir do diretório apresentado acima (*workspace*) foram criados três outros para se gerar os resultados dos modelamentos:

workspace para análises booleanas: .../dados/pilar/ai/boo

workspace para análises fuzzy: .../dados/pilar/ai/fuzzy

Para facilitar a manipulação dos dados criados durante todo o processo, foi adotado um padrão para nomenclatura também. Isto é importante, pois no nome do dado criado (seja uma *coverage* do ARC/INFO, um GRID, uma imagem do IDRISI ou do GRASS) é possível identificar o sistema utilizado, o tema, a seqüência de operação realizada, bem como a última operação realizada. Tal padronização encontra-se a seguir com alguns parâmetros exemplificados nas Tab.s 2.4, 2.5 e 2.6.

Nomenclatura dos arquivos:

Todos os arquivos e *coverages* foram nomeados com no máximo 8 caracteres minúsculos assim distribuídos:

1° = sistema utilizado (ARC/INFO, GRASS, IDRISI);

2°, 3° e 4° = tema (GEOlogia, LANDSAT *TM-4* ...);

5° E 6° = número da operação referente ao tema;

7° e 8° = operação (Importar *DXF* ...).

Por exemplo: ageo01id = *coverage* do ARC/INFO, de Geologia, primeira operação para o tema de geologia, importação de DXF. A seguir, tem-se a listagem de algumas padronizações para a nomenclatura utilizadas neste projeto

<i>Sistema utilizado</i>	
ARC/INFO	A
GRASS	G
IDRISI	I

TABELA 2.4: PADRONIZAÇÃO DE NOMENCLATURA PARA OS SISTEMAS UTILIZADOS.

<i>Temas</i>	
Altimetria (arcos)	ALT
Amostragem de sedimentos de corrente (pontos)	PGQ
Drenagem (arcos)	DRE
Geofísico (completo)	GEF
Geologia (polígonos)	GEO
Geologia Estrutural (arcos)	EST
Anomalia Geoquímica - Cu (pontos)	ACU
Anomalia Geoquímica - Pb (pontos)	APB
Imagens LANDSAT-TM (banda 4)	TM4
Imagens LANDSAT-TM (banda 5)	TM5
Imagens LANDSAT-TM (banda 7)	TM7
Ocorrências minerais (pontos)	OCO
Pontos de descrição de afloramentos (pontos)	AFL

TABELA 2.5: ALGUMAS PADRONIZAÇÕES DE TEMAS PARA NOMENCLATURA DE ARQUIVOS.

OPERAÇÕES	
ASCII > Raster	AR
ASCII > Vetor	AV
<i>Buffer</i>	BF
<i>Build</i> (Construção topológica - ARC)	BD
<i>Clean</i> (Construção topológica com intersecção - ARC)	CN
Digitalização (vetorial)	DG
Edição	ED
Edição de atributos	ET
Extração de Sub-bacias	SB
Filtragem Passa-Baixa	PB
GRASS > ARC	GA
IDRISI > ARC	IA
Importação DXF	IX
<i>Raster</i> > Vetorial	RV
Vetorial > <i>Raster</i>	VR
Combine	CM

TABELA 2.6: ALGUMAS OPERAÇÕES PARA NOMENCLATURA DE ARQUIVO.

No anexo 1 há um exemplo de relatório diário para controle das operações efetuadas na base de dados. Sua utilização torna-se fundamental quando se tem uma equipe de usuários manipulando uma grande quantidade de dados.

2. 5. Aquisição de dados

Um dos aspectos mais importantes de um trabalho utilizando SIG é justamente a entrada de dados, tanto pelos custos envolvidos quanto pelo tempo demandado. Não se esquecendo também o controle dos erros da digitalização.

Dados vetoriais

Todos os mapas utilizados na base de dados deste projeto foram digitalizados utilizando-se o AUTOCAD™ e depois convertidos para o formato de exportação DXF (ASCII) Campanha *et al (op cit)*, como parte de um projeto-piloto do IPT para gerência de base de dados geológicos utilizando SIG. Concomitante a esta fase foi realizado o controle dos erros e iniciou-se a conversão para o formato do GRASS, do IDRISI e por último para o formato vetorial do ARCINFO (*coverages*).

Dados raster

Quando da utilização dos sistemas GRASS e IDRISI, procedeu-se obrigatoriamente a conversão dos dados importados para o formato *raster* (matricial), uma vez que estes sistemas apenas fazem análises neste formato. O mesmo não foi feito em relação ao ArcInfo, pois este dispõe de uma ampla gama de ferramentas para operações vetoriais, sendo assim os dados pontuais não precisaram ser convertidos para o formato *raster*. Dados pontuais foram usados para gerar superfícies contínuas, no caso dos dados aerogeofísicos. Outra forma de entrada de dados raster utilizada foi a importação de imagens de outros sistemas.

Dados alfanuméricos

Os atributos alfanuméricos foram importados através de arquivos no formato dBASE. Estes dados incluem, a descrição das ocorrências minerais, os teores de amostragem geoquímica e a descrição de afloramentos. Outros dados, como os pontos de amostragem geofísica e seus respectivos valores de aeromagnetometria foram importados com o formato X, Y e Z (ASCII).

3. Base de dados - Folha Pilar do Sul

3. 1. Introdução

Tendo em vista os objetivos deste trabalho, não foi abordado aqui de forma detalhada a discussão dos resultados dos mapeamentos efetuados na área. Foram adotados basicamente os resultados apresentados pelo projeto do PRÓ-MINÉRIO (IPT, 1988 e Campos Neto *et al*, 1990) bem como alguns trabalhos encontrados na literatura sobre a região em estudo (Hasui, 1973; Stein *et al*, 1986). A base de dados é apresentada na Tab. 3.1 onde é possível verificar o tipo dos dados e a origem dos mesmos.

TEMAS	Topologia / Estrutura	Origem
Geologia	polígono	PRÓ-MINÉRIO
Geologia (unidades litológicas + aluviões sobrepostos)	<i>regions</i>	PRÓ-MINÉRIO
Geologia Estrutural (lineamentos / falhamentos)	arco	PRÓ-MINÉRIO
Altimetria - curvas de nível	arco - TIN - LATTICE	IBGE
Amostragem de sedimentos de corrente	ponto	PRÓ-MINÉRIO
Geofísica (aeromagnetometria / aerorradiometria)	ponto	CPRM
Pontos de amostragem geoquímica de sedimentos de corrente	ponto	PRÓ-MINÉRIO
Imagens LANDSAT – TM (bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7)	GRID	INPE
Ocorrências minerais	ponto	IPT
Pluviosidade (não foi útil neste trabalho)	ponto	PRÓ-MINÉRIO
Pontos de descrição de afloramentos	ponto	PRÓ-MINÉRIO
Pontos com ocorrência mineral	pontos	PRÓ-MINÉRIO
Bacias	polígonos	Modelo de elevação digital
Drenagem	arco	IBGE
Drenagem	arcos	Modelo de elevação digital

Tabela 3.1: Base de dados inicial utilizada para a pesquisa na folha Pilar do Sul.

Apesar das imagens de radar do projeto RADAMBRASIL terem sido utilizadas durante a confecção do mapa geológico, estes dados não serão utilizados neste projeto.

3. 2. Geologia

A folha geológica de Pilar do Sul produzida pelo PRÓ-MINÉRIO é a base deste trabalho e é apresentada na Fig. 3.1, IPT (*op cit*). Foi feita através de métodos e técnicas convencionais, buscando cobrir uniformemente a área com dados compatíveis com a escala 1:50.000. A fotointerpretação preliminar foi feita com fotos aéreas na escala 1:60.000 e posteriormente com fotos na escala 1:25.000 para confecção do mapa.

A norte da área ocorre um corpo restrito de biotita-granodiorito-gnáissico (APIGG) orientado NW-SE, concordante a orientação dos xistos feldspatizados vizinhos, resultando num contato pouco notável. Faz parte do que IPT (*op cit*) chamou de embasamento Pré-Açungui. No campo não foram definidos os contatos a sul e a oeste, o que foi feito através de observação de uma textura mais lisa nas fotos aéreas. A leste o contato é brusco com os granitos do maciço Pilar do Sul e a norte o contato é discordante com os filitos do Grupo São Roque através do Falhamento de Taxaquara.

Corpos orientados a NW-SE e alongados de Metaultrabaistos (PMPSaU) com espessura métrica a decamétrica a nordeste da Represa das Paineiras. IPT (*op cit*) já considera estas rochas como sendo do Grupo Açungui. É constituído por talco e clorita e secundariamente apresenta antofilita, serpentina e minerais opacos. Esta litologia é apenas aflorante em matacões e blocos que se alinham numa pequena crista saliente na topografia.

Os paragneisses (PMPSaGN) são representados como intercalações na seqüência de xistos feldspáticos e migmatitos, com dimensões mapeáveis em dois locais: a nordeste da Represa das Paineiras e na região da Serra do Lopes e outros afloramentos pontuais. São gnaisses, gnaisses-quartzíticos e gnaisses-granodioríticos, apresentando altas porcentagens de quartzo, plagioclásio, microclínio e biotita. Subordinadamente aparece muscovita e como acessórios ocorrem zircão, clorita, epidoto, granada, turmalina, minerais opacos, apatita e titanita. IPT (*op cit*) definiu esta rocha como já fazendo parte do Grupo Açungui. Apresentam contatos concordantes com a foliação das rochas vizinhas e quando observados são bruscos e paralelos a xistosidade.

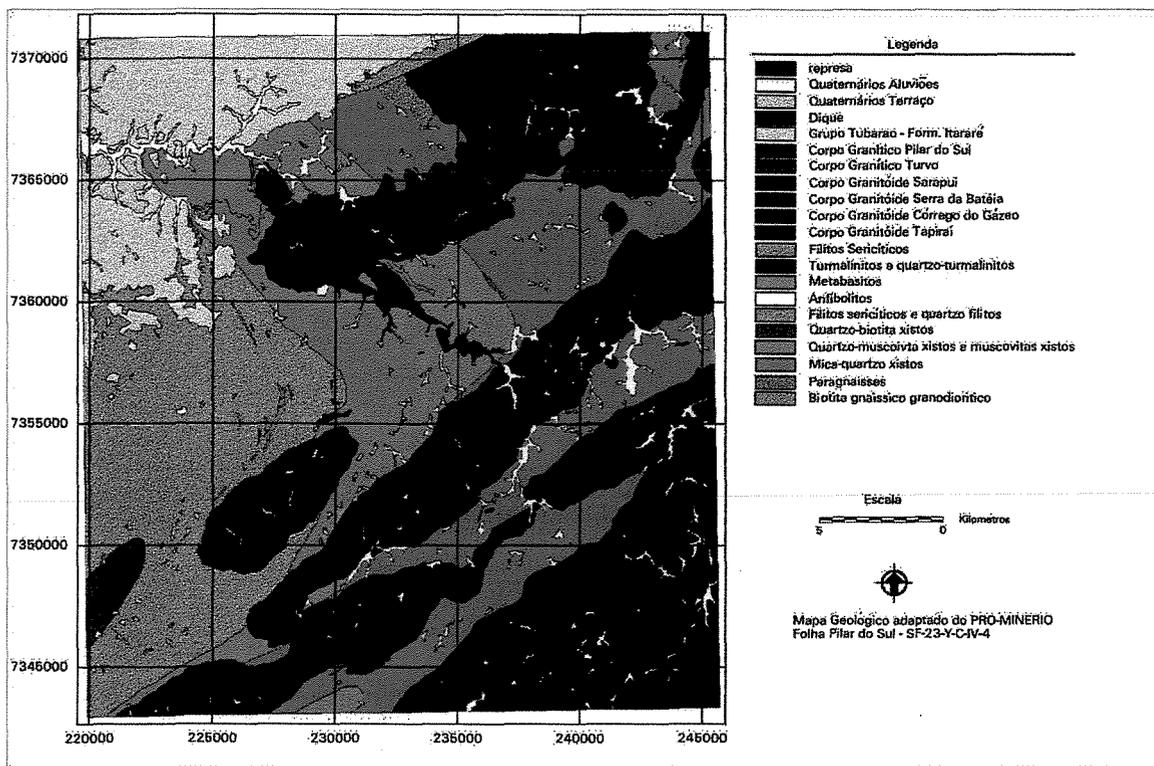


Figura 3.1: Mapa geológico produzido pelo PRÓ-MINÉRIO, na escala 1:50.000 da área estudada.

Mica xistos, quartzo-mica xistos e mica-quartzo xistos feldspatizados e localmente migmatizados (PMPsaxM) ocorrem em grandes extensões, a norte da área na região da Serra dos Lopes e da Serra do Pinhal, a nordeste da Represa das Paineiras e em duas faixas alongadas a NE-SW intercaladas nos granitóides da Suíte Piedade, na Serra de Paranapiacaba. A sudoeste da área, na Serra dos Agudos Grandes, essas litologias ocorrem de forma restrita. As micas são representadas pela biotita e muscovita sem ser possível estabelecer o predomínio de uma em relação a outra, dada a alteração das rochas. Secundariamente ocorrem granada, silimanita, andaluzita (ocorrendo como porfiroblastos), turmalina, minerais opacos e localmente grafita e estauroлита. Como acessórios aparecem clorita, zircão e metálicos variados, principalmente pirita. IPT (*op cit*) também definiu esta rocha como já fazendo parte do Grupo Açungui, mas a estratigrafia da área não será aqui discutida. Com os xistos não feldspatizados os contatos são transicionais sendo que a representação do contato no mapa começa com o início da ocorrência de feldspatização dos xistos. Já com as rochas granitóides os contatos são bruscos e discordantes, o que é menos evidente no contato sul do Corpo Serra da Batéia.

Com o corpo gnáissico a norte da área os contatos são bruscos.

IPT (*op cit*) mostra os quartzo-biotita xistos e biotita-quartzo xistos (PMPSaBX) aflorando unicamente a sudoeste da área, na região dos córregos do Amaral e Terrível. São xistos com quartzo em porcentagens altas se alternando em predominância de micas, onde a biotita é mais abundante. Apresentam ainda granada, minerais opacos, carbonato, clorita e turmalina. Como opaco a magnetita é uma presença constante. Localmente ocorre grafita. Não foi definido o contato destas rochas com os filitos, sendo por este motivo esta unidade individualizada através de contato litológico com caráter indefinido.

Há uma seqüência de quartzo-muscovita xistos e muscovita xistos (PMPSaX) que se estende por uma faixa delgada a sudoeste da área nas encostas de norte da Serra dos Agudos Grandes e ocupa a porção central e norte da folha na região das represas das Paineiras e Jorda Flor. Em áreas restritas se expõe nas regiões dos ribeirões Três Barras e Água das Furnas. Além das rochas mencionadas apresentam freqüentes bandas de variadas espessuras de quartzo xistos e quartzito micáceos. Subordinadamente e com maior expressão a oeste da unidade ocorrem grafita xistos associados a intercalações de filitos sericíticos. Além disto, nesta mesma porção da unidade, há intercalações de metabasitos. A leste predominam bandas de anfíbolitos que se repetem por toda a unidade. Há uma única ocorrência de mármore-calciosilicático intercalada nos xistos desta unidade. Observam-se veios de quartzo que em sua maioria são concordantes a xistosidade. Associam-se a tais veios, pseudomorfos limonitizados, possivelmente de pirita, com dimensões centimétricas. Nos contatos com os granitos há grande quantidade de veios de quartzo e de micas desorientadas e maiores que no geral. Estas porções restritas à delgada faixa sujeita ao metamorfismo de contato representando *hornfels* alumino-silicáticos. Com a seqüência de filitos os contatos são transicionais, com recorrência de tipos na região do contato e aumento gradativo no tamanho das micas no sentido dos filitos para os xistos. Também transicional e como descrito anteriormente é o contato com os xistos feldspatizados a oeste. Com os granitos do Pilar do Sul os contatos são discordantes bem como os granitóides da Suíte Piedade. O contato com os sedimentos da Formação Itararé é discordante, IPT (*op cit*).

Associados aos filitos, xistos e xistos feldspáticos afloram os quartzitos (PMPSaQ) na forma de bandas intercaladas. São predominantemente sericíticos e restritamente apresentam micas mais grossas, geralmente muscovitas, que ocorrem mais nas seqüências xistosas. Os minerais acessórios presentes nos xistos e filitos também estão presentes nos quartzitos, bem como algumas ocorrências de pirita. Frequentemente ocorrem veios de quartzo associados. Os contatos são bruscos com os filitos e xistos, mas concordantes com a orientação geral dessas rochas.

Os filitos sericíticos e quartzo filitos (PMPSaF) afloram em quase toda a porção oeste da área, sendo que no extremo noroeste desaparecem sob os sedimentos do Grupo Tubarão e seu contato com os xistos a leste é basicamente definido pelo Ribeirão do Pilar. São caracterizados pelo bandamento e ritmicidade. Ocorrem intercalações, até métricas, de metassiltitos e metarenitos, também sericíticos, de filitos grafitosos, além de bandas mais restritas de xistos finos, principalmente na porção leste da unidade. Há também, frequentes intercalações de metabasitos. A grafita é um mineral importante em várias porções desta seqüência. Como acessórios apresentam-se a turmalina e a magnetita, este como opaco. Não são observadas variações significativas próximas aos contatos com os granitóides, sendo que estes contatos são discordantes. Os contatos são transicionais com os xistos a leste e na faixa contígua, com recorrência de xistos em meio aos filitos. Já com os sedimentos do Grupo Tubarão, o contato é por discordância angular.

Os anfibolitos (PMPSaA) ocorrem intercalados nas seqüências xistosas sob a forma de bandas com espessura até decimétrica sempre concordantes com a orientação da xistosidade. São constituídos essencialmente por hornblenda e plagioclásio, principalmente andesina e oligoclásio. Subordinadamente apresentam como opacos pirita, magnetita e titanita, além de quartzo, apatita e epidoto. A área de ocorrência é demarcada, em relação aos metabasitos, a partir dos contatos entre filitos e xistos, só ocorrendo intercalados nestes últimos.

Os metabasitos (PMPSaB) ocorrem intercalados à seqüência de filitos na porção oeste da área. São constituídos por actinolita e clinozoisita, com titanita, clorita, clinopiroxênio, plagioclásio, leucoxênio e opacos subordinados. Há corpos mapeáveis, com espessura decamétricas, porém no geral são espessuras até métricas. São relativamente fáceis de serem mapeadas por fotos aéreas. Apresentam-se concordantemente com o acamamento original reliquiar dos filitos, em contatos bruscos, aparentemente sem afetar as rochas adjacentes. Associados ocorrem talco e amianto antofilítico, bem como outros minerais portadores de metais.

Turmalinitos, quartzo turmalinitos; ortoquartzitos sacaróides e gonditos (PMPSaT) apresentaram-se em ocorrências dispersas pelos domínios das seqüências xistosas. Ocorrem também como cristas mapeáveis na região central da área em estudo. Geralmente estão associados a xistos turmaliníferos. A norte da Represa de Paineiras, aparecem quartzitos associados aos turmalinitos, sendo caracterizados como ortoquartzitos. Mais a sul, os corpos desta unidade apresentam ortoquartzitos restritos. Associados a estes, ocorrem gonditos, granada-quartzitos. Os turmalinitos e quartzo-turmalinitos são basicamente constituídos por turmalina ou então com porcentagens equilibradas com o quartzo. Podem apresentar ainda minerais opacos e muscovita, geralmente formando agregados

conjuntamente com o quartzo. Os contatos são litológicos, conseqüentemente, imprecisos, delimitando cristas que são sustentadas em função das próprias litologias que as constituem

Os filitos sericíticos do Grupo São Roque (PMPSsF) ocorrem no extremo norte da área, numa estreita faixa entre os sedimentos do Grupo Tubarão e o Falhamento de Taxaquara. São encontrados, também, quartzo filitos, que localmente podem ser miloníticos. Nestas rochas a porcentagem de quartzo supera a de sericita, mostrando secundariamente clorita, pseudomorfos limonitizados, turmalina e zircão. Já nas rochas miloníticas associadas ao Falhamento de Taxaquara o quartzo e a sericita e/ou clorita formam agregados granolepidoblásticos finos. Dentro desta seqüência há ocorrências pontuais de metabasitos. Os contatos desta litologia com os granitos, gnaisses e xistos são bruscos através da região de falha, em franca discordância estrutural. Já com os sedimentos da Formação Itararé estão em clara discordância angular e erosiva.

A suite Granitóide Piedade é subdividida em quatro corpos de rochas granitóides sin-a tardi-tectônicas. Como característica comum estão a granulação predominantemente grossa, textura porfiróide com megacristais, geralmente de feldspato alcalino, matriz granular-hipidiomórfica com presença de minerais máficos:

- **Sarapuí:** localizado no extremo nordeste da área, de composição granítica a granodiorítica caracterizado por uma grande quantidade de veios e bolsões irregulares de aplitos, pegmatitos e granitos isótipos atribuídos ao maciço de Pilar do Sul. Os contatos com os xistos feldspatizados e os migmatitos são discordantes, sendo que a delimitação da unidade foi difícil por fotos aéreas, dada ao subnívelamento da área e a presença de apófises dos granitóides no meio dos xistos. Em relação ao maciço de Pilar do Sul os contatos são aproximados.

- **Córrego do Gázeo:** situado a sul da cidade de Pilar do Sul, de composição granítica a quartzo-monzonítica, apenas em um local é observado veio aplitico cortando as rochas deste corpo. Os contatos com os filitos e xistos são discordantes com variação de relevo entre as unidades.

- **Serra da Batéia:** estendendo-se de sudoeste para nordeste da área englobando parte da Serra dos Agudos Grandes e a Serra da Batéia a nordeste. É de composição granítica a granodiorítica. Invariavelmente ocorrem metálicos, principalmente nas porções mais mesocráticas do corpo. Os contatos com o maciço granítico Turvo são bruscos, com dificuldades de traçá-los, uma vez que há porções mais jovens intrudidas na Suíte. Já com os xistos e filitos, além de bruscos, são discordantes.

- **Tapiraí:** ocupando porção sudoeste da área. Apresenta composição granítica a quartzo-monzonítica, uma das principais características deste corpo é a

abundância de veios e bolsões de tamanhos e formas variados de material granítico. Uma das principais características deste corpo é a abundância de veios e bolsões de tamanhos e formas variados de material granítico.

A Suíte Granítica Pilar do Sul é formada por dois corpos tipicamente intrusivos, pós-tectônicos:

- **Corpo Granítico Pilar do Sul:** situado a norte da área, com pequena porção sem continuidade física com o corpo principal, situado logo a sul do mesmo. Apresenta composição global granítica a granodiorítica. A sul do corpo principal é individualizado um corpo pequeno de um granito bem foliado de composição granítica diferenciada de porções da borda do corpo principal. A norte, onde é limitado pelo Falhamento de Taxaquara, apresenta forte orientação, deformado por cataclase incipiente, e ao norte da área a deformação é tão intensa que chega a formar filonitos. Cortando em seus limites a sudoeste e os xistos na sua proximidade há veios de espessuras decimétricas, chegando a até métricas constituídos por muscovitas e quartzo de granulação até centimétrica. Estes veios foram classificados como *greisens*, podendo configurar um ambiente favorável a mineralizações de W, Sn, Be e Li. Invariavelmente, nesse corpo ocorrem metálicos, ilmenita. Os contatos com os granitóides são bruscos, porém difíceis de serem traçados. Já em relação aos xistos e filitos é francamente discordante, com os gnaisses é brusco, seguindo a orientação da rocha.

- **Corpo Granítico do Turvo:** a norte da cidade de Tapiraí. Tem composição granítica e apresenta veios aplíticos, classificados como quartzo monzonitos. Sua principal característica é a textura equigranular orientada na borda do corpo. Os contatos com os xistos feldspatizados e migmatitos são bruscos em discordância, já com os granitóides a sul são bruscos, com dificuldade de traçá-lo, uma vez que há porções mais jovens intrudidas nas referidas suítes, conforme discutido anteriormente.

As rochas cataclásticas são representadas por protomilonitos, milonitos, filonitos e ultramilonitos apresentando transições entre si. Estão restritamente associados aos principais falhamentos e localmente a pequenas falhas. O Falhamento de Taxaquara afetou, ao norte da área, o maciço granítico de Pilar do Sul e os filitos do Grupo São Roque. O Falhamento de Belchior, ao sul da área, afetou os xistos feldspatizados, apresentando lentes de quartzo estirados e grãos de feldspatos ocelares envoltos por matriz bem foliada. Nas unidades xistosas com a presença de neossomas, a cataclase é mais evidente nas bandas quartzo-feldspáticas. Outras ocorrências de protomilonitos ocorrem nos granitóides do Corpo da Serra da Batéia.

A noroeste da área a Bacia do Paraná se apresenta com o afloramento da Formação Itararé que pertence ao Grupo Tubarão. É caracterizada por matriz arenosa

com seixos e até matacões do embasamento. A presença de conglomerados basais não é uma constância no contato com o embasamento. À medida que se afasta dos limites da bacia, afloram mais freqüentemente arenitos, siltitos, folhelhos e ritmitos.

Os diques de diabásio têm ocorrência restrita, apenas em um local, a norte de Tapiraí, com direção NW/SE. Petrograficamente é um diabásio, compacto, fino, constituído por plagioclásio e augita, além de argilo-minerais e opacos (magnetita).

Coberturas de Terraço Aluvial aparecem mais a noroeste da área sobre os sedimentos do Grupo Tubarão, ocorrendo, porém, em diversos pontos da folha. São predominantemente de arenitos de granulação variada, por vezes conglomeráticos

Os aluviões aparecem em toda a área. São depósitos atuais inconsolidados, constituídos por areias de granulometria variada. A importância dos aluviões se resume a referências de antigas faiscagens de ouro, principalmente na região da Serra de Agudos Grandes e a sul e sudoeste da área mapeada, bem como às margens do Rio Verde.

3. 3. Correlações entre as seqüências sedimentares

Em vista de uma evolução geológica complexa para uma área de rochas que datam do Proterozóico Médio a Superior, torna-se difícil e imprecisa as correlações sem continuidade física. Mesmo assim, IPT (1983) e Stein *et al* (1986) apresentam evidências de que as rochas da região nordeste do Paraná e sudeste do estado de São Paulo se assemelham aos metassedimentos observados na região de Pilar do Sul. Aquelas seriam em sua porção basal a Seqüência Perau definida por Piekarz (1981) e que, controversas à parte, é tida hoje, como uma formação do Grupo Setuva. O caráter basal é dado pela presença de núcleos do embasamento.

Seguindo a linha de raciocínio encontrada em IPT (*op cit*), tem-se que: “Os metassedimentos presentes na região de Pilar do Sul, em termos de similaridade litológica, se correlacionariam com o Açungui II proposto pela MMAJ/JICA (1983), como também com a seqüência imediatamente superior à de *metacherts* descrita por Silva & Schöll (1982) que gradam verticalmente para seqüência de mármore dolomíticos. A estes autores admitem equivalência lateral em âmbito regional e na descrição de seus litotipos denota-se uma grande similaridade com a seqüência oriental definida na área de Pilar do Sul. Os mesmos autores definem sobre a seqüência anterior uma outra com caráter vulcano-sedimentar que guarda extrema semelhança com a seqüência da área estudada.”

Para Silva & Schöl (*op cit*) as seqüências mencionadas são mencionadas como Formação Setuva definida por Schöl *et al* (1982) que a consideram do Proterozóico

Inferior. Para Fritzens *et al* (1982) as seqüências sobrepostas à Formação Perau nas antiformas de Anta Gorda e Setuva seriam pertencentes ao Grupo Açungui e o núcleo de Betara ao Grupo Setuva (Formação Água Clara).

Deste modo, estes metassedimentos da área estudada se correlacionariam com as porções imediatamente superiores à Formação Perau de Fritzens *et al* (*op cit*), à Formação Açungui II da MMAJ/JICA (*op cit*) e a porções superiores da Formação Setuva de Scholl *et al* (*op cit*).

Stein *et al* (*op cit*) vão mais além ao subdividir a Formação Perau na folha Pilar do Sul em três seqüências de litotipos. Estes refletem a diferenciação quanto ao grau de metamorfismo e recristalização, com amplas passagens transicionais sem superfície de discordância ou variações significativas no padrão estrutural.

Neste trabalho será adotado a definição, também usada por Stein *et al* (*op cit*) de Formação Perau, seguindo definição de Piekarz (*op cit*), equivalente a seqüência vulcano-sedimentar de Schöll *et al* (*op cit*). O que importa, agora, não é uma definição estratigráfica precisa a respeito desta correlação, mas sim uma validade faciológica entre os metassedimentos mineralizados do Vale do Ribeira com os metassedimentos encontrados na folha Pilar do Sul.

3. 4. Recursos minerais

Apesar de não haver uma ocorrência importante de depósitos minerais na área estudada, há ocorrências que podem ser consideradas como guias prospectivos. Estas são representadas por turmalinitos, sulfetos em filitos e xistos grafitosos, granitos a duas micas, *greisens* e rochas metaultrabásicas. Há também, ocorrências de mármore, talco e bauxita.

As atividades mineradoras presentes na área são pouco significativas, limitando-se a cascalho, areia, brita e argila, como materiais de construção, e caulim.

Grafita

Para a caracterização de uma ocorrência de grafita, IPT (*op cit*), considerou as intercalações com espessura superior a 5m. No geral, os filitos ou xistos com bandas grafitosas apresentam porcentagens baixas de grafita (de 4 a 5%). Entretanto, há duas lavras abandonadas de grafita.

Pirita e calcopirita

São encontrados de uma forma geral espalhados pela área, no gnaisse granodiorítico, nos granitóides porfiróides e nos equigranulares e principalmente nos metassedimentos. Somente alguns pontos foram considerados ocorrências por apresentar teores acima da média da área.

3. 5. Geoquímica

Há diversas maneiras para se definir as anomalias geoquímicas. Para este trabalho os teores anômalos foram definidos por métodos estatísticos (percentil), IPT (1988).

Rondinelli *et al* (1989) além de apresentar os resultados para a área pelo método da superposição, apresentou, utilizando os mesmos dados, os resultados pelo método de Análise Fatorial. No entanto, para se manter um padrão para este trabalho será adotada as anomalias definidas pelo PRÓ-MINÉRIO, não sendo utilizados aqui os resultados de outros métodos. A matriz de correlação é uma ferramenta importante para se conhecer dados multivariados como é este tema. Essa matriz é apresentada no anexo 3, baseada em Rondinelli *et al* (*op cit*). Já a distribuição espacial dos mesmos, pode ser verificada na Fig. 3.2 sobrepostos ao sobre o modelo digital de terreno como também sobre bacias e drenagens traçadas automaticamente.

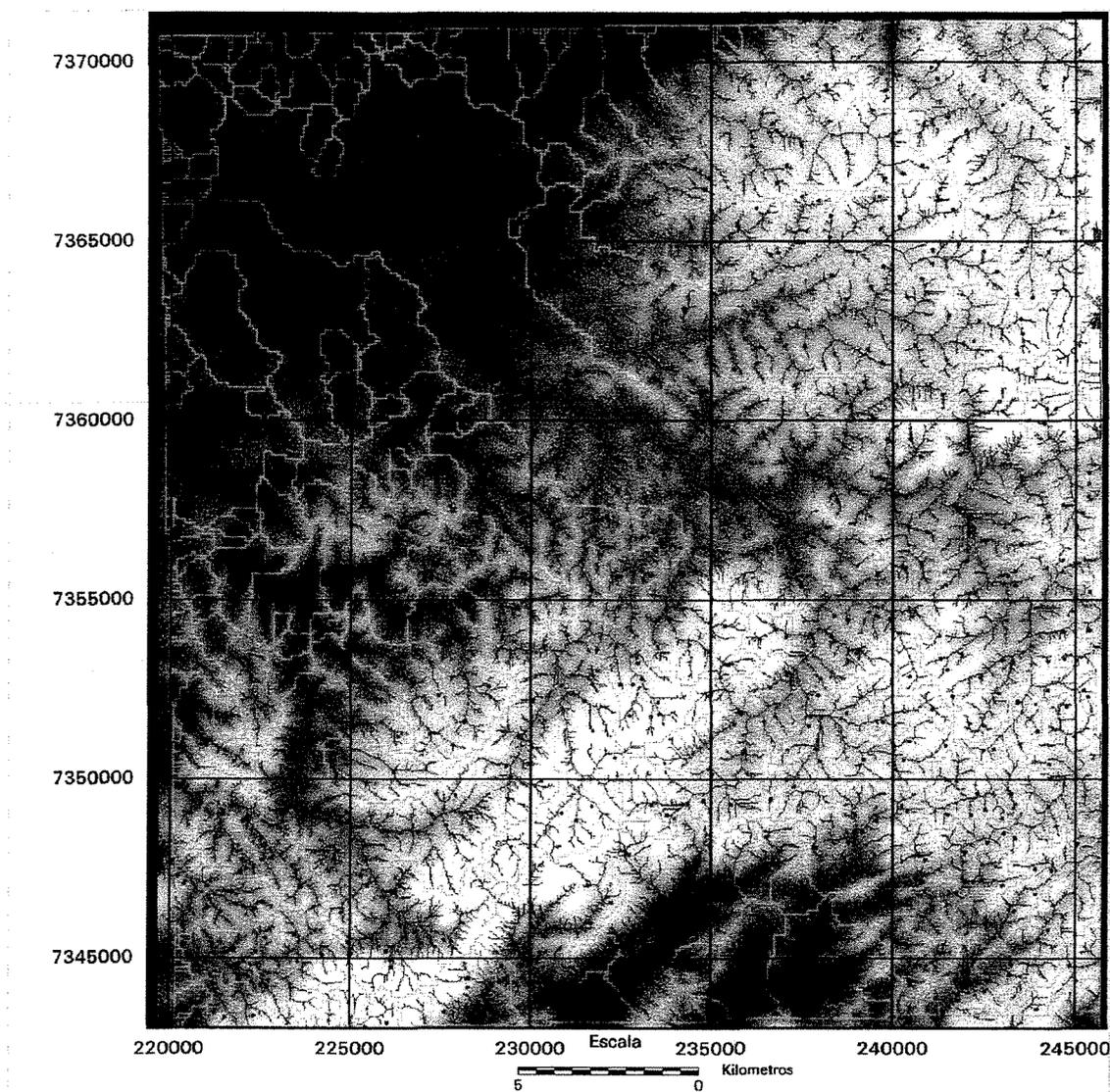


Figura 3.2: Pontos de amostragem geoquímica (em vermelho) sobre o modelo de elevação digital e as bacias edrenagens traçadas automaticamente.

A consideração de como foi feita a amostragem geoquímica é fundamental para qualquer tratamento posterior. Portanto, é apresentada a seguir a descrição da mesma, realizada pelo PRÓ-MINÉRIO, IPT (*op cit*).

A amostragem, foi feita a partir da distribuição regular com densidade de 1 amostra/km², dando-se preferência para as drenagens menores (1^a e 2^a ordens), área de influência de um conjunto de pontos variando de 0,5 a 5 km², e coleta dupla a cada 20 amostras coletadas, mas regularmente espaçadas. Foram recolhidas cerca de 700 amostras

sendo analisadas pelo LAMIN da CPRM do Rio de Janeiro, por Espectrografia Óptica para 30 elementos, na fração menor que 80 *mesh*, pulverizada a menos de 200 *mesh*.

Segundo relatório do PRÓ-MINÉRIO, a área mais problemática para amostragem foi a região norte da área, tendo em vista, as grandes extensões de plantações. Já a região sul, na Serra de Paranapiacaba, de difícil acesso e pouca ocupação apresentou poucas áreas de contaminação.

Foram feitas análises estatísticas IPT (1988) para os elementos Fe, Ca, Ti, Mn, B, Ba, Be, Co, Cr, Cu, La, Nb, Ni, Pb, Sc, Sn, Sr, V, Y e Zr, enquanto que os elementos Ag, Bi, Cd, Ga, Li, Mg, Mo, Sb, W e Zn não foram considerados, por apresentarem poucos valores acima de seus limites de detecção pelo método utilizado.

3. 5. 1. Zonas anômalas - PRÓ-MINÉRIO

Na época do projeto do PRÓ-MINÉRIO não foi feito teste de reprodutibilidade para a Folha Pilar do Sul. Mesmo assim foi elaborado uma reamostragem em alguns pontos anômalos, confirmando ou não os valores anteriores, de maneira relativa e que foi usado como auxílio para priorização de zonas anômalas. O mesmo relatório descreve a metodologia para a confecção do mapa de anomalias geoquímicas do referido projeto. Este mapa foi aproveitado no presente trabalho para um controle inicial das anomalias geoquímicas. Foram atribuídos pesos em função dos percentis das anomalias de 1^a (amostras com teores acima do percentil 95 da curva de frequência acumulada), 2^a (teor na faixa ente os percentis entre 80 e 95) e 3^a ordem (percentis entre 70 e 80), sendo respectivamente de valores iguais a 3, 2 e 1. Este procedimento foi feito para todos os elementos com exceção dos elementos Fe, Ti, Mn e Zr que apresentaram inúmeros valores acima do limite de detecção do método utilizado. Estes valores calculados para os dois elementos de maior interesse para este trabalho (Cu e Pb) podem ser verificados na Tab. 3.2.

Elemento	Background (ppm)	Anomalia 3ª ordem (ppm)	Anomalia 2ª ordem (ppm)	Anomalia 1ª ordem (ppm)
Cu	10	16 - 20	20 - 50	> 50
Pb	58	77 - 94	94 - 150	> 150

Tabela 3.2: Parâmetros estatísticos para Cu e Pb na Folha Pilar do Sul (IPT, *op cit*).

IPT (*op cit*) apresenta a potencialidade de cada zona cuja definição foi dada “em função da litologia, estrutura, ambiente geológico, associação geoquímica, valores absolutos dos resultados, contrastes geoquímicos em relação ao *background* definido pelo percentil 50, extrabilidade a frio, proximidade a mineralizações conhecidas, correlação com anomalias magnéticas e cintilométricas, quando disponíveis, além de estudos morfoestruturais de imagem de satélite.” Quanto às associações geoquímicas presentes, foram obtidas pelo método da superposição. Estas zonas traçadas podem ser verificadas na Fig. 3.3, sendo que apenas serão descritas adiante as zonas com prioridade A que por recomendação do PRÓ-MINÉRIO devem ser estudadas com maior detalhe.

