



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO

**APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO PARA ELABORAÇÃO DE
MAPA DE FAVORABILIDADE PARA OCORRÊNCIAS DE
MINERALIZAÇÕES DE CHUMBO E ZINCO NA REGIÃO DE VAZANTE-
PARACATU, MG**

Marina Dias Hanna

Marina Marques Dalla Costa

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Tati de Almeida

MONOGRAFIA DE CONCLUSÃO DE CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO

BRASÍLIA

2015

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO

**APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO PARA ELABORAÇÃO DE
MAPA DE FAVORABILIDADE PARA OCORRÊNCIAS DE
MINERALIZAÇÕES DE CHUMBO E ZINCO NA REGIÃO DE VAZANTE-
PARACATU, MG**

**Marina Dias Hanna
Marina Marques Dalla Costa**

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Tati de Almeida

BRASÍLIA

2015

AGRADECIMENTOS

À Universidade de Brasília e ao Instituto de Geociências, que permitiram o uso dos equipamentos e das dependências do Laboratório de Computação. Aos professores e técnicos responsáveis pelo curso de Especialização em Geoprocessamento da Universidade de Brasília, pelo conhecimento transmitido ao longo do processo e pela ajuda, em especial aos professores que tornaram possível a realização desse trabalho. Por fim, aos alunos Gabriel Topã, Débora Rabelo Matos e Larissa Ane de Sousa Lima, pelo auxílio.

RESUMO

A região entre as cidades de Vazante-Paracatu, localizada no oeste do estado de Minas Gerais, possui diversos depósitos importantes de zinco (Zn) e chumbo (Pb), compondo o maior distrito zincífero do Brasil. Na área de estudo, situada entre as cidades supra citadas, destacam-se dois depósitos significativos desses elementos, a Mina de Vazante e a Mina de Morro Agudo. O presente trabalho tem por objetivo realizar a integração de dados multifontes de forma a produzir um mapa de favorabilidade para ocorrência de Zn e Pb na região de Vazante-Paracatu. Para isso, foram utilizados os métodos *fuzzy* e soma ponderada para a integração de dados litológicos, estruturais, geoquímicos e de sensoriamento remoto. Os resultados obtidos indicam regiões de alta favorabilidade para ocorrência de mineralizações de Zn e Pb na porção central da área, coincidindo com uma grande dobra. O resultado obtido é corroborado pela localização das Minas de Vazante e Morro Agudo, as quais ocorrem nas regiões classificadas como de alta favorabilidade. Enquanto a integração empregando a técnica *fuzzy* permitiu a geração de um mapa menos restritivo, detectando maior quantidade de áreas, o método da soma ponderada resultou em um mapa mais restritivo, portanto, com menos áreas favoráveis, facilitando a visualização. Por fim, concluiu-se, ainda, que os mapas de favorabilidade são ferramentas úteis em campanhas e projetos de exploração mineral.

Palavras-chave: Lógica *fuzzy*, soma ponderada, mapa de favorabilidade, mineralizações de Zn e Pb, Vazante-Paracatu

ABSTRACT

The Vazante-Paracatu region, located in northwest Minas Gerais state, has many significant deposits of zinc (Zn) and lead (Pb) that comprises the biggest known zinc district of Brazil. In the study area, located between the cities of Vazante and Paracatu, occurs two important Pb-Zn mines, the Vazante and Morro Agudo mines. The main objective of this work is to integrate data, according to predefined prospective models for these two deposits, aiming to produce a favorability map for occurrences of Zn e Pb in the region of Vazante-Paracatu. The fuzzy logic and weighted sum methods were applied in order to integrate lithological, structural, geochemistry and remote sensing data. Results show that regions with high favorability for occurrences of Zn and Pb mineralizations are restricted to the central portion of the area, which coincides with the occurrence of a great folded structure. The high favorability areas delineated in this study are corroborated by their coincidence with the location of the Vazante and Morro Agudo mines. The fuzzy integration method originated a map less restrictive, however more polluted, while the weighted sum integration method created a more restrictive map – therefore with fewer favorable areas –, but with a better display. Finally, it can be concluded that favorability maps are very useful tools for mineral exploration campaigns and projects.

Key words: Fuzzy Logic, Weighted Sum method, favorability map, Zn and Pb mineralizations, Vazante-Paracatu

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. 1. Mapa de localização da área de estudo, entre os Municípios de Paracatu, a norte, e Vazante, a sul.....	14
Figura 1.2. (A) Mapa de localização da Faixa Brasília e do Cráton São Francisco (Dardenne, 2000);	16
Figura 1.3. Fluxograma com as etapas adotadas na análise de favorabilidade (modificado de Araújo & Macedo, 2004).....	18
Figura 3.1. Fluxograma indicando os procedimentos realizados para geração dos produtos finais.	25
Figura 3.2. Resultado do processamento realizado para ressaltar possíveis morros de composição carbonática. As regiões de coloração avermelhada correspondem aos possíveis alvos de interesse. (A) Processamento com filtro passa baixa de matriz de convolução 5 x 5. (B) Processamento com filtro passa baixa de matriz de convolução 5 x 5 com aplicação da máscara confeccionada para o intervalo de altitude de 680 a 1.100 metros.....	26
Figura 3.3. Imagem Landsat 8 com composição colorida RGB 564. Na imagem são destacadas em amarelo duas ocorrências de morrotes de composição carbonática nos quais é possível observar a coloração avermelhada devido à presença de cobertura vegetal, bem como a textura característica destes corpos.....	27
Figura 3.4. Delimitação de alvos de ocorrência potencial de morros de carbonatos, obtida por meio da análise conjunta da imagem Landsat8, do modelo digital de elevação e dos produtos dos processamentos descritos anteriormente. As áreas demarcadas em vermelho representam as regiões com maior possibilidade de presença de carbonatos.....	28
Figura 3.5. Mapa geológico da região de Vazante – Paracatu em escala 1:1.000.000 realizado pela CPRM. A legenda indica a nomenclatura das unidades de acordo com o estabelecido pela CRPM (Heineck <i>et al.</i> , 2004).....	29
Figura 3.6. Fluxograma indicando os procedimentos realizados para extração das feições lineares da área, bem como os processamentos posteriores para obtenção de dados referentes ao fator estrutural do modelo prospectivo.....	30
Figura 3.7. Lineamentos extraídos com base na análise da imagem Landsat 8 e do modelo digital de elevação tanto para feições de relevo (marcadas em vermelho) quanto para feições de	

drenagem (marcadas em azul). (A) representa os lineamentos de relevo e drenagem e (B) representa os lineamentos de relevo e de drenagens maiores que 2 km.	32
Figura 3.8. Rosetas e histogramas de frequência obtidos a partir dos lineamentos traçados. (A) Roseta de azimute e histogramas de frequência de azimute e de comprimento dos lineamentos de drenagem, (B) Roseta de azimute e histogramas de frequência de azimute e de comprimento dos lineamentos de drenagem maiores que 2 km e (C) Roseta de azimute e histogramas de frequência de azimute e de comprimento dos lineamentos de relevo.....	33
Figura 3.9. Fluxograma indicando as etapas realizadas para o tratamento dos dados de geoquímica de sedimentos de corrente.....	34
Figura 3.10. Sub-bacias de influência das análises geoquímicas de sedimento de corrente para (A) Cu, (B) Pb e (C) Zn.....	37
Figura 3.11. Gráficos tipo <i>boxplot</i> elaborados a partir dos dados geoquímicos de sedimentos de corrente para Cu, Zn e Pb. Os pontos coloridos em cada caixa do gráfico indicam as medianas de cada conjunto de dados, e os limites das linhas pontilhadas correspondem aos limiães superior e inferior.....	38
Figura 4.1. Diagrama de Venn ilustrando a diferença de limites entre um conjunto <i>fuzzy</i> (A) e um conjunto booleano (B) (Burrough, 1998, <i>apud</i> Lima, 2013).....	40
Figura 4.2. Ilustração que demonstra o cálculo matemático realizado pela ferramenta de integração soma ponderada (<i>weighted sum</i>) do ArcGis 10.1. (Retirada da ferramenta "ajuda" do programa ArcGis 10.1.)	42
Figura 4.3. Fluxograma com as diferentes etapas empregadas na integração <i>fuzzy</i> . (A) Integração dos mapas de pertinência para anomalias geoquímicas de Pb, Zn e Cu por meio do operador <i>gamma</i> . (B) integração dos mapas de pertinência elaborados para os fatores litológico e estratigráfico utilizando o operador <i>gamma</i> . (C) integrações dos mapas de pertinência dos lineamentos de relevo e drenagem por meio do operador <i>sum</i> , obtendo um produto integrado para lineamentos de direção NE e outro para os de direção NW.	45
Figura 4.4. Mapa de favorabilidade para o Modelo de Vazante obtido a partir da aplicação do método <i>fuzzy</i> de integração, apresentado em variação de 0 (baixa favorabilidade) a 1 (alta favorabilidade). (Anexo 3).....	57

Figura 4.5. Mapa de favorabilidade para o Modelo de Morro Agudo obtido a partir da aplicação do método fuzzy de integração, apresentado em variação de 0 (baixa favorabilidade) a 1 (alta favorabilidade). (Anexo 5).....	48
Figura 4.6. Mapa de favorabilidade para o Modelo de Vazante obtido a partir da aplicação do método fuzzy de integração, apresentado na forma de intervalo. (Anexo 4).....	49
Figura 4.7. Mapa de favorabilidade para o Modelo de Morro Agudo obtido a partir da aplicação do método fuzzy de integração, apresentado na forma de intervalo. (Anexo 6).....	50
Figura 4.8. Fluxograma com as etapas adotadas na integração por meio da técnica da soma ponderada. A ponderação foi feita utilizando os dados apresentados na Tabela 4.4.....	51
Figura 4.9. Mapa de favorabilidade para o Modelo de Vazante obtido a partir da aplicação do método da soma ponderada de integração, apresentado em variação de 0 (baixa favorabilidade) a 1 (alta favorabilidade). (Anexo 7).....	53
Figura 4.10. Mapa de favorabilidade para o Modelo de Morro Agudo obtido a partir da aplicação do método da soma ponderada de integração, apresentado em variação de 0 (baixa favorabilidade) a 1 (alta favorabilidade). (Anexo 9).....	54
Figura 4.11. Mapa de favorabilidade para o Modelo de Vazante obtido a partir da aplicação do método da soma ponderada de integração, apresentado na forma de intervalo. (Anexo 8).....	55
Figura 4.12. Mapa de favorabilidade para o Modelo de Morro Agudo obtido a partir da aplicação do método da soma ponderada de integração, apresentado na forma de intervalo. (Anexo 10).....	56