A **zona 3**, situada no quadrante sudoeste da folha, mostrou anomalia de primeira ordem para Cr, Ni, Co, V, Cu e Nb; de segunda ordem para Ca e terceira ordem para Sc e Mg. De acordo com os dados de reamostragem, os valores anômalos para Ni, Co e Cu foram confirmados. A associação geoquímica de Ni - Co - Cu relacionada a rochas básicas ou metabásicas, com relação Ni / Cu próxima de 1 e a extrabilidade de 10% a 20%, respectivamente para Cu e Ni, sugerem a presença de sulfetos.

A **zona 4**, localizada na porção sudoeste da folha, revelou-se anômala de primeira ordem para Cr, Ni, Co, V, Cu, Ca e Mg; de segunda ordem para Sc; e de terceira ordem para Y e B. Pelos dados de reamostragem, os valores anômalos para Cr, Ni, Co e Cu foram confirmados. A associação geoquímica Cr - Co - Cu - Ni, com relação Ni / Cu próxima de 1, com extrabilidade de 13% a 21% para Cu e Ni, respectivamente, sugere a possibilidade de existência de sulfetos.

A **zona 9**, situada na parte leste da folha, apresentou anomalia de primeira ordem para Ni, B, Be, Ca e Mg; de segunda ordem para Co, V, Cu, Pb e Sn; de terceira ordem para Sc, Nb e Ba. Os resultados de reamostragem para valores anômalos para Be e B foram confirmados pelo valor de 25 ppm para Li. A associação de B, Be e Li reflete, provavelmente, a presença de pegmatitos nas bacias de captação, face às ocorrências mapeadas ao sul desta zona.

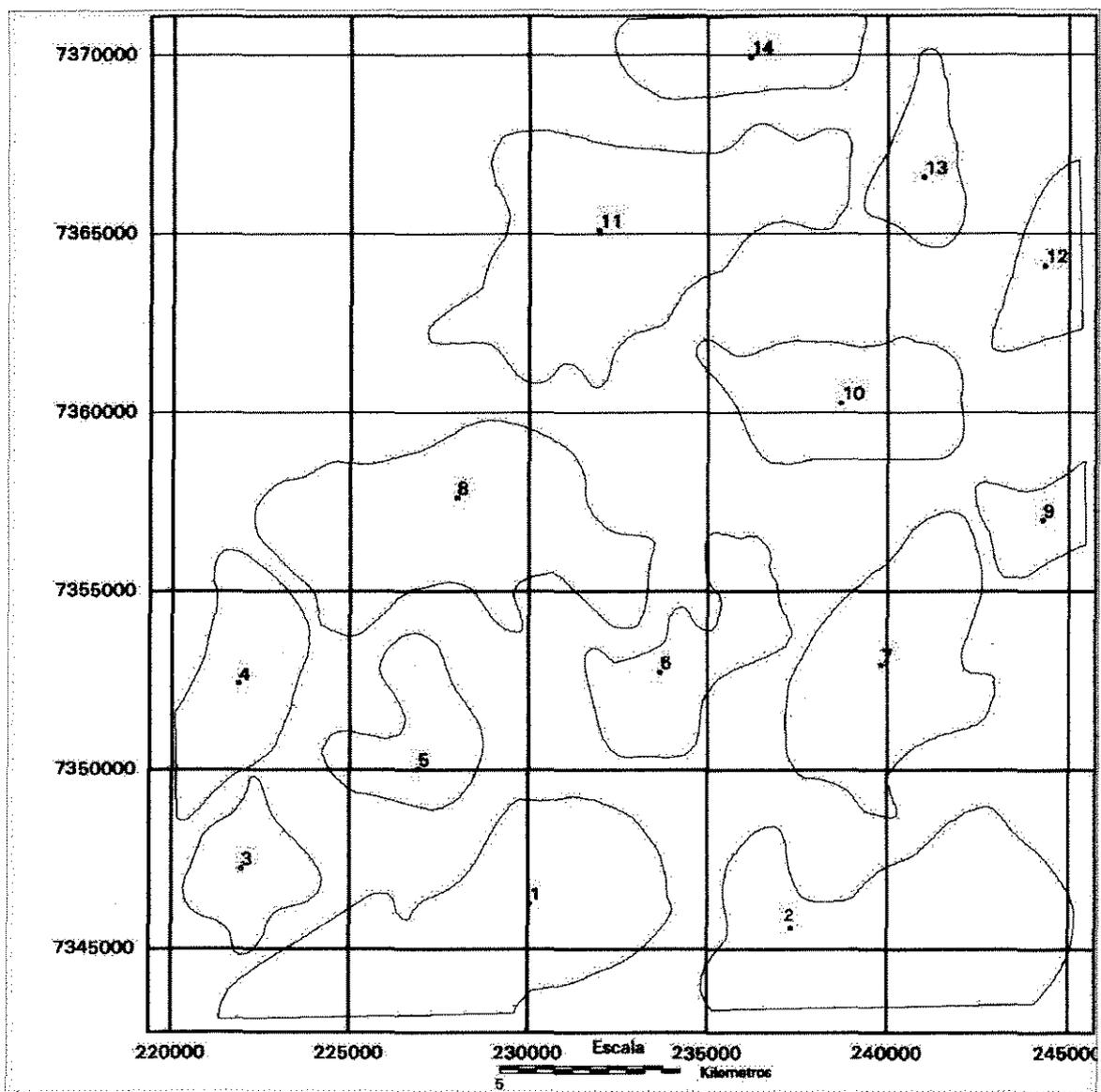


Figura 3. 3: Zonas de anomalias geoquímicas traçadas pelo PRÓ-MINÉRIO.

A **zona 10**, localizada na porção nordeste da folha, revelou anomalia de primeira ordem para Cr, Ni, Cu, V, Nb, B, Be, Ca e Mg; de segunda ordem para Co, Pb, Sn, Sc, Y e La; e de terceira ordem para Sr e Ba. Com os resultados de reamostragem, não foram confirmados os valores anômalos para Cr, Ni, Cu, Co e Pb. A anomalia regional é um provável reflexo litológico / ambiental. Face às ocorrências de talco e de greisens associadas aos pontos de amostragem, esta zona teve prioridade A.

3. 6. Geofísica

Para este projeto, foram utilizados dados de aeromagnetometria e aerogamametria colhidos pelo Projeto aerogeofísico São Paulo - Rio de Janeiro. Segundo Barros (1984) este projeto na sua totalidade abrangeu todo o estado do Rio de Janeiro, parte de São Paulo e pequena porção do Paraná, totalizando uma área total de 104.000 km². A área estudada está contida na subárea III do referido projeto, levantamento de junho a agosto de 1978 e novembro e dezembro do mesmo ano. A altura média do vôo foi de 150 m numa margem de +/-10%, com intervalo médio entre as linhas de vôo de 1 km, de direção N - S. O cristal detector para os dados de radiometria foi de Iodeto de Sódio (DIGRS-3001) que possuía um volume de 1024 polegadas cúbicas. Os executores do referido levantamento foram a CPRM / ENCAL S. A.

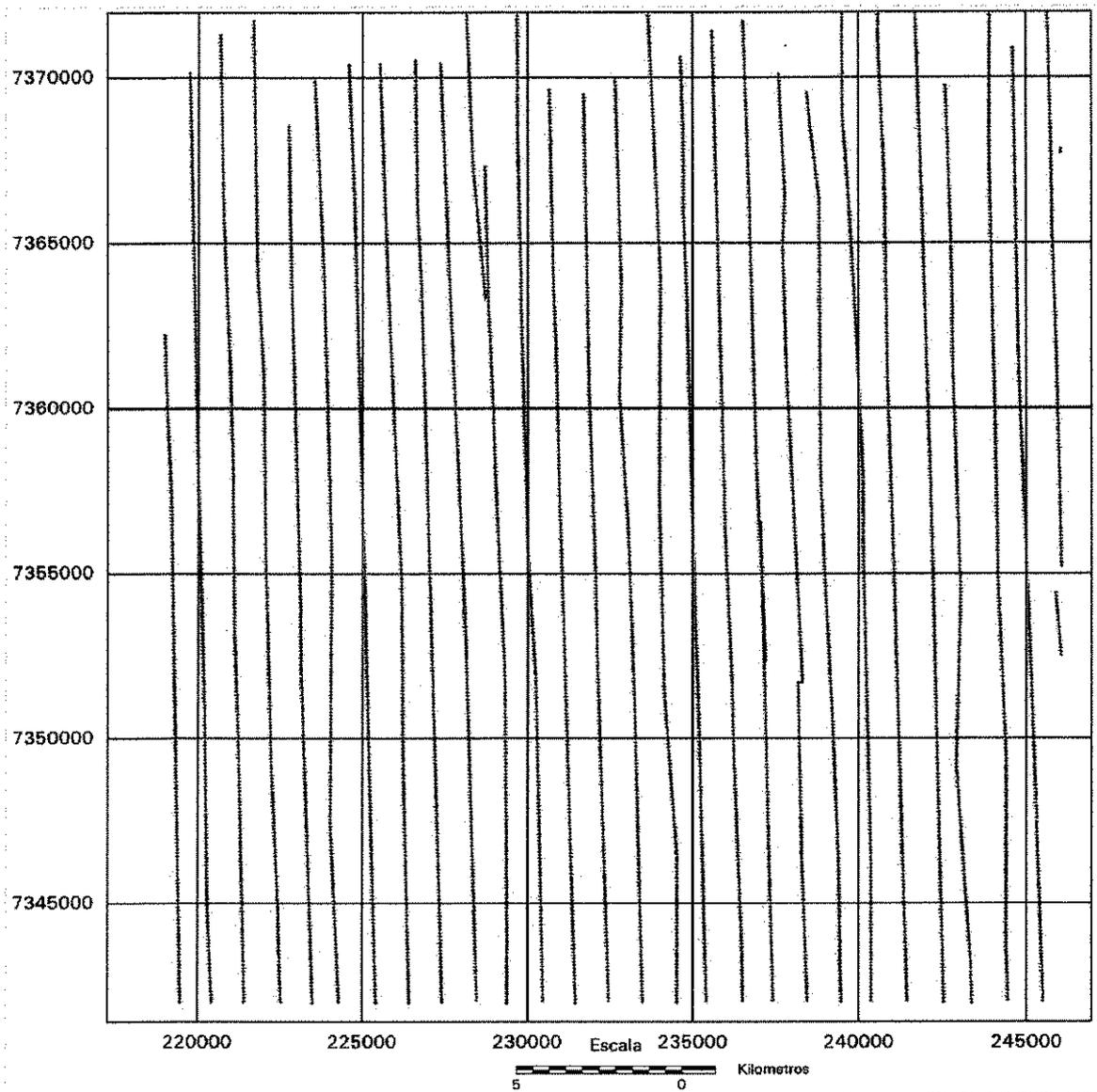


Figura 3. 4: Pontos do levantamento aerogeofísico sobre a região estudada.

4. Métodos estudados: uma introdução teórica

4. 1. Introdução

As análises lógicas *booleana* e a *fuzzy* fazem parte das chamadas operações algébricas não-cumulativas. Uma rápida introdução a este tema pode ser encontrado em Braghin & Barros (1996a).

4. 2. Históricos das lógicas *booleana* e *Fuzzy*

A história da lógica pode ser simplificada em três estágios: lógica grega, lógica escolástica e lógica matemática. No primeiro, as fórmulas lógicas consistiam de palavras da linguagem ordinária, sujeita às regras sintáticas usuais. No segundo a lógica era tirada da linguagem ordinária mas caracterizada por regras sintáticas diferenciadas e funções semânticas especializadas. Já no terceiro, a lógica era marcada pela linguagem artificial, pelo uso de palavras e sinais com funções semânticas limitadas. A obra de Boole insistia que a lógica deve ser associada a matemática e não a metafísica.

O tratado de George Boole, como ele mesmo definiu, era investigar as leis fundamentais das operações em que o pensamento é feito. Isto significou dar uma expressão a elas numa linguagem simbólica do Cálculo e com base neste fundamento estabelecer a ciência da Lógica e construir seu método. No curso de investigação fez algumas prováveis insinuações da natureza da mente humana. Estas insinuações são melhores atingidas com o desenvolvimento da lógica *Fuzzy* por Zadeh, como será visto adiante. O desenho deste tratado de Boole é dividido em duas grandes vertentes: a lógica propriamente dita e a probabilidade.

4. 2. 1. Histórico da lógica booleana

O surgimento desta lógica, ocorreu durante o século XIX, que foi justamente uma das épocas de maior desenvolvimento da história da matemática desde os tempos da Idade da Grécia, Boyler (1968). Segundo este mesmo autor, a França já não era o mais importante centro do mundo matemático. Este fato é verificado pelas duas contribuições mais revolucionárias na álgebra terem sido feitas, em 1843 e 1847, por matemáticos que

lecionavam na Irlanda. A primeira se refere a obra de Sir William Rowan Hamilton (1805 - 1865) e a segunda de George Boole.

Boyley (*op cit*) atribuiu que as contribuições mais importantes foram de ingleses que passaram algum tempo nos Estados Unidos - Arthur Cayley (1821 - 1895) e J. J. Sylvester (1814 - 1897). Estes, provinham de Cambridge, onde se deu o início da álgebra moderna. O ponto crucial na matemática inglesa foi em 1815 com a formação em Trinity College of Analytical Society. Ao passo dos matemáticos da Trinity, Hamilton e Cayley, desenvolviam dois novos tipos de álgebra, uma terceira forma foi criada por um inglês autodidata praticamente desconhecido, George Boole. Nascido em Lincoln, Inglaterra em 1815 e falecido em 1864 na Irlanda, com sua obra de 1847 (*The Mathematical Analysis of Logic*) e de 1854 (*Investigation of The Laws of Thought*), é apontado atualmente como quem definiu uma álgebra da lógica, no caso daquela em que foi aproveitado seu nome. Além do mais, desconhecido para Boole, Leibniz há muito tempo já estava convencido do tratamento matemático da lógica. Sem o conhecimento do trabalho de Boole, Gottlob Frege construiu uma lógica matemática mais profunda e extensiva que a álgebra de Boole que em termos de classe na forma revisada e simplificada de Jevons-Peirce-Schröder que é popularmente associada com a lógica matemática. Este particular êxito de Boole, a aplicação da álgebra a lógica, ainda que limitado a simples classe de cálculo e aspectos de proposição, tem um efeito estimulante marcado no desenvolvimento da lógica moderna.

A obra de 1854 é um clássico da história da matemática, pois ampliou e esclareceu as idéias pensantes de 1847, estabelecendo ao mesmo tempo a lógica formal e uma nova álgebra, usando letras x , y , z para representar os subconjuntos dos objetos, escolhidos de um conjunto universal cuja totalidade era designada pelo símbolo ou número 1.

Também importante, mas não tão bem conhecido ou fácil de avaliar, foi o efeito da introdução de Boole de um tipo não-quantitativo de álgebra tido na introdução da moderna lógica abstrata. Ele mesmo não estava inteiramente cômico que estava criando uma nova álgebra, como a idéia de uma álgebra que ainda não havia surgida. Mantendo as notações da Álgebra simbólica, então corrente, ele pensou dar uma nova interpretação para símbolos gerais da álgebra, aqueles com várias interpretações, numérica, geométrica ou física. Boole usou todas as operações usuais da álgebra ordinária adicionando, entretanto, o requerimento especial que símbolos padrões para termos de classes devam satisfazer a lei $x^2 = x$. Esta nova condição, satisfeita como uma lei não-aritmética somente pelos números 0 e 1, habilitando uma saída única com notável ingenuidade, se não completamente claro, estas feições de completa álgebra numérica usáveis pela lógica. O método de Boole também inclui o uso de expressões, tais como 0/0 e 1/0, para que nenhum significado possa ser dado na álgebra ordinária sozinha na lógica. A eliminação

posterior pelos lógicos daquilo que não foi totalmente compreendido ou não é estritamente relevante para a lógica de termos de conjunto, resultou num cálculo que a formulação abstrata é agora conhecida como a Teoria de Álgebra Booleana ou, em uma forma equivalente, a teoria do círculo Booleano.

Boole foi um rigoroso pensador e o sistema matemático que ele elaborou por fazer a lógica não foi mostrada ser errada pela simplificação histórica para Álgebra Booleana mas meramente recolocada por ela. Dos lógicos de renome que sucederam Boole, apenas Venn foi um aderente do estrito sistema Booleano de fazer lógica.

Além da fase do trabalho de Boole de álgebra-lógica, há uma outra que foi os fundamentos lógicos da probabilidade. Entretanto, em contraste com a lógica, este aspecto do trabalho de Boole não teve grande resíduo histórico.

4. 2. 2. Histórico da lógica fuzzy

Esta lógica teve seu ponto de partida com o trabalho de Lotfi A. Zadeh em 1965, quando definiu as idéias básicas dos conjuntos *fuzzy* e conceitos como união, interseção, inclusão, complemento, relação e convexidade. Estes conceitos, por sua vez, foram inspirados a partir da *multivalued logic* que foi proposta por um matemático polonês na década de 1920, chamado J. Lukasiewicz.

Até os dias atuais, Zadeh é professor de Ciência da Computação e Engenharia Elétrica, membro na Universidade da Califórnia, Berkeley, desde 1959. Nascido na Ex-União Soviética, filho de iranianos, foi para os EUA em 1944 e estudou em MIT e Columbia, onde obteve o título de PhD em 1949. Depois de trabalhar na Universidade de Columbia durante 1950, Zadeh foi para Berkeley. Insatisfeito com o uso de matemática muito precisa para descrever algo altamente impreciso como o mundo real, Zadeh, durante a década de 60, desenvolveu a teoria dos conjuntos *fuzzy*. Vale lembrar, no entanto, que ainda hoje, há matemáticos críticos a esta nova lógica desenvolvida. Mesmo assim, serve de base para várias linhas de pesquisa, como sistemas inteligentes (Inteligência Artificial) e descrição matemática de um mundo real.

Por se tratar de uma lógica extremamente recente, o seu momento histórico ainda está sendo criado, e ainda assim, já é amplamente difundido por diversas partes do mundo. Como em outras tecnologias chaves atuais, foi criada nos EUA, aperfeiçoada na Europa e agora está sendo massificado no mercado pelo Japão.

A primeira aplicação industrial da lógica *fuzzy* foi feita após a década de 70 na Europa, mais precisamente no Queen Mary College (Londres), para o controle de um gerador de vapor que não seguia às técnicas tradicionais. Logo após, na Alemanha começam então a surgir sistemas *fuzzy* para apoio a decisão. Somente a partir da década

de 1980 esta lógica consegue ganhar espaço em aplicativos de análise de dados e apoio a decisão na Europa.

Inspirado nos primeiros aplicativos europeus, as companhias japonesas iniciaram o uso da lógica *fuzzy* na engenharia de controle a partir da década de 80. Devido à baixa performance computacional nos equipamentos padrões, muitas aplicações foram desenvolvidas em *hardware* especialmente desenhado. O sucesso dessas primeiras aplicações no Japão aumentou, em muito, o interesse dos japoneses. Talvez o maior dos motivos seja a própria cultura japonesa, em que os engenheiros japoneses nunca utilizaram muito a lógica Booleana. Junta-se a isso o fato do esforço do governo japonês para reunir esforços com a criação da IFSA (*International Fuzzy Systems Association*) que depois foi seguida por outras como a SOFT (*Japan Society for Fuzzy Theory and Systems*). Como resultado neste país, esta lógica tem sido muito usada em controles inteligentes e processamento de dados.

Apenas há 5 anos atrás grandes corporações européias retomaram os esforços nos seus aplicativos. Desde então, verificou-se um grande sucesso comercial destas aplicações tornando-se uma técnica de desenho padrão.

Recentemente, após a rápida trajetória pelo Japão e Europa, inicia-se nos EUA um grande esforço para a retomada da tecnologia de ponta, principalmente através de grandes companhias que têm fortes concorrentes nos mercados acima.

Para os técnicos de lógica *fuzzy* o próximo passo no desenvolvimento da tecnologia é a combinação desta com as redes neurais o que já está se tornando uma realidade em diversas aplicações.

4. 3. Lógica Booleana

A definição desta lógica passa por diversos conceitos e leis definidas por Boole para expressar em termos algébricos uma forma de raciocínio humano. O conceito mais primordial é o de conjunto.

4. 3. 1. Conjuntos Booleanos

Pode ser definido pela especificação de cada um de seus elementos (método de listagem) ou pela especificação de propriedades comuns a todos os elementos (método de regras). O primeiro, por sua vez, só pode ser usado para conjuntos finitos.

$$A = \{ a_1, a_2 \dots a_n \},$$
$$B = \{ b \mid b \text{ tem as propriedades } P_1, P_2 \dots P_n \}$$

Para se definir um objeto individual x como membro ou elemento de um conjunto A , escreve-se:

$$x \in A$$

Por outro lado, se x não pertence ao conjunto A , define-se:

$$x \notin A$$

Por esta definição vê-se claramente que só há duas opções para um elemento sob a perspectiva *booleana*, ou está dentro ou fora do conjunto. Sob esta perspectiva tem-se que o processo para definir indivíduos de um conjunto universal X é determinado por uma função. Por exemplo para um conjunto A , esta função assinala um valor $\mu_A(x)$ para todo $x \in X$ tal que:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 \Rightarrow x \in A \\ 0 \Rightarrow x \notin A \end{cases}$$

Os conjuntos são considerados como sistemas bivalentes com seus próprios estados alternando entre a inclusão ou exclusão. Deste modo, o grau de pertinência para o conjunto A é 0 se x não é um elemento de A e o grau de pertinência é 1 se x é um elemento de A . Assim como há apenas dois estados possíveis, a transição entre estes estados é sempre imediata e rígida. Valores de um conjunto *booleano* são sempre completamente categorizados não havendo ambigüidade ou dicotomia sobre suas pertinências.

4. 3. 2. Operadores Booleanos

Visando uma comparação concisa da lógica *booleana* e da lógica *fuzzy* serão vistos rapidamente os conceitos dos operadores *booleanos*. Para facilitar esta comparação, deve-se lembrar de duas leis primordiais da época aristotélica e que são aproveitadas na lógica *booleana*:

A lei da Não Contradição:

“A interseção de um conjunto com seu complemento resulta num conjunto cheio ou vazio.”

A lei da exclusão dos centros:

“A união de um conjunto com seu complemento resulta no conjunto universal do domínio subjacente.”

Estes dois teoremas refletem todo o raciocínio dos operadores *booleanos*. Na verdade a segunda lei aqui apresentada é consequência da primeira.

União (OR)

Esta operação gera um resultado em que todos os elementos dos conjuntos serão mantidos. Para exemplificar tem-se a Tab. 4.1 seguinte no que se refere a uma operação de união em matrizes. Na Fig. 4.1 apresenta-se um diagrama de Venn para uma operação de união com dois conjuntos hipotéticos.

A				B				A < OR > B		
2	5	2		2	3	5		0	1	0
4	3	1		1	3	1		0	1	0
3	5	1		1	5	3		1	0	1

Tabela 4.1: Representação de um operador *booleano* OR numa matriz 3x3.

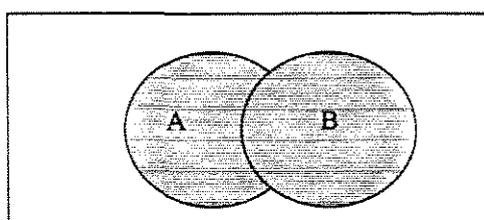


Figura 4.1: Representação pelo diagrama de Venn, de uma operação usando OR *booleano*, (A <OR> B).

Interseção (AND)

A interseção gera um conjunto em que somente os valores comuns são mantidos e não todos como é o caso da união. A seguir, na Tab. 4.2 e na Fig. 4.2 há exemplo desta operação.

A				B				A < AND > B		
2	5	2		2	3	5		0	0	0
4	3	1		1	3	1		0	1	0
3	5	1		1	5	3		0	0	0

Tabela 4.2: Representação de um operador *booleano* AND numa matriz 3x3.

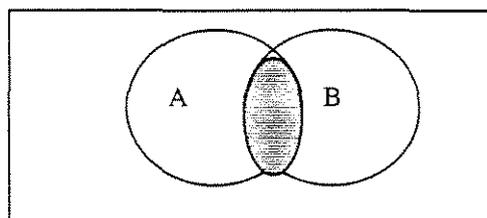


Figura 4.2: Representação pelo Diagrama de Venn de uma operação de Interseção, (A <AND> B).

Complemento (\sim)

Corresponde aos elementos pertencentes ao Universo mas que não está contido no conjunto em questão. Na Fig. 4.3 tem-se um exemplo deste operador utilizando o diagrama de Venn.

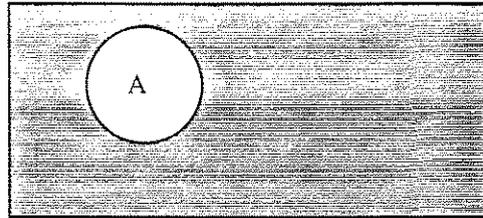


Figura 4.3: Representação do complemento de um conjunto, através do Diagrama de Venn, ($\sim A$).

Exclusão (NOT)

Corresponde a uma operação de exclusão, onde tudo o que for exclusivamente de um dos conjuntos não será mantido no resultado. Como consequência disto, para conjuntos disjuntos o resultado desta operação será o próprio conjunto. Na Tab. 4.3 a seguir apresenta-se um exemplo para esta operação utilizando dois conjuntos representados por matrizes 3x3. A seguir tem-se um exemplo esquemático utilizando o diagrama de Venn na Fig. 4.4.

A				B				A < NOT > B		
2	5	2		2	3	5		1	0	1
4	3	1		1	3	1		1	0	1
3	5	1		1	5	3		0	1	0

Tabela 4.3: Representação de um operador *booleano* NOT numa matriz 3x3.

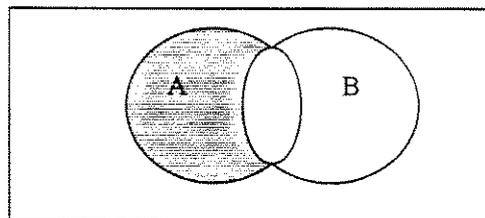


Figura 4.4: Representação pelo Diagrama de Venn do resultado de um operador NOT, (A <NOT> B)

OR exclusivo (XOR)

Talvez seja o operador mais complexo previsto na lógica *booleana*. Corresponde a uma exclusão a tudo o que é comum aos conjuntos em questão. Na Tab. 4.4 a seguir há

um exemplo deste operador em matrizes. Na Fig. 4.5 aparece este mesmo operador num diagrama de Venn.

A				B				A < XOR > B		
2	5	2		2	3	5		0	1	1
4	3	1		1	3	1		1	0	1
3	5	1		1	5	3		1	1	1

Tabela 4.4: Representação de um operador *booleano* XOR numa matriz 3x3.

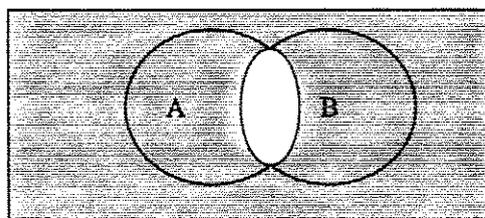


Figura 4.5: Representação do resultado de um operador XOR, através do Diagrama de Venn (A < XOR > B).

4. 4. Lógica *fuzzy*

O propósito inicial do desenvolvimento desta lógica foi o controle de fluxo de sistemas, uma vez que a lógica Booleana (que prevê conjuntos rígidos de verdadeiro ou falso) não estava mais suportando algumas modelagens de mundo real nos sistemas desenvolvidos. Estas modelagens estão muito associadas aos conceitos de imprecisão e *fuzziness*. Partia-se do princípio que a própria razão humana não era fundamentada em símbolos ou números mas sim em termos difusos em que as lógicas tradicionais não podiam quantificar. Estes termos definem categorias gerais mas não rígidas. A transição de uma categoria para outra é gradual com alguns estados tendo maior ou menor participação em um conjunto.

Para exemplos variados de aplicações desta lógica, tem-se Gupta et al (1979), Yagger (1987) e Dubois *et al* (1997).

Pode-se entender como sendo o cálculo da compatibilidade. Diferente da Probabilidade, que está baseada na distribuição de frequências de uma população aleatória, a lógica *fuzzy* trabalha com a descrição das características das propriedades que tem variação de valores continuamente por partições associadas destes valores com um identificador semântico. Estas partições podem se sobrepor. A sobreposição corresponde a transição de um estado a outro. Estas transições vem naturalmente da ocorrência da ambigüidade associada com estados intermediários dos identificadores semânticos.

O grau de pertinência pode ser descrito como o nível de compatibilidade entre uma instância dos domínios do conjunto e o conceito sobrepondo o conjunto.

A imprecisão *fuzzy* é independente de qualquer capacidade de medida. Enquanto algumas formas de medida são de fato incertezas estocásticas, a imprecisão *fuzzy* é uma propriedade do fenômeno por si mesmo.

Deve-se ressaltar que a lógica *fuzzy* não deve ser confundida com a teoria da probabilidade. A incerteza estocástica trabalha com a incerteza de que o evento ocorrerá ou não. Entretanto, a incerteza *fuzzy* trabalha com a definição do que é o evento. A teoria de probabilidade, seja frequentista ou *bayesiana*, não pode ser usada nesta questão pois trata-se de uma combinação de categorias subjetivas num processo de decisão humana que não segue seus axiomas.

4. 4. 1. Sistemas fuzzy

É impossível descrever em poucas palavras a lógica *fuzzy* sem antes mencionar sistemas *fuzzy* que são as principais aplicações desta lógica.

A lógica *fuzzy*, e de certa forma o raciocínio aproximado, é sempre usado para expressar processos de conceitos imprecisos ou aproximados, bem como suas relações. A lógica *fuzzy* é uma representação mais formal que o raciocínio aproximado. Como um método de codificação de conhecimento através de regras *fuzzy*, condicionais e não-condicionais, o raciocínio aproximado desenha não apenas a matemática subordinada a lógica *fuzzy*, mas incorpora um conjunto de conceitos heurísticos que residem fora da Teoria de conjuntos *fuzzy*.

Com base nas definições, tem-se uma série benefícios de modelamento de sistema *fuzzy*, listados por Cox (1994), mas que podem ser facilmente adaptados numa aplicação de modelamento de mundo real:

- Habilidade de se modelar problemas altamente complexos;
- Melhor modelamento cognitivo de sistemas inteligentes;
- Habilidade de se modelar sistemas envolvendo várias áreas de conhecimento;
- Complexidade de modelo reduzida;
- Melhor manuseio de incerteza e possibilidades.

Vale lembrar que os métodos empregados pela maioria dos sistemas convencionais são probabilidades *bayesianas* e algumas formas de confiança ou critérios de fatores.

4. 4. 2. Conjuntos fuzzy

Conjuntos *fuzzy* podem ser definidos como funções que definem um valor que pode pertencer a um conjunto situado entre os valores 0 ou 1 (falso ou verdadeiro) indicando seu grau de pertinência. Um valor 0 significa fora do conjunto e 1 significa que é completamente representativo do conjunto. Isto produz uma curva ao longo dos membros do conjunto, como se verifica na Fig. 4.6. Rigorosamente tem-se a definição de Zadeh (1965): sendo X o domínio do conjunto com um elemento genérico chamado x , tal que $X = \{x\}$. Um conjunto *fuzzy* A em X é caracterizado por uma função de pertinência $\mu_A[x]$ (ou $f_A(x)$) que associa cada ponto em X um número real no intervalo $[0, 1]$.

Podem existir vários tipos de conjuntos *fuzzy*. Neste trabalho, tendo-se em vista os dados geológicos, serão abordados apenas dois tipos: o conjunto linear e o de curva S.

A função linear é a mais simples, mas nem sempre é a ideal para os dados disponíveis neste trabalho. Já para o caso do conjunto ser da curva S haverá um novo fator que é o ponto de inflexão onde $\mu(x)$ assume o valor de 0.5, tem-se listadas a seguir a partir do trabalho de Cox (*op cit*).

O conceito de relação, diretamente ligado ao de função, é ordinariamente tido como um conjunto de pares ordenados. Em relação a conjuntos *fuzzy*, uma relação *fuzzy* em X é um conjunto *fuzzy* no espaço de produto $X \times Y$. Assim, uma relação indicada por $x \gg y$, $x, y \in R^1$, pode ser considerado como um conjunto *fuzzy* A em R^2 com a função de pertinência de A , $f_A(x, y)$. Como exemplo tem-se:

$$f_A(20, 4) = 0$$

$$f_A(200, 35) = 0.65$$

$$f_A(250, 20) = 1$$

Historicamente, os conjuntos *fuzzy* tem sido usados por sua habilidade em modelar categorias lingüísticas. Esta situação é devida a sua habilidade em representar a gradatividade de conceitos. Para tanto, é importante ressaltar a ligação entre os dados originais do mundo físico e as categorias com que o pensamento humano são mais confortáveis em compreender e usar a informação. Além disto, muito das noções básicas na medida e manipulação da informação, tal como incerteza, preferência e similaridade são naturalmente gradativos.

Muitos significados semânticos podem estar associados com o uso de conjuntos *fuzzy*. O primeiro (e mais antigo) é a expressão de proximidade, similaridade. Sob este aspecto, o grau de pertinência é visto como elemento preestabelecido do conjunto *fuzzy*, enquanto outros graus estiverem a proximidade de elementos a estes elementos. Esta visão é muito usada em classificação, por exemplo de imagens de sensores remotos, onde objetos são julgados serem suficientemente similares sendo colocados numa mesma classe difusa.

O segundo significado é relacionado a representação do estado incompleto ou vago da informação sob a forma de distribuições de possibilidades. Esta visão de conjuntos *fuzzy* permite que uma informação imperfeita, imprecisa ou incerta seja armazenada. Informação incerta expressa em termos de possibilidade e necessidades medidas podem ser propagadas através de padrões de inferência.

Um terceiro significado é útil quando modelando um *constraint* (ou limitação) flexível, especificação ou objeto expressando preferências entre mais ou menos soluções aceitáveis com respeito ao *constraint*. A gradatividade introduzida pelo uso de conjunto *fuzzy* refina a simples distinção binária feita por *constraints* comuns, com especificações rígidas, e completamente proibidas. Isto é especialmente importante para tomada de decisões. Algoritmos clássicos de *constraint*, técnicas de otimização e evolução multifatorial podem ser estendidos em ordem para lidar com tanto requerimentos flexíveis e dados incertos usando um representação de conjuntos difusos. Além disso, pesquisas flexíveis a um banco de dados armazenando pedaços de informação incerta ou imprecisa dá outro exemplo de uma situação onde tanto a preferência e o significado incerto são encontrados.

O domínio é o universo total de valores permitidos para um conjunto *fuzzy*. É um conjunto de números reais. Os valores podem ser tanto positivos como negativos. O domínio é selecionado para representar um completo intervalo de valores para um conjunto *fuzzy* no contexto do modelo adotado. Como exemplo, para cada elemento geoquímico amostrado terá um domínio que corresponde ao intervalo entre o valor máximo e mínimo que o método de análise possibilita.

Já universo de discurso é composto, geralmente, de vários conjuntos sobrepostos cada qual descrevendo uma parte semântica da variável do problema. Por exemplo, no caso das anomalias geoquímicas, pode-se ter a situação de três conjuntos *fuzzys* cada um descrevendo anomalia de 1^a, 2^a e 3^a ordem conforme parâmetros estatísticos apropriadamente escolhidos.

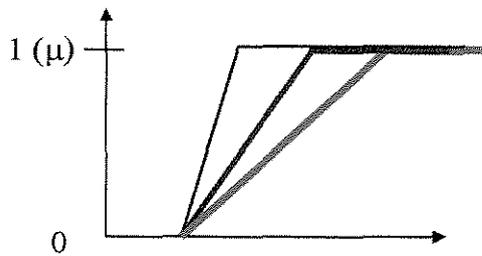


Figura 4.6: Universo de discurso para uma anomalia hipotética, onde a linha vermelha representaria a anomalia de 1ª, a azul a de 2ª e verde de 3ª.

Conjunto *Fuzzy* linear

A representação deste conjunto é uma linha reta. Há duas formas de conjuntos *fuzzy* linear: ascendente ou descendente. O primeiro é o mais utilizado, onde o valor em um domínio inicia-se no zero de pertinência e move-se para a direita com os valores aumentando até 1. Um exemplo disto pode ser visto na Fig. 4.7. O conjunto descendente é o oposto.

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq \alpha \\ \alpha < x < \beta \rightarrow \frac{x - \alpha}{\beta - \alpha} \\ 1, & x \geq \beta \end{cases}$$

onde:

$\mu(x)$ é o grau de pertinência calculado,

α é o valor mínimo associado ao grau de pertinência 0

β é o valor máximo associado ao grau de pertinência 1

x é o valor da variável dentro do domínio

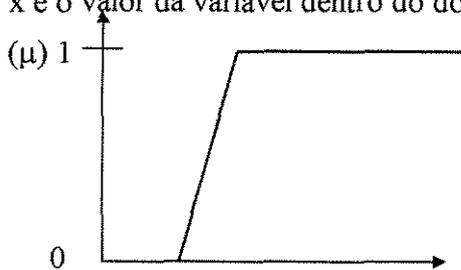


Figura 4.7: Conjunto *fuzzy* segundo uma função de pertinência linear.

Conjunto *Fuzzy* de curva S

Também chamado de sigmoidal, com uma representação em S da curva. Também pode ser ascendente ou descendente. Além da forma curva, existe um ponto de inflexão ao redor do ponto de 0.5 do grau de pertinência. Cox (*op cit*) assim descreve este conjunto:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 \rightarrow x \leq \alpha \\ 2((x - \alpha) / (\gamma - \alpha))^2 \rightarrow \alpha < x \leq \beta \\ 1 - 2((x - \gamma) / (\gamma - \alpha))^2 \rightarrow \beta < x \leq \gamma \\ 1 \rightarrow x \geq \gamma \end{cases}$$

onde:

$\mu(x)$ é o grau de pertinência do conjunto fuzzy;

α é o grau de pertinência zero;

γ é o grau de pertinência completo (1);

β é o valor da inflexão.

Esta definição pode ser traduzida em termos gráficos a Fig. 4.8.

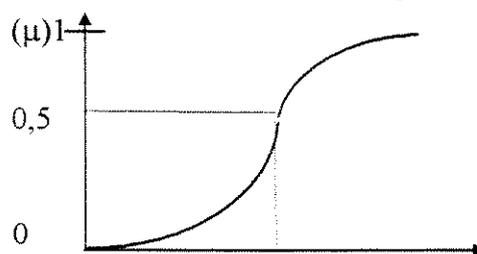


Figura 4.8: Conjunto *fuzzy* segundo função de pertinência de curva S.

4. 4. 3 Números fuzzy

São definidos como limites *fuzzy* ao redor de um valor central e são graficamente definidos como curvas com forma de sino. De uma forma genérica um número *fuzzy* X pode ser considerado como aproximadamente Y.

São de fato números, mas com sua imprecisão intrínseca. Podem ser de três formas gerais: PI, beta e Gaussiana. A diferença entre estes deve-se a declividade da curva e aos valores finais das curvas. Apesar de um conceito diferente a forma gráfica destes números pode ser aplicada a definição de conjuntos *fuzzy* com os devidos graus de pertinência.

Curva PI

É o tipo de curva mais usado. Produz uma curva suavizada a partir do valor central até o grau zero de pertinência ao longo do domínio. A curva PI é centrada em um

simples valor do domínio (γ) com um simples parâmetro que indica a largura da base da curva. O valor da curva para o ponto do domínio x é dado, segundo Cox (*op cit*):

$$\pi(x; \beta, \gamma) = \left[\begin{array}{l} S(x; \gamma - \beta, \gamma - \beta/2, \gamma) \rightarrow x \leq \gamma \\ 1 - S(x; \gamma, \gamma + \beta/2, \gamma + \beta) \rightarrow x > \gamma \end{array} \right]$$

Curva Beta

É a curva mais firmemente compactada curva de sino que a curva PI. Assim como esta, é definida por dois parâmetros: o valor do domínio ao longo da curva é construída (γ) e o valor que indica a metade da largura da curva no ponto de inflexão (β). O valor da curva para o ponto x do domínio é dado:

$$B(x; \gamma, \beta) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x - \gamma}{\beta}\right)^2}$$

A curva produzida por esta fórmula traz algo parecido com a curva PI, mas onde a função do grau de pertinência aproxima-se do zero somente com valores extremamente altos de β , que está no infinito.

Curva Gaussiana

Também conhecida como curva exponencial. É definida por dois parâmetros também: o valor do domínio ao redor do qual a curva é construída (γ) e o valor que indica a largura da curva (k). Ainda segundo Cox (*op cit*) esta curva é assim determinada:

$$G(x; k, \gamma) = e^{-k(\gamma - x)^2}$$

Esta equação última produz uma curva beta com uma diferença: a declividade da função de pertinência vai até zero rapidamente com uma pequena cauda.

4. 4. 4. Operadores fuzzy

Assim como na lógica Booleana, tem-se diversos operadores para se trabalhar com os conjuntos *fuzzy*.

Existem diversos operadores *fuzzy*, para este trabalho serão adotados os operadores definidos por Zadeh (1965). Entretanto será apresentado alguns outros, chamados compensatórios. Estes outros são assim conhecidos pois atuam para

compensar o rigoroso mínimo, máximo e complemento dos operadores de Zadeh. Os compensatórios geralmente dão uma relação mais fraca ao longo das proposições quando seus valores verdadeiros são mais dispersos.

União - Zadeh

O conceito matemático é muito parecido com o operador booleano, porém sob essa lógica trabalha-se com graus de pertinência. É um operador binário. Levando-se a conceituação abaixo, tem-se um exemplo apresentado a seguir com dois conjuntos *fuzzy*.

$$A \cup B = \max(\mu_A[x], \mu_B[y]), x, y \in U$$

$$A = \{0.9, 0.4, 0.5, 0\}$$

$$B = \{0.2, 0.3, 0.4, 0.8\}$$

$$A \cup B = \{0.9, 0.4, 0.5, 0.8\}$$

Intersecção - Zadeh

Ao contrário do operador anterior, mantém-se os valores menores na intersecção dos dois conjuntos. Também é um operador binário. A seguir é apresentado um exemplo com dois conjuntos hipotéticos.

$$A \cap B = \min(\mu_A[x], \mu_B[y]), x, y \in U$$

$$A = \{0.9, 0.4, 0.5, 0\}$$

$$B = \{0.2, 0.3, 0.4, 0.8\}$$

$$A \cap B = \{0.2, 0.3, 0.4, 0\}$$

Complemento - Zadeh

É um conceito semelhante a da lógica Booleana também, mas lembrando sempre que se trata de graus de pertinência, como definido abaixo. É um operador unitário.

$$\mu_{\neg A}[x] = 1 - \mu_A[x], x \in U$$

$$A = \{0.9, 0.4, 0.5, 0\}$$

$$A' = \{0.1, 0.6, 0.5, 1\}$$

Concentração

Assim como o complemento, a concentração é um operador unário. O resultado deste operador num conjunto *fuzzy* é a criação de um novo subconjunto em que a redução na magnitude do grau de pertinência de y no conjunto original é relativamente maior para o y com menor grau de pertinência. O efeito deste operador sobre um conjunto *fuzzy* sigmoidal corresponde a um achatamento do mesmo

A equação que define este operador é:

$$\mu_{CON(A)}[x] = \mu_A[x], x \in U$$

Dilatação

O efeito deste operador é justamente o oposto da concentração, sendo desta forma também um operador unário. A equação que define este operador para um conjunto *fuzzy* A é a seguinte:

$$\mu_{DIL(A)}[x] = \sqrt{\mu_A[x]}, x \in U$$

Intensificação e dilatação

Os modificadores de contraste mudam a natureza de áreas *fuzzy* dos conjuntos, fazendo a região menos difusa (intensificação) ou mais difusa (difusão). Estes operadores estão relacionados a idéia de entropia *fuzzy* e ambigüidade intrínseca.

Como resultado da intensificação tem-se o efeito de diminuição do valor de $\mu_A[x]$ para todo x (exceto onde $\mu_A[x] = 1$), com os maiores valores de $\mu_A[x]$ diminuindo proporcionalmente menos que os menores valores. Também é chamado de intensificação de contraste.

Propriedades de operadores binários

Assim como na lógica Booleana algumas propriedades foram definidas por Zadeh (*op cit*) a respeito destes operadores de conjuntos *fuzzy*. Apenas, para comparação segue algumas delas.

Baseado na lei de Morgan:

$$\begin{aligned}(A \cup B)' &= A' \cap B' \\ (A \cap B)' &= A' \cup B'\end{aligned}$$

Baseado nas leis distributivas:

$$\begin{aligned}C \cap (A \cup B) &= (C \cap A) \cup (C \cap B) \\ C \cup (A \cap B) &= (C \cup A) \cap (C \cup B)\end{aligned}$$

Operadores algébricos:

Ainda no trabalho primordial de Zadeh (*op cit*) foram definidos alguns operadores algébricos.

Produto Algébrico

O produto algébrico de A e B é indicado por AB e é definido como funções de pertinência de A e B pela seguinte relação:

$$\mu_{AB}[x] = \mu_A[x] \mu_B[x]$$

Somatória algébrica

A somatória algébrica de A e B é indicada por $A + B$ e é assim definida em Zadeh (*op cit*):

$$\mu_{A+B}[x] = \mu_A[x] + \mu_B[x] - \mu_A[x] \mu_B[x]$$

Contanto que a somatória f_{A+B} é menor ou igual a um. Deste modo, ao contrário do produto algébrico, a somatória algébrica é significativa apenas quando a condição $\mu_A[x] + \mu_B[x] \leq 1$ é satisfeita para todo x . Assim, Zadeh (1968) incrementa esta definição;

$$\mu_{A+B}[x] = \mu_A[x] + \mu_B[x] - \mu_A[x]\mu_B[x], \forall x$$

Apenas a título de comparação a Tab. 4.5 apresenta os operadores algébricos compensatórios.

	Interseção	União
Zadeh	$\min(\mu_A[x], \mu_B[y])$	$\max(\mu_A[x], \mu_B[y])$
Mean	$(\mu_A[x] + \mu_B[y]) / 2$	
Mean ²	mean ²	$4 * (\max(\mu_A[x], \mu_B[y])) / 6$
√Mean	mean ^{1/2}	mean ^{1/2}
Product	$(\mu_A[x] * \mu_B[y])$	$(\mu_A[x] + \mu_B[y]) - (\mu_A[x] * \mu_B[y])$
Bounded Sum	$\max(0, \mu_A[x] + \mu_B[y] - 1)$	$\min(1, \mu_A[x] + \mu_B[y])$

Tabela 4.5: Operadores compensatórios algébricos de Interseção e União, Cox (*op cit*).

Operadores compensatórios (Yager)

Ainda a título de comparação a Tab. 4.6 apresenta uma descrição rápida

de diversos operadores alternativos dentro da lógica *fuzzy*. Atenção especial será dada aos operadores de Yager, ainda assim apenas para verificar suas diferenças. Outros operadores compensatórios como os de “Zimmerman e Zysno” e de “Dubois / Prade” são apenas referenciados aqui, porém não serão usados. Vale lembrar que no desenrolar deste trabalho apenas será aplicado os operadores de Zadeh.

	Interseção	União
Zadeh	$\min(\mu_A[x], \mu_B[y])$	$\max(\mu_A[x], \mu_B[y])$
Yager	$1 - \min(1, ((1 - \mu_A[x])^k + (1 - \mu_B[y])^k)^{1/k}$	$\min(1, \mu_A[x]^k + \mu_B[y]^k)^{1/k}$

Tabela 4.6: Operadores compensatórios de União e Interseção de Yager, comparados com os de Zadeh.

Os operadores de Yager utilizam um parâmetro k que representa um peso de transformação, assim como outros operadores compensatórios. No caso dos operadores de união e interseção de Yager, as funções convergem a resultados da representação mínima e máxima com valores muito altos de k ($k \rightarrow \infty$). Especificamente, no caso da interseção, quando o valor de k é alto, a resposta é cada vez menor de grau de pertinência até que se estabilize no mínimo da função verdadeira. Situação inversa se

verifica para a união. Há também o operador compensatório **Yager NOT** que pode ser definido da seguinte forma:

$$\sim \mu_A(x) = (1 - \mu_A(x)^k)^{1/k}$$

onde k está geralmente definido no intervalo $[>0, <5]$.

4.4.5. Modificadores de conjuntos fuzzy

Um modificador, como o próprio nome diz causa um efeito em que transforma a forma de uma superfície *fuzzy* criando desta forma um novo conjunto *fuzzy*.

O mecanismo da operação de um modificador *fuzzy* são geralmente heurísticos por sua natureza. Ou seja, o grau em que um conjunto *fuzzy* é modificado bem como sua natureza de transformação não são baseados em uma teoria matemática de operações, mas sim associados com o ajuste percebido da transformação.

Zadeh (1972) dividiu em dois grupos os de tipo I e os de tipo II. Os primeiros correspondem aos que atuam num conjunto *fuzzy*, por exemplo: muito, mais ou menos, altamente etc. Os segundos requerem uma descrição de como atuam nos componentes de operadores (*e.g.* essencialmente, tecnicamente, atualmente, estritamente, em um sentido, praticamente, virtualmente, regular etc.) A Tab. 4.7 apresenta alguns modificadores lingüísticos apresentados por Cox (*op cit*).

Modificadores	Significado
acima, mais que	Restringe uma região <i>fuzzy</i>
quase, definitivamente, positivamente	Intensificação de contraste
abaixo, menos que	Restringe uma região <i>fuzzy</i>
Genericamente, usualmente	Difusão de contraste
Não	Negação ou complemento
Preferivelmente, até certo grau	Dilui uma região <i>fuzzy</i>
muito, extremamente	Intensifica uma região <i>fuzzy</i>

Tabela 4.7: Modificadores lingüísticos e seus significados aproximados.

4. 4. 6. Constraint

A tomada de decisão em um ambiente difuso (não claro), segundo Bellman & Zadeh (1970), é entendido como o processo em que as metas e/ou os limites (*constraints*) são difusos em sua própria natureza. Isto implica que estas metas sejam classes com limites não muito bem definidos. Deste modo, tanto as metas como os *constraints* difusos podem ser definidos precisamente como conjuntos difusos no espaço das alternativas. Conseqüentemente a decisão difusa pode ser entendida como a interseção dos objetivos e limites, sendo considerado uma limitação. Este limite seria uma situação contrastante que trunca a função de pertinência num ponto. Este ponto corresponderia ao valor mínimo a ser adotado como anômalo. A Fig. 4.9 resume estas relações entre o conjunto *fuzzy* e o *constraint*, mostrando graficamente o efeito da aplicação de um *constraint* num conjunto difuso.

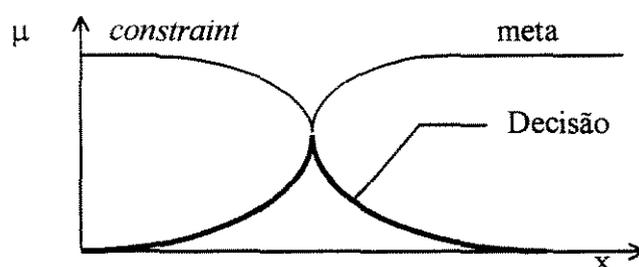


Figura 4.9: Tomada de decisão num ambiente difuso, no eixo μ tem-se o grau de pertinência e no x os valores correspondentes ao conjunto *fuzzy* e sua limitação.

Num processo de tomada de decisão quantificado, os *constraints* e as conseqüências de possíveis ações não são conhecidas precisamente. Para tratar quantitativamente com a imprecisão, normalmente emprega-se conceitos da Teoria da Probabilidade. Sob a ótica da lógica *fuzzy*, este procedimento é questionável uma vez que está sendo aceita a premissa de que a imprecisão pode ser igual a aleatoriedade. Por *fuzziness* entende-se como o tipo de imprecisão associado com os conjuntos *fuzzy*. Aleatoriedade está relacionado a incerteza do grau de pertinência de um objeto num conjunto não *fuzzy*.

Como será visto adiante o *constraint* será uma das técnicas mais utilizadas neste trabalho. Bellman & Zadeh (*op cit*) mostram a tomada de decisão num ambiente difuso em que é utilizado esta técnica.

4. 4. 7. Raciocínio fuzzy

A base dos sistemas difusos estão as proposições. Estas são declarações de relações entre variáveis modeladas e uma ou mais regiões *fuzzy*. Várias proposições condicionais são avaliadas com seus graus de pertinência que terão contribuições para o resultado final. Em termos gerais na Fig. 4.10 tem-se o funcionamento de um sistema difuso. Vale lembrar que em muitos casos este tipo de sistema está intimamente ligado ao processamento paralelo, um processamento para cada proposição.

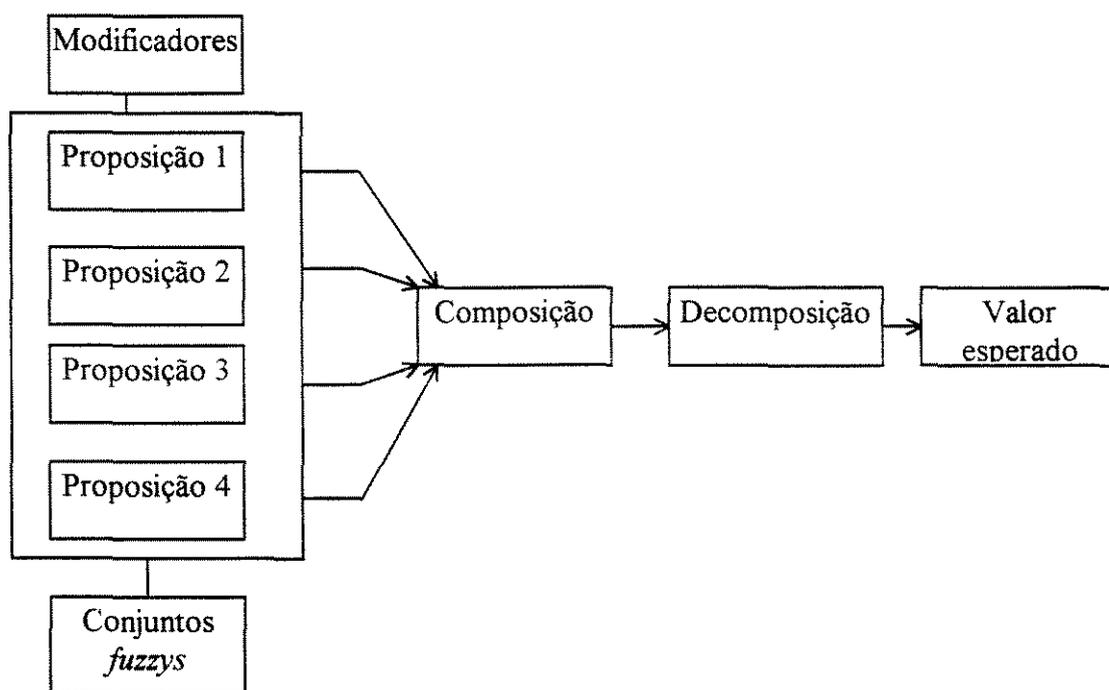


Figura 4.10: Combinação e decomposição de proposições difusas.

A *fuzzificação* de um problema de mundo real significa usar as funções de pertinência das variáveis lingüísticas para computar cada grau de termo de validade em um ponto de operação de algum processo.

Uma variável lingüística, a grosso modo, é o próprio nome de um conjunto *fuzzy*. Entretanto, uma variável lingüística também carrega o conceito de qualificadores para conjuntos *fuzzy*. Estes modificam a forma destes conjuntos em modos previsíveis exercendo a mesma funcionalidade de um adjetivo. Variáveis lingüísticas permitem o modelamento de uma linguagem difusa de expressar diretamente o tom de significados subjetivos usados pelos geólogos.

Os tipos de qualificadores que podem ser aplicados aos conjuntos *fuzzy* podem ser definidos por usualidade, frequência e contadores.

Como visto anteriormente um modelo *fuzzy* consiste de um conjunto de proposições *fuzzy* condicionais e/ou não-condicionais. Segundo Cox (*op cit.*), uma

proposição estabelece uma relação entre um valor no domínio e no espaço difuso. Deste modo tem-se:

$$x \text{ é } Y$$

onde x é um valor do domínio e Y é a variável lingüística. O efeito da avaliação de uma proposição é o grau de pertinência derivado da função de transferência abaixo.

$$\mu_A \leftarrow (x \in Y)$$

Tal proposição nos diz o quanto compatível x é com Y ou qual grau é x um membro do conjunto Y .

Proposições Fuzzy Condicionais

Uma proposição condicional é aquela qualificada pelo modificador *if*. De uma forma geral tem-se:

$$\textit{if } w \text{ é } Z \textit{ then } x \text{ é } Y$$

onde w e x são valores e Z e Y são variáveis lingüísticas e pode ser interpretada da seguinte forma:

$$\textit{se } x \text{ é membro de } Y \textit{ para o grau que } w \text{ é membro de } Z$$

Proposições Fuzzy Não-condicionais

Analogamente, uma proposição não-condicional é aquela em que não é aplicado a expressão *if*.

$$x \text{ é } Y$$

onde x é um valor do domínio e Y é uma variável lingüística e pode ser interpretado da seguinte forma:

$$X \text{ é o subconjunto mínimo de } Y$$

Quando o conjunto de saída X é vazio, então X é restrito a Y , de outra forma, para o domínio de Y , X torna-se $\min(X, Y)$.

Uma vez que estas proposição não são condicionais, então elas nunca são correlacionadas.

4. 4. 8. Aproximação monotômica

É uma regra simples de raciocínio aproximado. Quando duas regiões difusas são relacionadas aplica-se uma simples função de implicação proporcional:

$$\textit{Se } x \text{ é } Y \textit{ então } z \text{ é } W$$

o que pode ser representado pela seguinte função de transferência:

$$z = f((x, Y), W)$$

Desta forma, sob determinadas circunstâncias, um sistema difuso pode ser feito. O valor de saída é estimado diretamente de um grau de pertinência nas regiões difusas relacionadas. Como forma de exemplo próximo ao contexto deste trabalho, criou-se dois conjuntos *fuzzy*: anomalia para Cu (Fig. 4.11) e anomalia radiométrica (Fig. 4.12).

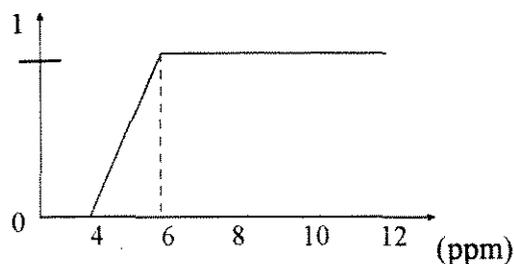


Figura 4.11: Anomalia para Cu (hipotético).

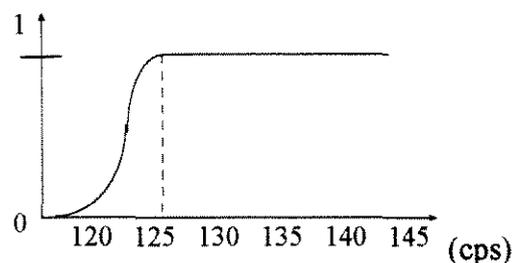


Figura 4.12: Anomalia radiométrica, contagem Total (hipotética).

Este modelo baseia-se na relação direta de anomalia de Cu com anomalia radiométrica: se *anomalia para Cu* é alta então *anomalia radiométrica* será alta.

Isto é feito com a implicação entre regiões *fuzzy* Y e W:

- Para um elemento x no domínio de Y, encontra-se o grau de pertinência na região *fuzzy* Y, tal que $\mu_Y[x]$.

- Na região *fuzzy* w no grau de pertinência correspondente a $\mu_Y[x]$, encontra-se o valor correspondente no domínio do eixo z que é a solução para esta implicação. Desta forma pode ser definida como: $z_w = f(\mu_Y[x], D_w)$ o que pode ser traduzido na Fig. 4.13.

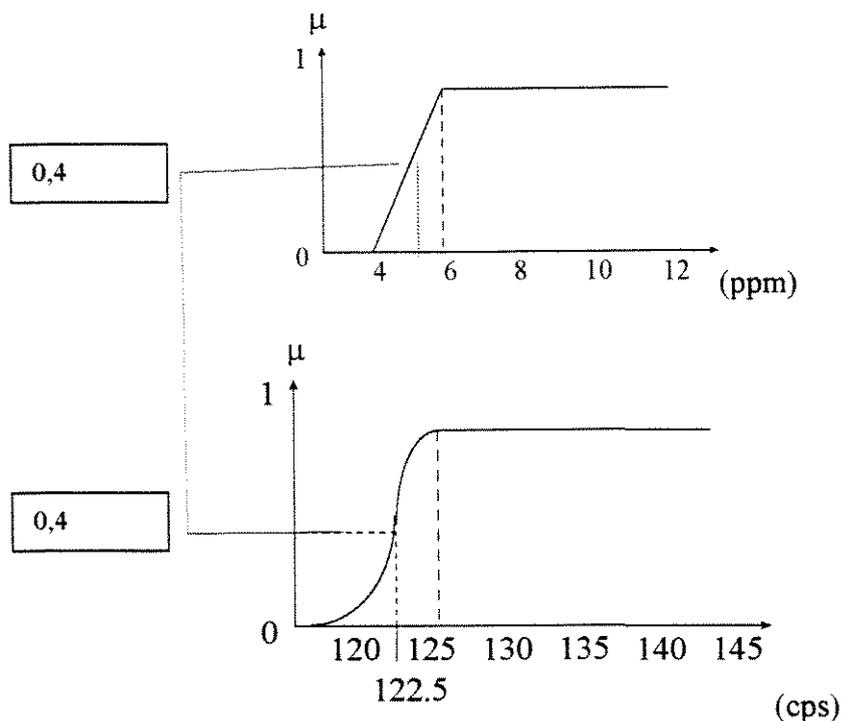


Figura 4.13: Exemplo de implicação monotômica utilizando dois conjuntos *fuzzy* hipotéticos definidos nas figuras anteriores.

4. 4. 9. Composição de regras de inferência fuzzy

Dentro de um processo difuso com variáveis linguísticas existem diversas formas de se inferir um resultado, ou seja, de se tomar uma decisão. Todas estas regras produzem espaços difusos pela interação de diversas proposições. Cada proposição é avaliada em paralelo, sendo que cada limiar destas proposições contribuem para a forma da variável final.

Os principais métodos são o *min-max* e o *aditivo difuso* que se diferenciam basicamente pelo modo de como atualizam a variável de saída. Outros métodos como de correlação e de implicação são menos usados. Atenção especial será dada neste trabalho ao método da correlação.

Regras de implicação MAX-MIN

A região *fuzzy* criada é restrita ao mínimo ou ao máximo valor verdadeiro atribuído. Desta forma tem-se as respectivas equações a seguir:

$$\mu_{cfs}[x_i] \leftarrow \min(\mu_{pt}, \mu_{cfs}[x_i])$$

Indicando que o conjunto *fuzzy* conseqüente (*cfs*) é modificado antes de ser usado. Esta modificação para cada elemento da função é para o mínimo tanto da função verdadeira quanto do atributo da proposição (*pt*).

O mesmo é feito em relação ao método máximo:

$$\mu_{sfs}[x_i] \leftarrow \max(\mu_{sfs}[x_i], \mu_{cfs}[x_i])$$

Indicando que a solução do conjunto *fuzzy* (*sfs*) é dada para cada valor de função verdadeira, o máximo tanto do valor verdadeiro da solução do conjunto *fuzzy* ou o conjunto *fuzzy* que foi correlacionado na equação anterior (*cfs*).

Regras de implicação de adição *fuzzy*

A região *fuzzy* conseqüente continua sendo reduzida pelo valor verdadeiro mínimo do atributo:

$$\mu_{cfs}[x_i] \leftarrow \min(\mu_{pt}, \mu_{cfs}[x_i])$$

mas a região de saída *fuzzy* é atualizado por uma diferente regra:

$$\mu_{sfs}[x_i] \leftarrow \min(1, \mu_{sfs}[x_i] + \mu_{cfs}[x_i])$$

Métodos de correlação

Podem ser de duas formas: a correlação mínima e o produto de correlação. O primeiro corresponde ao truncamento no máximo do valor verdadeiro do atributo. Analogamente o segundo corresponde ao conjunto *fuzzy* intermediário, ao invés do truncamento. Graficamente tem-se o resultado do método de correlação mínimo, na Fig. 4.14, que é o mais usado.

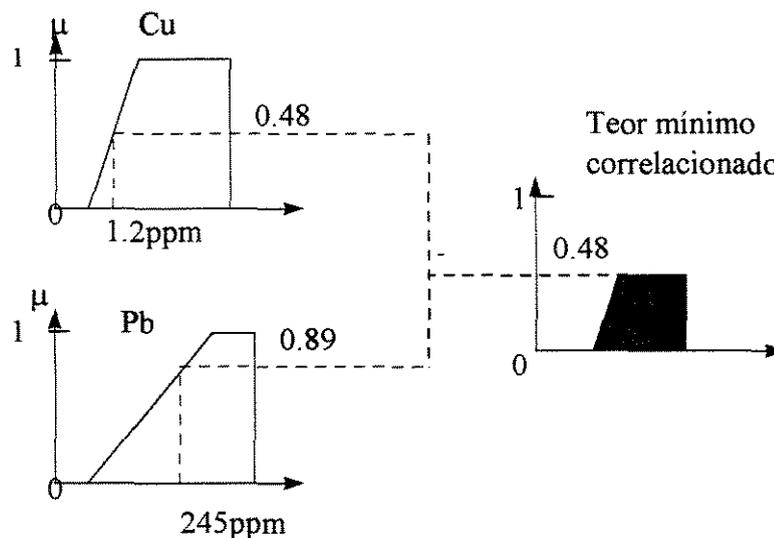


Figura 4.14: Teor mínimo correlacionado entre anomalia de dois elementos geoquímicos.

4. 4. 10. Métodos de “defuzzyficação”

A avaliação de proposições produz um conjunto *fuzzy* associado com cada variável de solução de modelo. As proposições seguintes, por exemplo, quando avaliadas, correlacionarão os conseqüentes conjuntos *fuzzys* *A*, *B* e *C* para produzir um conjunto *fuzzy* representante da variável de solução *D*:

se w é *Y* então *D* é *A*

se x é *X* então *D* é *B*

se y é *Z* então *D* é *C*

Deste modo, para encontrar o valor esperado d , é necessário encontrar o melhor que representa a informação contida no conjunto *fuzzy* *D*. A Fig. 4.15 mostra este processo que também é chamado de “defuzzyficação”. Há diversos métodos descritos de “defuzzyficação” sendo os principais: centróide, altura máxima e a técnica de evidência preponderante.

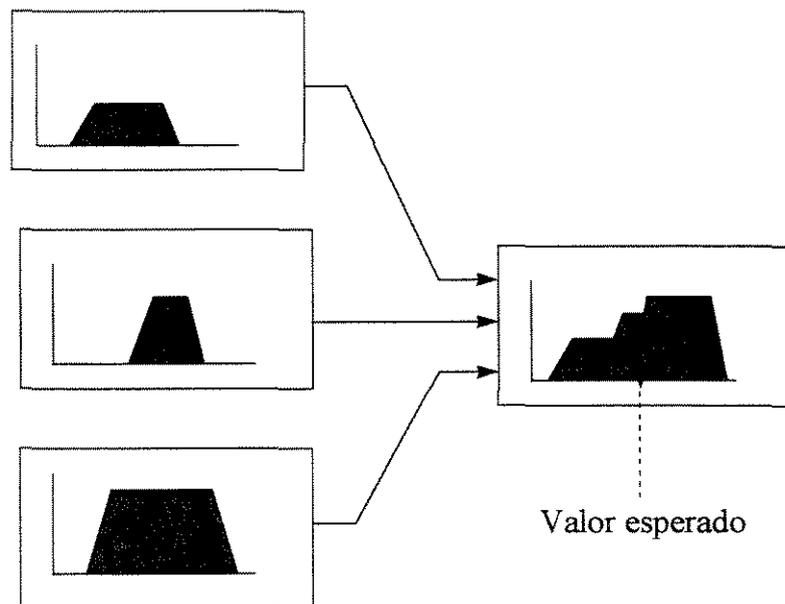


Figura 4.15: Processo de inferência e “defuzzyficação”.

5. Análise Metalogenética

5. 1. Introdução

A fase prospectiva de um bem mineral é precedida por uma caracterização regional das potencialidades minerais com base nos dados geológicos disponíveis. Ou seja, os dados geoquímicos, geofísicos e litológico-estruturais são coletados de forma regional e dispersa, dependendo da escala do mapeamento. Estes dados deverão então ser tratados para que resultem em áreas menores propícias para encontrar um determinado bem mineral. Não só os métodos de coleta destes dados evoluíram muito, mas também os processos de tratamento dos mesmos, com destaque o uso de SIG.

A pesquisa metalogenética começa com o inventário dos dados disponíveis, levando em conta os modelos geológicos adotados. É impossível fazê-la separando os processos considerados e o contexto observado através das informações disponíveis. Desta forma, são definidos a Província Metalogenética a que pertence a área estudada, o que está ligada ao conceito de Província Geotectônica, a Época Metalogenética, idade pela qual ocorreram os eventos responsáveis pela mineralização e os modelos geológicos adotados com base em conhecimentos prévios.

Neste contexto, a equipe de geólogos terá a disposição uma quantidade enorme de informações, sendo necessário um conhecimento de modelos metalogenéticos dos bens minerais em estudo para se efetuar a análise.

De uma forma geral os processos envolvidos na análise metalogenética podem ser esquematizados conforme a Fig. 5.1.

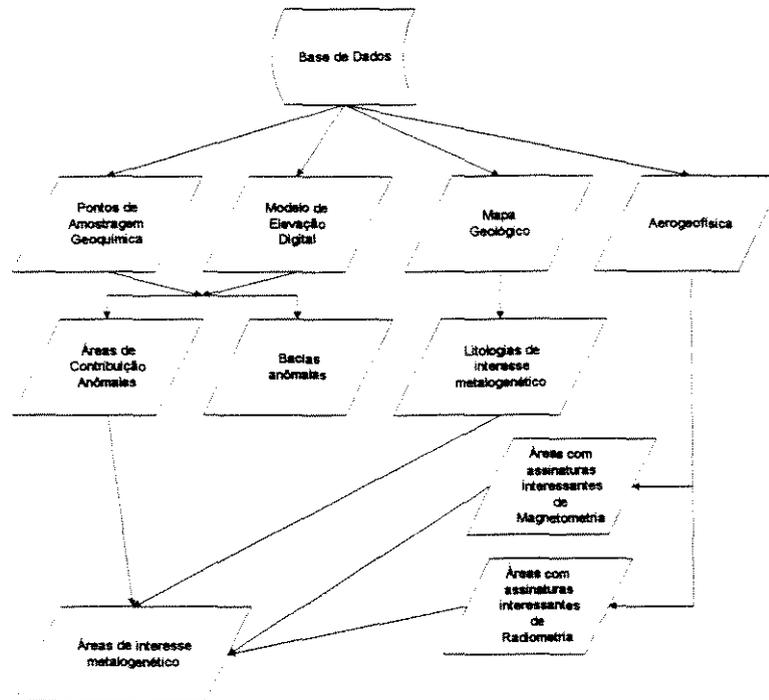


Figura 5.1: Diagrama geral da integração de dados.

5. 1. 1. Guias prospectivos na área

De acordo com as descrições dos turmalinitos da área, a origem destes pode ser considerada como exalativa que posteriormente sofreu um metamorfismo. Esta situação constitui num importante guia prospectivo para mineralizações associadas a sulfetos, especificamente as do tipo *stratabound* de acordo com Slack (1982). Este autor cita algumas associações minerais, como turmalina + quartzo + mica + albita + grafita, que aparecem parcialmente na área estudada. Essas associações podem se constituir em guias prospectivos para diversos metais como Au, W, Sn e U, bem como para Pb, Zn e Ag em outras rochas sulfetadas.

Os sulfetos em filitos e xistos grafitosos ocorrem com extrema frequência na área com evidências de que são de origem em ambiente redutor e que podem ter metais associados a estes sulfetos.

Em relação aos metabasitos, há ocorrências de minerais associados a estas rochas como talco e talvez amianto antofilitico. Deve-se lembrar da possibilidade de se ter minerais portadores de metais.

Como descrito anteriormente os granitos dos corpos de Pilar do Sul e Turvo constituem-se de granitos do tipo a duas micas. Particularmente no Corpo de Pilar do Sul, em seu limite sudoeste, há muitos veios irregulares, com espessuras até métricas,

constituídos por muscovita e quartzo. São *greisens*, o que pode indicar um ambiente favorável para concentrações de W, Sn, Be e Li. Porém, Silva (1995) define estes *greisens* como estéreis para W e Sn.

Campos Neto *et al* (1990) descrevem na porção NW da área ocorrências restritas de *BIFs* fácies óxido. Apesar das pequenas dimensões foram feitas diversas considerações, sob o aspecto prospectivo nesta área:

- associados a espessas formações ferríferas bandadas do tipo óxido-chert há extensos níveis de filitos grafitosos, correspondendo a tipologia de jazimentos associados a rochas vulcânicas;
- estes *BIFs* de ambientes turbidíticos distais, como encontrado na área, apresentam diversos exemplos de jazimentos em outras regiões.

Para a potencialidade de Sulfeto Estratiforme, Campos Neto *et al* (*op cit*) indicam uma grande similaridade de condições entre os depósitos do tipo Sullivan e o que se observa no Grupo Açungui. Esse tipo de depósito constitui-se de uma extensa lente de sulfetos de ferro, chumbo e zinco, encaixada em uma seqüência de turbiditos distais de idade Proterozóica Média (Hamilton *et al*, 1982, *apud* Campos Neto *et al*, *op cit*). Esses mesmos autores descrevem no depósito tipo *stratabound* uma intensa alteração hidrotermal à albita-clorita-pirita na zona mineralizada. Há também turmalinização em veios que seccionam o minério.

Stein *et al* (*op cit*) efetuaram uma correlação litoestratigráfica regional entre esta seqüência Vulcano-Sedimentar desta região com a mesma seqüência encontrada na região de Perau, no qual foi adotado o termo de Formação Perau. Esta correlação seria estabelecida pela litologia, metamorfismo, deformação e magmatismo, além de posicionamento frente às unidades geológicas maiores. Entretanto, na região de Pilar do Sul a conformação Perau é caracterizada por três unidades, que em termos de associações de litotipos originais foram reagrupados em duas amplas seqüências, dispostas segundo uma fase deformacional posterior. A Seqüência Oriental denota um nível crustal mais profundo frente a Ocidental, visto seu maior grau metamórfico e disposição exterior na grande dobra que inflexiona toda a seqüência para oeste. No entanto, as passagens entre as seqüências são tipicamente transicionais, sem qualquer discordância litológica, metamórfica ou estrutural.

Como ressaltado anteriormente, há uma grande similaridade de condições entre os depósitos do tipo Sullivan e a situação geológica encontrada nas rochas do Grupo Açungui. Nesse depósito, constituído por extensa lente de sulfetos de Fe, Pb e Zn e encaixado numa seqüência de turbiditos distais de idade Proterozóica, os sulfetos (pirrotita, esfalerita, galena e pirita) são acamados e intercalados com níveis de metassedimentos. São considerados como depósitos hidrotermais sin-sedimentares de fundo oceânico. Neste trabalho o que é definido como ou Grupo Açungui Superior, ou

Complexo Turbidico da Folha Pilar do Sul (Campos Neto *et al, op cit*) “tem na fácies pelítica uma provável associação de ambientes turbiditos distais à pelagíticos, relacionados lateral e inferiormente com o pacote de rochas de afinidade vulcano-exalativa. Diques e corpos concordantes de orto-anfibioticos grosseiros seccionam a unidade turbidítica , e são abundantes os turmalinitos e evidências de alteração hidrotermal”. Plimer (1988) cita turmalinitos associados a rochas com mineralizações submarinas (Pb-Zn-Ag, Cu-Co, Cu-Bi, W-Sn-Au e TR).

5. 1. 3. Modelo Geológico adotado

A mineralização exalativa sedimentar corresponde ao modelo para a mina do Perau, também está ligado ao prospecto do Ribeirão do Itacolomi (SP). São mineralizações constituídas por sulfetos contendo Pb, Zn, Ag e Fe, eventualmente Ba, concordantes com as encaixantes e especialmente relacionadas com *BIFs* em unidades basais do Grupo Açungui. Segundo Silva *et al (op cit)* esta mineralização se enquadra na classificação de Hutchinson (1983). Barbour & Oliveira (1979) descrevem-na como um veio de Pb, Zn, Cu e Ba associado a brechas intraformacionais e metaconglomerados mineralizados inserido em um pacote de rochas metassedimentares representadas por micaxistos, calcoxistos, calcários e quartzitos. Intercalando-se com rochas de origem ígnea (ortognaisses granodioríticos e anfibolitos). Num horizonte inferior há um outro nível mineralizado em Cu, numa passagem de uma fácies sedimentar clástica para química. Daitx (*op cit*) atribui uma formação singenética, corroborado por Tassinari *et al* (1990) mostrando que diversos autores atribuem diferentes gênese: processo sedimentares (Barbour & Oliveira, *op cit*), sedimentar-exalativo (Silva *et al*, 1982) ou vulcanogênico-exalativo (Fritzsos, Jr. *et al*, 1982).