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1. Relação dos produtos utilizados na etapa de tratamento de dados.	19
Tabela 2.1. Descrição dos fatores do modelo prospectivo elaborado para o depósito de Vazante.	22
Tabela 2.2. Descrição dos fatores do modelo prospectivo elaborado para o depósito de Morro Agudo.	23
Tabela 3.1. Resultados obtidos no tratamento estatístico dos dados de geoquímica de corrente utilizando o método <i>boxplot</i> de Tuckey (1977).....	36
Tabela 4.2. Operadores utilizados na técnica de integração <i>fuzzy</i> e suas respectivas descrições.....	42
Tabela 4.3. Funções e parâmetros utilizados para atribuição de valores de pertinência para os produtos referentes a cada fator prospectivo.....	44
Tabela 4.4. Ponderação atribuída aos mapas de pertinência para a aplicação da técnica de soma ponderada.	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CPRM	Serviço Geológico do Brasil
Cu	Cobre
MDE	Modelo Digital de Elevação
MME	Ministério de Minas e Energia
MVT	Mississippi Valley Type
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
Pb	Chumbo
SEDEX	Sedimentar exalativo
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
USGS	United States Geological Survey
WGS	World Geodetic System
Zn	Zinco

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	13
1.1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1.1. Apresentação	13
1.1.2. Localização da área de estudo	13
1.1.3. Objetivos	14
1.2. CONTEXTO GEOLÓGICO.....	14
1.3. MATERIAIS E MÉTODOS	17
CAPÍTULO 2. MODELOS DESCRITIVO, GENÉTICO E PROSPECTIVO	20
2.1. INTRODUÇÃO.....	20
2.2. MODELO DE VAZANTE.....	20
2.3. MODELO DE MORRO AGUDO	22
CAPÍTULO 3. DADOS DE ENTRADA.....	24
3.1. FATOR LITOLÓGICO	24
3.2. FATOR ESTRATIGRÁFICO	28
3.3. FATOR ESTRUTURAL	29
3.4. FATOR GEOQUÍMICO.....	34
CAPÍTULO 4. INTEGRAÇÃO DE DADOS	39
4.1. INTRODUÇÃO TEÓRICA	39
4.2. MAPAS DE PERTINÊNCIA	43
4.3. INTEGRAÇÃO DE DADOS	45
4.3.1. Lógica <i>Fuzzy</i>	45
4.3.2. Soma ponderada	50
CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES.....	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59
ANEXOS	63

PREÂMBULO

O presente trabalho de conclusão do curso de Especialização em Geoprocessamento Ambiental do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília está organizado na forma de monografia, adotando as normas exigidas pela Coordenação de Especialização em Geoprocessamento. A monografia encontra-se dividida em cinco capítulos, organizados da seguinte forma:

- ❖ **CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO:** Este capítulo apresenta de forma sucinta o tema e os objetivos do trabalho, bem como sua justificativa, e especifica a área de estudo, o contexto geológico em que se insere e os materiais e métodos adotados.

- ❖ **CAPÍTULO 2. MODELOS DESCRITIVO, GENÉTICO E PROSPECTIVO:** Neste capítulo são apresentados os modelos descritivo, genético e prospectivo elaborados para os depósitos de Morro Agudo e Vazante utilizando a bibliografia existente para a área de estudo.

- ❖ **CAPÍTULO 3. DADOS DE ENTRADA:** Nesta seção, o processamento dos dados utilizados na integração é apresentado juntamente com os resultados obtidos para cada produto.

- ❖ **CAPÍTULO 4. INTEGRAÇÃO DE DADOS:** Neste capítulo, são tratados os métodos de integração empregados no trabalho, com uma sucinta explanação teórica acerca de cada método, seguida dos resultados obtidos e respectivas discussões.

- ❖ **CAPÍTULO 5. CONCLUSÃO:** O capítulo final traz uma síntese dos resultados obtidos, além das principais conclusões feitas acerca dos métodos adotados.

- ❖ **ANEXOS:** Nessa seção são apresentados os resultados mais significativos em tamanho maior, proporcionando melhor visualização dos mesmos.

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

1.1. INTRODUÇÃO

1.1.1. Apresentação

A análise de favorabilidade constitui uma importante etapa em um processo decisório, técnica essa que vem sendo usada pela indústria mineral e por agências governamentais como um dos meios de avaliação de áreas para investimentos prioritários na exploração de recursos minerais (Franca-Rocha *et al.* 2000).

O Brasil possui diversas ocorrências de zinco (Zn) e chumbo (Pb) distribuídas ao longo de seu território. A região de Vazante-Paracatu, situada na porção noroeste de Minas Gerais, representa o maior distrito zincífero conhecido do país, incluindo diversos depósitos importantes, dos quais se destacam Vazante, Morro Agudo, Ambrósia e Fagundes, todos associados a rochas de composição carbonática (Monteiro, 2002; Neves, 2011). Devido a esta expressividade mineral, a área de Vazante-Paracatu foi escolhida para este projeto.

O objetivo desse trabalho é a produção de mapas de favorabilidade de ocorrências de Pb e Zn na região de Vazante-Paracatu, no extremo oeste do estado de Minas Gerais utilizando integração de dados. Para isso, foi utilizado os métodos *fuzzy* e soma ponderada para a integração de dados litológicos, estruturais, geoquímicos e de sensoriamento remoto. O produto gerado pode ser utilizado para guiar o tomador de decisão na escolha de áreas com maiores probabilidades de sucesso exploratório

1.1.2. Localização da área de estudo

A área de estudo está localizada entre os municípios de Paracatu e Vazante, em Minas Gerais, aproximadamente a 500 km de Belo Horizonte e a 350 km de Brasília (Figura 1.1). A área situa-se entre as coordenadas 8107000N, 7997000N, 268000E e 330000 E¹, somando 7.000 km². O acesso à área pode ser feito a partir da BR-040.

¹Sistema de Projeção Universal Transversa de Mercator, zona 23S, *datum* horizontal WGS-84.

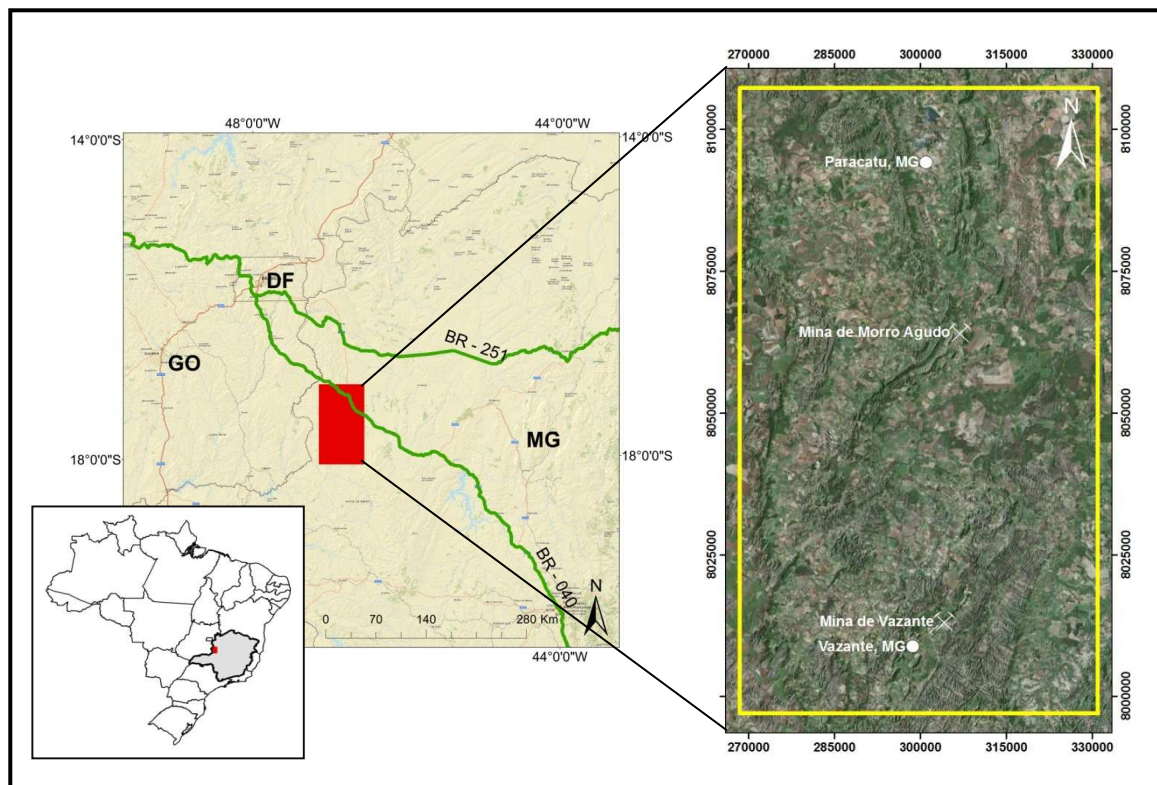


Figura 1. 1. Mapa de localização da área de estudo, entre os Municípios de Paracatu, a norte, e Vazante, a sul.

1.1.3. Objetivos

O objetivo deste trabalho é apresentar, a partir da integração de dados de sensoriamento remoto, geologia e geoquímica da região de Vazante-Paracatu, utilizando os métodos da lógica *fuzzy* e da soma ponderada, um mapa de favorabilidade de ocorrência de minerais de chumbo e zinco na área de estudo gerado a partir dessa integração.

1.2. CONTEXTO GEOLÓGICO

A Faixa de Dobramentos Brasília (Almeida, 1967) (Figura 1.2. A) localiza-se no Brasil central e possui extensão de cerca de 1.100 km na direção N-S (Fuck, 1994; Fuck *et al.*, 1993 e 2005). Esta entidade geológica, juntamente com as faixas Araguaia e Paraguai, compõe a Província Tocantins, um orógeno desenvolvido no Neoproterozóico devido à colisão de três blocos continentais denominados crátons São Francisco, Amazonas e Paranapanema, que culminaram na formação do supercontinente Gondwana (Pimentel *et al.*, 1999; Dardenne, 2000).

A Faixa Brasília é caracterizada pela diversidade de terrenos e de graus metamórficos, sendo disposta em um conjunto de dobramentos e lascas de empurrão com vergência para o

cráton São Francisco, com aumento progressivo da intensidade do metamorfismo e da deformação para oeste (Fuck, 1994; Fuck *et al.*, 1993; Dardenne 2000).

A compartimentação da Faixa Brasília é caracterizada longitudinalmente por dois segmentos de direções estruturais distintas, sendo um braço norte, de direção dominante NE-SW, e um braço sul, de direção NW-SE, com a separação destes braços marcada pela Sintaxe dos Pirineus (Araújo Filho, 2000). No segmento meridional da faixa, em sua zona externa, ocorrem sequências de rochas sedimentares e metassedimentares dos Grupos Araí, Paranoá, Serra da Mesa, Canastra, Araxá, Ibiá, Vazante e Bambuí (Pimentel *et al.*, 1999; Dardenne 2000; Pimentel *et al.* 2001).