Macedo (1986) apresenta um extenso trabalho de prospecção litogeoquímica para a região do Perau com determinação de halos geoquímicos primários e secundários para Pb, Cu e Zn.

Para os depósitos exalativos ressalta-se a associação espacial imediata dos corpos de minério com zonas de alteração inferiores, caracterizadas por empobrecimento em álcalis e cloritização e sericitização.

IPT (1986) indica que na região do Perau não foram encontradas correlação de anomalias magnéticas com a mineralização. Isto deve ser visto com cuidado pela a baixa amostragem (linhas de vôo a 500m) podendo localmente haver alguma correlação. Daitx (1996) destaca o sucesso dos métodos geofísicos de prospecção (IP, SIP,EM) na área Perau-SW, mas sem resultados aparentes para a mineralização de Canoas. Em relação a magnetometria ressalta a importância a nível regional (mapeamento de *BIFs*) quanto a

um nível mais local, ressaltando também que nem sempre se há uma relação de intensidade magnética com a presença da mineralização.

Daitx (*op cit*) mostra que a prospecção para metais básicos no Vale do Ribeira não deve se restringir apenas aos depósitos tipo-Perau e tipo-Paneles, vinculados à presença de seqüências carbonáticas/pelítico-carbonáticas. Isto porque as atividades exalativas poderiam não ter se restringido unicamente ao ambiente plataformal e ao período tardio de deposição das rochas carbonáticas. Esta observação é muito importante haja visto a pouca presença destas rochas na região de Pilar do Sul.

Uma característica importante da mineralização do Perau, mostrada por Daitx (*op cit*) é a presença de rochas vulcânicas félsicas com altos teores de potássio próximo aos corpos de minério. Esta propriedade poderá ser validada com o uso da aeroradiometria.

Portanto, o modelo prospectivo a ser adotado nesta área abrange as seguintes características:

- rochas pertencentes ao Grupo Açungui;
- áreas representativas de anomalia geoquímica para Cu e Pb;
- áreas que tenham alguma caracterização radiométrica indicativa de hidrotermalismo correspondentes às rochas de interesse com altos valores de K e U;
- áreas com pouca susceptibilidade magnética, porém dada às características da amostragem magnética na área este critério deve ser tomado com cuidado.

5. 2. Análise metalogenética usando lógica *booleana*

O modelamento *booleano* envolve a combinação lógica de mapas binários resultantes da aplicação de operadores lógicos *booleanos*. Cada mapa é usado como uma condição podendo ser considerado como um nível de evidência. Os vários níveis de evidência são combinados para suportar uma hipótese, ou proposição. A hipótese que está sendo avaliada neste trabalho é se há alguma potencialidade para depósitos de Pb e Cu na área estudada. Os dados são cruzados para determinar se há um conjunto de situações para os quais os critérios são satisfeitos. Os valores dos conjuntos gerados podem ser somente 0 (FALSE) ou 1 (TRUE), não sendo admitido um valor intermediário indicando “talvez”.

Inferências sobre uma hipótese baseada na aplicação de um conjunto de regras *booleanas* constituem um método de representar uma forma de pensar. Dentro desta lógica tem-se ainda os modelos de índice de sobreposição. A vantagem do procedimento de se atribuir pesos a índices de sobreposição é que cada mapa é usado

como uma evidência com diferentes pesos, dependendo da sua importância para a hipótese em consideração.

Sob este aspecto há duas formas de ponderação dentro da lógica *booleana* em SIG, segundo Boham-Carter (*op cit*):

- Mapas de evidência binária: é o modo mais simples, onde os mapas de entrada são binários e cada mapa carrega um simples ponderador;
- Mapas com várias classes: neste caso, cada classe de todo mapa é dado um valor diferente, permitindo um sistema de ponderação mais flexível.

Mesmo os resultados apresentando-se mais próximos de uma situação ideal, usando um raciocínio *booleano*, continuam sendo dependentes de um valor absoluto de verdadeiro ou falso. Nestes dois últimos métodos, haverá uma maior relevância para os valores mais altos, que usando a lógica *booleana*, terá um delimitador do valor que será considerado alto como verdadeiro (prospectável). Para cada tema será descrito, a seguir, a forma de tratamento utilizado sob a perspectiva *booleana*. Dentro desta mesma lógica, tem-se vários procedimentos matemáticos que suportam as diversas relações topológicas entre os objetos espaciais representados por um SIG, todas levando em conta que um determinado objeto (um polígono, por exemplo) é associado sempre a um atributo. Desta forma, um corpo geológico com grau metamórfico baixo é separado de um outro com grau metamórfico médio, sob critérios rígidos de separação dos mesmos. Ou seja, um critério de verdadeiro (valor 1) ou falso (valor 0), não sendo admitido um valor intermediário e comumente usando operações de União (\cup), Interseção (\cap) e Exclusão (\neg).

Vale lembrar que, exceção feita à anomalia geofísica onde foi gerada uma superfície contínua, muitas das operações poderiam ser feitas usando dados vetoriais. Certas operações foram obrigatoriamente feitas utilizando dados *raster*, como a determinação de áreas de contribuição a pontos de amostragem em sedimentos de corrente. Deste modo, a partir da característica de cada operação efetuada usou-se dado vetorial ou *raster* em sua origem, mas que o resultado final, foi apresentado em *raster*.

Braghin & Silva (1996) apresentam uma metodologia de trabalho usando lógica *booleana* para a região englobando o uso de topologia de polígonos e *Regions*. Também é apresentado o mapeamento de áreas de interesse geoquímico através de bacias anômalas como também por áreas de contribuição a montante de pontos anômalos. Neste caso, as áreas de contribuição sempre estiveram contidas nas bacias consideradas anômalas, o que de fato é de se supor. Outro fato significativo apresentado é que tanto com o uso da topologia de polígonos quanto com o uso de *Regions* o resultado foi exatamente o mesmo, tanto para as áreas de contribuição como para as bacias.

Tendo em vista estas considerações, neste trabalho não será adotada a análise por bacias bem como não será feita a análise usando a topologia de *Regions*.

5. 2. 1. Geoquímica

Para a seleção dos elementos de interesse foi feita uma seleção dos pontos anômalos de 1ª ordem com os teores definidos por IPT (1988) para os elementos de interesse. Estes critérios podem ser encontrados na Tab. 3.3. Vale lembrar ainda que a utilização desta lógica pode ser estendida para outros elementos. Neste caso foram analisados os seguintes elementos: Pb e Cu.

Com os pontos selecionados pode-se definir as áreas de contribuição destes pontos e assim determinar áreas de interesse para cada elemento. Esta operação é feita baseada no modelo de elevação digital da área.

Quando da definição destes pontos anômalos durante o PRÓ-MINÉRIO foram anotados apenas as litologias descritas nos mesmos. Neste trabalho foi usada a área de contribuição a montante para a pesquisa das litologias que se cruzam com estas áreas. O mesmo procedimento poderia ter sido feito em relação às bacias.

Para as operações definidas a seguir, todos os dados utilizados foram convertidos para o formato *raster*, pois na maioria destas operações (intersecção) foram utilizadas mais de duas variáveis, o que tornaria o mesmo processo no modo vetorial muito mais complexo. Aproveitou-se o conceito de NODATA do módulo GRID do ArcInfo para melhor gerenciar esta intersecção. Desta forma dois ou mais GRIDs *booleanos*, com um pixel correspondente em cada um deles com um valor disponível e outro considerado NODATA, terá como resultado de uma combinação o valor NODATA. Todos estes procedimentos podem ser resumidos na Fig. 5.2.

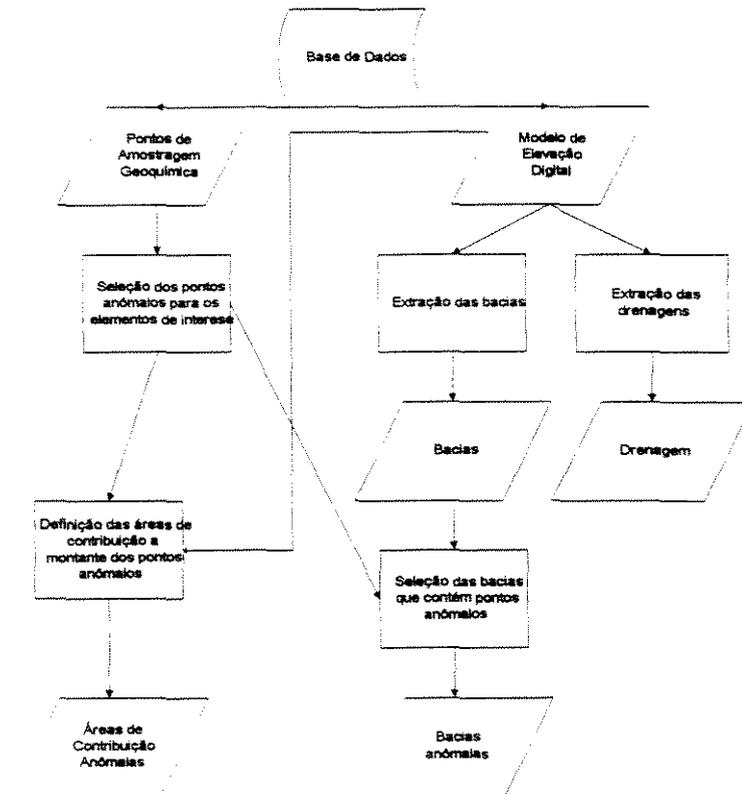


Figura 5.2: Diagrama de operações para determinação de áreas de interesse geoquímico para posterior cruzamento com informações litológicas.

Para as operações desta lógica foram basicamente criados dois AMLs. O primeiro cria coverages de pontos a partir da seleção dos pontos que tenham teor acima do teor definido como de 1ª ordem. Logo após, um segundo AML é acionado para determinar as áreas de contribuição de cada ponto considerado anômalo. O resultado desta operação pode ser visto nas Figs 5.3 e 5.4, respectivamente para Cu e Pb.

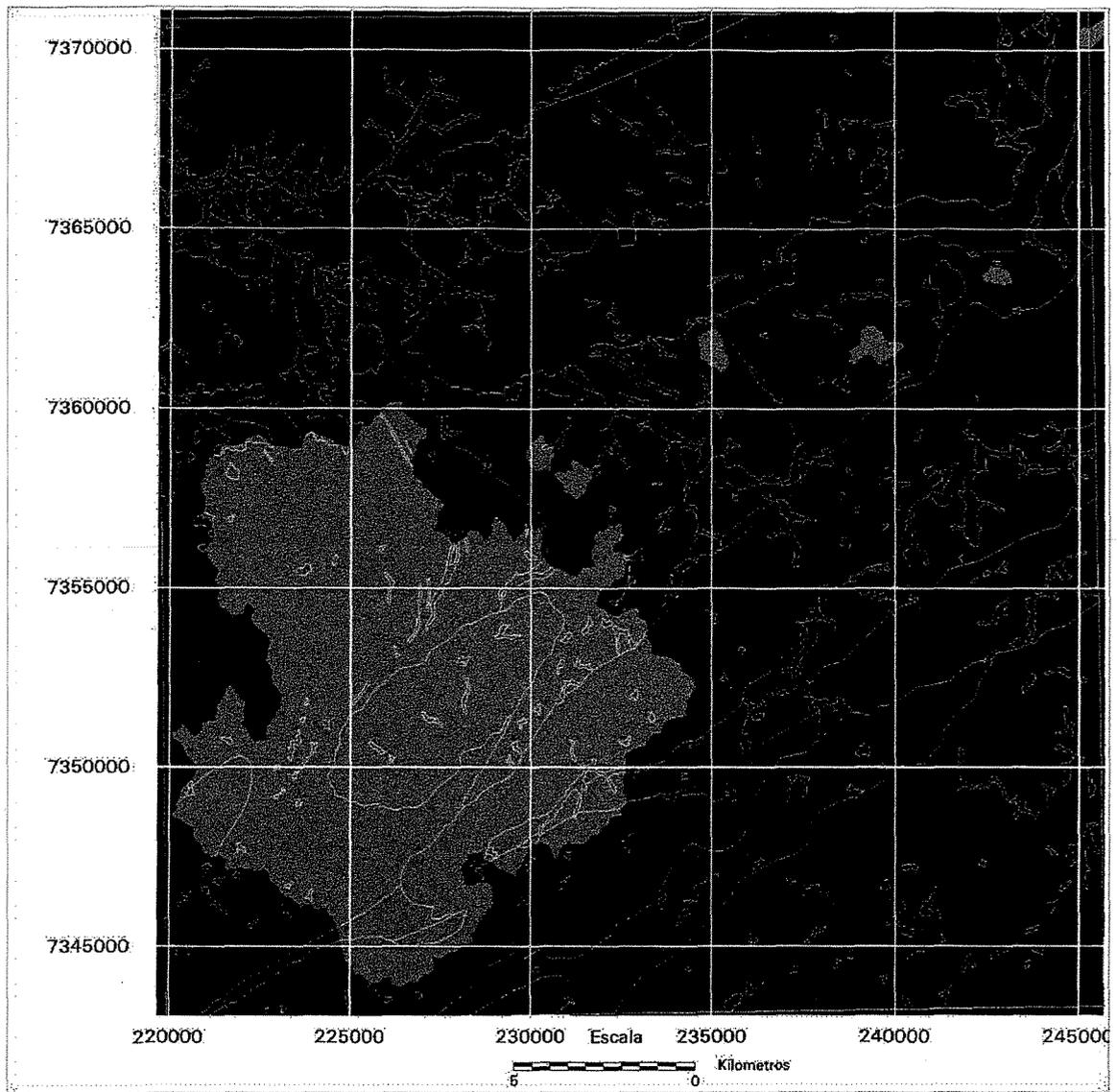


Figura 5.3: Áreas de contribuição extraídas para Cu a partir dos pontos considerados como de anomalia de 1ª ordem.

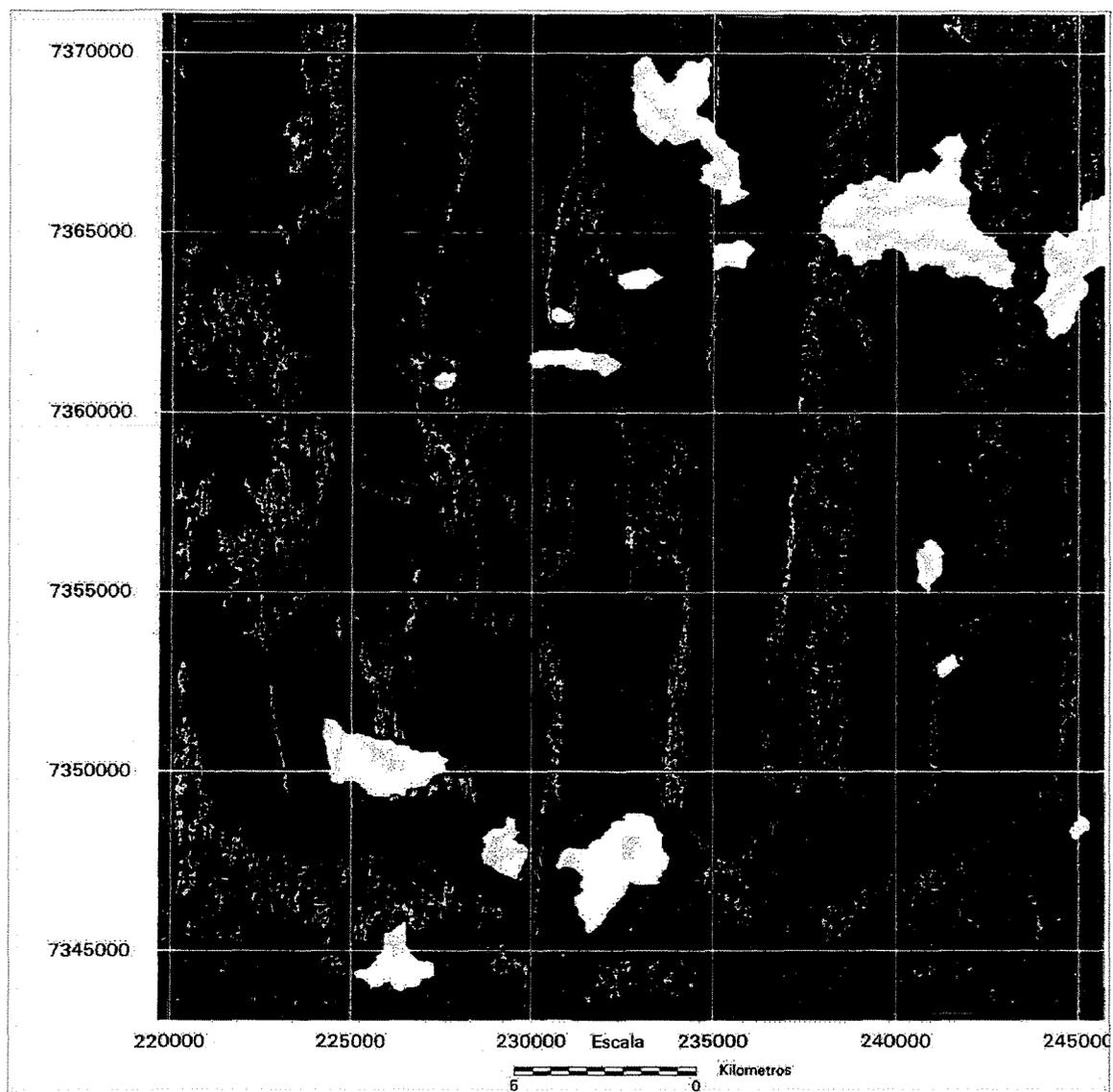


Figura 5.4: Áreas de contribuição extraídas para Pb a partir dos pontos considerados como de anomalia de 1ª ordem.

Como resultado preliminar das operações com os dados de geoquímica descritas anteriormente tem-se como resultado os dados que estão disponíveis para os próximos passos para a pesquisa metalogenética. Neste caso, as áreas de contribuição foram geradas no formato *raster* e depois convertidas para o formato vetorial:

- GQ_CONTx: áreas de contribuição para pontos considerados anômalos do elemento *x*, que pode ser, neste caso, Pb, Cu.

Estes resultados podem ser vistos nas Figs 5.4 e 5.5 que apresentam com sobreposição às litologias mapeadas. Apesar de ter sido mostrado a abordagem por

bacias anômalas, serão aproveitados apenas os dados gerados para as bacias de contribuição, pois restringem um pouco mais a área de interesse.

5. 2. 2. Geofísica

Como descrito no capítulo anterior, foi gerada uma superfície contínua por um método de interpolação adequado para os dados do levantamento aerogeofísico.

Tendo em vista que os dados de aeromagnetometria pode apresentar tanto anomalias negativas como positivas, este tipo de dado não pode ter suas anomalias separadas estatisticamente de uma forma direta. Portanto, foi efetuado um estudo visual desta superfície gerada. Para a superfície de aeromagnetometria já numa primeira vista observa-se um nítida correlação entre o Falhamento de Belchior a sudeste da folha com uma intensa faixa de anomalia magnética. O mesmo ocorrendo com o ramo final, a norte da folha do Falhamento de Taxaquara. Tais correlações podem corresponder a uma faixa de hidrotermalismo associadas a este falhamento. Além de conter minerais com susceptibilidade magnética, estas regiões podem conter minerais sulfetados de interesse para esta pesquisa. No entanto, nenhum outro dado corrobora esta afirmação. Deste modo, o dado aeromagnetométrico será visto com ressalvas neste trabalho.

Como apresentado no capítulo 3, esta mesma superfície pode ser visualizada em relevo sombreado com falsa luminosidade em diferentes direções. Este subproduto gerado poderia ser utilizado relacionando minerais com resposta magnética a sulfetos de Cu e Pb. No contexto geológico da área isto não está claro se esta relação se faz presente, portanto este dado não será utilizado no modelamento *booleano*.

No que se refere às superfícies de radiometria, efetuou-se uma composição colorida em RGB, respectivamente para os canais U, Th e K. Pôde-se então selecionar as áreas que correspondem simultaneamente aos maiores valores de U e K, correspondentes ao Grupo Açungui, com o critério estatístico adotado (Média + 3 Desvio Padrão) admitindo uma distribuição lognormal para os dados. Com isto, pôde-se gerar uma nova imagem correspondente aos maiores valores de U e K mapeando assim áreas de provável alteração hidrotermal que serão utilizadas neste trabalho o que pode ser visto na Fig. 5.5. Para esta seleção de áreas foi utilizada o *software* de processamento digital de imagens IMAGINE. Esta superfície terá papel fundamental na determinação de áreas de interesse para Cu e Pb.

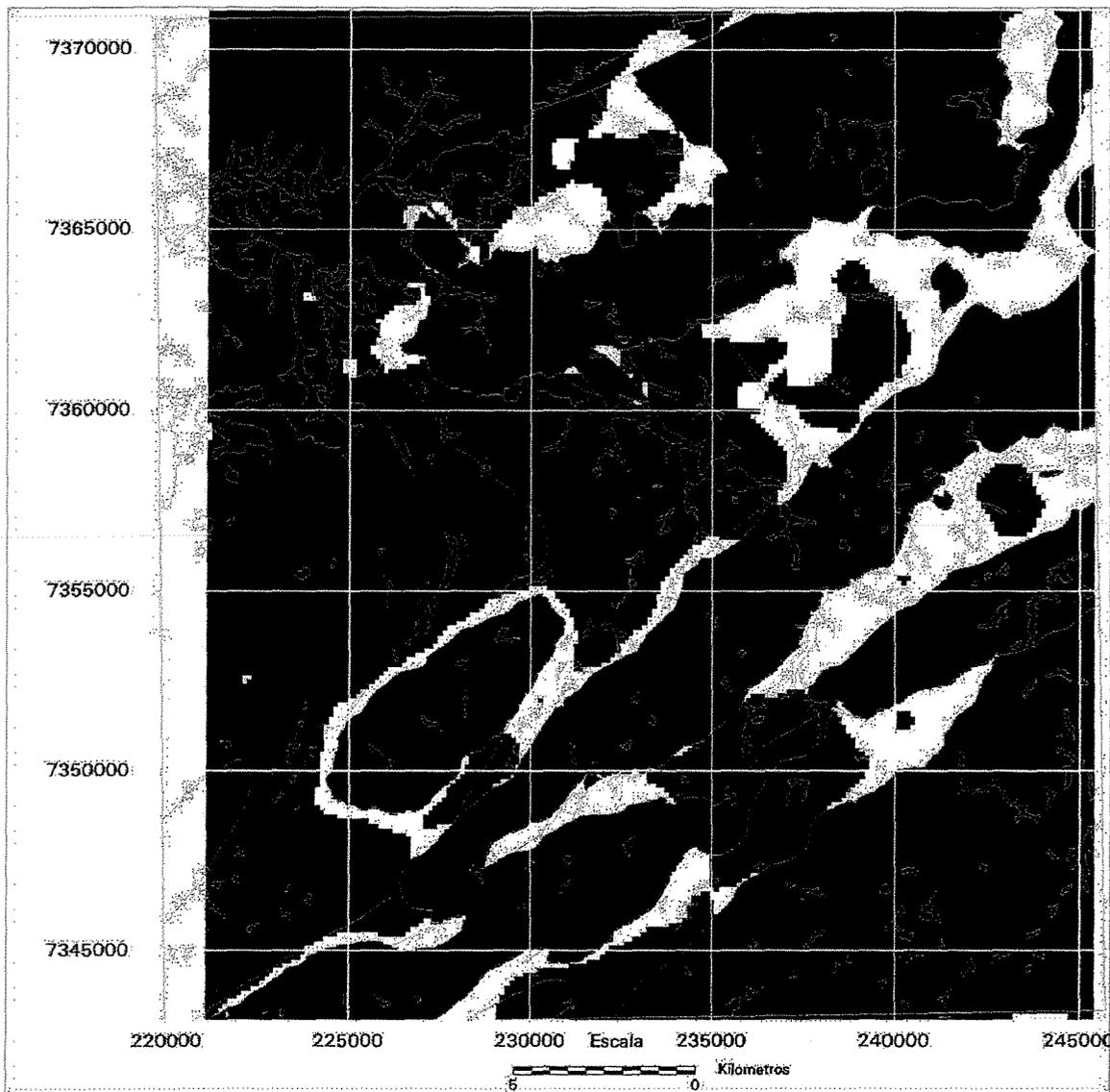


Figura 5.5: Áreas de anomalias aeroradiométricas *booleanas* traçadas por método estatístico.

5. 2. 3. Integração dos dados booleanos

Após a geração de dados *booleanos* listados nos itens anteriores deste capítulo, processou-se a integração dos diversos conjuntos de dados disponíveis. Num primeiro momento, optou-se por utilizar a topologia de *regions* para o mapa geológico. Dada às características geológicas da área os resultados apresentados com o uso desta topologia não foram diferentes da apresentada pela topologia dos polígonos. Além do mais, considerando que as amostragens de geoquímica dificilmente eram feitas em aluviões e que os dados de aeroradiometria não correspondem a valores muito profundos, não há,

com estes dados, a necessidade de se considerar a litologia que está por debaixo de uma aluvião.

A operação para esta fusão equivale a intersecção *booleana*, onde houver simultaneamente zonas de interesse geoquímico, de interesse radiométrico e litologias coerentes com um contexto geológico. Desta forma, com estes subprodutos *booleanos* gerados foi possível gerar um resultado final *booleano*. Neste caso, onde o valor das áreas de interesse for 1, são de interesse metalogenético e onde for 0, não são de interesse para análises de maior detalhe.

Para cada elemento geoquímico tem-se um dado para as áreas de contribuição a montante destes pontos de drenagem (GQ_CONTx). Como dado comum ao outro conjunto tem-se as áreas com assinatura radiométrica interessante. Desta forma, como resultado para esta anomalia dentro deste conjunto tem-se:

$$\text{RESULT_BACx} = \text{GQ_BACx} \langle \cap \rangle \text{GEOLOGIA} \langle \cap \rangle \text{RADIOM}$$

$$\text{RESULT_CONTx} = \text{GQ_CONTx} \langle \cap \rangle \text{GEOLOGIA} \langle \cap \rangle \text{RADIOM}$$

Deste resultado, foi feito o cruzamento com o mapa geológico da área para a determinação de quais áreas serão interessantes para um trabalho de campo de detalhe.

A seguir são mostrados o resultado final de cada conjunto de dado gerado, tanto para Cu como para Pb, levando-se em conta as áreas de contribuição dos pontos a montante, a radiometria e a litologia de interesse, o que pode ser visto nas Fig.s 5.6 e 5.7.

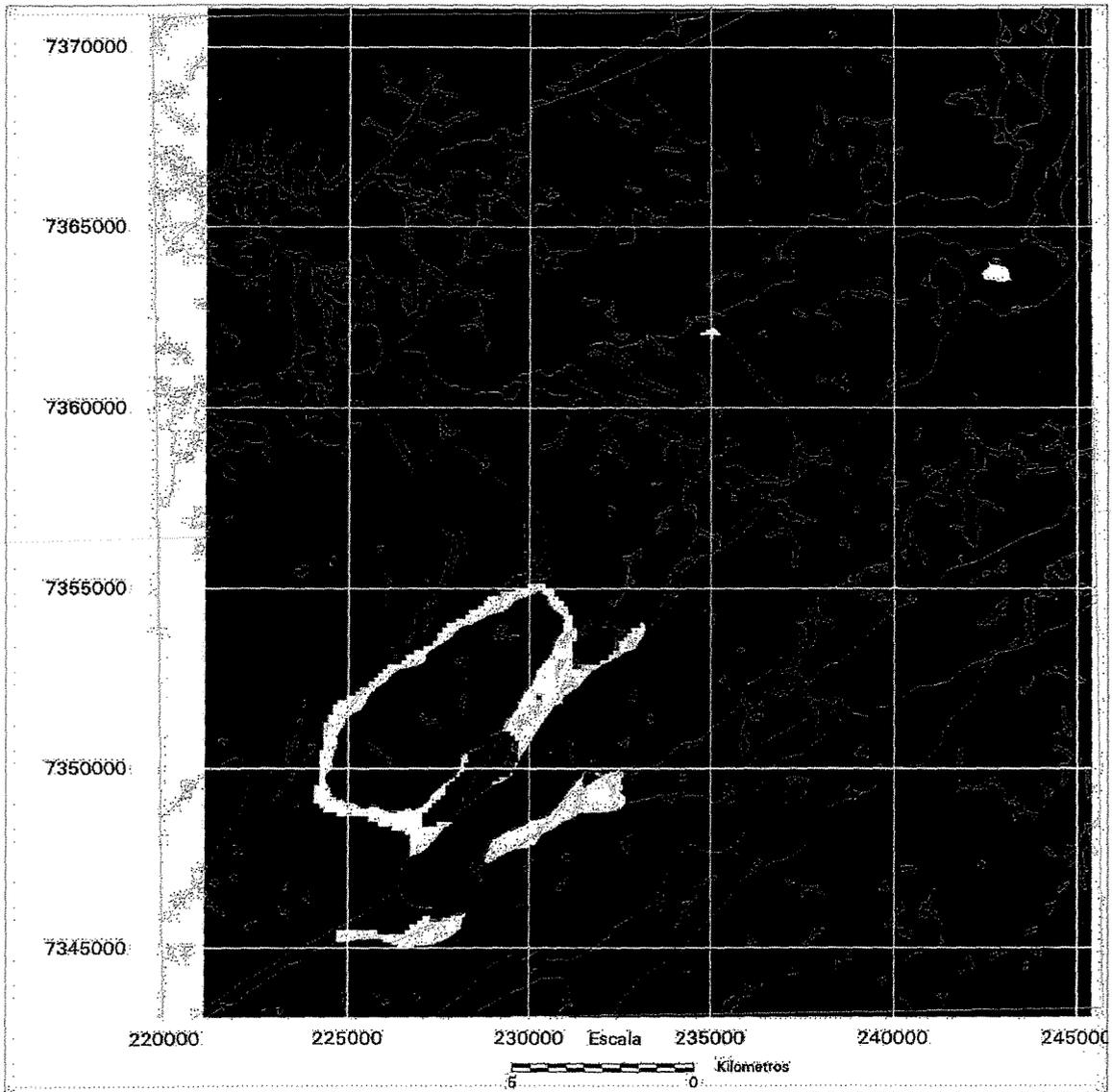


Figura 5.6: Áreas de interesse para Cu, cruzamento de geoquímica e radiometria (U e K), com a geologia sobreposta.

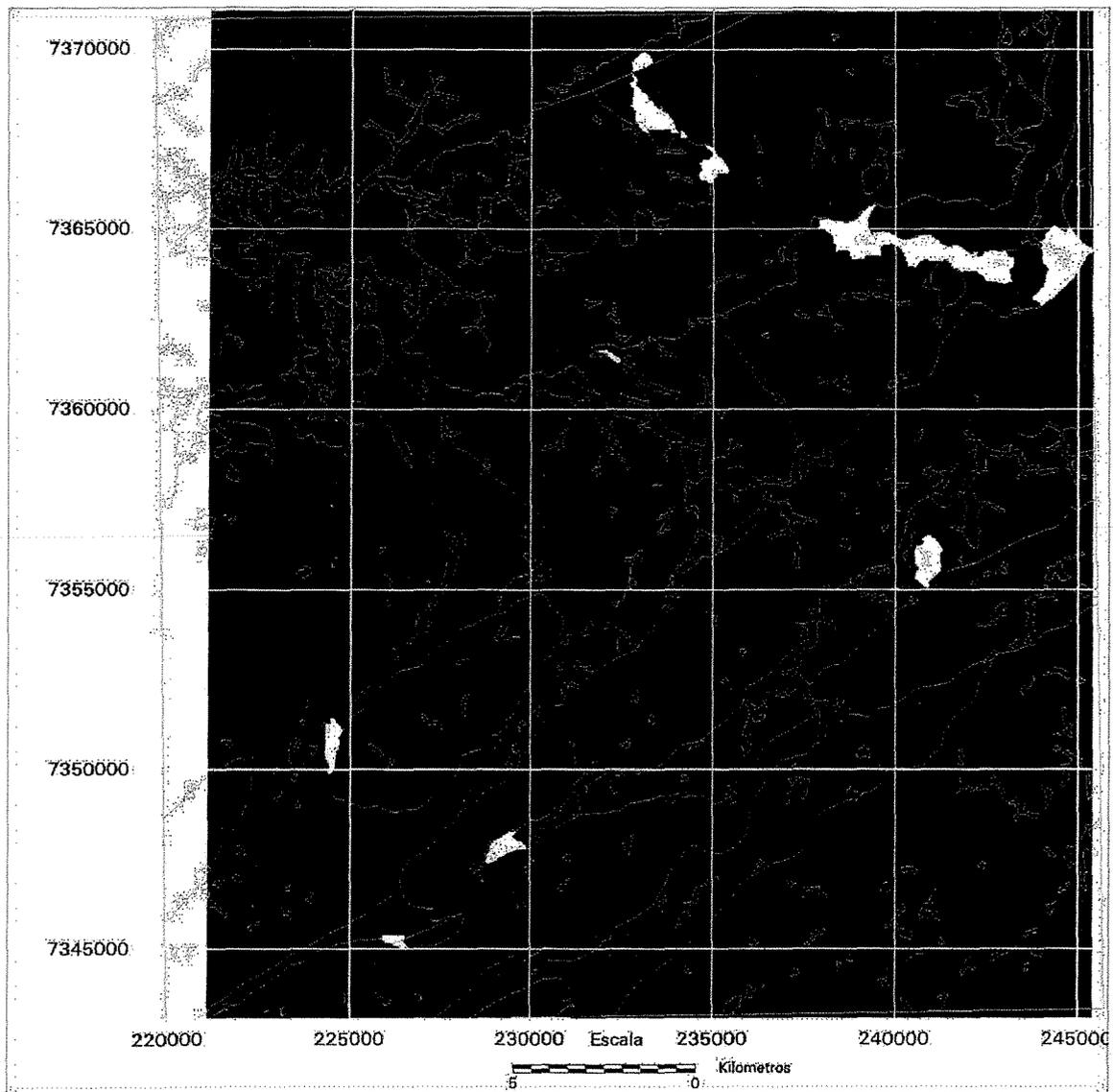


Figura 5.7: Áreas de interesse para Pb, cruzamento de geoquímica e radiometria (U e K), com a geologia sobreposta.

Se fosse aplicada uma metodologia semelhante para as bacias anômalas, haveria um aumento de áreas possíveis interessantes. No entanto isto não poderia ser considerado como uma vantagem, já que a precisão para se delimitar uma área realmente anômala é melhor delimitada quando se está usando o critério das áreas de contribuição de drenagem a montante dos pontos anômalos.

5. 3. Análise metalogenética usando lógica *fuzzy*

5. 3. 1. Introdução

Serão abordados diferentes tipos de dados: geológicos, geofísicos e geoquímicos. Todos eles terão abordagens próprias com o problema de se escolher a função de pertinência. Esta pode ser feita tanto pelo conhecimento prévio como usando métodos numéricos. No primeiro caso esta definição é baseada no conhecimento do geólogo (*knowledge-driven*). No segundo caso tem-se o *data-driven*, onde apenas dois parâmetros são necessários, o valor do limite inferior (pertinência 0) e do limite superior (pertinência 1).

Segundo Burrough (1996) o método mais simples usa a imposição de uma função de pertinência *a priori* com que objetos individuais ou valores de atributos podem ser associados a um grau de pertinência. Como será visto adiante vai ser o método adotado neste trabalho. É chamado de importação semântica.

O outro método apresentado por Burrough (*op cit*) é análogo a análise de agrupamento e taxinomia numérica em que o valor do grau da função de pertinência é calculado do dado de atributo. Um versão comumente usada deste modelo é o *fuzzy k-means*. Para tanto o grau de pertinência μ do objeto i para o agrupamento c no ordinário *fuzzy k-means*, com a distância d usada para similaridade e o expoente *fuzzy* q que determina a imprecisão:

$$\mu_{ic} = \left[(d_{ic})^2 \right]^{-1/(q-1)} / \sum_{c'=1}^k \left[(d_{ic'})^2 \right]^{-1/(q-1)}$$

Deste modo, o grau de pertinência de um membro em relação a média da classe num espaço multivariado é calculado e avaliado para a próxima classe.

A indistinção (*fuzziness*) é o tipo de imprecisão que caracteriza classes, que por várias razões, não podem ter ou não tem limites muito bem definidos. Este conceito é aplicado por Burrough (*op cit*) aos conjuntos *fuzzy*. Seu uso é apropriado se estiver se tratando com ambigüidades, conceitos vagos ou modelos conceituais de fenômenos empíricos. Este mesmo autor lembra que esta indistinção não é um atributo probabilístico em que o grau de pertinência de um conjunto é ligado a uma função estatisticamente definida de probabilidade. Porém, é a admissão da possibilidade de um objeto ser de um conjunto. A avaliação da possibilidade pode ser baseada em um conhecimento subjetivo, intuitivo, como também isto pode ser relacionado claramente a incertezas definidas baseadas na teoria probabilística.

Ainda Burrough (*op cit*) afirma que o problema de se tratar informações espaciais é que se tratam de fenômenos que são determinados por mais de um atributo. Enquanto há uma definição inicial de um objeto, tanto a definição dos limites geográficos quanto da definição dos atributos não podem ser localizados precisamente. Desta forma, o problema de se tratar objetos espaciais inexatos não é somente um problema geográfico como também semântico.

Como apresentado no capítulo 3, a teoria dos conjuntos difusos tem alguns significados associados. O grau de pertinência de um conjunto *fuzzy* tal como anômalo pode ser entendido em três diferentes maneiras dependendo do contexto. Primeiro, anômalo pode descrever uma classe *fuzzy* de anomalias mais ou menos próximas a valores preestabelecidos. Segundo, pode representar um estado incompleto de informação, tal como, apenas sabemos que “a região é anômala” sem saber seus valores amostrados nem para qual elemento. Por último, pode expressar um *constraint* flexível, tal como, estarmos procurando uma região anômala.

Pode-se notar dois aspectos importantes dos conjuntos *fuzzy*:

- Conjuntos *fuzzy* são sempre dependentes do contexto. Por isto, não pode existir qualquer regra universal numa função de pertinência de um conjunto *fuzzy* como anômalo. Mesmo quando nos tem indicado se está falando de anomalia geoquímica de sedimentos de corrente, anomalia geoquímica de solos ou anomalia geofísica. Se restringir o significado de conceito de anomalia para sedimentos de corrente, será diferente quando considerando as anomalias relacionadas a determinados domínios geológicos. Além do mais, a idéia de anômalo também dependerá do conhecimento da área pelo usuário e do uso desejado.
- Quando se junta conjuntos *fuzzy* uma comensurabilidade implícita nos graus de pertinência pode ser feita. O uso de uma única escala de pertinência sobre a hipótese de que o grau de pertinência para um conjunto *fuzzy* é transformado em uma quantificação universal que pode ser medida.

Estes aspectos foram considerados neste modelamento. Muitos dos procedimentos feitos nesta fase do trabalho seriam impossíveis sem a utilização de ferramentas do SIG utilizado (ArcInfo).

5. 3. 2. Lógica Fuzzy em SIG

Em se tratando de informações espaciais, especialmente geológicas, há várias aplicações desta lógica, dada as diversas incertezas associadas. Estas podem ser desde espaciais, como até as incertezas de definições geológicas.

Kim (1996) apresenta um método de classificação de imagens de sensoriamento remoto usando conjuntos difusos. Um outro exemplo deste tipo de aplicação pode ser vista em Roux & Desachy (1997).

Wang *et al* (1990) apresentam um modelamento de dados em um SIG convencional para análises espaciais *fuzzy*. Para avaliação de solos para agricultura tem-se um exemplo em Davidson *et al* (1994). Burrough (1989) traz um bom exemplo deste tipo de aplicação. Eastman *et al* (1995) apresentam uma análise espacial com diversos critérios utilizando tanto ferramentas da lógica *fuzzy* como dos métodos *bayesianos* dentro de um SIG. Wang (1994) apresenta um modelamento de dados também utilizando um SIG convencional. Altman (1994) apresenta a lógica *fuzzy* para manipulação das incertezas de imprecisão. Banai (1993) apresenta o uso da lógica *fuzzy* com o uso de uma estrutura hierárquica num SIG tradicional. Katinsky (1994) apresentou um modelamento de feições naturais usando SIG aplicando a lógica *fuzzy*. Oliveira (1996) apresenta a utilização de modelos para classificação *booleana* e *fuzzy* num estudo de pedológico.

Há uma tendência em se criar aplicações com a junção da lógica *fuzzy* e mais outra teoria. É o caso de Grim (1993) que apresenta uma aplicação da teoria do Caos juntamente com a lógica *fuzzy*. Wang & Ou (1993), apresentam um modelo para predição de terremotos também com o uso da Teoria do Caos com a lógica *Fuzzy*. Katz (1991) apresenta uma boa aplicação neste sentido com enfoque para prospecção mineral que é a simulação de um SIG associado com um sistema inteligente (PROSPECTOR) usando teoria *fuzzy* e métodos *bayesianos* de probabilidade. McNoleg (1996) apresenta a integração de SIG, Sensoriamento Remoto, Sistemas Inteligentes, Co-Krigagem, com técnicas de lógica difusa e redes neurais para um modelamento ambiental.

Reunindo diversas aplicações com SIG tem-se em Burrough & Frank (1996) uma coletânea de teorias e aplicações no que se refere ao uso de um SIG com objetos de limites indeterminados. Na maior parte das situações, são utilizadas ferramentas da lógica *fuzzy*.

5. 3. 3. Objetos geográficos difusos

Pode-se criar objetos geográficos difusos se houver alguma informação que determine o quão abrupto ou difuso for os limites destes objetos dentro de um modelo de dados de um SIG. Segundo Burrough (1996), se o limite indica o grau de pertinência de polígono então será mais apropriado usar o modelo SI, discutido adiante, para computar os valores dos graus de pertinência dos lugares em relação a sua distância perpendicular ao limite adotado.

Na prática, como o próprio Burrough (*op cit*) lembrou, não há nenhuma razão *a priori* para todo o limite de um simples polígono ter o mesmo grau pertinência ao longo de toda a sua extensão. Os limites das unidades geológicas podem ser abruptas em alguns trechos e difusas em outros. Esta informação que é usualmente notada pelo geólogo no campo ou na interpretação aérea é dificilmente usada ou mesmo descrita. Dado a poucas informações disponíveis para este fim, foi feita uma tentativa teórica de incertezas dos limites dos corpos geológicos neste trabalho, como será visto adiante.

Couclelis (1996) definiu três perspectivas para as feições de limites não definidos, que serão apresentados a seguir, a natureza empírica da feição, o modo de observação e o propósito do usuário.

Natureza empírica da feição

Esta perspectiva leva em conta que os limites e as entidade que elas limitam são um conceito mútuo, onde cada um toma parte na definição do outro. Isto é, em termos de linhas e polígonos, interiores e exteriores, zonas difusas e superfícies de probabilidade. Os tipos de limites dependem de uma série de atributos (tipo de material interno, temporal etc).

Se no âmbito da física, ainda se terá muita discussão sobre os elementos indivisíveis da partícula, no âmbito geográfico isto ainda depende de alguns fatores (escala de trabalho, tipo da entidade). Por exemplo, a definição de um Grupo geológico podendo ser subdivido em diversas formações não perde assim sua identidade. A noção de limite, *a priori*, reside melhor com a visão atômica dos objetos que com a visão plena, ao passo que o mundo geográfico real nos força a considerar tanto as entidades discretas como as maiores.

Há uma diferença muito grande em se tratar áreas com atributos homogêneos ou heterogêneos. Limites são distinções binárias, ao passo que entidades heterogêneas variam pelo grau de pertinência a um atributo de lugar a lugar dentro da mesma entidade. A transição de um objeto espacial pode ser suave e contínua, tanto que qualquer limite entre os mesmos é empiricamente real. Em algumas situações obviamente, a transição será brusca, *booleana*.

Dependendo da modelagem dos dados, algumas entidades espaciais podem consistir de materiais fluídos o que torna a definição do seu limite muito mais difícil.

Se a modelagem passar por entidades em 3D a definição dos limites destas entidades será também mais difícil dado a imprecisão nas medições desta natureza. Por exemplo, é mais fácil mapear uma formação aflorante na superfície do que mapear a mesma formação através de furos de sondagens. Isto, obviamente também depende da amostragem realizada.

Sob todo este aspecto também a variável tempo também deve ser considerada, se a entidade é atual ou não, se é permanente ou variável. Neste sentido, se a entidade é fixa ou móvel.

Modo de observação

Dependendo das características empíricas das entidades geográficas, estas podem aparecer bem definidas dadas as condições de observação e medidas.

O primeiro fator a se considerar sob este aspecto é a escala, de trabalho. Com o aumento da generalização e da abstração pela diminuição da escala faz com que entidades comecem a ser representadas por pontos, ou faixas sejam representadas por linhas e contatos indefinidos sejam transformados em contatos definidos. Dada a relação direta entre a escala e a resolução, este último também deve ser considerado. Em geral, quanto maior a resolução mais difícil será a definição de limites espaciais. Isto porque as irregularidades, discontinuidades e heterogeneidades serão mais difíceis de serem ignoradas.

A forma de visualização de um dado espacial também é um fator de se facilitar ou não a definição de limites espaciais. Há diversos métodos de se realçar a visão de um objeto espacial. Por exemplo, a visão em perspectiva de um Modelo de Elevação Digital com um mapa geológico sobreposto pode realçar a definição de alguma formação mas esconder outras.

Sob este mesmo aspecto, a representação do erro, que não está necessariamente associada aos limites, também pode ser considerada. Relacionado a isto, tem-se a incerteza, que nada mais é a admissão de um erro possível expresso quantitativamente.

Para finalizar este aspecto, não menos importante, é a definição teórica da entidade espacial. Por exemplo, os critérios para se definir um litotipo para uma equipe de geólogos pode ser distinta para uma outra equipe em mapeamentos geológicos distintos.

Propósito do usuário

Obviamente, por mais que a informação espacial seja inexata ou não completa, a modelagem dos dados definida pelo usuário é que definirá a consideração das incertezas ou não nos limites dos objetos. Isto dependerá da necessidade deste tipo de informação nas análises a serem efetuadas.

5.3.4. Geologia

Para o mapa geológico adotado, será elaborado um mapa geológico *fuzzy*, onde os contatos serão traçados levando-se em conta a imprecisão dos dados. Ou seja, o contato entre dois corpos geológicos não será mais rígido, mas sim uma zona difusa em que uma litologia irá gradando para outra. Vale lembrar, que este contato conhecido será o ponto de inflexão ($\mu_x=0,5$) no caso do modelo do conjunto *fuzzy* ser o da curva S. Cada contato terá uma regra específica, além de uma regra geral que será ditada pelo *RMS* (erro quadrático médio). Outra forma de se elaborar este mapa seria o cruzamento de dois mapas de fontes diferentes para se gerar zonas de contato difusos com diferentes formas. No caso do presente trabalho, a partir de uma imprecisão mínima mais as incertezas dos contatos, será elaborado este novo mapa geológico. Isto então será feito baseado nas distâncias até os contatos.

Feito isto, para a extração das litologias de interesse será definida uma regra *fuzzy* levando-se em conta o modelo geológico adotado. Retirado as litologias de interesse serão definidas as bacias sobrepostas a estas litologias de interesse com o respectivo grau de pertinência. Deverá ser estabelecido um critério *fuzzy* para a determinação do tamanho das bacias. Exemplos hipotéticos destes contatos difusos podem ser vistos na Fig. 5.8.

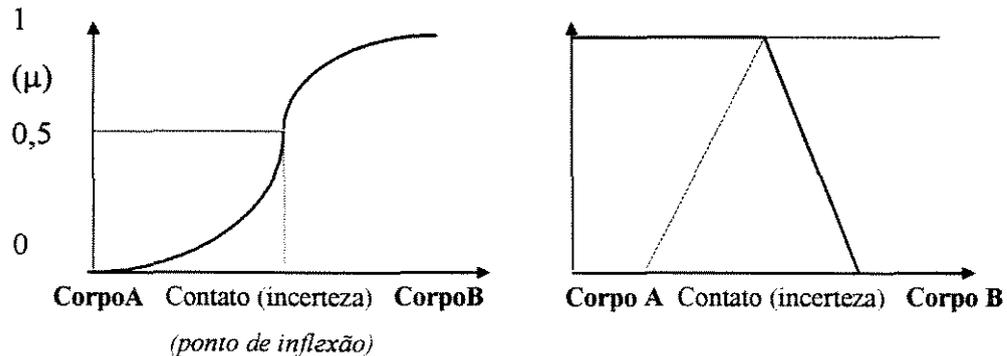


Figura 5.8: Representações possíveis por conjuntos *fuzzy* de contatos litológicos.

Burrough (1996) apresenta um exemplo de geração limites difusos em um polígono originalmente com limites rígidos. Juntamente com o trabalho de Lagacherie *et al* (1996) serão a base para a metodologia aqui apresentada para a determinação de contatos litológicos difusos.

Lagacherie *et al* (*op cit*) apresentam uma metodologia para mapear incertezas e imprecisões para os contatos de um mapa de solos. A Fig. 5.9 apresenta quatro estudos de casos apresentados por estes autores no mapeamento de solos mostrando a diferença entre *fuzziness* e incerteza no mapeamento de solos. Levando-se em conta o alto grau de

intemperismo da área em estudo deste trabalho, o uso desta abordagem é muito similar. Na sub-Fig. 5.9a tem-se alta *fuzziness* e baixa incerteza, pois a variação gradual da espessura do solo é delineado por mudanças marcadas na vegetação e no uso do solo. Na sub-Fig. 5.9b tem-se alta *fuzziness* e alta incerteza com uma variação gradual de arenito de uma camada de solo intermediária com feições de superfície não observadas. Na sub-Fig. 5.9c, tem-se baixa *fuzziness* e baixa incerteza com uma abrupta variação de todo o perfil do solo (contato geológico), detectado por uma quebra de declividade e uma variação nas areias de superfícies. E por último na Fig. 5.9d tem-se baixa *fuzziness* e alta incerteza, com não-detectável mas variação abrupta na estrutura do solo em camadas mais profundas. Estas observações em solo puderam ser quantificadas em áreas de incertezas entre os contatos dos solos. Analogamente será feito o mesmo procedimento para a área em estudo baseado na descrição dos contatos geológicos.

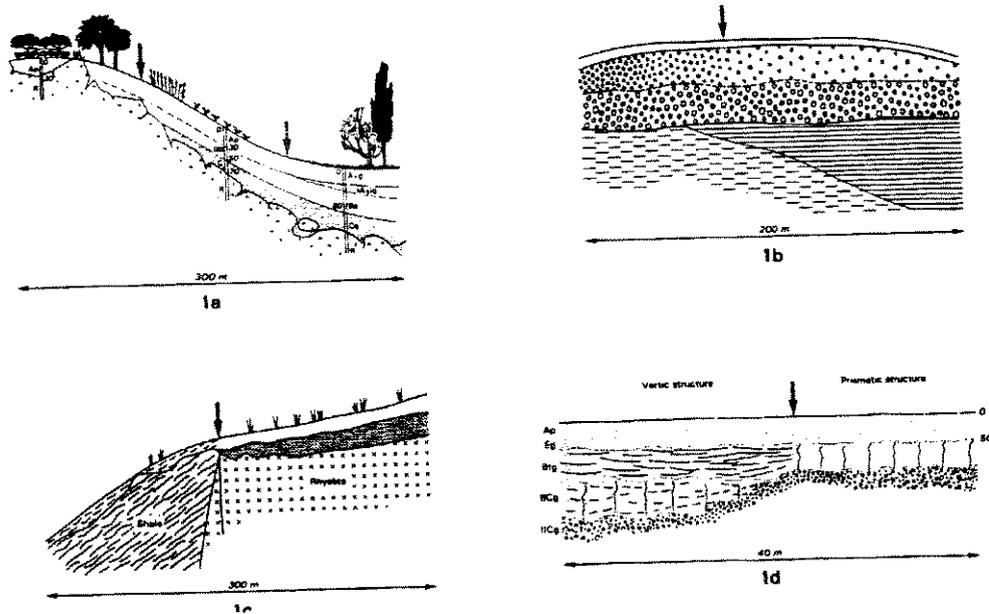


Figura 5.9: Demonstração da diferença de *fuzziness* e incerteza em mapeamento de solos, adaptado de Lagacherie *et al* (1996).

Uma abordagem muito semelhante será usada neste trabalho, levando-se em conta a diferença que aqui tem-se contatos litológicos numa região tropical apresentando grande espessura de alteração aumentando o grau de incerteza no mapeamento litológico. Além do mais, grande parte ao norte da área está composta por áreas de uso agrícola e ao sul por uma espessa vegetação com relevo acidentado o que dificulta em muito a definição de contatos geológicos.

Como base para a definição da incerteza dos contatos, tem-se para cada litologia descrita em IPT(1983) as relações de contato. Para exemplificar, tem-se a seguir as

descrições de alguns destes contatos, as mesmas descrições foram aproveitadas para a definição de áreas incertas para cada contato, o que está descrito na Tab. 5.1.

APiGG:

- sul e oeste: sem contatos observados;
- leste: contato brusco com os granitos e
- norte: contato discordante.

PMPSaU:

- blocos / matacões alinhados na crista topográfica
 - associam-se a paragnaisse e xisto

PMPSaGN:

- contatos concordantes com a estrutura

PMPSaXM:

- sentido SW-NW: predominância gradativa de biotita sobre moscovita
- com os xistos não feldspatizados: transicionais (no mapa geológico foi anotado o início da ocorrência de feldspatização dos xistos);
- com as rochas granitóides: bruscos.

PMPSaBX:

- contatos indefinidos.

PMPSaX:

- com os xistos o contato é transicional;
- com os xistos feldspatizados a W, também é transicional;
- com o corpo granítico o contato é abrupto;
- em relação ao Itararé: discordância angular.

PMPSaQ:

- contatos bruscos com filitos e xistos, mas concordantes com a orientação geral destas rochas.

PMPSaF:

- contatos transicionais com os xistos a leste, e na faixa contígua, com recorrência de xistos em meio aos filitos;
- com os granitóides: contato discordante;
- com os Grupo Tubarão: discordância angular.

PMPSaA:

- ocorrência bem marcada, porém intercalada entre o contato com os xistos;

PMPSaB:

- concordante com o acamamento reliquiar dos filitos em contatos bruscos;
- Hipótese: eventuais contatos discordantes paralelizados pela primeira fase dos dobramentos.

PMPSaT:

- contatos imprecisos, delimitando cristas que são sustentados em função das próprias litologias que as constituem.

PMPSsF:

- contatos bruscos com os granitos, gnaisses e xistos, através do Falhamento de Taxaquara.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	----	200	----	160	80	80	80	80	80	80	80	80	----	80	80	80	80	80	80	80	----	----	80
2		----	----	200	----	----	100	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	100	----	----	----	----	----
3			----	----	----	----	----	80	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
4				----	----	----	80	----	----	----	----	160	----	----	----	200	----	200	----	200	----	----	----
5					----	----	120	120	----	----	120	----	----	----	----	----	----	----	----	----	160	----	120
6						----	----	120	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	80	----	----
7							----	----	----	----	120	80	----	----	----	----	----	80	----	120	----	----	80
8								----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	80	----	----	----
9									----	----	----	----	----	----	----	80	----	80	----	120	----	----	----
10										----	----	----	----	----	----	80	----	80	----	----	----	----	----
11											----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	160	----	----
12												----	----	----	----	----	----	----	----	120	----	----	120
13													----	----	----	160	----	160	----	----	----	----	----
14														----	----	120	----	----	----	----	----	----	----
15															----	----	----	80	----	80	----	----	----
16																----	----	160	160	----	----	----	----
17																	----	----	----	----	----	----	----
18																		----	----	160	100	----	----
19																			----	----	----	----	----
20																				----	100	80	120
21																					----	80	----
22																						----	----
23																							----

TABELA 5.1: RELAÇÕES DE CONTATO DIFUSO QUANTIFICADAS PARA OS CONTATOS DESCRITOS NA ÁREA.

Legenda da Tab. 5.1:

- 1 - Aluviões atuais - Qa
- 2 - Coberturas Aluviais Terraço - Qt
- 3 - Diques de diabásio - JK β
- 4 - Formação Itararé - CPI
- 5 - Rochas Cataclásticas - ϵ OM
- 6 - Corpo Granítico do Turvo - ϵ Oyt
- 7 - Corpo Granítico de Pilar do Sul - ϵ Oyp
- 8 - Corpo Granitóide de Tapiraí - PSyt
- 9 - Corpo Granitóide da Serra da Batéia - PSyb
- 10 - Corpo Granitóide do Córrego do Gázeo - PSyg
- 11 - Corpo Granitóide de Sarapuí - PSys
- 12 - Filitos sericíticos - PMPSsF
- 13 - Turmalinitos, quartzo turmalinitos; ortoquartzitos sacaróides e gonditos - PMPSaT
- 14 - Metabasitos - PMPSaB
- 15 - Anfibolitos - PMPSaA
- 16 - Filitos sericíticos e quartzo filitos - PMPSaF
- 17 - Quartzitos - PMPSaQ
- 18 - Quartzo-muscovita xistos e muscovita xistos - PMPSaX
- 19 - Quartzo-biotita xistos e biotita-quartzo xistos - PMPSaBX
- 20 - Mica xistos, quartzo-mica xistos e mica-quartzo xistos feldspatizados e localmente migmatizados - PMPSaXM
- 21 - Paragnaisses - PMPSaGN
- 22 - Metaultrabasito - PMPSaU
- 23 - Biotita-granodiorito-gnáissico – APIGG

Contato difuso mínimo: RMS + Incerteza (*Fuzziness*) (m) = 30 + 50 = 80 m

A incerteza considerada acima deve-se aos erros propagados durante a confecção do mapa.

Com as incertezas quantificadas entre os contatos foi possível gerar um mapa geológico com contatos incertos que melhor representaria a realidade dos contatos traçados com as incertezas encontradas durante o mapeamento geológico. O critério para a definição da incerteza mínima foi o *RMS* calculado durante a digitalização do mapa geológico mais a um valor correspondente aos próprios erros propagados na confecção do mapa: distorções de foto aérea, traçados de contatos em mapas de diferentes escalas e incertezas de fechamento dos contatos por ocasião dos trabalhos de campo. Este valor foi calculado levando-se em conta a própria escala do mapa (1:50.000), sendo assumido como 50m. Deste modo, a incerteza mínima admitida é de 80 m entre os contatos. Dependendo então da relação de contato descrita este valor foi acrescido proporcionalmente. Estas relações de contatos *fuzzy* são exemplificadas na Figs 5.10, 5.11 e 5.12 e o resultado final em detalhe na Fig. 5.13.

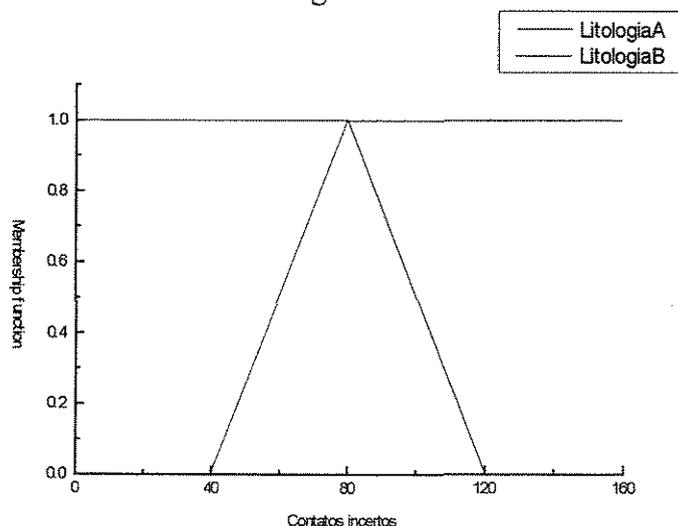


Figura 5.10: Incerteza entre duas litologias. Como esta foi calculada em 80 m em relação ao contato conhecido, nesta situação, a mais simples possível, a incerteza foi de 40 m adentro de cada litologia.

A intersecção das incertezas entre os dois contatos terá como resultado a regra que irá definir a “transição” de uma litologia para outra. No entanto, a informação que se tem no mapa geológico é a litologia propriamente dita, a incerteza até o contato mapeado e a incerteza da rocha adjacente. Desta forma a Fig. 5.11 apresenta de forma esquemática a definição da regra para os contatos litológicos *fuzzy*.

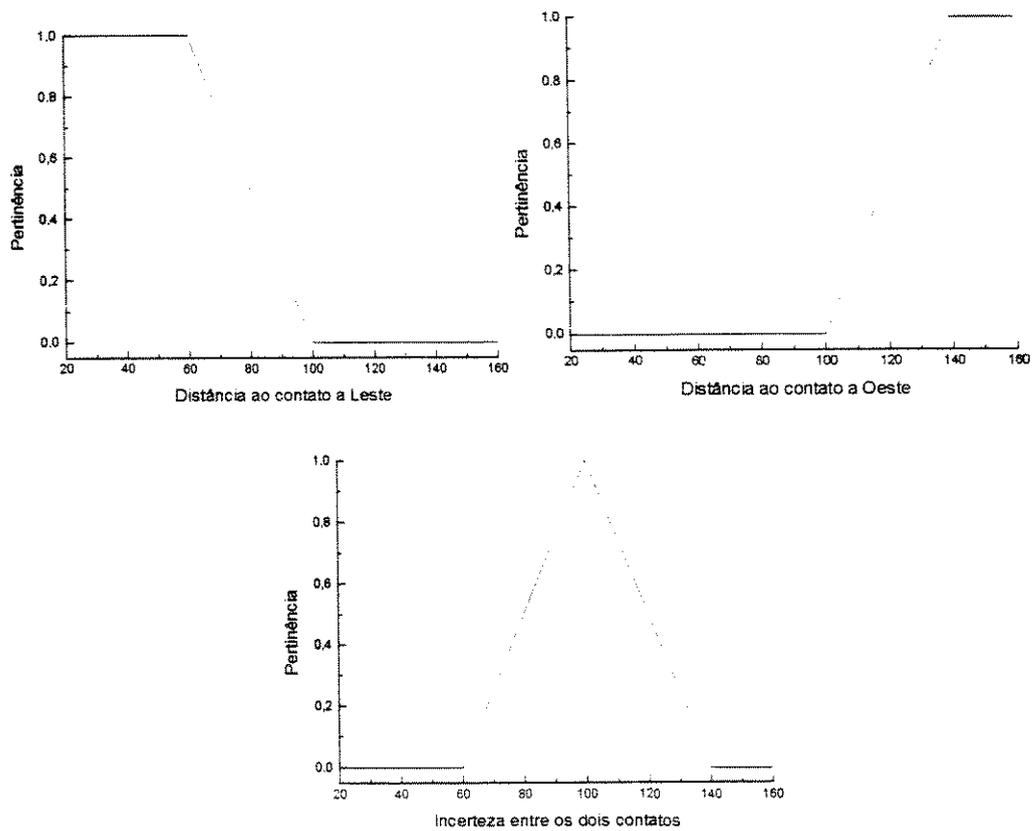


Figura 5.11: Intersecção de dois conjuntos *fuzzy*. O conjunto superior direito seria uma litologia com um contato incerto a E e o da esquerda uma litologia com contato incerto a W. Ambos com a incerteza mínima de 80 m de contato.

Como verificado na Fig. 5.11, a definição da regra que define o contato difuso é a intersecção das incertezas nos contatos ou é o complemento da união da descrição dos dois conjuntos *fuzzy* representando a certeza do contato, resultando num novo conjunto representando a incerteza dos mesmos. Ou seja, no contato mapeado tem-se a incerteza máxima decrescendo para cada lado, conforme critério estabelecido pela descrição dos mesmos.

$$\begin{aligned}
 \text{Contatos} &= \neg_{(\text{lito log iaE} \cup \text{lito log iaW})} \\
 \mu_{A \cap B}(x) &= \min(\mu_A(x), \mu_B(x)), \quad x \in X \\
 \mu_{A \cap B}(x) &= \begin{cases} x < 80 \rightarrow 0 \\ \frac{x - 80}{10} \rightarrow 80 \leq x < 160 \\ \frac{240 - x}{10} \rightarrow 160 \leq x < 240 \\ x > 240 \rightarrow 0 \end{cases}
 \end{aligned}$$

Figura 5.12: Função de pertinência descrevendo a intersecção dos dois conjuntos *fuzzy* apresentados na Fig. 5.10.



Figura 5.13: Detalhe do mapa geológico difuso considerando as relações de contato descritas na Tab. 5.1.

Numa primeira vista, o resultado da Fig. 5.13 parece ser simplesmente um mapa geológico com *buffers* nos contatos, entretanto é importante destacar que entre cada litologia há uma gradação entre as pertinências de cada litologia.

Além das considerações a serem feitas com relação aos contatos, tem-se as que são feitas com relação à própria descrição das rochas e mesmo em relação ao modelo metalogenético adotado. Este último será muito importante por ocasião da integração dos dados, quando serão definidas regras difusas (incertezas no modelo geológico adotado) para se determinar áreas de maior interesse metalogenético. Numa

aproximação muito distante a área em estudo, segue alguns exemplos de regras criadas que poderiam ser aplicadas (quantificando as incertezas) neste sentido:

Se a rocha for sedimentar então tem aproveitamento nulo para os sulfetos.

Se o material for aluvionar o aproveitamento econômico é nulo para sulfetos.

Se a rocha ocorrer associada a formação Perau então seu interesse para os sulfetos é alto.

5. 3. 5. Geofísica

Para os dados de aeromagnetometria, serão utilizadas algumas abordagens estatísticas juntamente com critérios de sobreposição com a litologia para a determinação de áreas de interesse para fins prospectivos.

Tendo em vista, seu caráter interpretativo baseado no conhecimento geológico da área, será necessária o estabelecimento de diversas regras para a determinação das anomalias geofísicas. Este tema poderá, por conseguinte, apresentar mais de um resultado, dependendo do modelo geológico adotado. Desta forma, para simplificar a utilização desta lógica com o uso da geofísica, será adotado o seguinte critério:

- Anomalia radiométrica (Média + 3 Desvio Padrão), admitindo uma distribuição lognormal dos dados, coincidente com alguma litologia de interesse e que esteja possivelmente associada a um hidrotermalismo. Isto considerando também considerando áreas com alta correlação de K e U (aeroradiometria).

Deste modo, foram criados dois conjuntos *fuzzy* representando a anomalia para cada um destes dois canais, com os valores estatísticos já definidos apresentados na Tab. 5. 2. A seguir nas Fig.s 5.14 e 5.15 tem-se a definição dos conjuntos fuzzy para estes dois canais baseado na estatística apresentada. Ressalta-se que isto foi possível considerando uma distribuição lognormal para os dados o que pôde se separar amostras anômalas com o critério de média + (3 * desvio padrão).

Canal	Média aritmética	Desvio padrão
U	5,446	5,483
K	10,885	11,801

TABELA 5. 2: PARÂMETROS ESTATÍSTICOS USADOS PARA A DEFINIÇÃO DAS ANOMALIAS FUZZY PARA OS CANAIS U E K, VALORES EM CPS.

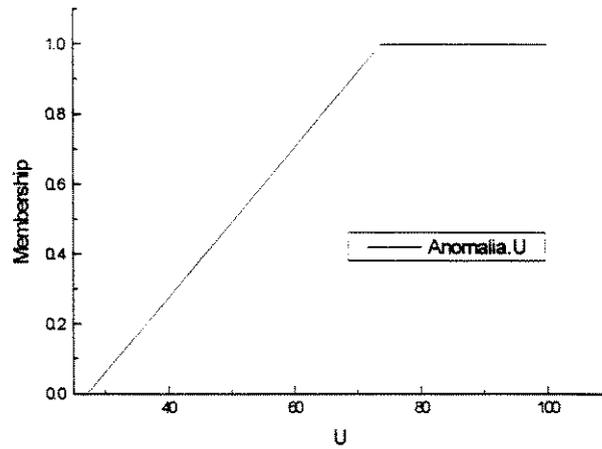


Figura 5.14: Definição do conjunto *fuzzy* para U, usando parâmetros estatísticos da Tab. 5.2.

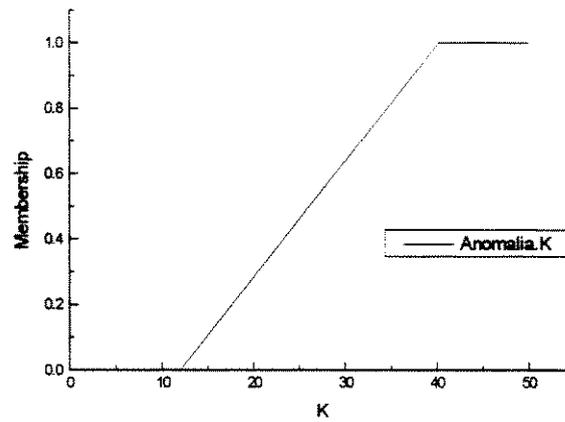


Figura 5.15: Definição do conjunto *fuzzy* para K, usando parâmetros estatísticos da Tab. 5.2.

Com a definição do critério de definição do conjunto *fuzzy*, neste caso, estatístico, pôde-se obter os resultados apresentados na Figs 5.16 e 5.17. A intersecção dos dois resultados será usada para o cruzamento com demais informações.

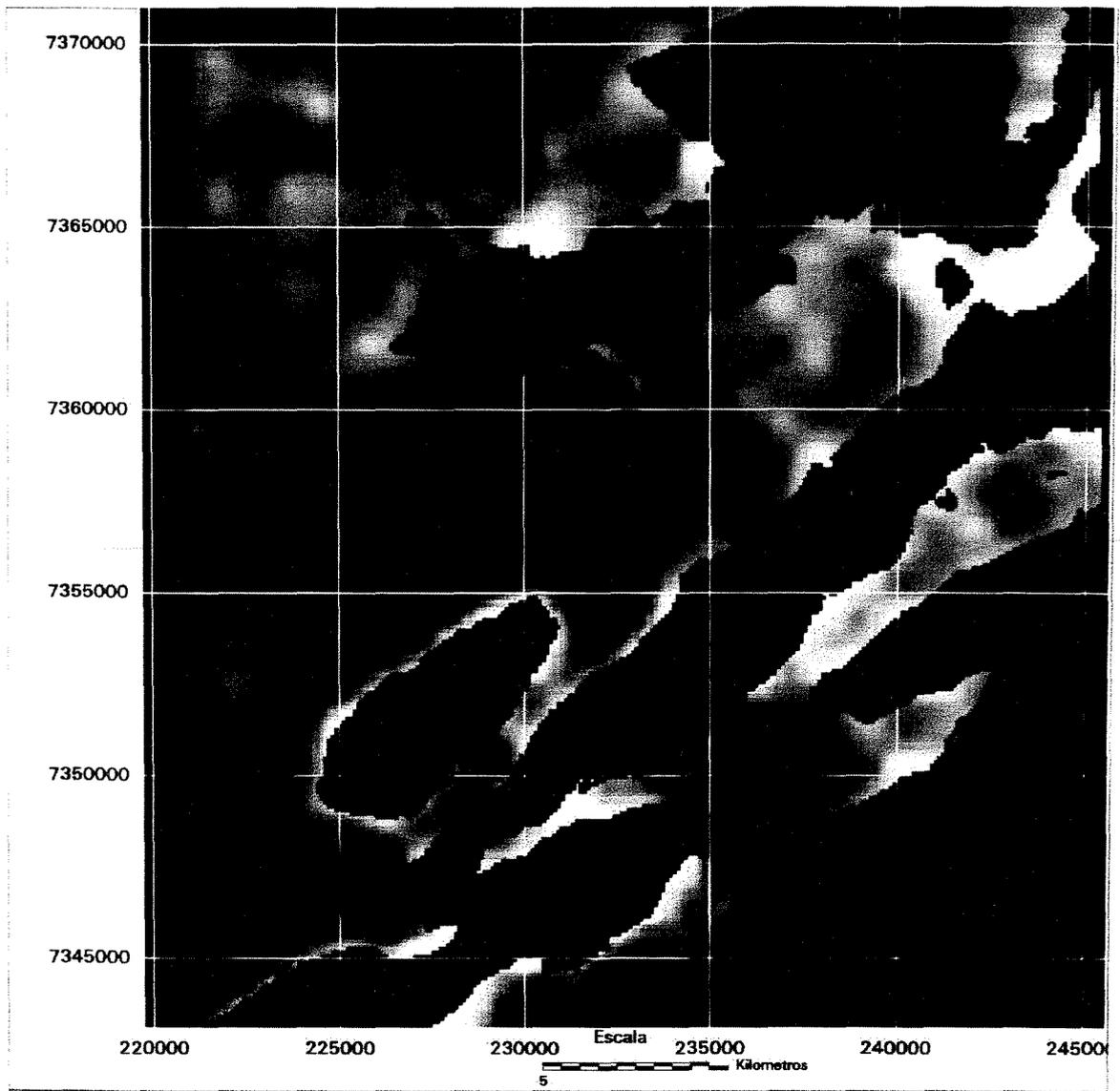


Figura 5.16: Anomalias *fuzzy* para U, resultado da aplicação da regra apresentada na Fig. 5.14.

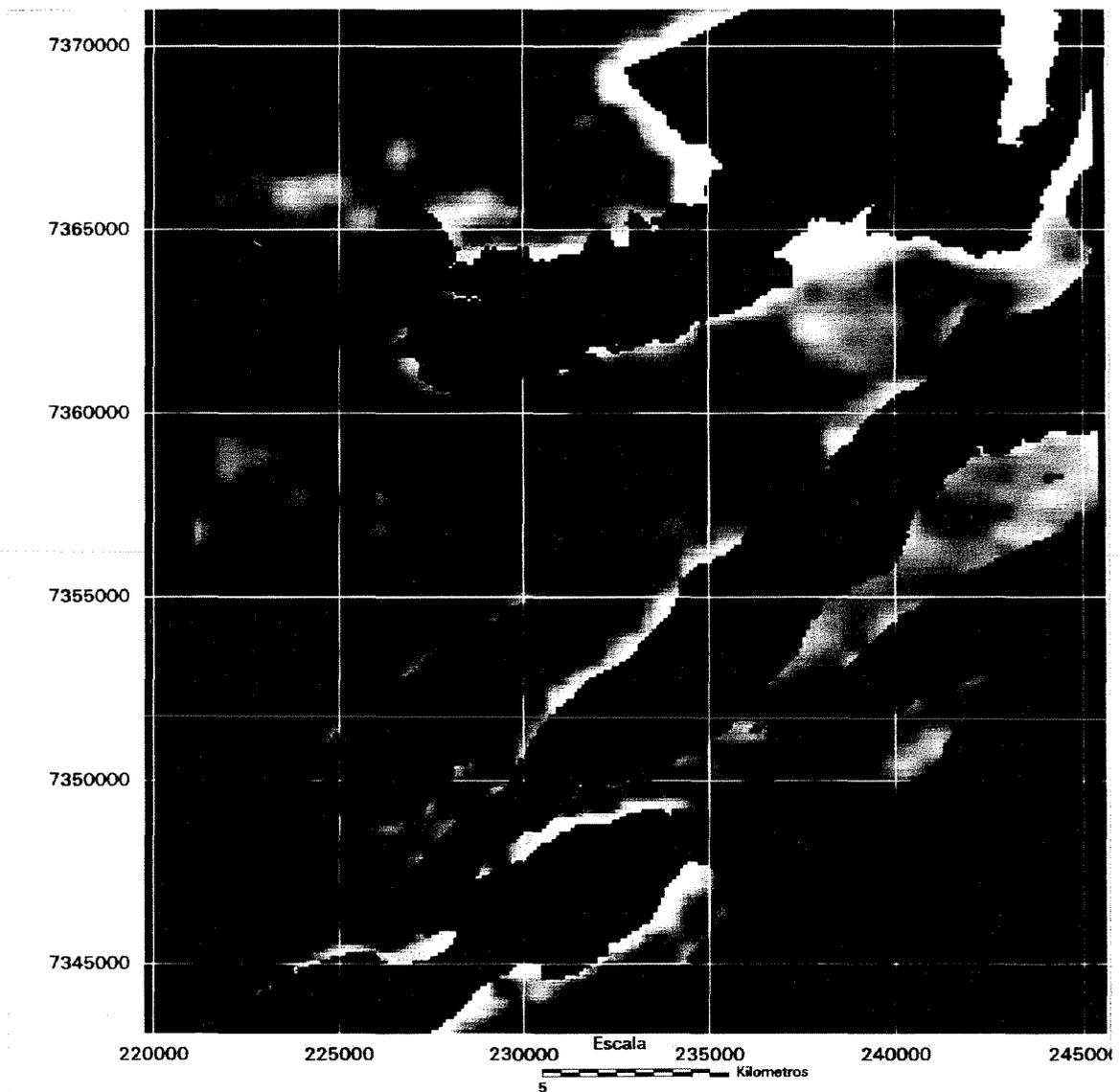


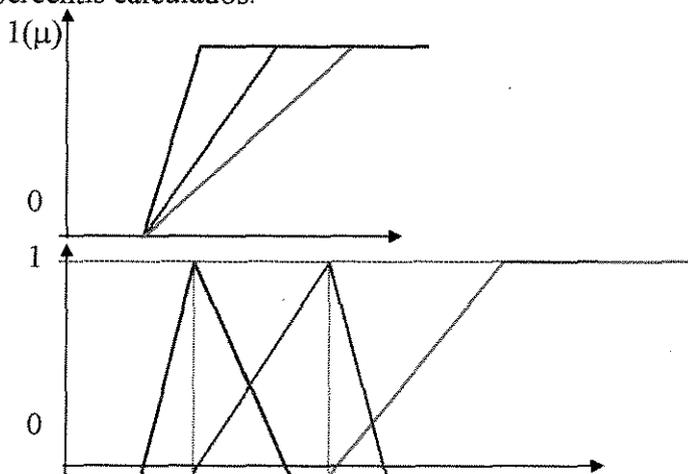
Figura 5.17: Anomalias *fuzzy* para o canal K, resultado da aplicação da regra apresentada na Fig. 5.15.