Na região de Vazante-Paracatu são identificadas rochas pertencentes aos grupos Canastra e Vazante (Heineck *et al.*, 2004). O Grupo Canastra (Barbosa, 1955; Barbosa *et al.*, 1970) estende-se em uma faixa contínua entre o sudoeste de Minas Gerais e o centro oeste de Goiás, e é composto por uma sucessão de rochas metapsamíticas e metapelíticas, com níveis carbonáticos e carbonosos, consistindo principalmente em filitos e quartzitos metamorfizados na fácies xisto verde (Dardenne, 2000).

Dardenne *et al.* (1998) e Dardenne (2000) definiram as unidades formais do Grupo Vazante, o qual consiste em uma espessa pilha de sedimentos pelito-carbonatados metamorfizados em fácies xisto verde baixo e distribuídos ao longo de 250 km, desde a cidade de Coromandel (MG) até Unaí (MG), em uma faixa com largura média de 20 a 35 km. Esta faixa possui geometria em forma de arco com concavidade voltada para oeste marcada pela flexão do Rio Escuro, que a divide em dois setores com características estratigráficas, estruturais e metalogenéticas distintas. No setor norte, ocorrem os depósitos de Pb e Zn sulfetados de Morro Agudo, Ambrosia e Fagundes, hospedados nas rochas do Membro Pamplona Superior da Formação Morro do Calcário. No setor sul, localiza-se a mineralização de Zn silicatado que caracteriza o depósito de Vazante, hospedado em litologias do Membro Pamplona Inferior da Formação Serra do Poço Verde (Dardenne, 2000; Monteiro *et al.*, 2006, 2007) (Figura 1.2 B e C).

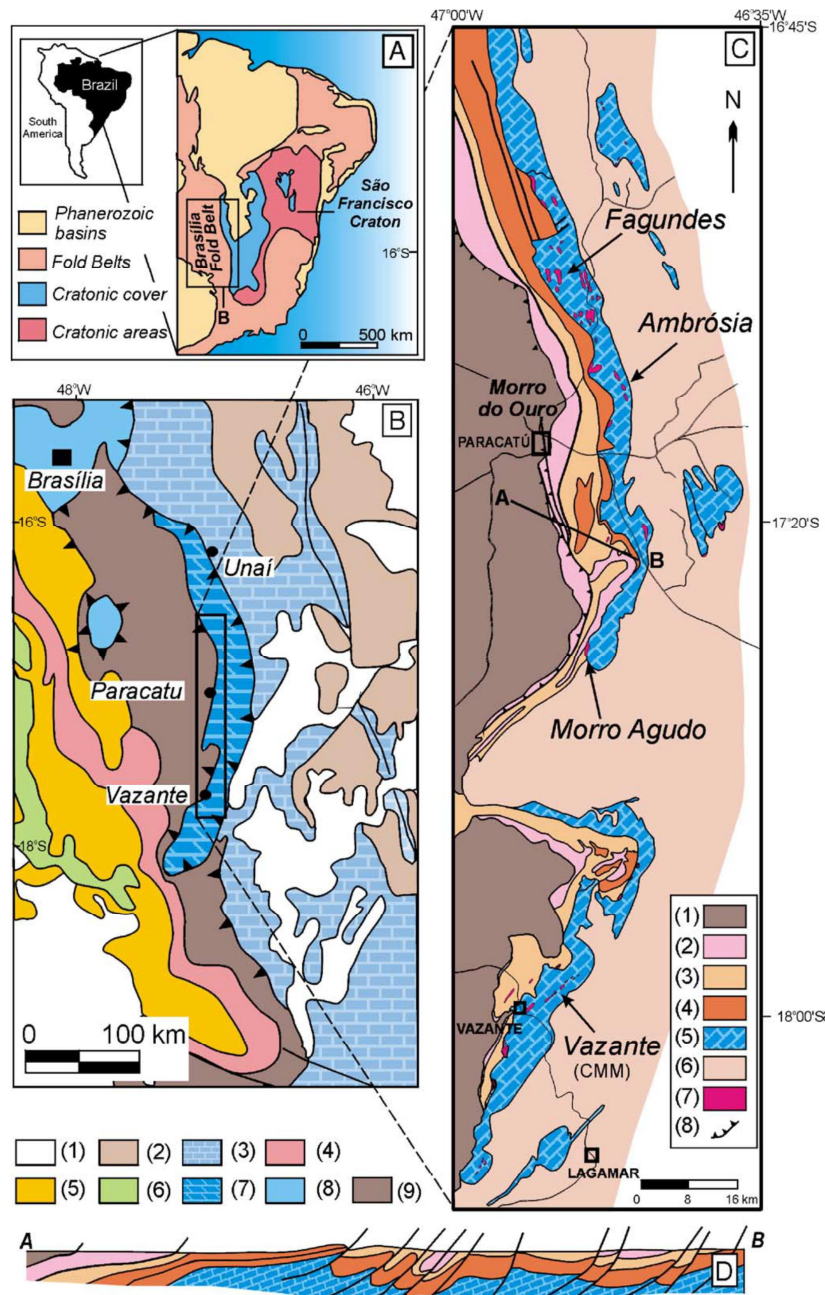


Figura 1.2. (A) Mapa de localização da Faixa Brasília e do Cráton São Francisco (Dardenne, 2000);
(B) Mapa geológico da parte sul da Faixa Brasília (Dardenne, 2000): (1) Bacias Fanerozoicas; (2) Gr. Bambuí, Fm. Três Marias; (3) Gr. Bambuí, Subgr. Paraopeba; (4) Gr. Araxá; (5) Gr. Paranoá; (6) Fm. Ibiá; (7) Gr. Vazante; (8) Granulitos e ortogneisses félsicos e máficos; (9) Gr. Canastra;
(C) Mapa geológico do Gr. Vazante e localização dos depósitos de Vazante, Ambrósia e Fagundes (Votorantim Metais): (1) Gr. Canastra, Fm. Paracatu; (2) Gr. Canastra, Fm. Serra do Landim; (3) e (4) Gr. Vazante, Fm. Lapa; (5) Gr. Vazante, Fms. Morro do Calcário e Serra do Poço Verde; (6) Gr. Vazante, Fm. Serra do Garrote; (7) Anomalias de Pb; (8) Falha
(D) Perfil da seção do Gr. Vazante.
 Modificado de Monteiro *et al.* 2006.

1.3. MATERIAIS E MÉTODOS

O método de trabalho aplicado neste projeto constituiu três etapas principais: (1) etapa conceitual, que compreendeu pesquisa bibliográfica e elaboração dos modelos descritivo, genético e prospectivo para os depósitos de Vazante e Morro Agudo; (2) etapa de tratamento de dados, a qual visou à construção do banco de dados digitais bem como o seu processamento; e (3) etapa de integração, na qual foram aplicadas as técnicas de integração de dados e gerados os mapas e favorabilidade mineral (Figura 1.3).

Na etapa conceitual, para a elaboração dos modelos descritivo e genético, procedeu-se ao levantamento de dados da literatura com vistas à descrição das feições que caracterizam os depósitos de Vazante e Morro Agudo e os processos que atuaram em sua gênese, respectivamente. A definição destes dois modelos subsidiou a confecção do modelo prospectivo e, conseqüentemente, a seleção dos parâmetros prospectivos aplicáveis à análise de favorabilidade. A correta definição de tais parâmetros tem consequência direta na natureza dos dados selecionados para a integração bem como no seu processamento, de forma que a etapa conceitual balizou a tomada de decisão de todas as etapas seguintes.

De acordo com Araújo & Macedo (2004), devido às peculiaridades da utilização de sistemas de informação geográfica no mapeamento de favorabilidade, não é possível utilizar todos os parâmetros definidos para o modelo prospectivo. A principal limitação encontrada neste trabalho foi a inexistência ou indisponibilidade de alguns dos dados definidos no modelo prospectivo, de forma que foi necessário adequá-lo às particularidades dos dados disponíveis. Além disso, destaca-se que alguns dos dados disponíveis não possuem as características ideais, porém foram utilizados por corresponderem aos melhores dados existentes.

Na etapa de tratamento de dados, foram processados produtos provenientes de sensores orbitais e informações obtidas em projetos de pesquisa desenvolvidos pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), conforme listado na Tabela 1.1. O processamento dos dados de sensores orbitais foi realizado com o auxílio do *software* ENVI 5.1, e tratamentos posteriores destes produtos, assim como dos demais dados listados na Tabela 1.1, foram realizados por meio do *software* ArcGIS 10.1. Tendo em vista que o processamento específico realizado para cada conjunto de dados foi função dos parâmetros estabelecidos no modelo prospectivo, optou-se por apresentar tais processamentos após o detalhamento dos modelos descritivo, genético e prospectivo (Capítulo 2), nos tópicos destinados a cada fator prospectivo a ser aplicado na análise de favorabilidade (Capítulo 3).

Para a integração dos diversos produtos gerados, e consequente elaboração dos mapas de favorabilidade, optou-se pela utilização das técnicas de Lógica Nebulosa, ou Lógica *Fuzzy*, e Soma Ponderada (*Weighted Sum*), que foram aplicadas com auxílio do *software* ArcGIS 10.1.

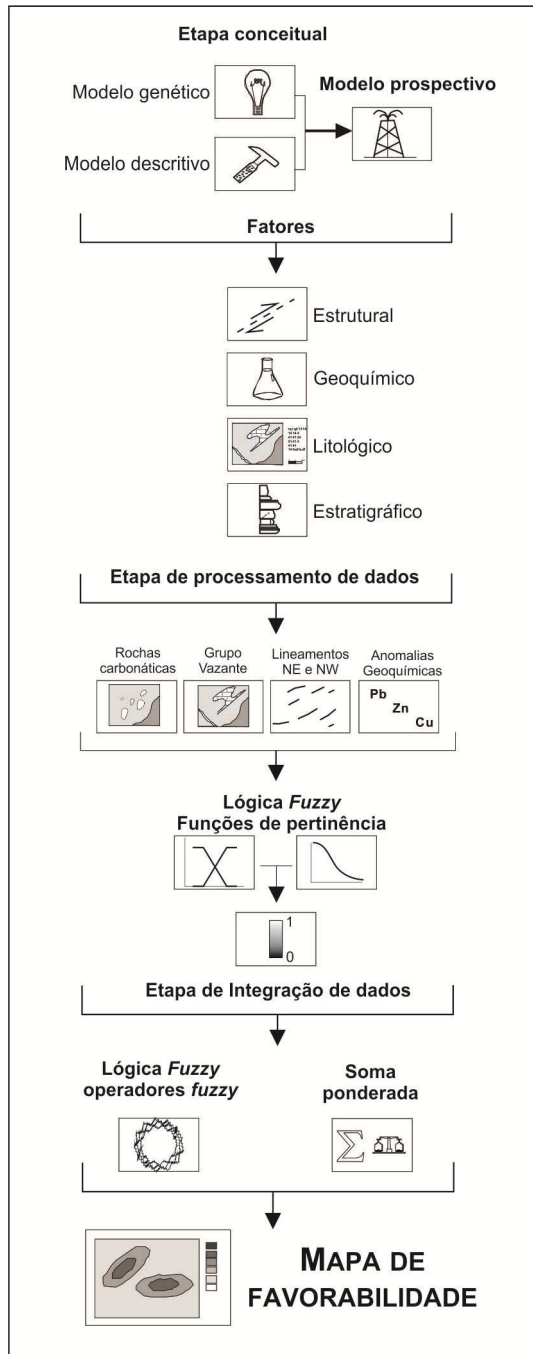


Figura 1.3. Fluxograma com as etapas adotadas na análise de favorabilidade. (modificado de Araújo & Macedo, 2004).

Tabela 1.1. Relação dos produtos utilizados na etapa de tratamento de dados.

Produto	Detalhamento	Fonte do dado
1. Imagem adquirida pelo sensor OLI – satélite Landsat 8	Cena órbita ponto 220_072; resolução espacial: banda pancromática: 15 m, demais bandas: 30 m; aquisição: agosto/2013	Obtida gratuitamente no site da Earthexplorer da USGS (earthexplorer.usgs.gov/)
2. Dados do projeto Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)	Cena 28_16; resolução espacial: 90 metros.	Baixados gratuitamente no site do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS – http://srtm.usgs.gov/index.php)
3. Mapa geológico 1:1.000.000 da região de Vazante – Paracatu (Heineck <i>et al.</i> , 2004)	Folha SE23 – Belo Horizonte; formato dos dados: vetorial.	Obtido gratuitamente no site do Serviço Geológico do Brasil. (CPRM - http://www.cprm.gov.br)
4. Dados geoquímicos de sedimento de corrente do Projeto Geoquímica do Bambuí – Etapa II (Heineck <i>et al.</i> , 1975)	Método de análise: espectroscopia de absorção atômica; abertura: HNO ₃ a quente; Elementos analisados: Pb, Zn e Cu (ppm).	Cedidos pelo Serviço Geológico do Brasil. (CPRM - http://www.cprm.gov.br)

Todos os produtos estão em Projeção Univerasa; Transversa de Mercator, zona 23S, datum horizontal WGS-84.

CAPÍTULO 2. MODELOS DESCRITIVO, GENÉTICO E PROSPECTIVO

2.1. INTRODUÇÃO

Em determinada área, o conhecimento das ocorrências de mineralizações pode ser organizado a partir da descrição de suas características geológicas, tais como mineralogia, estrutura, distribuição espacial e estratigrafia. Esta organização deriva exclusivamente de observações e o produto obtido corresponde ao modelo descritivo. A partir do agrupamento das características descritivas elencadas anteriormente, podem-se inferir os processos que ocasionaram a gênese das ocorrências minerais de interesse e, desta forma, inserir outros fatores indicativos da mineralização, obtendo-se, assim, o modelo genético do depósito. A partir das características descritivas e dos fatores contidos no modelo genético, procede-se à separação dos elementos que podem auxiliar no rastreamento de mineralizações. Tais elementos compõem o modelo prospectivo (Araújo & Macedo, 2004).

Apesar de estarem espacialmente próximos e inserirem-se em contextos geológicos semelhantes, os depósitos de Vazante e Morro Agudo possuem algumas diferenças marcantes. Tendo em vista tais especificidades, optou-se pela elaboração de modelos distintos para ambos os depósitos. Desta forma, foi realizada uma integração para cada modelo prospectivo, de acordo com os elementos determinados. São apresentados, a seguir, os modelos elaborados para os depósitos de Vazante e Morro Agudo.

2.2. MODELO VAZANTE

A mina de Zn de Vazante, localizada próxima ao município homônimo, no noroeste do estado de Minas Gerais, está em produção desde 1956 e possui recursos totais calculados em torno de 60Mton @20%Zn. Esta jazida é considerada o maior depósito de minério willemítico do mundo, composto principalmente por willemita - Zn_2SiO_4 , com ocorrências restritas e subordinadas de franklinita ($ZnFe_2O_4$), esfalerita - (ZnS), galena - (PbS) e sulfetos de cobre e prata (Monteiro, 1997; Monteiro *et. al.*, 2006; Lemos, 2009 e Slezak, 2012). A alteração intempérica do minério willemítico permitiu a formação de minério supergênico (calamina), constituída por minerais secundários de zinco, chumbo e cobre, com destaque para hemimorfita ($Zn_4Si_2O_7(OH)_2H_2O$), smithsonita ($ZnCO_3$); cerussita ($PbCO_3$) e malaquita - $Cu_2CO_3(OH)$ (Oliveira, 2013).

A mineralização willemítica é hospedada por dolomitos de coloração rosa acinzentada com lamiações algais e estruturas do tipo *bird's eye*, ardósias e filitos do Membro Pamplona

Inferior, próximo ao contato com o Membro Morro do Pinheiro Superior, ambos pertencentes à Formação Serra do Poço Verde do Grupo Vazante (Monteiro, 2002, Monteiro *et al.*, 2006).

O controle principal da mineralização é estrutural, caracterizado pela zona da Falha de Vazante, com 11 quilômetros de extensão e direção geral NE, porém, tendo em vista que, em toda a área de ocorrência do Grupo Vazante, a mineralização willemítica só é conhecida no entorno da cidade de Vazante, a restrição do minério silicatado a esta região indica que a natureza das rochas carbonáticas encaixantes também tem papel importante nas condições de formação do depósito. Além disso, observa-se um controle estratigráfico, uma vez que a mineralização ocorre preferencialmente próxima ao contato entre duas sucessões carbonáticas distintas da Formação Serra do Poço Verde (Oliveira, 2013).

Diversos autores propuseram modelos genéticos análogos ao modelo *Mississippi Valley Type* (MVT) para os depósitos de Vazante (Amaral, 1968; Rigobello *et al.*, 1998; Iyer *et al.*, 1992, 1993), devido à natureza dolomítica das rochas encaixantes e a ausência de atividade magmática. De acordo com Monteiro *et al.* (2006), o depósito de zinco willemítico de Vazante é epigenético e formado pela mistura entre fluidos oxidados metalíferos pobres em enxofre e fluido meteórico canalizado pela estrutura da Falha de Vazante. Esta mistura em zona de cisalhamento permitiu condições de alta fO_2/fS_2 responsáveis pela estabilidade da paragénese willemítica e pela intensa alteração hidrotermal fissural, acompanhada principalmente por brechação hidráulica e veios preenchidos por siderita, dolomita, Fe-dolomita, hematita e jaspe. As condições de alta fO_2/fS_2 também foram favorecidas pela ausência de sequências redutoras sobre o depósito de Vazante que pode ter limitado a disponibilidade de H_2S para formação de esfalerita.

A partir dos modelos apresentados anteriormente, foram selecionados os parâmetros prospectivos para o depósito de Vazante, conforme a Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Descrição dos fatores do modelo prospectivo elaborado para o depósito de Vazante.

Fator	Descrição
Litológico	Rochas de composição carbonática, notadamente dolomitos.
Estratigráfico	Grupo Vazante, Formação Serra do Poço Verde, Membro Pamplona Inferior. O contato com o Membro Morro do Pinheiro serve como guia estratigráfico.
Geoquímico	Anomalias de Pb, Zn e Cu. Fator definido a partir da opinião de peritos, considerando que anomalias destes elementos são intrínsecas ao modelo.
Estrutural	Estruturas de direção NE associadas à Falha de Vazante, traduzidas em lineamentos de quebras de relevo e drenagem.

2.3. MODELO MORRO AGUDO

A mina de Morro Agudo, localizada a 50 km do município de Paracatu-MG, é considerada uma mina de médio porte, com reserva estimada em 9,7 Mton com teor médio de 6,5% de Zn e 2,8% de Pb (Viviani *et al.* 2001 *apud* Monteiro 2002). Os minerais de minério mais relevantes compreendem a esfalerita (ZnS) e a galena (PbS) (Neves, 2011). O depósito, de 1.700 metros de extensão, é composto por corpos sulfetados *stratabound* concordantes e remobilizações não concordantes, ambos hospedados em dolarenitos e brechas dolomíticas a dolareníticas do Membro Pamplona Superior da Formação Morro do Calcário, do Grupo Vazante (Neves, 2011).

Enquanto na porção norte da jazida a zona mineralizada se encontra orientada a N15E, na porção sul essa orientação tende a N70E, com mergulho de 20° para oeste. A nordeste, o depósito de Morro Agudo faz contato com dolomitos estromatolíticos não mineralizados, sendo limitado pela denominada Falha Principal, de direção NW (Neves, 2011). Ainda de acordo com Neves (2011), dada a presença de corpos mineralizados mais espessos e com teores mais elevados de Zn e Pb nas regiões mais próximas da Falha Principal, acredita-se que essa é a principal alimentadora (*feeder*) do sistema. Sendo assim, as soluções ricas em metais provenientes da água do mar e/ou de águas conatas percolaram a Falha Principal, misturando-se ao enxofre. Esses fluidos, por sua vez, percolaram as rochas hospedeiras, que são mineralizadas.

Monteiro *et al.* (2006) classificam o depósito de Morro Agudo como singenético a epigenético e Neves (2011) classifica-o apenas como epigenético. Devido às diferenças observadas entre os corpos mineralizados, ainda há controvérsias quanto ao modelo genético

no qual se encaixa o depósito de Morro Agudo. A existência de piratas maciças no corpo de minério indica um possível depósito do tipo Sedimentar Exalativo (SEDEX). No entanto, o restante da jazida tem características de um depósito do tipo *Mississippi Valley* (MVT), com maior semelhança ao subtipo *Irish*, proposto por Paradis *et al.* (2001) (Neves, 2011). A partir dos modelos apresentados anteriormente, foram selecionados os parâmetros prospectivos para o depósito de Morro Agudo, listados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Descrição dos fatores do modelo prospectivo elaborado para o depósito de Morro Agudo.

Fator	Descrição
Litológico	Rochas de composição carbonática, notadamente dolomitos.
Estratigráfico	Grupo Vazante, Formação Serra do Calcário, Membro Pamplona Superior.
Geoquímico	Anomalias de Pb, Zn e Cu. Fator definido a partir da opinião de peritos, considerando que anomalias destes elementos são intrínsecas ao modelo.
Estrutural	Estruturas de direção NW associadas à Falha de Principal, traduzidas em lineamentos de quebras de relevo e drenagem.