Com o conhecimento prévio da área, possibilitado pela lógica *booleana*, tem-se que numa situação como apresentada acima pode em não resultar em alguma área, dada a não correlação entre anomalia magnetométrica e radiométrica de interesse. Neste caso, será usada, como feita na lógica *booleana*, apenas os dados de aeroradiometria para o cruzamento com as demais variáveis.

5. 3. 6. Geoquímica

Uma primeira consideração a ser feita em relação aos dados geoquímicos da região em estudo é o próprio tipo de dado. A amostragem geoquímica por sedimentos de corrente, por sua natureza é um dado com muitas incertezas associadas e às vezes difícil de ser quantificado. Rose *et al* (1979) apresentam alguns problemas em se determinar anomalias em sedimentos de corrente. Tendo isto em vista, está sendo proposta aqui uma metodologia em que as amostras não serão consideradas para uma interpolação de uma superfície contínua. Isto geraria novas incertezas. Desta forma o que se propõe aqui as amostras tenham uma área de abrangência de validade que dependerá da distância em relação às amostras mais próximas, o tipo de relevo (terrenos planos, terrenos íngremes etc) e o próprio modelo de elevação digital. Depois de determinadas estas “áreas de abrangência” as mesmas serão cruzadas com os graus de pertinência do teor geoquímico dos elementos geoquímicos ao conjunto considerado anômalo. Ou seja, teremos dois conjuntos difusos, com valores entre 0 e 1. O primeiro diz respeito o quanto o *pixel* é representativo de alguma amostra de sedimento de corrente e o segundo diz o quanto o teor geoquímico está contido numa anomalia geoquímica *fuzzy*.

Apesar de neste trabalho focar apenas as anomalias geoquímicas de primeira ordem, as Figs 5.18 a/b, ilustram as relações que podem ser adotadas para o tratamento das anomalias geoquímicas. As duas formas de modelamento de anomalia podem ser utilizados. No entanto, neste trabalho, será usada a segunda abordagem que reflete a Tab. 3.3 os percentis calculados.



Background Moda da 3ª Moda da 2ª

Anomalia geoquímica de 1ª ordem: _____

Anomalia geoquímica de 2ª ordem: _____

Anomalia geoquímica de 3ª ordem: _____

Figura 5.18a / b: Hipotéticas anomalias geoquímicas *fuzzy*.

Na Fig. 5.18a considera-se como todo elemento pertencente a uma anomalia de 1ª ordem como também pertencente a de 2ª ordem. Na Fig. 5.18b tem que uma anomalia de 3ª, 2ª e 1ª são gradativamente modificadas não se considerando como um conjunto totalmente pertencente a outro.

Como descrito anteriormente serão utilizadas as anomalias definidas pelo método do percentil apresentadas anteriormente. Para então se definir a função de pertinência *fuzzy* para cada amostra e sua relação de quanto é anômala, foram feitas a partir da função apresentada na Fig. 5.19 e 5.20, respectivamente para Pb e Cu.

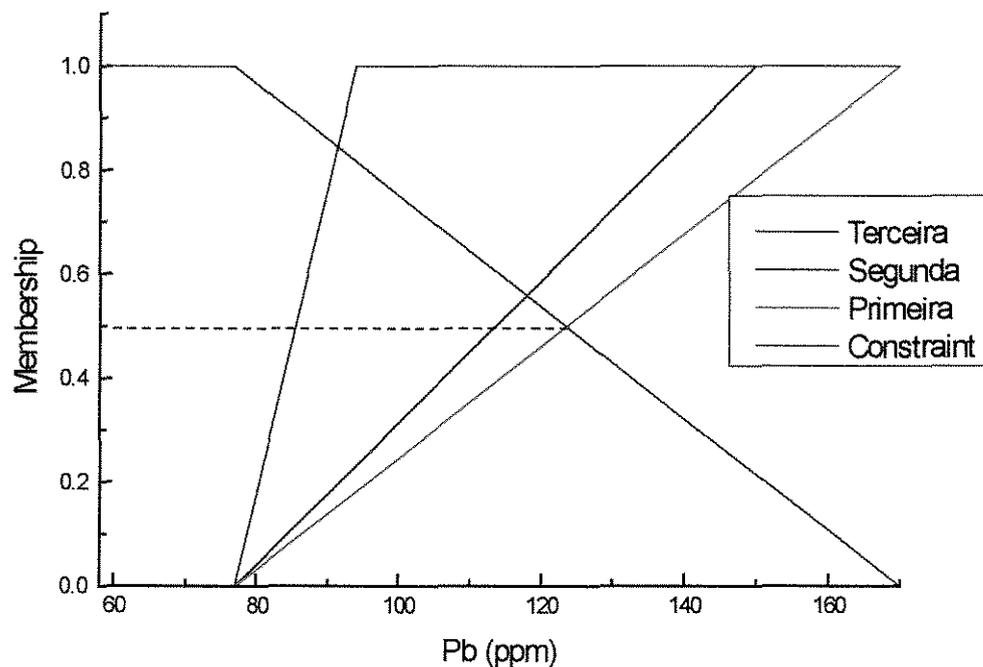


Figura 5.19: Conjunto *fuzzy* para a definição de anomalias geoquímicas de Pb baseado em parâmetros estatísticos de 1ª, 2ª e 3ª ordem.

O grau de pertinência associado a intersecção do *constraint* com a função que define anomalia de 1ª ordem foi de 0,485. Portanto, as amostras que tiverem valor de grau de pertinência de 1ª ordem acima deste valor, serão consideradas como de interesse geoquímico. Equivaleria dizer que estas amostras talvez sejam de interesse geoquímico e não somente aquelas com grau de pertinência 1.

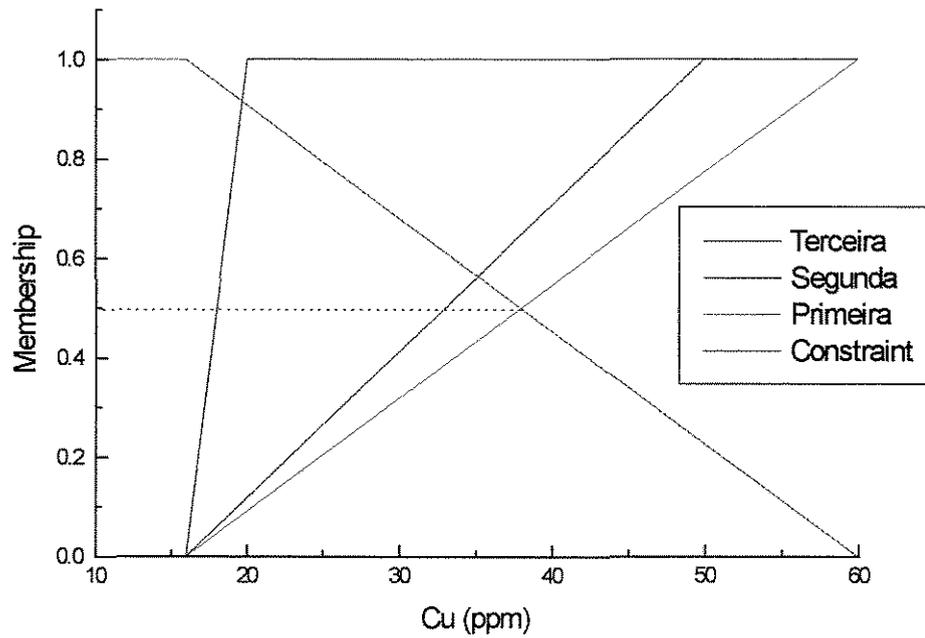


Figura 5.20: Conjunto *fuzzy* para a definição de anomalias geoquímicas de Cu baseado em parâmetros estatísticos de 1^a, 2^a e 3^a ordem.

O grau de pertinência associado a intersecção do *constraint* com a função que define anomalia de 1^a ordem foi de 0,498. Este valor é muito parecido com o do conjunto Pb, mas dependendo da função que define o dado (linear, sigmoidal) a definição deste valor irá modificar muito. Neste trabalho será usada a definição linear.

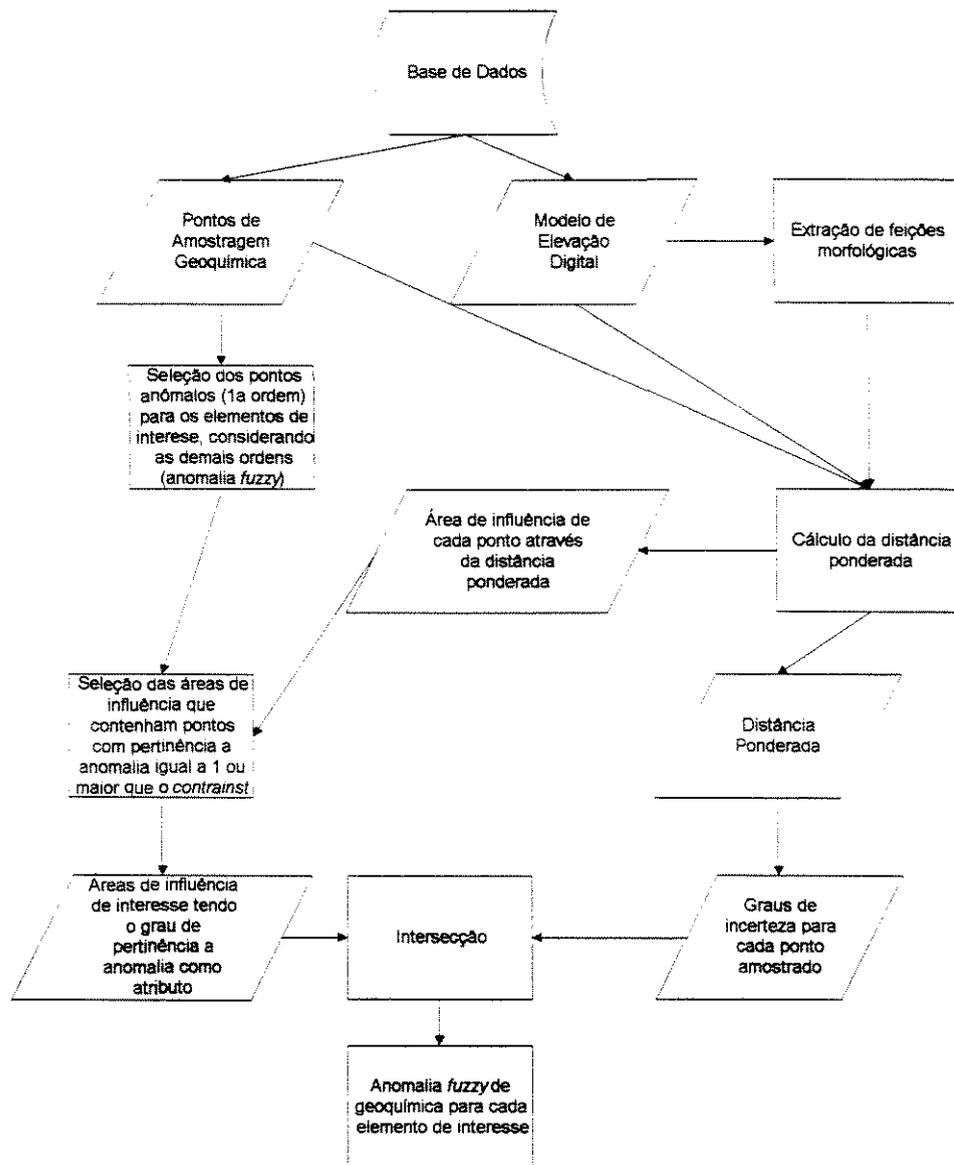


Figura 5.21: Fluxograma para geração de anomalias geoquímicas difusas.

Com o cruzamento dos dois conjuntos de dados descritos anteriormente, será gerado um mapa com as incertezas de anomalias geoquímicas. Estas incertezas serão analisadas por cada área de contribuição a montante destas regiões geoquímicas difusas. Uma descrição geral da geração deste conjunto de anomalias geoquímicas é descrita na Fig. 5. 21. Como feito na abordagem *booleana*, estas áreas serão cruzadas com as litologias mapeadas, mas nesta abordagem serão utilizados os contatos difusos para isto.

Uma forma simples de se explicar a definição de anomalias *fuzzy* por *data driven* é a seguinte consideração a respeito de escolha de pontos de interesse. Admitindo uma distribuição lognormal para os dados, poderia ser adotado as seguintes funções de pertinência, com a definição das anomalias de 1ª, 2ª e 3ª ordem, respectivamente $M +$

DP, M + 2DP e M + 3DP (M=média e DP = Desvio Padrão). Para o caso da função ser linear tem-se para cada um dos casos

Terceira ordem:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & , x \leq MG \\ [0-1] & , MG < x < (DP + MG) \rightarrow \frac{x - MG}{|DP - MG|} \\ 1 & , x \geq MG \end{cases}$$

Segunda ordem:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & , x \leq MG \\ [0-1], & MG < x < 2(DP + MG) \rightarrow \frac{x - MG}{2DP + MG} \\ 1 & , x \geq 2(MG + DP) \end{cases}$$

Primeira ordem:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & , x \leq MG \\ [0-1], & MG < x < 3(DP + MG) \rightarrow \frac{x - MG}{3DP + 2MG} \\ 1 & , x \geq 3(MG + DP) \end{cases}$$

Já para o caso do conjunto ser da curva S haverá um novo fator que é o ponto de inflexão onde $\mu(x)$ assume o valor de 0.5, tem-se listadas a seguir a partir da sugestão de Cox(1994):

Terceira ordem

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & , x \leq MG \\ 2((x - MG)/((MG + DP) - MG))^2 \rightarrow MG < x \leq \beta \\ 1 - 2((x - MG + DP)/((MG + DP) - MG))^2 \rightarrow \beta < x < MG + DP \\ 1 & , x \geq (MG + DP) \end{cases}$$

Segunda ordem:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & , x \leq MG \\ 2((x - MG)/(2(MG + DP) - MG))^2 \rightarrow MG < x < \beta \\ 1 - 2((x - 2(MG + DP))/(2(MG + DP) - MG))^2 \rightarrow \beta < x < 2(MG + DP) \\ 1 & , x \geq 2(MG + DP) \end{cases}$$

Primeira ordem:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & , x \leq MG \\ 2((x - MG)/(3(MG + DP) - MG))^2 \rightarrow MG < x < \beta \\ 1 - 2((x - 3(MG + DP))/(3(MG + DP) - MG))^2 \rightarrow \beta < x < 3(MG + DP) \\ 1 & , x \geq 3(MG + DP) \end{cases}$$

Onde , MG é a média geométrica e DP é o desvio padrão.

Uma primeira consideração a ser feita para a definição das anomalias é a própria escolha dos teores que serão definidos como anômalos. Ou seja, se foi definido que uma amostra com teor acima de 100 ppm é considerada anômala de 1ª ordem, com teor acima de 10 ppm ser de 3ª ordem, então o que dizer de uma amostra cujo teor é de 98ppm. Numa abordagem *booleana* esta amostra não seria escolhida (valor de pertinência igual a zero). Neste caso, haveria um grau de pertinência a um conjunto de anomalia difusa com grau de mais de 0,9. No entanto, a partir de qual grau de pertinência poderia ser considerado interessante ? Para responder esta pergunta há diversas formas na teoria *fuzzy*. Como já apresentado no capítulo 3, Bellman & Zadeh (1970) apresentam uma metodologia bastante simples para tomada de decisões em situações dúbias, o *constraint* (limite). Isto equivaleria dizer a uma situação mínima que corresponde exatamente ao que não é anômalo. Como visto na Figs. 5.19 e 5.20 a partir do cruzamento da função que define a anomalia de 1ª ordem com esta situação do que não é anômalo, tem-se a seleção do grau de pertinência (*membership grade*) que é de interesse.

Para se exemplificar o que está se propondo para a geração de um conjunto *fuzzy* de representatividade de cada amostra, observe o comportamento disto em relação a duas amostras. No primeiro exemplo da Fig. 5.22 tem-se duas amostras num terreno plano, ou seja, a área de abrangência de cada amostra é simplesmente limitada pela distância entre elas. Já no segundo exemplo, tem-se que as duas amostras estão separadas por um região elevada, o que faz diminuir a área representativa entre as duas amostras. Isto se verifica no perfil extraído do conjunto *fuzzy* gerado. O primeiro caso é extremamente simples para uma situação real na geoquímica, pois a representatividade de uma amostra em sedimentos de corrente também depende das condições de relevo, que só pode ser considerado no segundo caso.

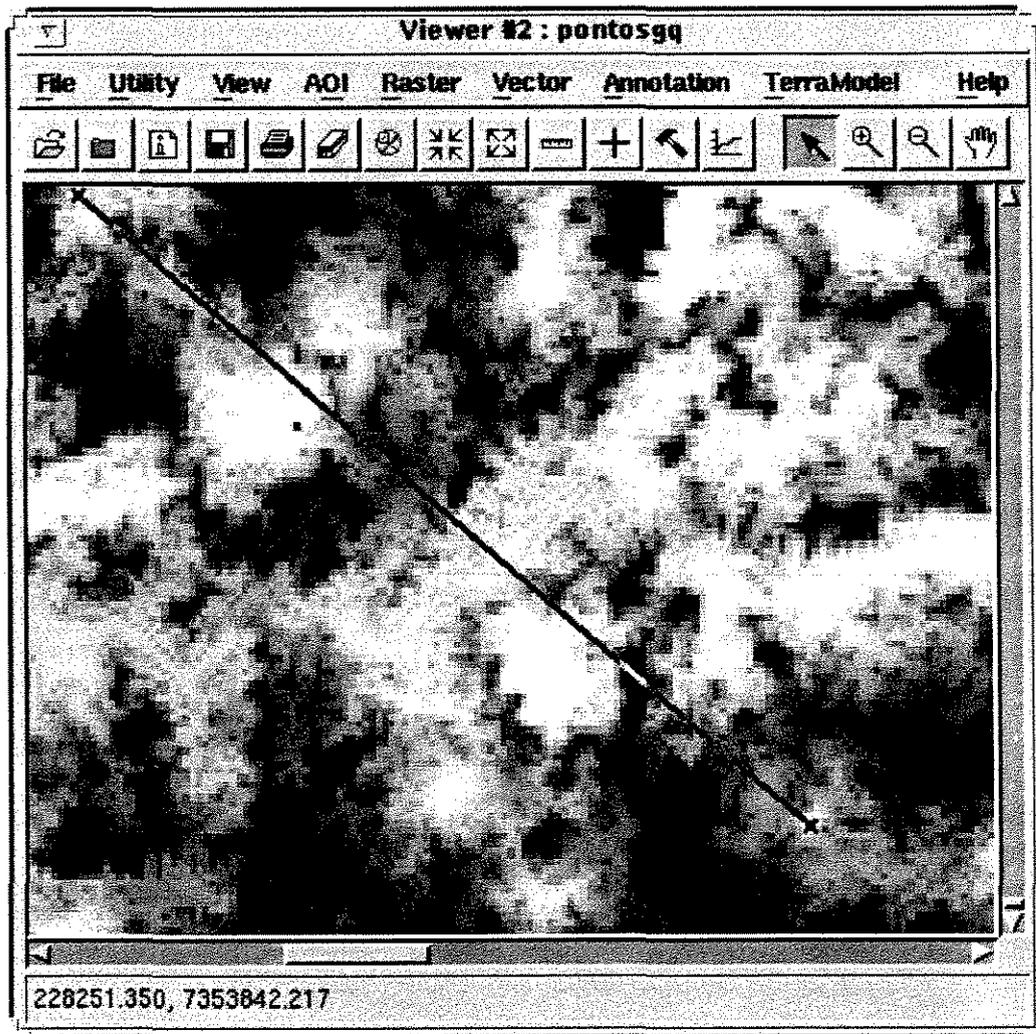


Figura 5.22: Conjunto *fuzzy* de representatividade espacial de amostras de sedimentos de corrente. O traço corresponde ao perfil traçado utilizados na Fig. 5.23.

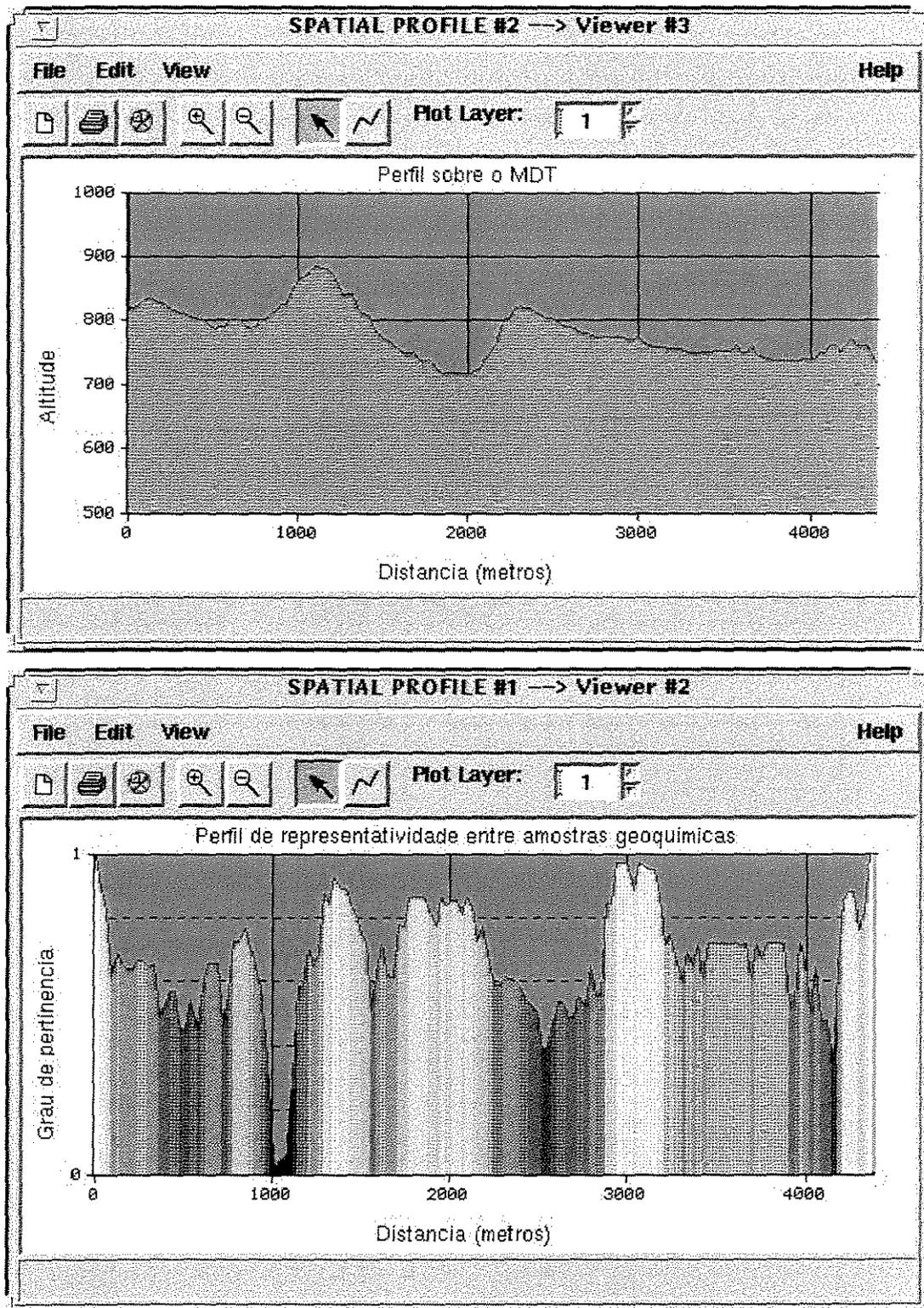


Figura 5.23: Exemplo da representatividade entre duas amostras de sedimentos de corrente. O primeiro perfil é sobre o modelo de elevação digital mostrando o relevo, o segundo apresenta a representatividade entre duas amostras.

Como apresentado na Fig. 5.23 tem-se que a representatividade mínima entre as duas amostras é onde a distância é máxima e onde o relevo “isola” uma área onde uma amostragem em sedimentos de corrente não consegue representar. As demais falhas de representatividade mostradas no segundo perfil são reflexos de outras amostras que estão mais distantes ou próximas mas em outras direções que não a do perfil traçado.

Para se efetuar o cálculo deste conjunto *fuzzy*, teve-se que primeiro gerar uma superfície contínua em que é medida a distância ponderada entre as amostras. O ponderador deste cálculo era justamente as feições de relevo traçadas, extraídas através da 2ª Derivada do MDT. O resultado desta operação foi traduzido em termos de custo (dificuldade em se movimentar para os *pixels* adjacentes) através da Tab. 5.2. Reparar que estão listados os valores máximos e mínimos e que entre eles a definição do custo foi uma função linear.

Resultado da Curvatura	Custo
-4 (concavidade negativa)	0
0 (Terrenos planos)	0.25
4 (concavidade positiva)	1

TABELA 5.3: RESULTADO DA 2ª DERIVADA SENDO TRADUZIDO PARA O CUSTO QUE SERÁ O PONDERADOR PARA A DISTÂNCIA PONDERADA.

Com a área de abrangência de cada amostra definida pela menor distância ponderada, tem-se diversas áreas que terão então como atributo o grau de pertinência à anomalia do elemento analisado. Este grau de pertinência foi calculado usando uma função linear tendo apresentada nas Figs. 5.19 e 5.20. O resultado da atribuição destes valores às áreas de abrangência podem ser vistos nas Figs. 5.24 e 5.25, respectivamente para Cu e Pb, onde as áreas mais claras são as mais próximas ao anomalia de 1ª ordem.

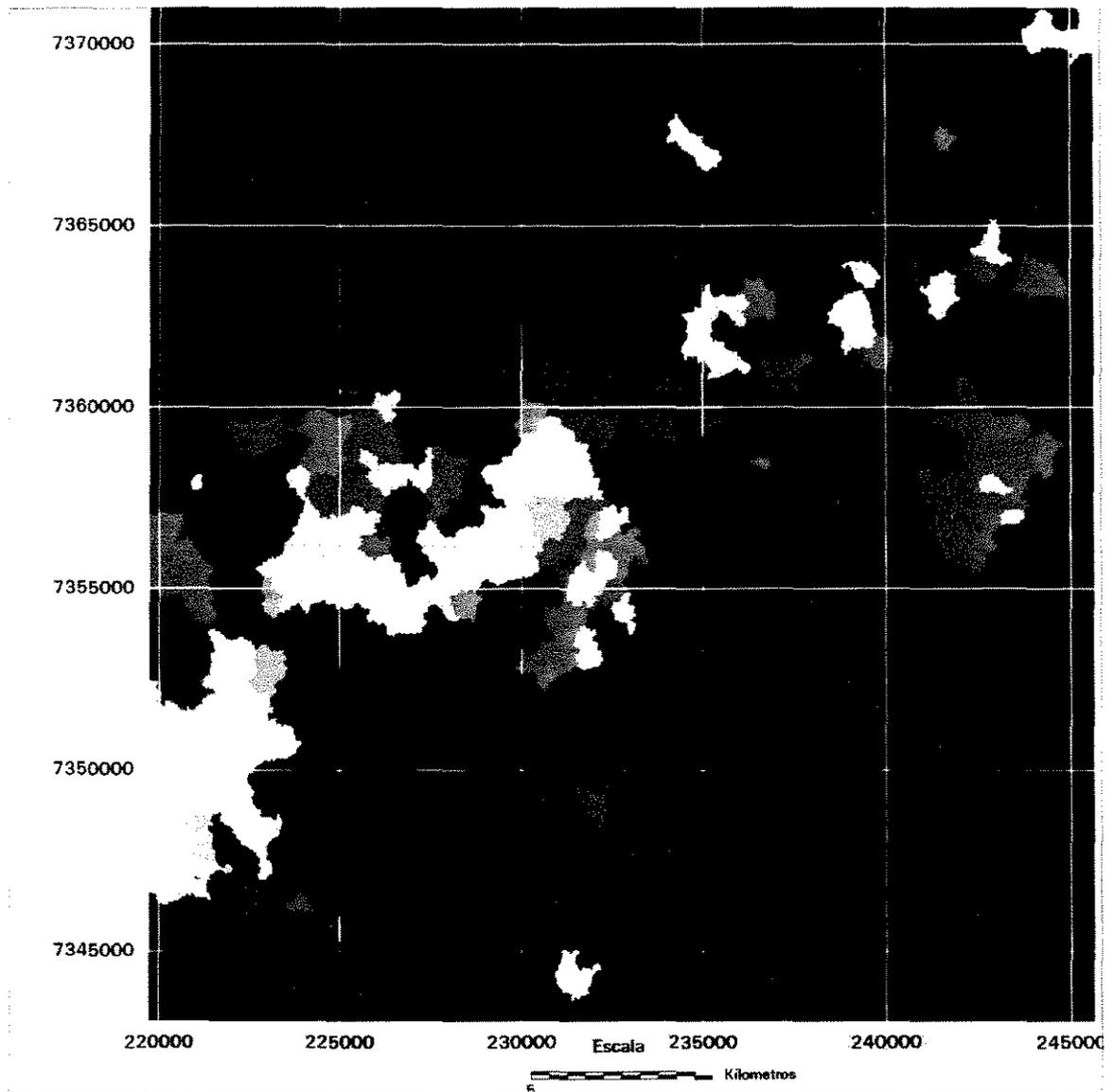


Figura 5. 24: Conjunto *fuzzy* para o grau de pertinência de cada área de abrangência de amostra para a anomalia de Cu.

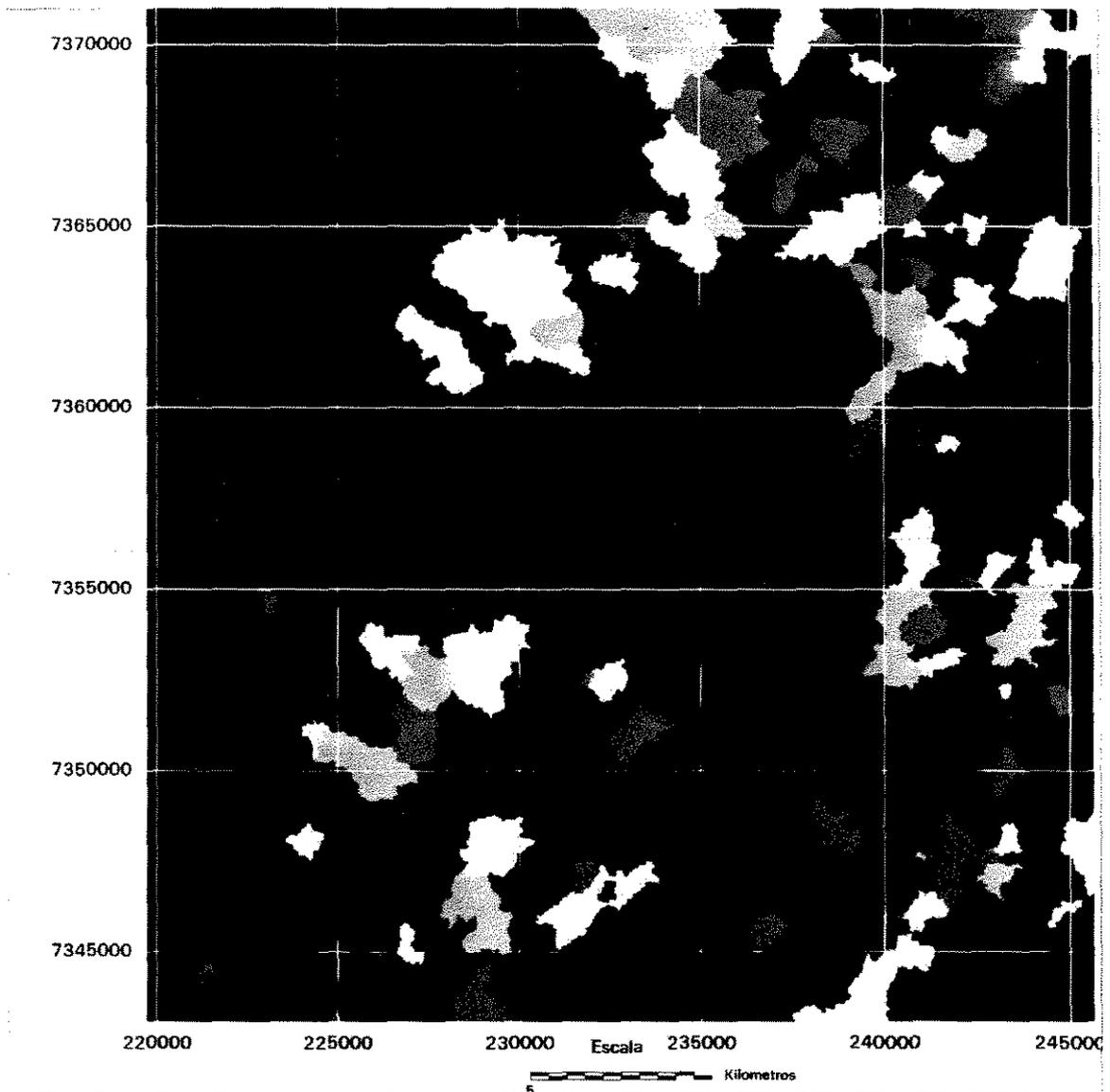


Figura 5. 25: Conjunto *fuzzy* para o grau de pertinência de cada área de abrangência de amostra para a anomalia de Pb.

Estabelecido este GRID de distância ponderada e respectiva área de abrangência para cada amostra, foi gerado para cada área um conjunto *fuzzy* com função linear. Este conjunto obtém como valor máximo a maior distância ponderada que vai ter o grau de pertinência zero até o *pixel* em que está a amostra, que tem o valor no grau de pertinência igual a um. Neste caso, o valor 1 equivale a dizer que o *pixel* é representativo ao máximo daquela amostra, já o valor 0, significa dizer que o *pixel* está longe o suficiente da amostra para poder representá-la, ou numa mesma situação, está separada do *pixel* que contém a amostra por alguma feição de terreno que dificulta a representatividade do *pixel*. Esta operação com a definição deste conjunto *fuzzy* é feita para cada área de abrangência definida, uma vez que os valores máximos de distância

ponderada variam para cada área. Com este conjunto *fuzzy* de representatividade foi possível associar a cada polígono, através da correlação *fuzzy*, o grau de pertinência de cada amostra a anomalia *fuzzy* geoquímica definida estatisticamente. Deste modo, foram então definidas as áreas de interesse geoquímico para a integração com outras variáveis como será visto adiante.

Resumidamente foram feitos os seguintes passos:

1 - Definidos os graus de pertinência a anomalia *fuzzy* dos dois elementos de interesse (Cu e Pb) usando os mesmos parâmetros estatísticos para o modelamento *booleano*;

2 - Associou-se cada ponto amostrado ao seu grau de pertinência a anomalia;

3 - Cada ponto com seu grau de pertinência foi associado aos polígonos de área de abrangência;

4 - Foi feita então uma correlação *fuzzy* para o conjunto *fuzzy* com grau de pertinência associado aos polígonos de abrangência e com o conjunto das incertezas medidas para cada amostra.

5 - Baseado no limite (*constraint*), foi estipulado quais os graus de pertinência que poderiam ser mais interessantes, este então seus pontos selecionados para que se possa traçar as áreas de contribuição a montante de cada ponto. Esta área de contribuição será usada apenas como máscara espacial para o cruzamento seguinte. O resultado desta operação pode ser visto respectivamente para Cu e Pb nas Figs. 5.26 e 5.27.

6 - Com as áreas de contribuição *fuzzy* para cada ponto serão selecionadas somente as áreas com interesse geológico.

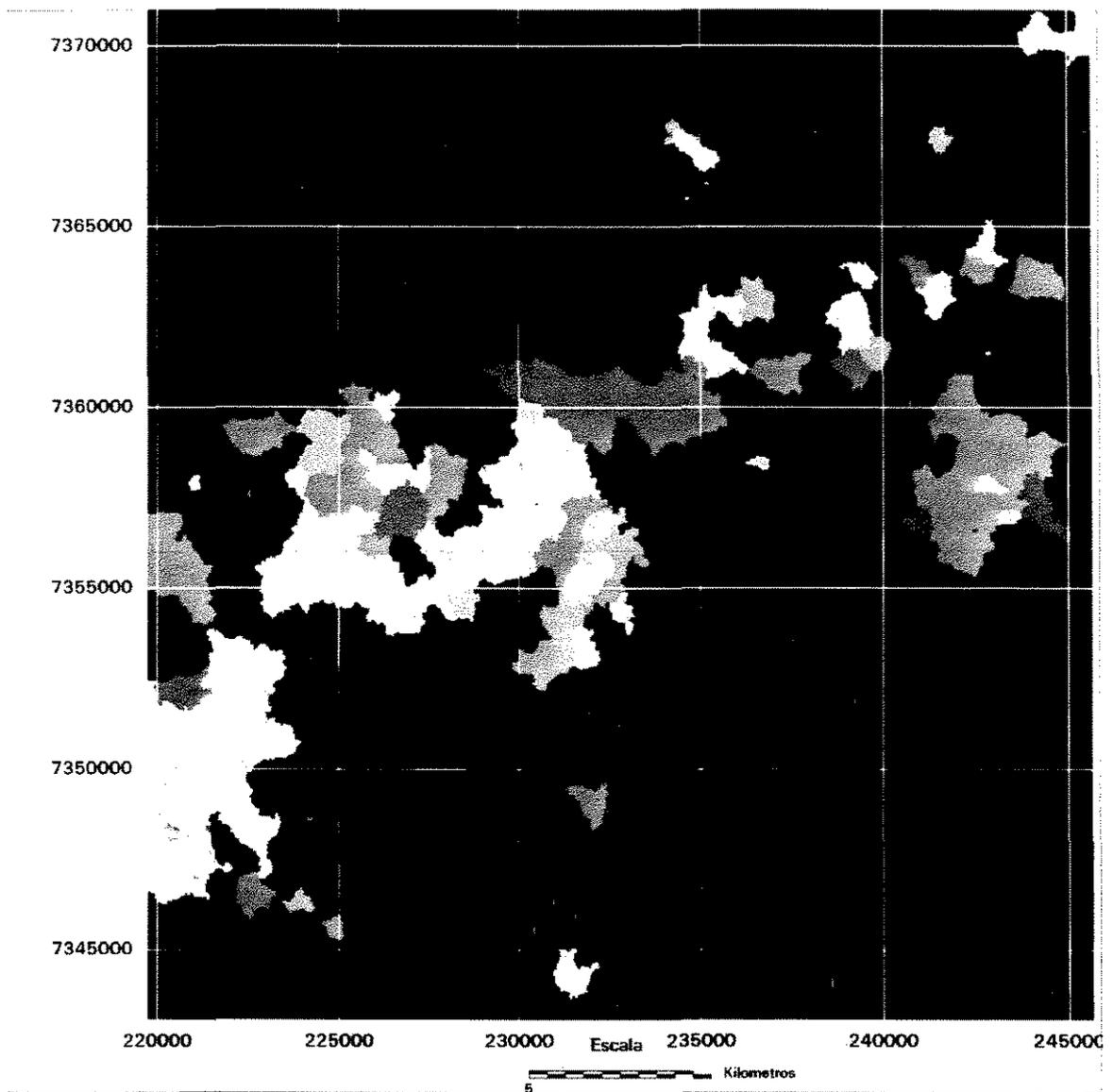


Figura 5.26: Resultado da interseção *fuzzy-Zadeh* dos polígonos de área de abrangência com o conjunto de grau de pertinência ao conjunto *fuzzy* anômalo para Cu.

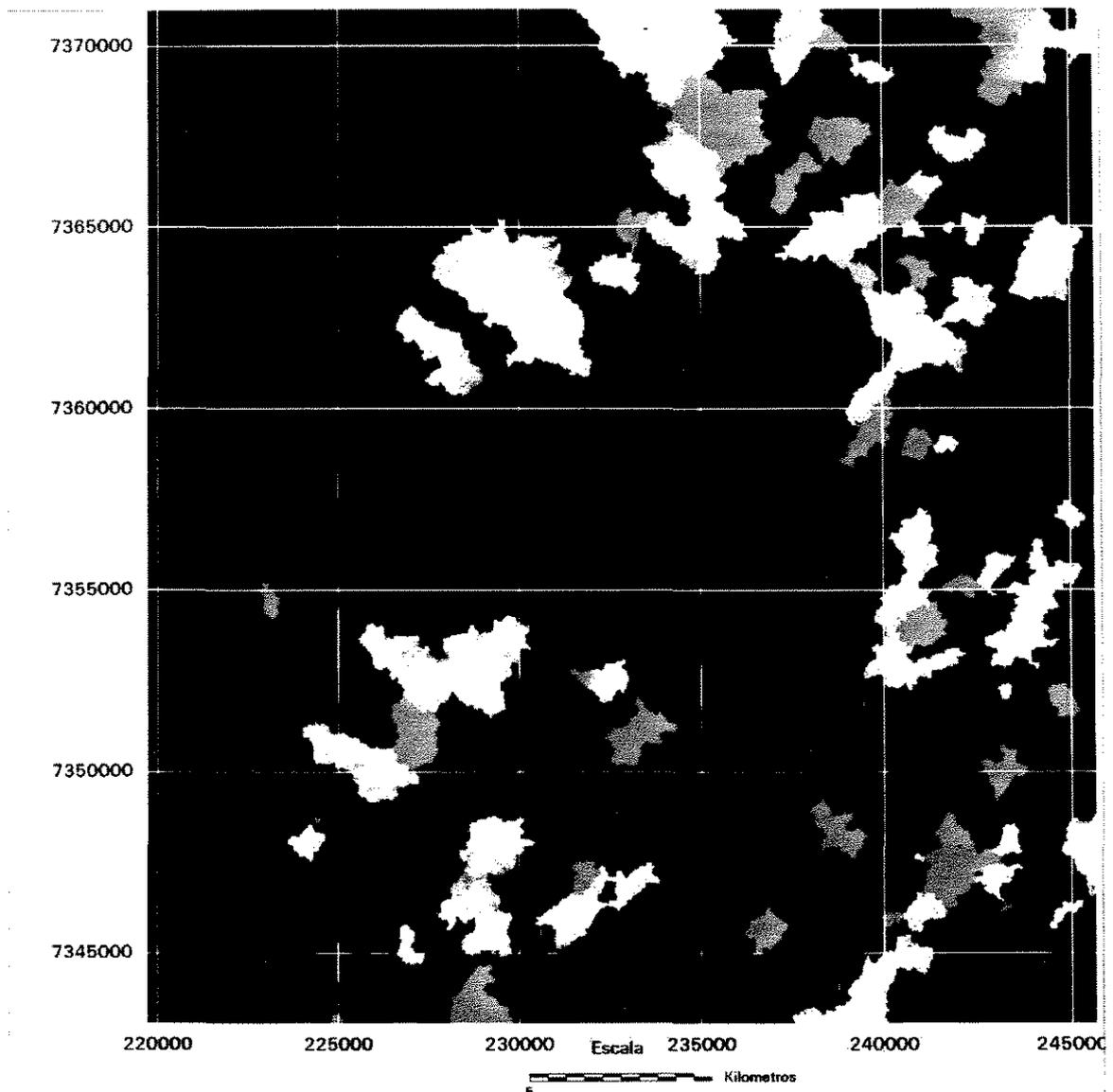


Figura 5.27: Resultado da interseção *fuzzy-Zadeh* dos polígonos de área de abrangência com o conjunto de grau de pertinência ao conjunto *fuzzy* anômalo para Pb.

5. 3. 7. Integração dos dados

Como visto no capítulo anterior, há diversos operadores *fuzzy* que podem ser usados na integração dos dados. Existem os mais simples, os operadores de Zadeh, até os operadores compensatórios de Yager assim como outros. Neste trabalho serão usados apenas os primeiros para a integração dos dados, pois os compensatórios ocasionarão num modelamento muito diferente do que foi proposto para a lógica *booleana*.

Numa forma geral, serão feitas as mesmas operações feitas na lógica *booleana*. Os resultados das anomalias geoquímicas difusas mapeadas conforme a área de

contribuição a montante serão cruzadas com os graus de pertinência às litologias de interesse. Este cruzamento será feito em relação aos contatos difusos traçados descrito anteriormente. Com esta definição geológica-geoquímica, assim como feito na abordagem *booleana*, será feita a integração (intersecção *fuzzy-Zadeh*) com as áreas de interesse de geofísica. Foram então geradas áreas de interesse com graus de pertinência entre 0 e 1, sendo que os valores mais altos serão mais interessante sob o ponto de vista metalogenético. Foram combinados os resultados dos três temas acima usando-se os operadores da lógica *fuzzy*. Basicamente, serão definidas regras *fuzzy* integrando-se:

- Áreas de interesse geoquímico *fuzzy* <*FuzzyAND*> Áreas de interesse geofísico *fuzzy* <*FuzzyAND*> Litologias de interesse representadas por contatos *fuzzy*.

Os resultados da integração *fuzzy* estão nas Fig.s 5.28 e 5.29, para Cu e Pb.

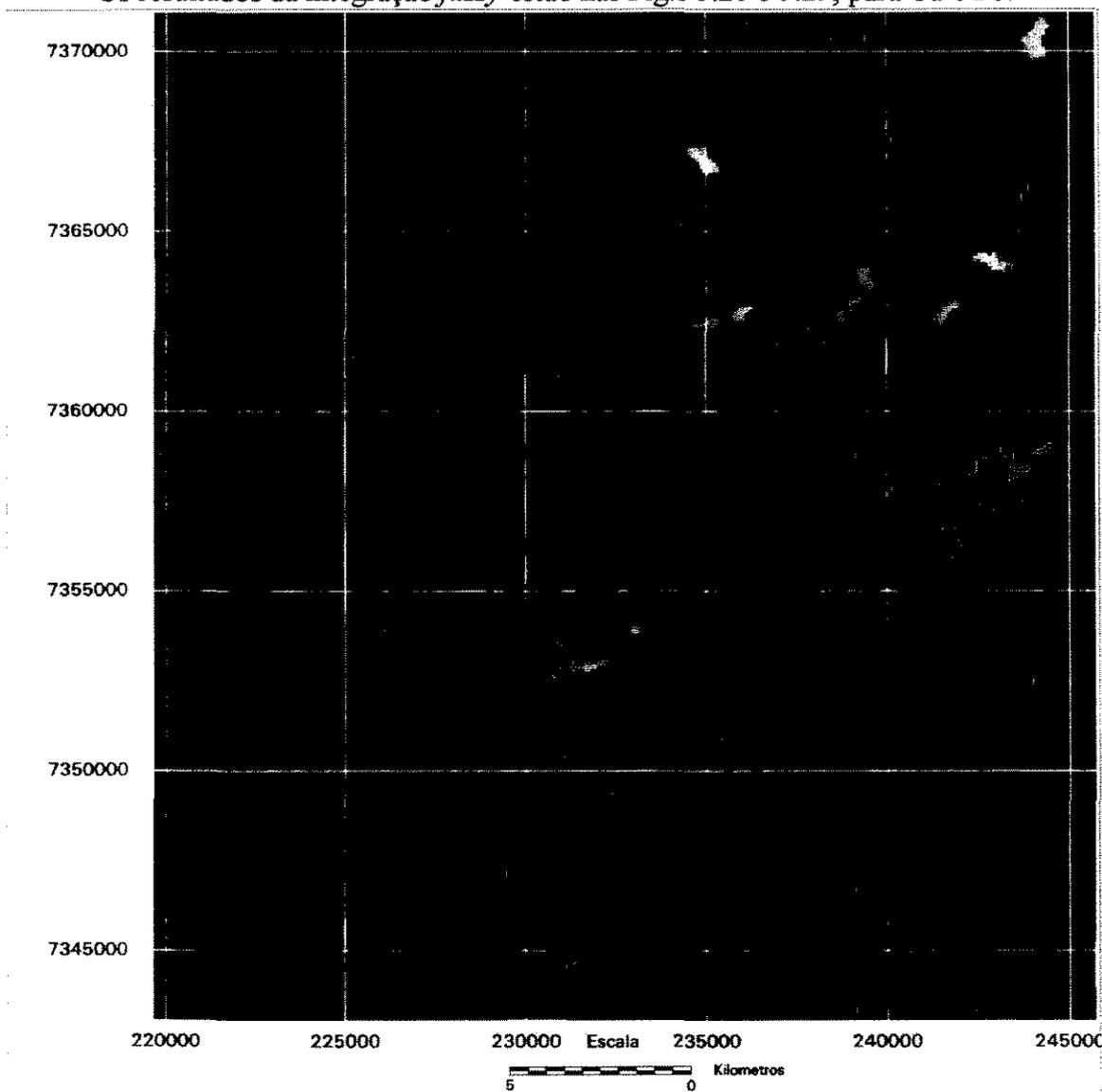


Figura 5.28: Áreas de interesse anômalo para Cu baseado na abordagem *fuzzy*, com sobreposição a litologia *fuzzy*.

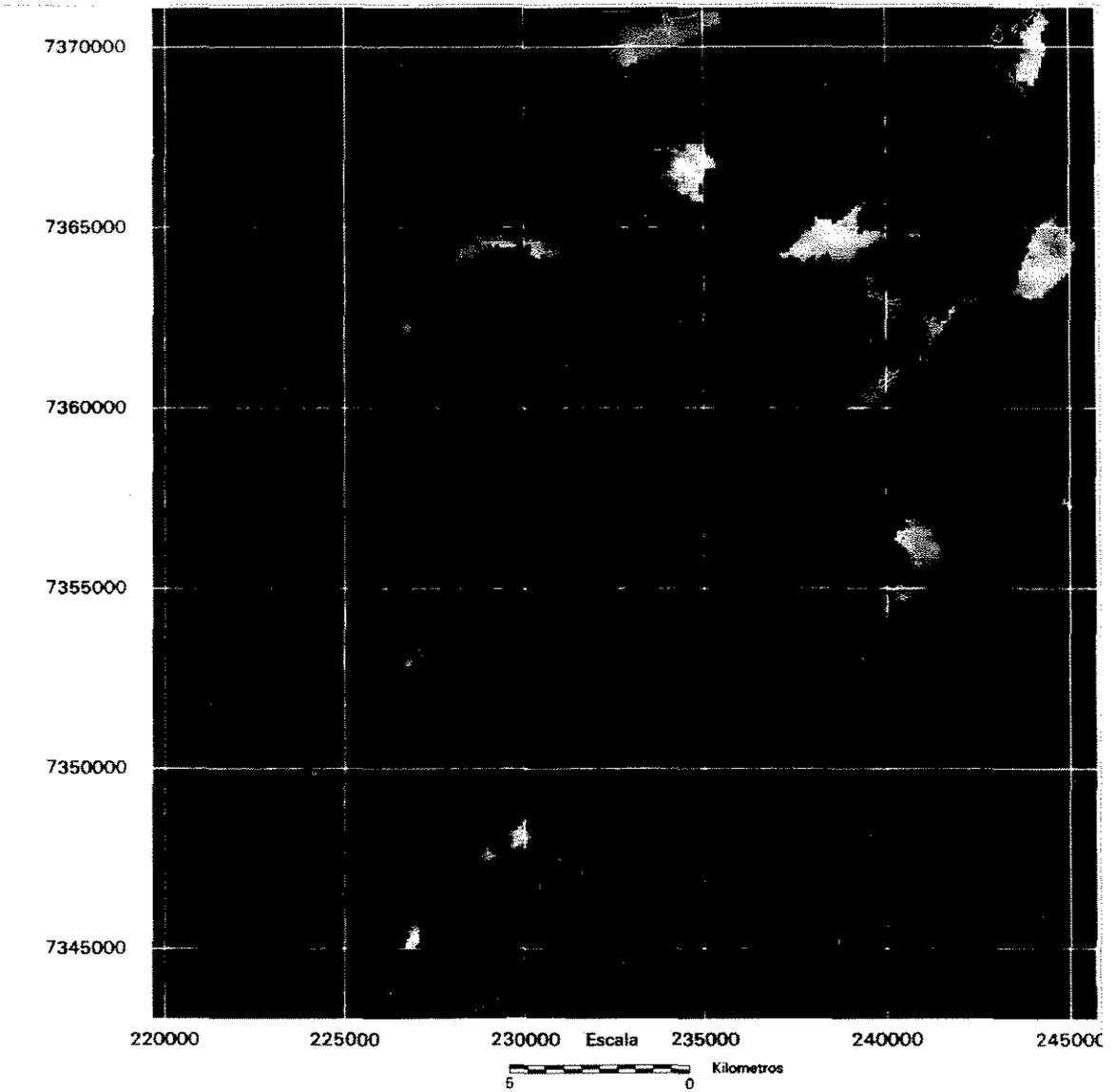


Figura 5.29: Áreas de interesse anômalo para Pb baseado na abordagem *fuzzy*, com sobreposição a litologia *fuzzy*.

6. Conclusões

Conforme se verifica no fluxograma apresentado no capítulo das análises, as áreas representativas para prospecção mineral podem ser encontradas com a intersecção das bacias ou áreas de contribuição dos pontos anômalos de geoquímica, com as anomalias geofísicas e unidades litológicas.

6. 1. Incertezas da Interpolação

As técnicas de interpolação utilizadas neste trabalho foram escolhidas baseados em critérios espaciais, ou seja, quando a variação muda de lugar para lugar, (no caso do variograma magnético) para os dados de aeromagnetometria e baseados na resposta de domínios geológicos definidos, para os dados de aeroradiometria. Mesmo assim, todo método de interpolação tem suas incertezas intrínsecas. Estas incertezas são muitas vezes desprezadas numa integração de dados gerando resultados que aparentemente apresentam alguma certeza, mas que na verdade têm imprecisões que apenas serão verificadas mais tarde numa etapa de campo. Isto pode trazer para uma empresa exploradora um desperdício de tempo e dinheiro. É muito comum, que de acordo com o interpolador escolhido, obter-se resultados muito distintos afetando tanto a interpretação qualitativa do dado gerado como o quantitativo. A geoestatística oferece algumas ferramentas para a escolha do melhor resultado da interpolação. No entanto, a lógica *fuzzy* tem sido cada vez mais usada para uma avaliação das superfícies geradas pela interpolação. Neste trabalho, com a determinação de anomalias *fuzzy* para o caso da aeroradiometria com aplicação de regras difusas para a criação de conjuntos *fuzzy* auxiliou a determinação das áreas. Com isto foi possível determinar as áreas certamente anômalas e as que apresentam dúvidas e o quanto é esta dúvida pelo grau de pertinência a anomalia. Com a lógica *booleana*, apenas áreas que sabidamente foram consideradas anômalas puderam ser delimitadas.

Tanto para a aplicação da lógica *booleana* quanto da lógica *fuzzy*, foi evitado o uso da interpolação para os dados geoquímicos haja visto as incertezas que este tipo de dado apresentaria. As amostras de sedimentos de corrente representam áreas restritas no terreno e não poderiam ser usadas para representar amostras separadas por elevações do terreno. Com o uso da lógica *booleana*, foram traçadas as áreas de contribuição a montante das amostras consideradas anômalas estatisticamente. Tratam-se de áreas com limite rígido e com a determinação da anômalo ou não-anômalo. Se um limiar de

anomalia for considerado como 90 ppm, uma amostra com valor de 89 ppm já não será considerada de interesse. Com a lógica *fuzzy* foi possível modelar uma margem de incerteza sobre estes valores com a definição de conjuntos *fuzzy* apresentando graus de pertinência entre o que é anômalo e o que não é anômalo.

6. 2. Abordagem *booleana*

O modelo *booleano* pode ser útil, num primeiro momento, para definir zonas de potencial mineral, mas não é conclusivo por si só, pois as zonas selecionadas não apresentam um grau de confiabilidade. O atrativo da lógica *booleana* é sua simplicidade. A operação *booleana* num SIG é diretamente análoga ao empilhamento físico de mapas em uma mesa de luz. Este método tradicional empregado ainda por muitos geólogos é relativamente demorado. Em casos onde os guias prospectivos foram estabelecidos por regras simples, as combinações *booleanas* são uma forma prática e fácil de operação. Na prática, entretanto, não é usualmente aconselhável dar importância igual para cada critério sendo combinado. As evidências precisam ser ponderadas dependendo de sua significância relativa. É, obviamente, o procedimento mais utilizado até hoje, mas isto está mais relacionado com uma falta de cultura em pesquisa metalogenética usando SIG, do que a uma metodologia implementada que utiliza todos os recursos de uma manipulação digital dos dados.

A metodologia apresentada aqui, apesar de não ser a única possível com uma abordagem *booleana*, deixa claro a sua simplicidade.

Um dos problemas de qualquer modelagem de dados tradicional num SIG é justamente a representação das feições reais, o que pode levar a imprecisões que serão propagadas até o resultado final. Este aspecto é um dos diferenciais dos métodos, ora estudados, e das conseqüentes análises efetuadas sob a ótica de cada um deles.

6. 3. Abordagem *fuzzy*

Já para a abordagem *fuzzy*, para cada dado de entrada, gerou-se um conjunto *fuzzy* baseado nas incertezas inerentes à definição destes dados. Para o mapa geológico gerou-se um mapa de contatos litológicos difusos. Para a geoquímica gerou-se um mapa das anomalias geoquímicas difusas para Cu e Pb levando-se em conta a representatividade de cada amostra e o teor destes elementos. Para a geofísica gerou-se

um mapa de anomalias de aeroradiometria, neste caso somente para U e K, visando mapear as áreas de hidrotermalismo.

A metodologia apresentada para a lógica *fuzzy* é mais complexa do que a anterior. No entanto, é possível definir áreas com maior potencial mineral e avaliar o quanto estas áreas tem a possibilidade de se ter um melhor resultado numa campanha de prospecção futura.

O mapa geológico difuso apenas considerou as incertezas dos contatos (distâncias ao redor dos contatos) e não considerou a incerteza na forma dos polígonos traçados. Deve-se lembrar que todo mapa geológico é uma interpretação e portanto passível de erros. Para um refinamento da metodologia de geração do mapa geológico difuso, sugere-se que nos trabalhos de campo seja dada a distância ao redor de cada contato indefinido. A definição da tabela de incertezas ao redor dos contatos foi feita baseada na descrição dos relatórios de campo sendo a única fonte de informações para estas definições.

Os dados de sedimentos de corrente foram considerados os dados mais imprecisos. Foi elaborado uma nova metodologia de representação das amostras em relação ao terreno e a distância entre as amostras.

Somente para a geração destes dados difusos a complexidade envolvida já pode ser considerada grande. A utilização da lógica *fuzzy* em sistemas inteligentes para controle de processos humanos revela-se extremamente útil e precisa. No entanto, para modelamentos geológicos onde diversas variáveis contribuem para outros tantos números de dados, este modelamento tende a ficar cada vez mais complexo. Diversas formas de se gerar dados geológicos difusos podem ser modelados, algumas delas provavelmente mais complexas do que apresentado aqui.

A mesma observação de complexidade deve ser feita em relação a integração destes dados difusos. Como apresentado no capítulo que descreve a lógica *fuzzy*, há diversas maneiras já definidas para se efetuar a integração de dados. A que foi usada aqui foi a mais simples, porém já apresentando resultados satisfatórios. Numa aplicação mais fiel a lógica *fuzzy*, deveria ser desenvolvido um sistema de informações *fuzzy* geográficas para contemplar todos estas operações chegando até mesmo a *defuzzyficação* e processos de inferência. Isto, no entanto, foge ao escopo deste trabalho que aqui pretende-se apenas mostrar a aplicação desta lógica em pesquisa mineral. Muito cuidado deve-se ter ao se efetuar um modelamento *fuzzy*, dada as inúmeras variáveis que podem ser consideradas numa análise metalogenética.

Mesmo que a aplicação da lógica *fuzzy* represente um avanço na análise metalognética, esta não dispensa uma equipe de geólogos especialistas nos diversos tipos de dados envolvidos. Considerando que um SIG possibilita a comparação entre diversos modelos geológicos adotados, estes devem ser bem definidos por um conhecimento

geológico prévio. A intervenção humana nos processos de inferência *fuzzy* ainda é muito importante.

Apesar de ter sido possível realizar análises metalogenéticas para dois elementos nesta área, elementos como o Au e As não foram analisados durante a campanha de amostragem geoquímica. A potencialidade para o Au é relativamente boa dada a correlação anteriormente citada e a presença de algumas faiscagens na região. Elementos como o Zn que poderiam apresentar alguma correlação com os elementos analisados, não apresentou teores acima do limite de detecção e não pode ser utilizado.

Outro aspecto importante é a incerteza no modelo geológico adotado para a área. A região do Vale do Ribeira apresenta uma estratigrafia complexa sendo alvo de grandes discussões a respeito. Sob este ponto de vista, adotou-se uma correlação litoestratigráfica com a Formação Perau ao sul da área.

6. 4. Análises para Pb

Comparando os resultados para Pb das duas abordagens, verifica-se um aumento da área prospectável, porém com a vantagem de se poder quantificar a incerteza de cada área. Desta forma poderia ser feita uma ordem de prioridades mais confiável de prospecção do que dada pela lógica *booleana*. Outro aspecto é que na lógica *booleana* algumas áreas que podem vir a ser interessantes foram totalmente descartadas. Algumas áreas que apresentaram a possibilidade *fuzzy* de mais de 0,9 foram totalmente descartadas na abordagem *booleana*. Algumas destas áreas inclusive estavam sobrepostas a litologias de interesse, pertencentes ao Grupo Açungui. Inclusive a forma das áreas anômalas resultantes das análises geoquímicas também foram bastante diferentes. Isto se observa basicamente pelas diferenças na forma de se gerar estas áreas. Na abordagem *booleana* apenas se levou em conta a direção a montante de cada amostra. Na abordagem *fuzzy*, além da direção revelou-se também as feições do terreno, extraídas da 2ª derivada, e a distância entre as mesmas. Nesta abordagem procurou-se representar melhor a representatividade de cada amostra dentro das ferramentas disponibilizadas pela teoria dos conjuntos *fuzzy*.

A SW da área uma importante observação nas anomalias geoquímicas de áreas com grau de pertinência 1, associadas a outras diversas com grau de pertinência entre 0 e 1 e que estavam sobrepostas a área de intensa anomalia magnética associada ao Falhamento de Belchior. Esta intensa anomalia magnética pode apresentar minerais com susceptibilidade magnética associadas a sulfetos. Recomenda-se aplicar algum método

elétrico para a verificação de algum corpo de sulfeto maciço associado esta anomalia magnética. Estas áreas não foram definidas pela abordagem *booleana*.

No geral as áreas delimitadas como de interesse geoquímico, principalmente através da abordagem *fuzzy*, estavam situadas muito próximas aos contatos dos granitos e granitóides com as rochas do Grupo Açungui. Isto pode corroborar um enriquecimento posterior dos metassedimentos sugerindo modelos de depósitos epigenéticos para a região.

Algumas áreas de interesse foram localizadas dentro do domínio destes corpos graníticos, principalmente do corpo granítico Pilar do Sul. Isto pode ser explicado pela presença de tetos pendentes em algumas regiões destes corpos o que poderia afetar alguma amostragem geoquímica localmente.

A Tab. 6.1 apresenta uma comparação da área total que apresenta interesse metalogénico para Pb tanto para a abordagem *booleana* quanto para a *fuzzy* que tenha grau de pertinência maior que 0,8 e 0,9.

Área com interesse pela abordagem <i>booleana</i>	239.400 m ²
Área com interesse com grau de pertinência <i>fuzzy</i> > 0,8	733.500 m ²
Área com interesse com grau de pertinência <i>fuzzy</i> > 0,9	45.900 m ²

TABELA 6.1: COMPARAÇÃO DO TOTAL DE ÁREAS DE INTERESSE PARA Pb ATRAVÉS DAS DUAS ABORDAGENS ESTUDADAS.

No resultado *fuzzy*, para este elemento, houve regiões com grau de pertinência igual a 1.

6. 5. Análises para Cu

Para o Cu também houve um aumento da área prospectável, porém de uma forma mais restrita com a abordagem *fuzzy*. Ao contrário do Pb, que apresenta depósitos que já foram economicamente ativos nas litologias correlacionadas, o Cu não apresenta grande expressão na área.

Para a abordagem *booleana* foi delimitada uma grande área de interesse geoquímico a SW da folha. Esta área sob o ponto de vista geológico é bastante distinto, pois apresenta influências de uma intrusão granítica (Corpo do Córrego do Gázeo) mas juntamente com os xistos apresenta corpos de anfibolitos e turmalinitos situados ao norte desta grande área. Geologicamente é uma grande área interessante associada a uma grande área de geoquímica anômala. Na abordagem *fuzzy* esta área foi melhor definida

com pequenas áreas com graus de pertinência a anomalia definidas. Além do mais, pôde-se definir áreas que justamente fora dos limites do corpo granítico. É uma observação importantíssima, pois a abordagem *fuzzy* foi capaz de delimitar melhor as áreas em relação a geologia, bem como quantificar o quanto cada sub-área representa para a anomalia de Cu. Desta forma a associação destas sub-áreas anômalas ficaram melhor definidas em relação a influência dos anfibólitos e turmalinitos.

A Tab. 6.2 apresenta uma comparação da área total que apresenta interesse metalogenético para Cu tanto para a abordagem *booleana* quanto para a *fuzzy* que tenha grau de pertinência maior que 0,8 e 0,9.

Área com interesse pela abordagem <i>booleana</i>	40.500m ²
Área com interesse com grau de pertinência <i>fuzzy</i> > 0,8	205.200m ²
Área com interesse com grau de pertinência <i>fuzzy</i> > 0,9	10.800 m ²

TABELA 6.2: COMPARAÇÃO DO TOTAL DE ÁREAS DE INTERESSE PARA CU ATRAVÉS DAS DUAS ABORDAGENS ESTUDADAS.

Em relação ao resultado *fuzzy* não houve qualquer área com valor igual a 1, o máximo do grau de pertinência em toda a área é de 0,918.

6. 3. Observações finais

As análises efetuadas apresentaram resultados bastante interessantes com o uso da lógica *fuzzy* para os modelamentos geológicos, geoquímicos e geofísicos, bem como a integração dos dados.

Um fato que nitidamente se percebe é que para a análise *booleana* do Pb e Cu para a região estudada, não apresentou uma correlação espacial. No entanto, com a abordagem *fuzzy* foi possível delimitar algumas áreas apresentando uma correlação espacial.

Uma das grandes vantagens da utilização da lógica *fuzzy* é a consideração de que os dados têm incertezas inerentes. Isto possibilita saber quais são as áreas que realmente são de interesse e aquelas que podem apresentar uma pseudo-anomalia por não considerar incertezas. Estas podem ser geradas de uma interpretação errada (um contato litológico indefinido), da natureza do dado (amostragem de sedimento de corrente que representa somente uma área específica a montante) ou mesmo da própria confecção do dado. Isto explica a grande diferença das áreas resultantes para as abordagens estudadas, como apresentada nas Tabs. 6.1 e 6.2.

Fatores cruciais que devem ser melhor estudados quanto ao uso da lógica *fuzzy* é a escolha da regra que define o conjunto *fuzzy* e o tipo de operador a ser utilizado. O primeiro fator, neste trabalho foi a utilização, das regras lineares. A escolha deste fator depende do conhecimento geológico e do tipo de dado a ser analisado. Muito cuidado deve ser tomado, pois um conjunto *fuzzy* não pode ser confundido com uma função de distribuição de probabilidades. O segundo fator é um pouco mais complexo pois o uso indevido de um operador *fuzzy* compensatório pode modificar bastante o resultado.

Recomenda-se um contínuo aprimoramento do uso da lógica *fuzzy* juntamente com redes neurais para aplicações geológicas, pois estas técnicas prevêm modelamentos muito mais próximos do raciocínio humano do que a lógica *booleana*. O rápido crescimento do uso de sistemas inteligentes nos mais diversos campos da ciência e tecnologia tem mostrado grande demanda nestes desenvolvimentos. No âmbito das Geociências isto também se aplica, pois muitas das informações usadas e modelos adotados são incertos e dependem de diversas variáveis que não são muito claras e fáceis de se manipular usando a lógica *booleana*. A aplicação da lógica *fuzzy* e redes neurais tem sido cada vez mais crescentes em SIGs e pacotes de processamento digital de imagens. Já há um grande número de operadores e processamentos da matemática nebulosa disponíveis que podem ser muito bem adaptados para seu uso na Geologia. Este trabalho mostrou apenas uma aplicação possível e não teve a pretensão de esgotar este assunto.

Referências bibliográficas

- Altman, D. 1994. Fuzzy set theoretic approaches for handling imprecision in spatial analysis. *Int. Journal of Geographical Information Systems*. UK, v. 8, nº3, p. 271-289, 1994
- Anjos, I. L. S. & Mourão, L. M. 1988. Projeto São Paulo - Rio de Janeiro. Relatório Final. Processamento dos dados. Parte I - São Paulo. Texto, vol. II. Cia. de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), 29p.
- Banai, R. 1993. Fuzziness in Geographical Information Systems: contributions from the analytic hierarchy process. *Int. Journal of Geographical Information Systems*. 7 (4): 315-329.
- Barbour, A. P. & Oliveira, M. A. F. 1979. Pb, Zn, Cu e Ba do distrito do Perau - Modelo sedimentar para sulfetos do Vale do Ribeira. *Boletim IG-USP*, 10: 97-120.
- Barros, L. B. 1984. Inventário dos levantamentos aerogeofísicos executados pelo DNPM. *Geofísica nº 3*. MME / DNPM.
- Bellman, R. E. & Zadeh, L. A. 1970. Decision-Making in a Fuzzy Environment. *Management Sciences*, 17(4): 141-164.
- Berry, J. K. 1997. Move Beyond a Map Full of Error. *GIS World*. 10.(3): 28. GIS World Inc.
- Bevington, P. R. & Robinson D. K. 1992. Data reduction and error analysis for the physical sciences. McGraw-Hill, Inc. 328p.
- Bonham-Carter, G. F. 1994. *Geographic Information Systems for Geoscientists. Modelling with GIS*. Pergamon. 398p.
- Boyd, C. 1995. How can regions be created? Workshop Proceedings of the 1995 ESRI User's Conference. Volume 1. ESRI.
- Boyer, C. B. 1968. *História da Matemática*. Dover Publications. NY. 488p.

- Braghin, M. A. & Silva, A. de B. 1996a. Utilização de análises lógicas em pesquisa metalogenética via SIG. CIG - Revista Eletrônica de Informações Georeferenciadas da UNICAMP. 1(1). <http://orion.cpa.unicamp.br/revista.html>.
- Braghin, M. A. & Silva, A. de B. 1996b. Análise metalogenética utilizando lógica booleana via SIG na Folha Pilar do Sul. Anais do 39º Congresso Brasileiro de Geologia vol. 7, p.55-57. SBG-BA/SE.
- Burrough, P. A. 1989. Fuzzy mathematical methods for soil survey and Land evaluation. *Journal of Soil Science*, 40, p. 477-492.
- Burrough, P. A. 1996. Natural Objects with Indeterminate Boundaries. *In: Burrough, P. A. & Frank, A. U. (1996). Geographic objects with Indeterminate Boundaries. 345p. Taylor & Francis ed. p. 3-28.*
- Burrough, P. A. & Frank, A. U. 1996. Geographic objects with Indeterminate Boundaries. 345p. Taylor & Francis eds. 345p.
- Campanha, G. A. C. Silva, A. de B. & Braghin, M. A. 1995. Projeto-piloto de banco de dados sobre a Geologia do estado de São Paulo baseado em Sistema de Informações Geográficas - Folha Pilar do Sul (SF - 23 - Y - C - IV - 4). In: Simpósio de Geologia do Sudeste, 4, Águas de São Pedro. Boletim... Águas de São Pedro, SBG, p. 102.
- Campos Neto, M. C; Bergmann, M; Siga Jr, O & Figueiredo, M. C. H. 1990. Geologia da Folha Pilar do Sul, 1:25.000. Vol. 1 - Geologia. Relatório Final. Secretaria da Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento Econômico. Programa de Desenvolvimento de Recursos Minerais - PRÓ-MINÉRIO. 96 p. + anexos.
- Congalton, R. G. 1997. Exploring and Evaluating the Consequences of Vector-to-Raster and Raster-to-Vector Conversion. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 63(4), p. 425-434. 1997.
- Couclelis, H. 1994. Towards an Operational Typology of Geographic Entities with Ill-Defined Boundaries. *In: Burrough, P. A. & Frank, A. U. Geographic objects with Indeterminate Boundaries. 345p. Taylor & Francis ed. 1996, p. 45-55.*

- Cox, E. 1994. *The fuzzy systems handbook: a practioner's guide to building, using and maintaining fuzzy systems*. New York. 623p.
- Daitx, E. C. 1996. *Origem e Evolução dos Depósitos Sulfetados Tipo-Perau (Pb-Zn-Ag), com base nas jazidas Canoas e Perau (Vale do Ribeira, PR)*. Tese de Doutorado. UNESP. Rio Claro, SP. 453p.
- Davidson, D. A; Theocharopoulos, S. ; Bloksma, R. J. 1994. A Land Evaluation Project in Greece Using GIS and based on Boolean and Fuzzy Set Methodologies. *International Journal od Geographical Information Systems*. p. 369-384.
- Drews, M. G. P. & Vascoceles, C. S 1991. Pesquisa Geofísica em Sulfetos Auríferos no Vale do Ribeira - SP. Resumos Expandidos do 3º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica. RJ. Vol. 1. p. 461-465.
- Dubois, D; Prade, H. & Yager, R. R. 1997. *Fuzzy information engineering: a guide tour of applications*. John Wiley & Sons Inc. 712p.
- Eastman, J. R; Jin, W; Kyem, P. A. K. & Toledano, J. 1995. Raster Procedures for Multi-Criteria/Multi-Objective Decisions. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 61(5), p. 539-547. ASPRS.
- Egenhofer, M. J; Clementini, E. & Felice, P. D. 1994. Topological relations between regions with holes. *International Journal of Geographical Information Systems*, v. 8, n. 2. p.129-142.
- Fritzsons Jr. O; Piekarz, G. F. & Falcade, D. 1982. Geologia e potencial econômico do Grupo Setuva (PR). In: Congresso Brasileiro de Geologia, 32. Salvador. Anais... SBG, v. 3, p. 987 - 1001.
- Guimarães Filho, H. A. 1994. Metodologias para intercâmbio de dados entre programas de CADD, SGDB, PDI e SGI em projetos de exploração mineral. Dissertação de Mestrado. IG-UNICAMP. Campinas.
- Grim, P. 1993. Self-reference and chaos in fuzzy logic. *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*. 1(4), p. 237-253.