CAPÍTULO 3. DADOS DE ENTRADA

Conforme apresentados no capítulo anterior, foram estabelecidos quatro fatores prospectivos para os modelos dos depósitos de Vazante e Morro Agudo: litológico, estratigráfico, estrutural e geoquímico. Para cada fator prospectivo foram selecionados conjuntos de dados de entrada para proceder à integração das informações. O detalhamento de cada dado, processamento e os resultados obtidos são apresentados nos tópicos a seguir.

Tanto a imagem Landsat 8 quanto o SRTM, já georreferenciados, foram projetados para o *datum* WGS 84, zona 23S.

3.1. FATOR LITOLÓGICO

Devido à indisponibilidade de dados de mapeamentos geológicos sistemáticos para a região, e tendo em vista a importância do fator litológico para rastrear mineralizações de Pb e Zn, optou-se pela análise da imagem Landsat 8 em conjunto com os dados do SRTM para delimitar remotamente ocorrências de rochas de composição carbonática na região. Os procedimentos adotados para o processamento destes dados são descritos a seguir e ilustrados no fluxograma da Figura 3.1.

Para auxiliar na identificação de ocorrências de corpos de composição carbonática, e sabendo que na região em estudo estas feições correspondem a elevações do terreno recobertas por vegetação moderada a alta, foi calculado o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index - NDVI*), por meio da Equação 01, na qual NIR corresponde à banda do infravermelho próximo (banda 5 do sensor OLI) e R corresponde à banda do vermelho (banda 4 do sensor OLI).

$$NDVI = \frac{NIR-R}{NIR+R} \quad (1)$$

A partir do resultado obtido, e com o objetivo de selecionar apenas o intervalo espectral correspondente à resposta dos alvos de interesse, procedeu-se ao ajuste iterativo no histograma da imagem por meio da ferramenta *interactive stretching*, optando-se pelo intervalo de 0,254 a 0,366. Posteriormente, foi aplicado um filtro passa baixa de matriz de convolução 5 x 5, com o objetivo de suavizar a imagem resultante, eliminando as altas frequências da imagem, uma vez que não há pixels isolados de rochas carbonáticas.

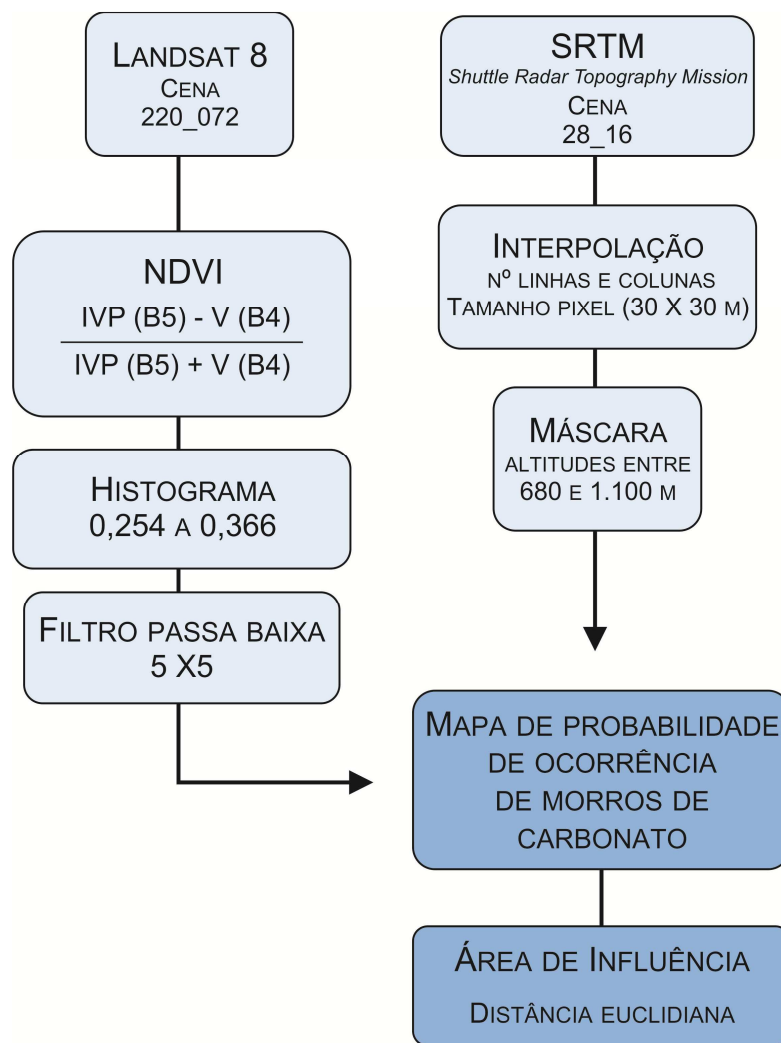


Figura 3.1. Fluxograma indicando os procedimentos realizados para geração dos produtos finais.

O produto obtido ressaltou, além dos alvos de interesse, feições recobertas por vegetação e que não correspondem a ocorrências de morros de carbonatos, como mata galeria, áreas cultivadas, pivôs centrais e vegetação nativa. Como tais feições encontram-se, em geral, em altitudes inferiores aos corpos carbonáticos, foi confeccionada uma máscara por meio dos dados SRTM, a qual contemplou altitudes entre 680 e 1.100 metros. Esta máscara foi aplicada à imagem resultante do NDVI com filtro passa baixa 5 x 5.

Após as etapas descritas acima, o produto obtido foi analisado conjuntamente com o Modelo Digital de Elevação (MDE), obtido a partir da aplicação de filtro direcional de 90° nos dados SRTM, e com a imagem Landsat 8 na composição colorida 564 (R:5 G:6 B:4), por meio do *software* ArcGIS 10.1. A partir disso foram definidos alvos potenciais para ocorrência de morros de carbonatos.

Tendo em vista que os corpos delimitados correspondem apenas a uma expressão superficial de camadas de rochas carbonáticas, calculou-se a distância euclidiana ao redor destes corpos para determinar uma área de influência.

Resultados

Os resultados obtidos para o índice NDVI e a posterior aplicação da máscara confeccionada para o intervalo de altitude são mostrados na Figura 3.2. O intervalo espectral de 0,254 a 0,366 ajustado no histograma da imagem resultante do NDVI ressaltou várias áreas com ocorrência de vegetação, como matas galeria e regiões de cultivo. A aplicação da máscara nesses dados resultou em menos alvos detectáveis e maior precisão na delimitação de rochas carbonáticas, apesar de existirem alvos ainda indesejáveis.

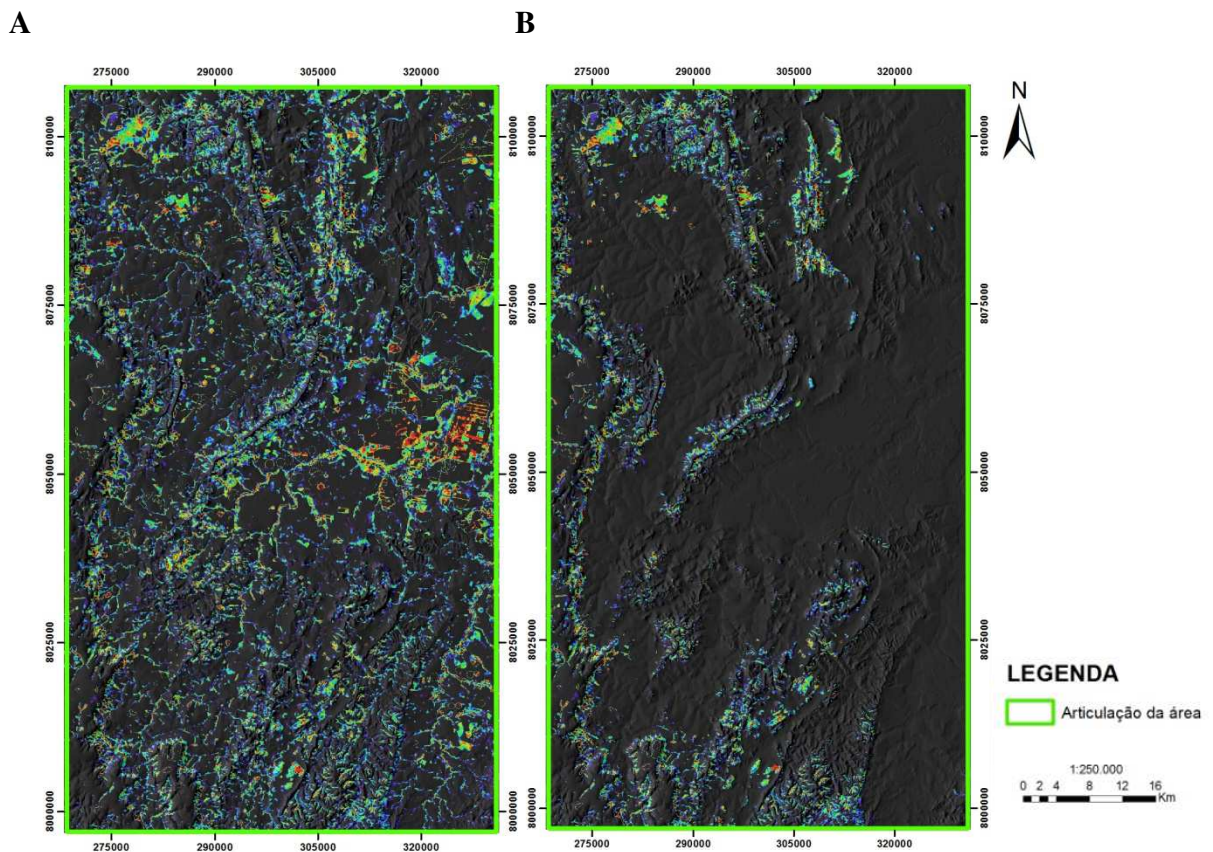


Figura 3.2. Resultado do processamento realizado para ressaltar possíveis morros de composição carbonática. As regiões de coloração avermelhada correspondem aos possíveis alvos de interesse. (A) Processamento com filtro passa baixa de matriz de convolução 5 x 5. (B) Processamento com filtro passa baixa de matriz de convolução 5 x 5 com aplicação da máscara confeccionada para o intervalo de altitude de 680 a 1.100 metros.

A Figura 3.3 mostra a imagem Landsat 8 com composição colorida RGB 564, com destaque para dois dos corpos de composição carbonática, os quais buscou-se ressaltar no processamento. Na imagem, é possível notar a coloração avermelhada e textura rugosa característica destas feições que, juntamente com o produto NDVI mais máscara, balizaram a definição dos alvos.