- Gupta, M. M; Ragade, R. K; Yager, R. R. 1979. *Advances in Fuzzy set theory and Applications*. Ed. North-Holland.
- Hamilton, J. M; Bishop, D. T; Morris, H. C. & Owens, O. E. 1982. *Geology of the Sullivan Orebody, Kimberley, B. C. Canada. In Pre-Cambrian Sulphide Deposits, Geol Assoc of Canada Spec. Paper n. 25.597-666. Apud Campos Neto, M. C; Bergmann, M; Siga Jr, O & Figueiredo, M. C. H. 1990...*
- Hasui, Y. 1973. *Tectônica da área das Folhas de São Roque e Pilar do Sul. Tese de Livre Docência apresentada ao IG-USP. São Paulo. 190 p.*
- Hu, J. 1995. *Methods of Generation Surfaces In Environmental GIS Applications. Proceedings of the 1995 ESRI User's Conference. ESRI.*
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. 1983. *Geologia da folha Pilar do Sul (SF - 23 - Y - C - IV - 4) - Estado de São Paulo: DMGA/IPT (Relatório 19.427). 128 p. + anexos.*
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. 1986. *Aprimoramento da Metodologia Geofísica Aplicada à Prospecção de Metais Básicos. DMGA/IPT. (Relatório 23.743) v. 1. 151p.*
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. 1988. *Projeto seleção e priorização de alvos do programa geoquímica regional. São Paulo: DMGA/IPT (Relatório 27.039). 280 p. + anexos.*
- Katinsky, M. 1994. *Fuzzy Set Modeling in Geographic Information Systems. MS thesis in Cartography. University of Wisconsin - Madison. 46 p.*
- Katz, S. S. 1991. *Emulating the Prospector Expert System with a Raster GIS. Computer & Geosciences, 17 (7), p. 1033-1050.*
- Kim, J. 1996. *Estimation of class mixture proportion within a pixel using the fuzzy partitioning method. Proceedings of the Eleventh Thematic Conference, volume 2, p. II-109 - II-118.*

- Kumler, M. P. 1994. An Intensive Comparison of Triangulated Irregular Network (TINs) and Digital Elevation Models (DEMs). *Cartographica*, 31(2). University of Toronto Press Inc. 99p.
- Lagacherie, P; Andrieux, P. & Bouzigues, R. 1996. Fuzziness and Uncertainty of Soil Boundaries: From Reality to Coding in GIS. In *Geographic Objects with Indeterminate Boundaries*, eds. Burrough, P. A. & Frank, A. U, Taylor & Francis Pub. Great Britain, p. 275-286.
- Macedo, A. B. 1986. Prospecção litogeoquímica na Mina do Perau, Paraná. Tese de Doutorado. São Paulo. IGc-USP, 2v.
- McNoleg, O. 1996. The Integration of GIS, Remote Sensing, Expert Systems and Adaptive Co-Kriging for Environmental Habitat Using Object-Oriented, Fuzzy-Logic and Neural_network Techniques. *Computer & Geosciences*, 22(5), p.585-588. Elsevier Science Ltd.
- Metal Mining Agency of Japan. Japan International Cooperation Agency. 1983. Report on geological survey of Anta Gorda, phase 3. *apud* Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. 1983. Geologia da folha Pilar do Sul (SF - 23 - Y - C - IV - 4) - Estado de São Paulo. (IPT. Relatório 19.427).
- Oliveira, M. T. 1996. Desenvolvimento de Modelo de Mapeamento para a Determinação de Áreas Áptas em Função do Perfil do Solo e da Topografia Comparando a Classificação Fuzzy e Booleana. Tese submetida como requisito parcial para a obtenção do grau de mestre em Ciências em Sistemas e Computação. IME - RJ. 173p.
- Perotta, M. M. 1996. Potencial aurífero de uma região no Vale do Ribeira, São Paulo, estimado por modelagem de dados geológicos, geoquímicos, geofísicos e de sensores remotos num Sistema de Informações Geográficas. Tese de Doutorado. IG-USP. São Paulo. 149p.
- Piekarcz, G. F. 1981. Reconhecimento de unidades correlacionáveis a seqüência mineralizada do Perau, Estado do Paraná. In: Simpósio Regional de Geologia, 3. Curitiba. Atas... SBG. v. 1. p. 148-154.

- Plimer, I. R. 1988. Tourmalines Associated with Australian Proterozoic Submarine Exhalative Ores. In: Base Metal Sulfide Deposits.
- Remacre, A. Z. & Braghin, M. A. 1997. Interpolation for Aeromagnetic Data Using Magnetic Variogram for Kriging. Proceedings of 5th International Congress of the Brazilian Geophysical Society.
- Rondinelli, D. Quintanilha, J. A. Silveira, C. A. Mayeama, O. & Beljavskis. P. 1989. Geoquímica regional da folha Pilar do Sul - São Paulo. Anais do II Congresso Brasileiro de Geoquímica, SBGq, Rio de Janeiro, p. 47-60.
- Rose, A. W; Hawkes, H. E. & Webb, J. S. 1979. Geochemistry in mineral exploration. 2nd ed. Academic Press. New York. 657p.
- Roux, L. & Desachy, J. 1997. Multisources Information-Fusion Application for Satellite Image Classification. *In: Dubois, D; Prade, H. & Yager, R. R. (1997). Fuzzy Information Engineering. A Guide Tour of Applications. John Wiley & Sons, Inc. p. 111-121.*
- Sawkins, F. J. 1976. Metal deposits related to intracontinental hotspot rifting environments. The Journal of Geology, v. 84 n. 6. 673 - 684.
- Schöll, W. V. Silva, A. C. G. de A; Monastier, M. S. 1982. A Formação Setuva do Pré-Cambriano no Estado do Paraná - uma revisão crítica. Anais do 32º Congresso Brasileiro de Geologia. Salvador, SBG. v. 1. p. 55 - 63.
- Silva, A. B. 1991. Remotely sensed, Geophysical and Geochemical data as aids to mineral exploration in Bahia State. Thesis presented for the degree of Doctor of Philosophy. England.
- Silva, A. B. 1995. Sistemas de Informações Geográficas. Apostila de curso.
- Silva, R. B. & Schöll, W. V. 1982. Metalogênese da barita de Água Clara no âmbito da evolução da Formação Setuva. Anais do 32º Congresso Brasileiro de Geologia, v. 3. SBG. Salvador. p. 1017 - 1023. *apud* Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. 1983. Geologia da folha Pilar do Sul (SF - 23 - Y - C - IV - 4) - Estado de São Paulo. (IPT. Relatório 19.427).

- Silva, R. B; Maeyama, O; Perosa, P. T. Y; Almeida, E. B; Saragiotto, J. A. R. 1982. Considerações sobre as mineralizações de chumbo, zinco e prata do Grupo Açungui no estado de São Paulo. Anais do 32º Cong. Bras. de Geologia, v. 3. SBG. Salvador. p. 972 - 985.
- Silva, R. B. 1995. Distinção de fertilidade para Sn e W em Granitóides do Sul do Estado de São Paulo. Tese de Doutorado apresentada a UNESP. Rio Claro. 262p.
- Slack, J. F. 1982. Tourmaline in Appalachian - Caledonian massive sulphide deposits and its exploration significance. Trans. Inst. Min. Metall. 91: 81 - 89. Section B: Applied Earth Science.
- Stein, D. P; Campanha, G. A. C; Fernandes, L. A. 1986. A Formação Perau na região de Pilar do Sul, SP. Anais do 34º Cong. Bras. de Geologia, v. 2. SBG. Goiânia. p. 919 - 930.
- Tassinari, C. C. G; Barbour, A. P; Daitx, E. C. & Sato, K. 1990. Aplicação dos isótopos de Pb e Sr na determinação da natureza das fontes das mineralizações de chumbo no Vale do Ribeira – SP e PR. In: Congr. Bras. Geol. 36º, Natal, SBG, Anais. V. 3: 1254 - 1266.
- Wang, F. 1994. Towards a natural language user interface: an approach of fuzzy query. Int. Journal of Geographical Information Systems. 8 (2), p. 143 - 162.
- Wang, F; Hall, G. B. & Subaryono. 1990. Fuzzy information representation and processing in conventional GIS software: database design and application. Int. Journal Geographical Information Systems, 4 (3), p. 261 - 283.
- Wang, G. Y. & Ou, J. P. 1987. Fuzzy-Random Models of Future Earthquake Ground Motion. Structures and Stochastic methods. Developments in Geotechnical Eng. v. 45. P. 361 - 371. A. S. Cakmak Ed.
- Yager, R. R. 1987. Fuzzy sets and Applications: Selected Papers by L. A. Zadeh. 684p. Ed. Wiley-Interscience publication.
- Zadeh, L. A. 1965. Fuzzy Sets. Information and Control, vol. 8. New York: Academic Press. p.338 - 353.

Zadeh, L. A. 1968. Probability Measures of Fuzzy Events. J. Math Analysis and Appl. 23:
p. 421 - 427.

Zadeh, L. A. 1972. Fuzzy Set Theoretic Interpretation of Linguistic Hedges. Journal of
Cybernetics, 2:2, p. 4-34. Hemisphere Publishing Corp.

ANEXO I

RELATÓRIO DIÁRIO PROJETO PILAR DO SUL

DATA: ___ / ___ / ____.
LOCAL: _____.

<i>Coverages / Arquivos criados</i>	DESCRICAÇÃO
	Conteúdo: _____ Plataforma: ()PC ()Workstation Máquina: _____ PATH: _____ Comandos: _____ Observações:
	Conteúdo: _____ Plataforma: ()PC ()Workstation Máquina: _____ PATH: _____ Comandos: _____ Observações:
	Conteúdo: _____ Plataforma: ()PC ()Workstation Máquina: _____ PATH: _____ Comandos: _____ Observações:

Se necessitar de mais espaço > use o verso

ANEXO II

Sistemas utilizados

Dos diversos SIGs disponíveis no mercado foram utilizados três sistemas diferentes. Para uma melhor comparação entre as metodologias estudadas foi dado um maior enfoque das operações utilizando o ARC/INFO. Cada um destes sistemas tem suas peculiaridades, não sendo o objetivo deste trabalho realizar um *benchmark* entre os mesmos.

ARC/INFO

É o Sistema de Informações Geográficas comercial com maior base instalada no mundo, produzido pela ESRI (*Environmental System Research Institute, Inc.*). É um sistema modular com capacidade de gerenciamento / análise tanto de dados vetoriais, *raster* e alfanuméricos de forma integrada.

Para todos os módulos (de uma forma indireta com o INFO) é possível programar usando linguagem interpretada, própria do ARC/INFO chamada AML™ (*Arc Macro Language*). Esta é responsável por um dos grandes trunfos deste sistema, uma vez que é relativamente simples sua *customização* para aplicações específicas. Entretanto, a tendência no desenvolvimento deste sistema é permitir sua *customização* com outras linguagens.

A versatilidade deste sistema é representada pelo número de análises capazes de serem realizadas através de seus módulos. Uma vez que este trabalho está enfocado para pesquisa metalogenética, em uma única folha 1:50.000 não serão utilizados todos os módulos disponíveis, como o COGO, NETWORK, LIBRARIAN. Porém para um conjunto de folhas geológicas, por exemplo as folhas geradas pelo PRÓ-MINÉRIO, seria necessário o gerenciamento de uma base de dados mais refinada, utilizando uma estrutura do LIBRARIAN ou ARCSTORM. Vale lembrar da possibilidade de se integrar um banco de dados relacional (como ORACLE™, SYBASE™, ADABAS™ etc.) à estrutura de operação do ARC/INFO através de um integrador de banco de dados. Este assunto de gerência não será abordado neste trabalho.

ERDAS IMAGINE

É um sistema processamento digital de imagens com muitas funcionalidades de SIG e que foi utilizado para muitos dos processamentos de imagens de satélites e dados gerados no ArcInfo, especialmente para o tratamento dos dados aerogeofísicos.

Também tem composição modular, sendo que neste trabalho foram apenas utilizados os módulos básicos. O módulo de radar, vetor (para atualização vetorial) e de cadastro de imagens não foram necessários.

A versão utilizada foi a 8.2 que apresentou os módulos citados anteriormente, mas a atual (8.3) apresenta outro empacotamento, não deixando de ser modular.

GRASS

GRASS (*Geographic Resources Analysis Support System*) é hoje um dos SIGs de caráter acadêmico dos mais usados e respeitados. É um sistema inicialmente desenvolvido pelo exército norte-americano no início da década de 80. Deste modo, é um sistema de domínio público. Com isto há grande desenvolvimento de aplicativos, novas bibliotecas etc., por vários usuários no mundo inteiro. Apesar de oferecer alguns comandos para manipulação de dados vetoriais, suas análises são feitas essencialmente com dados *raster*.

A estrutura do banco de dados do GRASS utiliza diretórios hierárquicos do UNIX. O diretório principal é conhecido como GISDBASE. Subdiretórios abaixo deste são conhecidos como LOCATIONS, onde todas as consultas e modificações são efetuadas. Os subdiretórios abaixo destes são conhecidos como MAPSETS. Estes contêm arquivos e outros subdiretórios que são chamados de ELEMENTOS do banco de dados. Estes, por sua vez, não são criados quando o MAPSET é criado, mas sim dinamicamente conforme os dados são introduzidos no banco de dados.

IDRISI

Sistema produzido pela Graduate School of Geography da Clark University com recursos tanto da própria universidade como da UNESCO através do *United Nations Environment Programn Global Resource Information Database (UNEP/GRID)* e do *United Nations Institute for Trainning and Research (UNITAR) European Office*.

A versão *for windows* facilitou bastante o seu uso, mas ainda continua com alguns problemas como: difícil *customização*, pelo fato de estar baseado numa plataforma PC, fica impossibilitado de trabalhar com grandes bases de dados e apesar de ter diversas ferramentas para análises *raster* e tratamento digital de imagens, não pode fazer qualquer tipo de operação com dados vetoriais.

É até o momento o único dos três sistemas que apresentou um conjunto de funções em que se pode efetuar análises lógicas tanto booleanas, quanto *fuzzy* bem como operações do método *bayesiano*.

ANEXO III

Matriz de correlação dos teores geoquímicos analisados

	Fe	Ca	Mg	Ti	Mn	B	Ba	Bc	Co	Cr	Cu	La	Nb	Ni	Pb	Sc	Sn	Sr	V	Y	Zr	
Fe	1,000																					
Ca	0,111	1,000																				
Mg	0,189	0,649	1,000																			
Ti	0,387	-0,013	-0,043	1,000																		
Mn	0,488	0,007	-0,030	0,470	1,000																	
B	-0,155	-0,011	0,113	-0,117	-0,123	1,000																
Ba	-0,060	0,119	0,465	-0,010	-0,231	0,094	1,000															
Bc	-0,048	0,001	0,036	-0,042	0,003	0,004	0,004	1,000														
Co	0,632	0,197	0,265	0,100	0,487	-0,076	-0,018	-0,043	1,000													
Cr	0,421	0,134	0,382	0,045	0,098	0,002	0,239	-0,061	0,437	1,000												
Cu	0,603	0,195	0,215	0,130	0,375	-0,047	-0,247	0,055	0,623	0,404	1,000											
La	-0,009	-0,026	-0,115	0,393	0,096	-0,083	0,026	-0,021	-0,092	-0,154	-0,057	1,000										
Nb	-0,116	-0,036	-0,069	0,281	0,115	0,037	0,055	0,017	-0,208	-0,224	-0,264	0,258	1,000									
Ni	0,476	0,240	0,477	0,010	0,147	-0,020	0,166	-0,049	0,578	0,705	0,594	-0,178	-0,179	1,000								
Pb	-0,103	-0,027	-0,019	0,262	0,073	-0,032	0,182	0,041	-0,180	-0,188	-0,185	0,575	0,341	-0,181	1,000							
Sc	0,514	0,306	0,369	0,014	0,206	-0,019	-0,056	-0,033	0,446	0,411	0,567	-0,101	-0,091	0,487	-0,113	1,000						
Sn	-0,092	-0,034	-0,093	-0,034	-0,093	-0,019	-0,024	0,004	-0,138	-0,149	-0,140	0,150	0,293	-0,131	0,241	0,019	1,000					
Sr	-0,066	0,194	0,461	0,000	-0,255	0,070	0,939	-0,010	-0,049	0,255	-0,267	0,044	0,076	0,142	0,199	-0,078	-0,024	1,000				
V	0,560	0,207	0,400	0,003	0,160	0,019	0,099	-0,038	0,531	0,568	0,540	-0,182	-0,265	0,595	-0,219	0,572	-0,205	0,107	1,000			
Y	0,002	-0,035	-0,095	0,258	0,146	-0,038	-0,062	-0,004	-0,085	-0,123	-0,021	0,611	0,145	-0,127	0,357	0,068	0,290	-0,055	-0,163	1,000		
Zr	-0,009	-0,013	0,008	0,360	0,044	-0,020	0,260	-0,003	-0,193	-0,077	-0,332	0,100	0,373	-0,137	0,160	0,001	0,244	0,272	-0,158	0,241	1,000	

Matriz de correlação dos teores geoquímicos analisados, com destaque para os valores absolutos acima de 0,500, Roindinelli *et al* (1989).

ANEXO IV

Pré-processamento dos dados

Antes de se iniciar as análises propriamente ditas, foi necessário efetuar processamentos prévios, visando o preparo e conhecimento dos dados. Isto será baseado em análises de erro espacial, análises espaciais prévias, análises estatísticas e escolha do método de interpolação mais adequado para cada tipo de dado. Um bom entendimento dos dados é um pré-requisito essencial para uma boa análise. Esta etapa também engloba a conversão de dados analógicos para o meio digital. Uma vez que a maior parte dos dados já se encontrara digitalizado por ocasião do início deste trabalho, procedeu-se inicialmente o controle de erros dos mesmos.

Cálculo do erro médio quadrático - *RMSE*

Apesar de ser uma etapa fundamental em qualquer projeto baseado em SIG, muitas vezes é negligenciado. A precisão, requerida no meio digital, deve ser considerada conjuntamente com a integração de dados.

Deve ser feito por ocasião de cada mapa digitalizado para se ter controle de cada um. O número calculado será usado, por exemplo, para a determinação do tamanho do *pixel* a ser empregado em dados *raster*. Dependendo da estrutura do dado *raster* pode-se ter representado um fenômeno anisotrópico com variação de resolução a cada eixo de coordenada.

PEC (Padrão de exatidão cartográfica)

$$\begin{array}{l} 50.000 \times 0.15 \\ 7.5 \text{ m} \end{array} \quad \rightarrow \quad \begin{array}{l} 50.000 \times 0.8 \\ 40 \text{ m (desenhista)} \end{array}$$

Desta forma, os dados no seu formato *raster* terão um *pixel* de 30 m, uma vez que esta é a unidade mínima de certeza. A digitalização das zonas anômalas definidas (IPT, 1988) também foi feita com cálculo do RMS que resultou em 25m. A tabela IV.1 traz os parâmetros utilizados para o cálculo do RMSE que foi adotado para o mapa geológico.

X real	X virtual	(Xr - Xv)²	Yreal	Yvirtual	(Yr - Yv)²
222000	221964	1296	7370000	7369969	961
230000	230008	64	7370000	7369983	289
236000	236006	36	7370000	7369993	49
244000	244020	400	7370000	7370030	900
222000	221987	169	7360000	7360002	4
230000	230008	64	7360000	7360015	225
236000	236018	324	7360000	7360017	289
244000	244005	25	7360000	7360005	25
222000	221996	16	7352000	7352035	1225
230000	229997	9	7352000	7352041	1681
236000	236013	169	7352000	73520025	625
244000	244000	0	7352000	7352038	1444
222000	222026	676	7344000	7344030	900
230000	22995	25	7344000	7344003	9
236000	236011	121	7344000	7340017	289
244000	243994	36	7344000	7344001	1

RMS_x = 15

RMS_y = 25

RMS_t = 30

Tabela IV.1: Erro Médio Quadrático do Mapa Geológico digitalizado da folha Pilar do Sul, utilizada neste projeto.

Pré-processamento para os dados altimétricos

O Modelo Digital de Terreno, foi originalmente gerado no formato vetorial (TIN) e transformado para o formato *raster*. Uma discussão extensa entre as vantagens e desvantagens de cada um destes formatos de dados é dada encontrada em Kumler (1994).

As curvas de nível, espaçadas de 20m, foram importadas diretamente de um arquivo DXF para o ArcInfo aproveitando-se os atributos contidos (*elevation*). O *lattice* na terminologia do ArcInfo, foi feito com resolução de célula de 30 metros. Este modelo gerado apresentou diversas depressões (*sinks*) que são resultantes de erros de arredondamento do interpolador o que foi corrigido posteriormente usando ferramentas do próprio ArcInfo.

Com o modelo gerado e corrigido pôde-se gerar alguns subprodutos de importância para este trabalho, especialmente para as análises envolvendo geoquímica.

As bacias bem como as drenagens foram traçadas automaticamente a partir do modelo de elevação digital. Com estas drenagens definidas obteve-se um melhor traçado das drenagens de segunda e terceira ordem que, na maioria das vezes não aparecem no mapa planaltimétrico do IBGE na escala 1:50.000. Essas drenagens são justamente as mais importantes, pois foram nelas onde foram feitas amostragens de sedimentos de corrente.

Considerações sobre os dados geoquímicos

Em qualquer área, a distribuição de um dado elemento, nas rochas, solos e sedimentos é uma resposta a todos os processos que provocam a movimentação de materiais na superfície da Terra. Basicamente, esta distribuição reflete as unidades litológicas, entretanto diversos processos, endógenos ou exógenos, podem modificar esta relação básica aos tipos de rochas. Intemperismo e erosão são alguns dos exemplos dos processos que também atuam na superfície da Terra para modificar os padrões de dispersão dos elementos originários de mineralizações em subsuperfície. Um dos aspectos para se determinar estas dispersões é reconhecer os valores normais de um elemento em material não-mineralizado (*background*). Para cada elemento, a abundância normal é consideravelmente diferente de um tipo de material para outro. Além do mais, mesmo para um mesmo elemento, esta distribuição não é uniforme para áreas diferentes.

Preferencialmente para os dados geoquímicos originados da amostragem de sedimentos de corrente, deve-se fazer uma análise pontual. Ou seja, deve ser feita uma análise de áreas de contribuição a montante ou no máximo para as bacias que contenham pontos de interesse. Isto se deve basicamente ao comportamento geoquímico diferenciado, especialmente à mobilidade dos elementos analisados.

As zonas de interesse metalogenético definidas durante programa PRÓ-MINÉRIO foram traçadas por diversos critérios conforme discutido no capítulo 3. Estas prioridades definidas vão ser importantes para a comparação dos resultados obtidos neste trabalho.

Antes de se efetuar as análises geoquímicas, deve se proceder a diversos procedimentos estatísticos. Neste trabalho serão adotados as análises prévias descritas no capítulo 3 que por sua vez se basearam em IPT (1988). Mesmo assim, certos procedimentos serão essenciais para este trabalho e descritos a seguir. O primeiro deles é a verificação da distribuição das amostras sobre a área, como apresentado na Fig. 3.3 que mostra a distribuição das amostras, das drenagens e das bacias automaticamente traçadas.

O procedimento de se efetuar levantamentos estatísticos sobre as geoquímica relacionada a litologia, será evitado aqui dada a mobilidade dos elementos. Trata-se de uma operação de agregação que não será aplicável aos dados geoquímicos.

Como já apresentado anteriormente foram calculados diversos valores estatísticos univariados para todos os elementos analisados com dados representativos: média-geométrica, aritmética, desvio-padrão, 1º, 2º, 3º e 4º quartil etc. Como análise multivariada foi analisada a matriz de correlação dos elementos estudados que foi apresentada na tabela 3.2. Esta será a estatística usada neste trabalho como separação de amostras anômalas.

Verificação de problemas de localização de amostras geoquímicas

Tendo em vista que na época da coleta das amostras esta foi feita sem uso de GPS foi necessário fazer esta verificação, mesmo havendo controle como descrito nos relatórios do Pró-Minério. Para tanto, foram extraídas automaticamente as drenagens do modelo de elevação digital. Isto porque as drenagens digitalizadas a partir da folha 1:50.000 do IBGE não chegavam ao detalhe necessário para mapear as drenagens utilizadas na campanha. Feito isto calculou-se as distâncias de cada ponto à drenagem mais próximas. Os pontos com distância à drenagem mais próxima maior que o erro admitido foram analisados com ressalvas. Foi então calculado a distância média de cada ponto de amostragem à drenagem traçada do DEM, que foi de 32,44m o que situa o erro muito próximo ao *RMSE* calculado anteriormente. Além disso o desvio padrão elevado de 29,60m desta distância revela que algumas amostras realmente apresentam grande distância às drenagens mais próximas.

Ocorrências Minerais

Como simples forma de apresentação das ocorrências mapeadas visualizou-se sobre as litologias a que estas estão associadas. Parte dos pontos das ocorrências não coincidiram com a descrição da litologia sobreposta apresentada no ponto. Estes pontos então tiveram que ser descartados, uma vez que as coordenadas armazenadas para estes pontos se revelaram não confiáveis no banco de dados conhecido. Ou seja a localização UTM da amostra não coincidia com a litologia descrita. Com os pontos considerados confiáveis pode-se verificar as distâncias com as estruturas mapeadas e definir se há um controle estrutural nestas ocorrências. Deve-se ressaltar que nesta escala deste trabalho esta análise é um pouco incipiente, pois o controle de uma mineralização pode ser local com estruturas que não foram mapeadas nesta escala.

Escolha dos métodos de interpolação

As linhas de vôo têm um espaçamento aproximado de 1.000m e distância de 100m entre amostras de uma mesma linha, neste caso N-S. Em algumas situações seria necessário o uso de uma *krigagem* anisotrópica, o que não está disponível nos SIGs atualmente. Daí o principal motivo em se usar ferramentas mais apropriadas da Geoestatística.

Para os dados de aeromagnetometria foi utilizado um modelo de variograma magnético definido a partir da própria definição do espectro magnético. Como este modelo só era disponível no GSLIB, foi feito um programa em C para converter dados do ArcInfo para o GSLIB e interpolar uma superfície e depois ser integrada ao ArcInfo novamente. Esta interpolação utilizou o modelo de variograma específico para dados magnéticos disponíveis. No ajuste do variograma foi utilizado o ANAVAR.

Variável	# overshoots	# undershoots	Resíduo com a vizinhança (3x3)
U	458	428	1.414783
Th	139	1013	1.104443
K	1265	45	0.174083

Tabela IV.3: Comparação dos resíduos para os pontos amostrados de aeroradiometria para as superfícies geradas.

No caso da magnetometria optou-se pelo uso do modelo magnetométrico disponibilizado pelo GSLIB para a geração da superfície. Este modelo aplicado para a área em estudo por Remacre & Braghin (1997). A grande vantagem deste modelo de variograma é que foi baseado na própria natureza do dado, favorecendo uma melhor interpolação. Além do mais, foi feita considerando anisotropia do dado. Foi gerado um *grid* com tamanho de célula de 125m e diferentes raios de amostragem tendo o cuidado de se obter um maior raio na direção perpendicular a linha de vôo.

Já para as superfícies de aeroradiometria (U, Th, K) optou-se pela comparação dos variogramas gerados por 5 modelos diferentes disponibilizados pelo ArcInfo. Como o próprio *software* se encarrega de ajustar o variograma, que é em uma única direção, pode-se escolher o modelo que melhor se ajusta e interpolar com este estimador ajustado. Sendo assim foi usado o modelo exponencial para o U e Th e para o K usou-se o circular. Para as três interpolações usou-se um raio de procura de 2.000m com tamanho de célula de 125m.

Variável	c0	c	r	sill	Modelo de variograma
U	33,165	245,957	2844,974	249,272	Exponencial
Th	45,325	19,881	1723,219	64,216	Exponencial
K	81,535	91,931	2053,251	173,466	Esférico

Tabela IV.4: Parâmetros utilizados para a interpolação das superfícies de U, Th e K.

A interpolação de dados para geração de superfícies é um problema que afeta qualquer projeto baseado em SIG. Foi feito um conjunto de AMLs e MENUs que usando os interpoladores do ArcInfo, permitiu experimentações e controle dos métodos. Uma comparação dos métodos de interpolação disponibilizados pelo ArcInfo, TREND, IDW, TIN e KRIGING, é apresentado por Hu (1995). Neste trabalho é sugerida a comparação dos resíduos através de dois conjuntos de estatísticas: univariada (média, moda, mediana e desvio padrão dos resíduos) e bivariada, com o cálculo da correlação entre os valores reais e os valores interpolados.

A partir de cada superfície gerada, verificou-se o valor para cada ponto original e o valor do ponto interpolado na mesma localização. A diferença entre estes dois valores chamou-se resíduo. À média dos resíduos chamou-se de viés do método para o conjunto de dados. Para se normalizar os diversos valores de média calculados, dividiu-se cada média de resíduos pelo respectivo desvio padrão. A superfície que apresentava menor valor era a escolhida para aquele dado. Na Tab. 4.3 são apresentados os métodos utilizados e os dados em questão e a superfície escolhida. Para os dados de aerogeofísica, optou-se pela verificação em relação a média dos valores de uma matriz de tamanho 3 x 3 ao redor do valor original. Esta mesma matriz também foi usada para o cálculo do número de *overshoots* (sobre-estimação) e *undershoots* (sub-estimação). Isto é feito comparando o valor original em relação ao menor valor desta janela, se menor, há um *undershoot*, se maior que o maior valor desta janela, tem-se um *overshoot*.

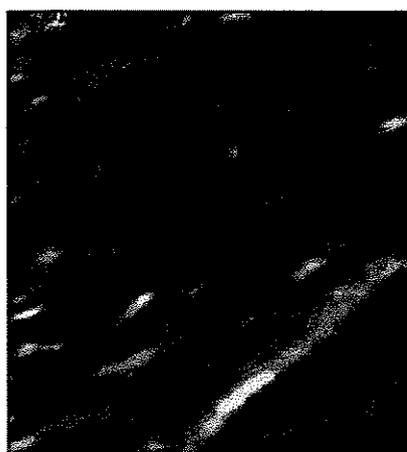
A *krigagem*, disponibiliza também o cálculo de uma superfície de variância, que não foi utilizado neste trabalho. Isto porque os valores mais altos desta superfície equivalem justamente àquelas regiões sub-amostradas. No caso da aerogeofísica, estas áreas sub-amostradas já são conhecidas como as áreas entre as linhas de vôo que tem espaçamento de 1.000m. Foram comparados então, os resíduos e o número de *overshoots* e *undershoots*. Para o caso da aeroradiometria, ficou evidente que mesmo tendo alguns cuidados para a escolha do interpolador, o resultado não foi muito satisfatório, devendo as superfícies ser geradas e encaradas com a devida incerteza.

Berry (1997) discute o espalhamento dos resíduos numa superfície contínua, interpolada por *krigagem*. Este método foi escolhido também com a comparação do resíduo de outros métodos e revelou-se o mais preciso para a base de dados utilizada.

Pré-análises com os dados aerogeofísicos

O processamento inicial dos dados, foi feito pela própria CPRM, sendo que os dados já foram recebidos no formato X Y Z. Anjos & Mourão (1988) descrevem os diversos pré-processamentos dos dados aerogeofísicos para a referida sub-área que abrange a Folha Pilar do Sul, desde a obtenção dos dados brutos dispostos em 5 canais (magnetometria, tório, urânio, potássio e contagem total). Sendo assim, para os dados aeromagnetométricos foram feitos o nivelamento magnético e a redução do campo geomagnético (IGRF). Já para os dados gamaespectométricos foram feitas as seguintes correções: redução do ruído de fundo atmosférico, correção do efeito Compton e correção altimétrica.

Para o conhecimento inicial dos dados de aeromagnetometria a geração de superfícies sombreadas com iluminosidades em diferentes direções pode realçar diferentes estruturas, o que pode ser visto na Fig. IV.1.



Azimute

315°



45°

Figura IV.1: Imagens de relevo sombreado da superfície de aeromagnetometria com diferentes azimutes para realce de estruturas magnéticas de diferentes direções. A inclinação da fonte de luz é a mesma (45°).

No caso de dados aeromagnetométricos, este tipo de visualização permite verificar diversas situações importantes. O mais evidente é a resposta magnética com direção NE ao sul da área correspondendo ao Falhamento de Belchior, visto com

luminosidade de 315 °. Com outro ângulo de luminosidade é possível identificar um *trend* com direção NW também ao sul da área que no mapa geológico corresponde apenas a alguns fotolineamentos traçados na região, mas que nitidamente é uma estrutura ou mesmo dique que não foi mapeado.

Para um melhor tratamento/análise dos dados aeroradiométricos, foram consideradas três macro regiões para os mesmos: Bacia do Paraná, Complexos Graníticos e Grupo Açungui.

O primeiro grupo, não apresenta muito interesse para este trabalho, portanto não será analisado. Já os dois últimos são importantes para este trabalho. Foram selecionados então os pontos pertencentes a cada um destes grupos e determinado os parâmetros necessários para delimitação das áreas de interesse para cada domínio. Das 7808 medições na área, foram selecionadas para o domínio dos granitos 3033 medições e para o domínio da seqüência meta-vulcanossedimentar (Grupo Açungui), 3323.

Domínio	Média Aritmética (U)	Desvio Padrão (U)	Variância (U)
Seq. Meta-vulcanossedimentar	10,99832	7,18328	51,59952
Granitos / Granitóides	15,60937	8,12306	65,98406
Domínio	Média Aritmética (Th)	Desvio Padrão (Th)	Variância (Th)
Seq. Meta-vulcanossedimentar	16,77622	11,85932	140,64341
Granitos / Granitóides	19,88975	16,35776	267,57651
Domínio	Média Aritmética (K)	Desvio Padrão (K)	Variância (K)
Seq. Meta-vulcanossedimentar	308,66010	110,45297	12199,85893
Granitos / Granitóides	480,62558	178,02403	31692,55863

Tabela IV.2: Parâmetros estatísticos para os canais de U, Th e K, nos dois domínios de interesse metalogenético.

Apesar de algumas diferenças geológicas com a região de São Paulo, no vale do Ribeira, onde aflora a Formação Águas Claras, Drews & Vasconcelos (1991), já afirmaram que as anomalias observadas pelo método magnético não apresentaram relação direta com as mineralizações da área. Observou-se, no entanto, que corpos aflorantes de metamarga carbonosa com grafita, pirita e pirrotita apresentaram anomalia isolada, algo semelhante a alguns corpos grafitosos encontrados na região de Pilar do Sul. Sob este aspecto, ao menos para as mineralizações de Cu, Pb e Zn já definidas no Vale do Ribeira, não puderam ser identificados quantidades apreciáveis de minerais

A mesma observação feita em relação à mobilidade dos elementos geoquímicos analisados, deve ser feita aos canais de U, Th e K. Principalmente este último, dada a sua alta mobilidade.

Para a definição das áreas de interesse as superfícies geradas terão diferentes abordagens nas lógicas e método estudado.

Um procedimento básico para se trabalhar com este tipo de dado é a composição colorida em RGB das três variáveis (U, Th e K), visto na Fig. IV.2 e com sua posterior seleção de áreas de interesse.

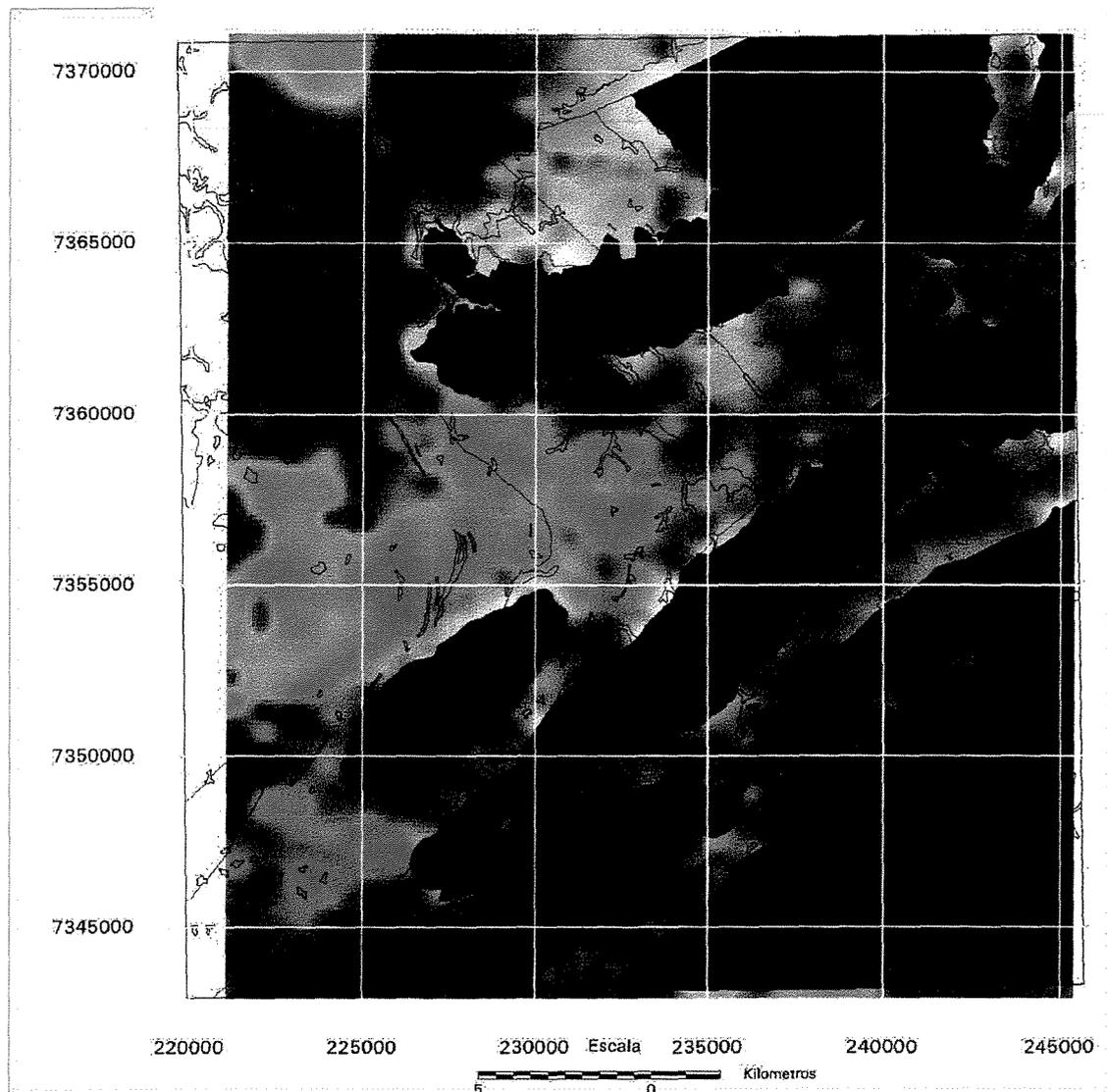


Figura IV.2: Composição colorida em RGB para U, Th e K respectivamente para os domínios do Grupo Açungui e Bacia do Paraná.