O resultado da delimitação das elevações de composição carbonática é mostrada na Figura 3.4, a partir da análise da qual é possível observar que tais elevações estão dispostas ao longo de uma grande estrutura dobrada localizada na porção central da área de estudo. No caso de alguns morros mais alongados, consegue-se, ainda, identificar uma direção preferencial NE. Estas características sugerem que há um controle estrutural na ocorrência dos corpos carbonáticos, que corrobora com o modelo prospectivo.

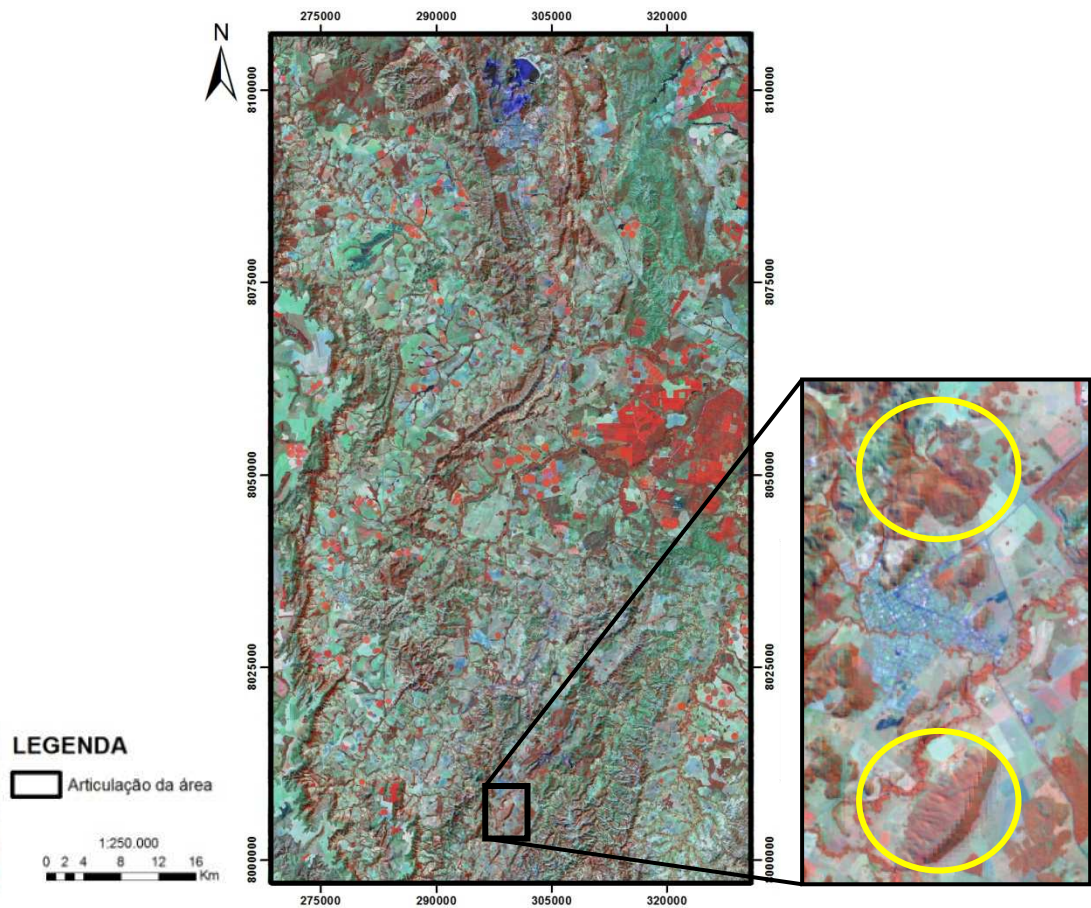


Figura 3.3. Imagem Landsat 8 com composição colorida RGB 564. Na imagem são destacadas em amarelo duas ocorrências de morrotes de composição carbonática nos quais é possível observar a coloração avermelhada devido à presença de cobertura vegetal, bem como a textura característica destes corpos.

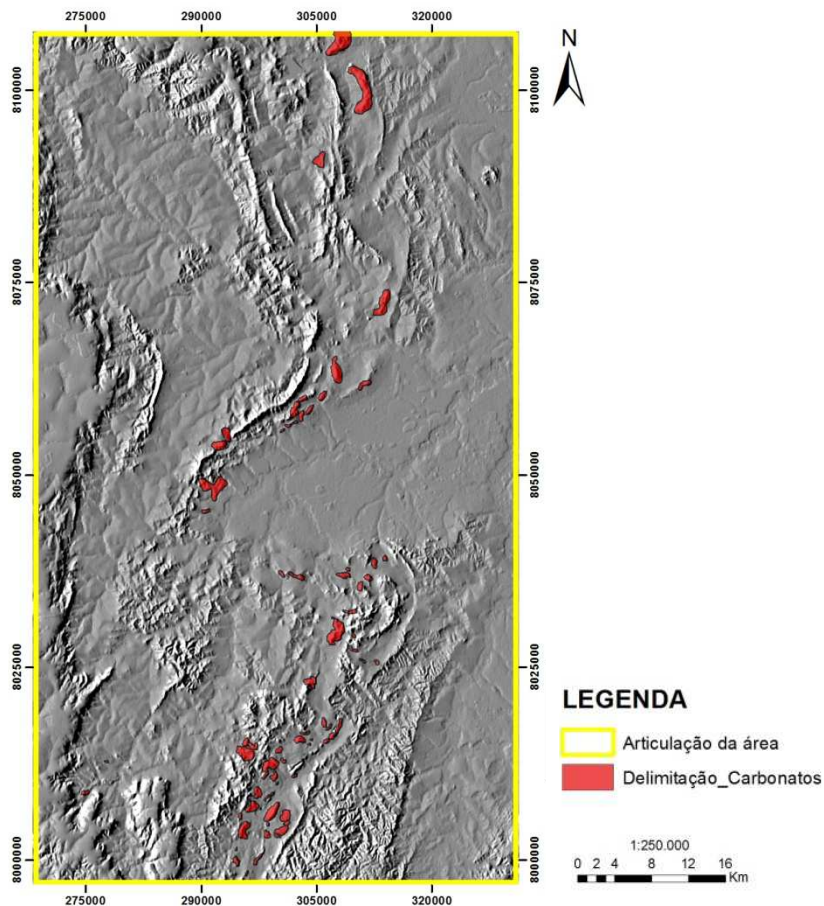


Figura 3.4. Delimitação de alvos de ocorrência potencial de morros de carbonatos, obtida por meio da análise conjunta da imagem Landsat8, do modelo digital de elevação e dos produtos dos processamentos descritos anteriormente. As áreas demarcadas em vermelho representam as regiões com maior possibilidade de presença de carbonatos.

3.2. FATOR ESTRATIGRÁFICO

As informações sobre a litologia da região de Vazante- Paracatu foram obtidas a partir de dados do mapeamento geológico em escala 1:1.000.000 do estado de Minas Gerais realizado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). Esses dados estão na forma vetorial (*shapefile*) e podem ser encontrados no site da CPRM (Figura 3.5).

Por se tratar de um mapa geológico em escala 1:1.000.000, não há detalhamento da área de ocorrência das formações Serra do Calcário e Serra do Poço Verde, tampouco dos membros Pamplona Inferior e Pamplona Superior. Os dados indicam apenas a ocorrência de duas unidades do Grupo Vazante na área do presente estudo, denominadas “Vazante A”, que abarca rochas pelíticas, e “Vazante B”, que corresponde a rochas de composição carbonática, além de rochas pertencentes ao Grupo Canastra e depósitos aluvionares.

Para possibilitar a integração deste dado, o arquivo *shapefile* foi cortado para a área do projeto e foram atribuídos valores iguais a 2 para a unidade Vazante B, por ser mais favorável à ocorrência de mineralizações de Pb e Zn, 1 para a unidade Vazante A e 0 (zero) para as demais unidades, as quais considera-se pouco favoráveis. Em seguida, o arquivo foi convertido para formato *raster*.

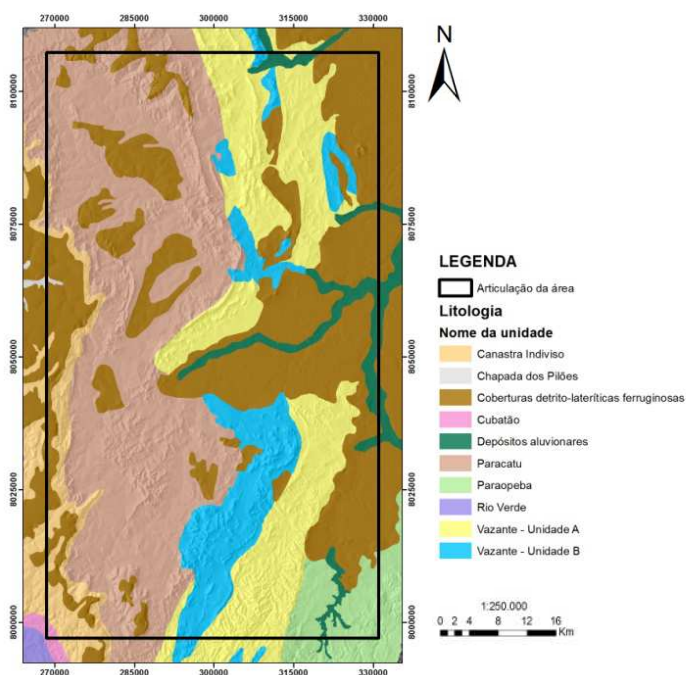


Figura 3.5. Mapa geológico da região de Vazante – Paracatu em escala 1:1.000.000 realizado pela CPRM. A legenda indica a nomenclatura das unidades de acordo com o estabelecido pela CRPM (Heineck *et al.*, 2004).

3.3. FATOR ESTRUTURAL

Os dados referentes à geologia estrutural da área foram obtidos por meio da interpretação da imagem Landsat 8, utilizando a composição colorida RGB 564 (R:5 G:6 B:4) fusionado com a banda 8 e o Modelo Digital de Elevação (MDE), obtido por meio da aplicação de filtro direcional de 90° aos dados SRTM (Figura 3.6).

A partir dos produtos supracitados, procedeu-se a extração de feições lineares de drenagem e relevo na escala de 1:50.000 por meio do *software* ArcGIS 10.1 (Figura 3.7). Os resultados obtidos foram utilizados para confeccionar rosetas de azimute dos lineamentos, bem como histogramas de frequência, tanto para as direções de azimute quanto para o tamanho dos lineamentos (Figura 3.8). Destaca-se que os azimutes dos lineamentos foram obtidos por meio da extensão *EasyCalculate*, enquanto as rosetas foram confeccionadas com auxílio da extensão *Polar Plot*, ambas vinculadas ao *software* ArcGis 10.1. As rosetas foram

criadas adotando-se 40 classes e, posteriormente, a tabela de atributos dos lineamentos foi exportada para o programa *Microsoft Excel 2010*, no qual os histogramas de frequência foram elaborados, dividindo os dados de azimute em nove classes e os dados de comprimento dos lineamentos em 40 classes para drenagens e 20 classes para o relevo.

Com o objetivo de definir uma área de influência para os lineamentos extraídos, calculou-se a distância euclidiana ao redor de cada linha. Nesta etapa, foram produzidos quatro produtos: distância euclidiana para lineamentos de (i) drenagem com orientação NE, (ii) drenagem com orientação NW, (iii) relevo com orientação NE e (iv) relevo com orientação NW. Estes quatro produtos buscaram contemplar a diferença entre o controle estrutural definido para o modelo de Vazante, que possui direção NE, e aquele definido para Morro Agudo, com direção NW.

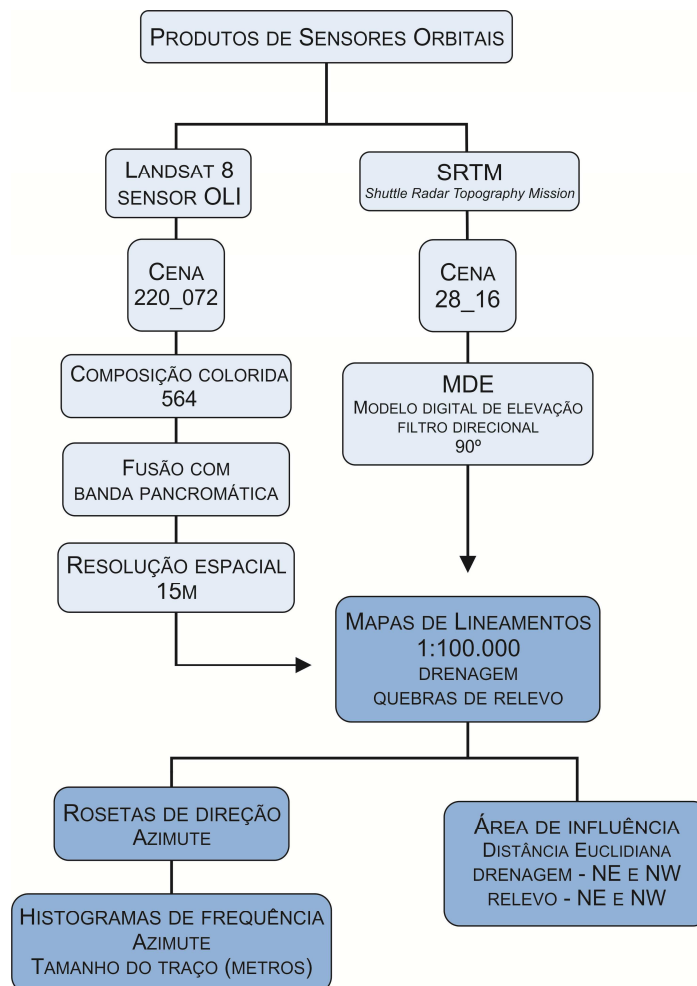


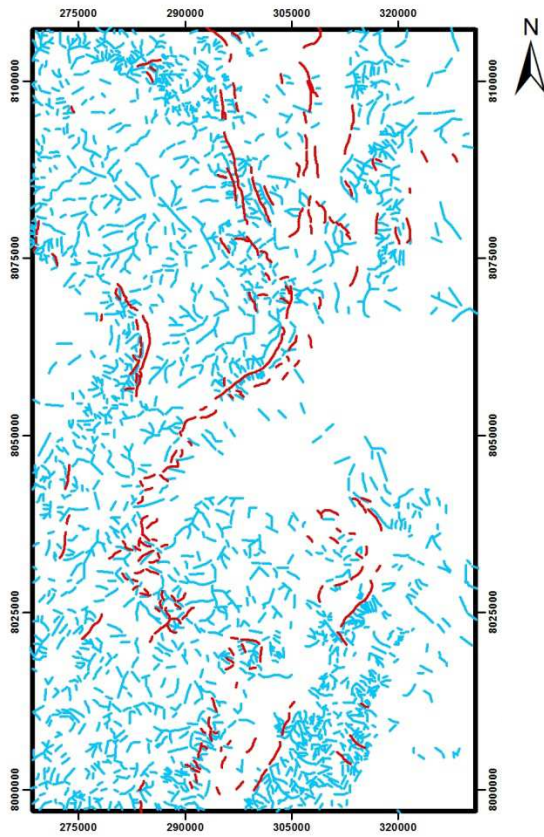
Figura 3.6. Fluxograma indicando os procedimentos realizados para extração das feições lineares da área, bem como os processamentos posteriores para obtenção de dados referentes ao fator estrutural do modelo prospectivo.

Resultados

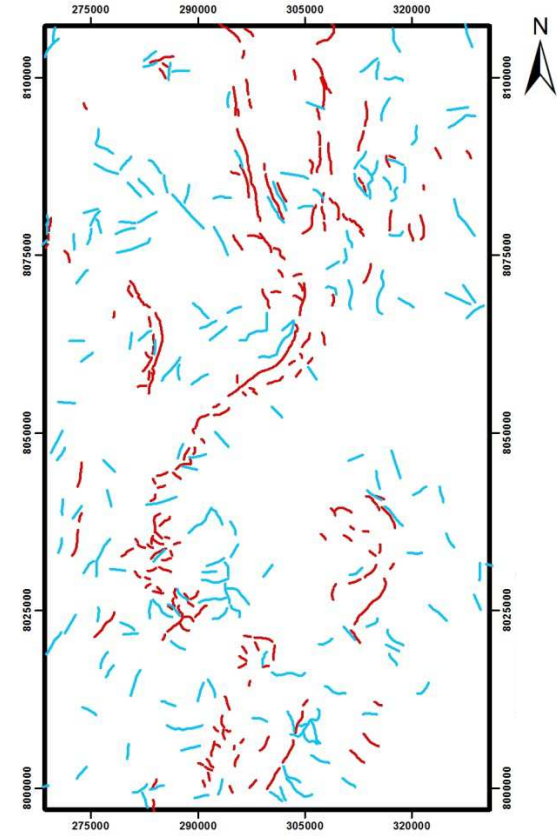
As feições lineares extraídas e as rosetas de azimute e histogramas de frequência são mostrados nas Figuras 3.7 e 3.8 respectivamente. A partir da análise da Figura 3.8 A, na qual são mostrados os resultados obtidos para as rosetas de azimute e os histogramas de frequência dos lineamentos de drenagem, é possível observar que não há uma direção preferencial para estas feições e, além disso, há uma maior concentração dos lineamentos nos menores comprimentos.

A ausência de uma direção principal pode ser explicada por essa predominância de drenagens de menor comprimento na área, que correspondem a feições encaixadas tipicamente em siltitos e ritmitos do Grupo Canastra, e que não estão dispostas em uma direção principal. Desta forma, com o objetivo de melhorar a visualização e permitir a definição de direções estruturais preferenciais, foram selecionados somente os traços de drenagem maiores que dois quilômetros e elaborada uma nova roseta de azimute e novos histogramas de frequência (Figuras 3.7 B e 3.8 B). Estes produtos evidenciam que, apesar de ainda haver distribuição de azimutes em todas as direções, é possível identificar uma tendência preferencial em N20-40E e N120-140W.

Os resultados obtidos para os lineamentos de relevo (Figura 3.8 C) indicam uma maior concentração de lineamentos entre 800 e 1.200 metros. A roseta e o histograma de frequência de azimute apontam três *trends* preferenciais: NE, NS e NW, sendo o último o mais predominante. Além disso, analisando-se os traços de cristas de relevo (Figura 3.7), é possível observar a presença de uma grande estrutura dobrada no centro da área de estudo. Ressalta que esta é a mesma estrutura na qual alinham-se os corpos de carbonato delimitados na figura 3.4, além de coincidir com a área de ocorrência do Grupo Vazante, de acordo com o mapa geológico da CPRM.

A**LEGENDA**

- Lineamentos de drenagem
- Lineamentos de relevo
- Articulação da área

**B****LEGENDA**

- Lineamentos de drenagem >2km
- Lineamentos
- Articulação da área



Figura 3.7. Lineamentos extraídos com base na análise da imagem Landsat 8 e do modelo digital de elevação tanto para feições de relevo (marcadas em vermelho) quanto para feições de drenagem (marcadas em azul). (A) representa os lineamentos de relevo e drenagem e (B) representa os lineamentos de relevo e de drenagens maiores que 2 km.

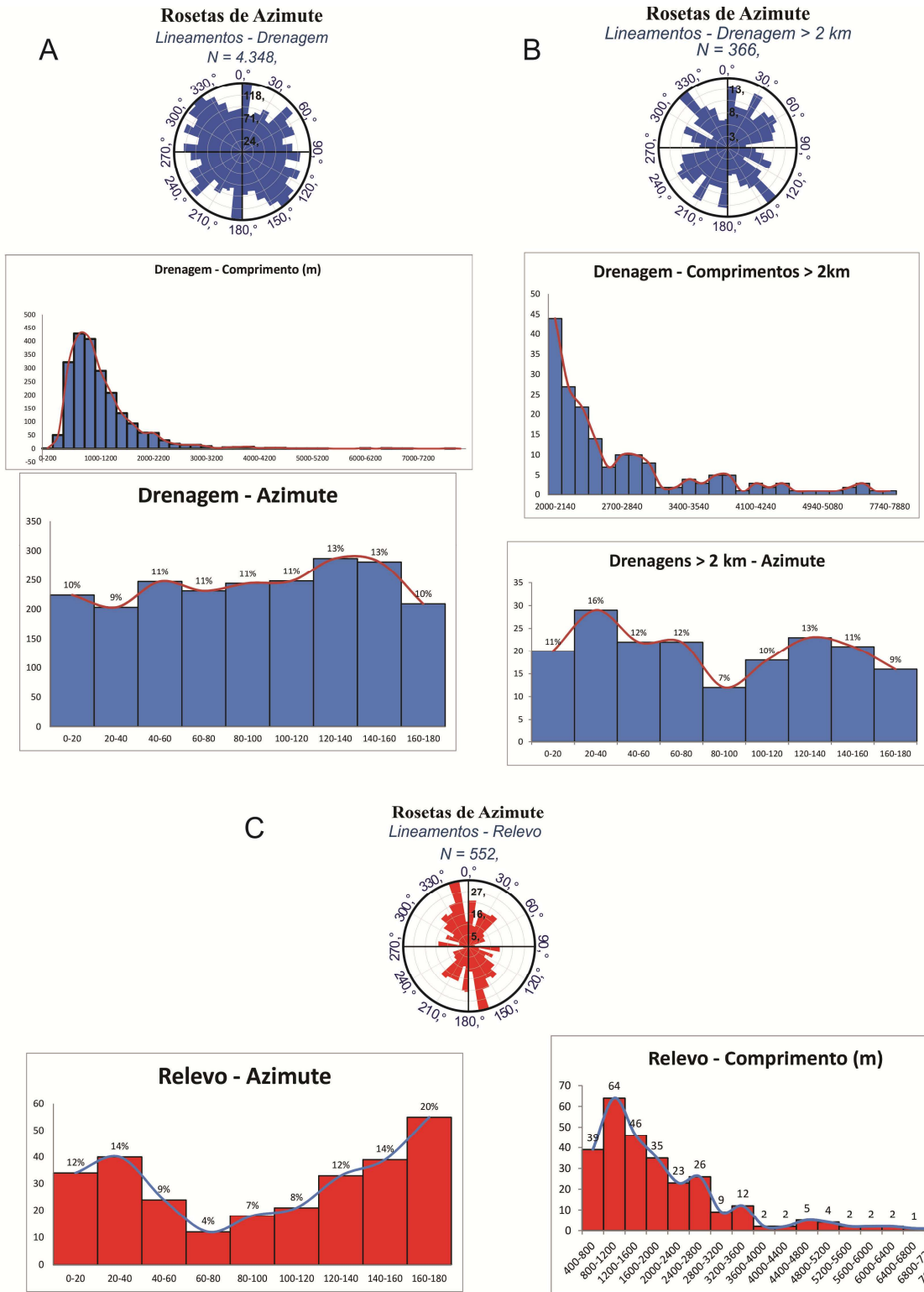


Figura 3.8. Rosetas e histogramas de frequência obtidos a partir dos lineamentos traçados. (A) Roseta de azimute e histogramas de frequência de azimute e de comprimento dos lineamentos de drenagem, (B) Roseta de azimute e histogramas de frequência de azimute e de comprimento dos lineamentos de drenagem maiores que 2 km e (C) Roseta de azimute e histogramas de frequência de azimute e de comprimento dos lineamentos de relevo.

3.4. FATOR GEOQUÍMICO

Para esse fator foram utilizadas análises geoquímicas de sedimento de corrente cedidas pela CPRM, que compreendem apenas resultados para os elementos cobre, zinco e chumbo. Apesar de, do ponto de vista prospectivo, estes dados não serem os ideais, buscou-se determinar áreas anômalas para os três elementos, por se tratarem das únicas informações disponíveis. As etapas realizadas no tratamento dos dados geoquímicos de sedimento de corrente são indicadas na Figura 3.9.

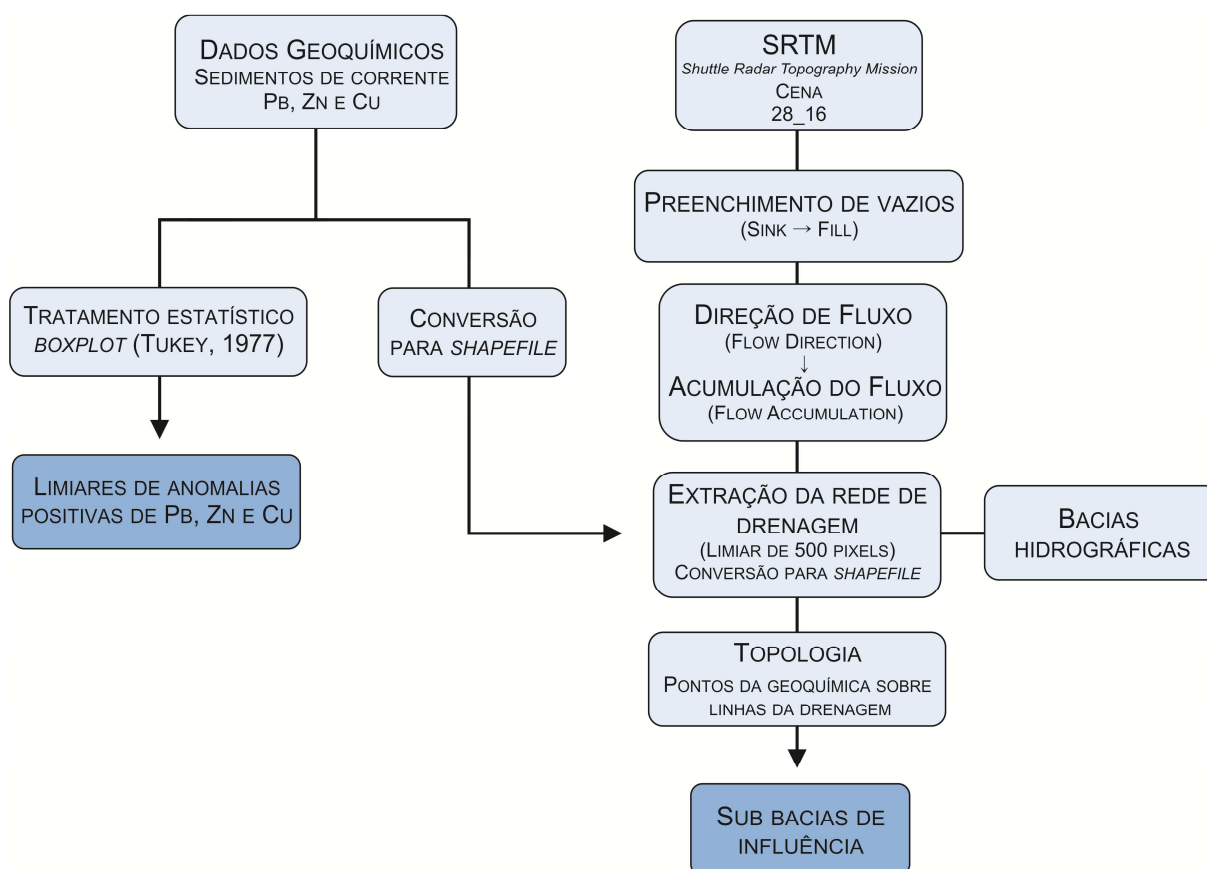


Figura 3.9. Fluxograma indicando as etapas realizadas para o tratamento dos dados de geoquímica de sedimentos de corrente.

Inicialmente, procedeu-se à conversão dos dados para o formato *shapefile* com o objetivo de analisar sua distribuição e aferir a contribuição de cada ponto de análise geoquímica em função da hidrografia da área. Os pontos obtidos foram cortados para a região do projeto.

Os dados SRTM foram utilizados para traçar a rede de drenagem e, a partir do resultado, foram obtidas as bacias hidrográficas da área de estudo. Em seguida, foram aplicadas regras de topologia para certificar-se que os pontos correspondentes às análises geoquímicas coincidiam com os traçados da drenagem. De posse destas informações, procedeu-se ao

traçado das sub-bacias de influência de cada ponto de análise geoquímica de sedimento de corrente.

Em um cenário ideal, a determinação de anomalias geoquímicas para os elementos de interesse deve levar em conta valores de *background* da região, que podem variar de acordo com o tipo litológico. No entanto, esta abordagem implica a necessidade de campanhas de levantamentos geoquímicos detalhados, não disponíveis para este projeto. Consequentemente, foi necessária a adoção de tratamentos estatísticos para a detecção de anomalias geoquímicas para Pb, Zn e Cu.

Em geral, anomalias geoquímicas são identificadas estabelecendo-se valores de limiar, que marcam os limites superior e inferior de uma variação normal para uma dada população. Os valores dentro do intervalo de limiares são considerados como não anômalos, ou seja, correspondem ao *background*, enquanto que valores além e aquém dos limiares são definidos como anomalias. Em campanhas de exploração mineral, normalmente busca-se identificar os valores acima do limiar superior – ou seja, anomalias positivas, tendo como premissa a presença de mineralizações em uma determinada área –, assim como seus produtos de intemperismo, que tendem a aumentar a concentração de elementos acima dos níveis crustais tidos como normais (Reiman *et al.*, 2005).

Diferentes métodos estatísticos foram amplamente utilizados na interpretação dos dados geoquímicos, no entanto, devido às peculiaridades de cada conjunto de dados, não há um método estatístico que possa ser universalmente aplicado. Desta forma, no presente trabalho, optou-se pela aplicação do método *boxplot* desenvolvido por Tukey (1977). Nesta abordagem, para cada conjunto de dado geoquímico são determinados os valores de máximo e mínimo, a mediana e o primeiro e o terceiro quartis, denominados quartil inferior e superior, respectivamente. Consideram-se anomalias positivas valores acima de 1,5 vezes o intervalo entre o quartil superior e o quartil inferior (*interquartile range*).

Para os dados utilizados neste trabalho, foram calculados os limiares para Cu, Pb e Zn levando-se em conta todos os pontos de análise constantes nos arquivos cedidos pela CPRM – e não apenas os pontos que incidem sobre a área do projeto. Isso tem por objetivo aumentar a amostragem e obter valores de limiar regionais, haja vista a presença de dois depósitos de Pb e Zn na área do projeto, os quais podem mascarar anomalias caso seja dado um enfoque mais localizado.

Resultados

Após a conclusão dos procedimentos discriminados acima, os seguintes produtos foram obtidos: (i) localização dos pontos de análises geoquímicas de sedimento de corrente na área do projeto e as respectivas sub-bacias de influência; (ii) teores em ppm atribuídos às bacias amostradas para cobre, chumbo e zinco; e (iii) os valores de limiar para estes três elementos.

Os resultados obtidos para a delimitação das sub-bacias de influência das análises geoquímicas de Cu, Pb e Zn são mostrados na Figura 3.10, na qual os maiores teores correspondem às zonas marcadas por cores mais escuras. É possível observar que, nos produtos gerados para cada elemento, há regiões onde não foram delimitadas sub-bacias, devido à ausência de pontos de análise geoquímica que contemplassem tais áreas.

A análise dos mapas da Figura 3.10 indica que, em geral, os maiores teores para os três elementos analisados encontram-se na região central da área. No mapa gerado para as análises de Cu (Figura 3.10 A) destaca-se a presença de altos teores deste elemento na porção noroeste da área. Na Figura 3.11 são apresentados os gráficos tipo *boxplot* obtidos para os conjuntos de análises de cada elemento. Foram estabelecidos os limiares de 50, 114 e 47 ppm para Cu, Zn e Pb, respectivamente. Na Tabela 3.1 são mostrados os principais resultados obtidos no tratamento estatístico dos dados de geoquímica de corrente.

Tabela 3.2. Resultados obtidos no tratamento estatístico dos dados de geoquímica de corrente utilizando o método *boxplot* de Tuckey (1977).

Elemento	1°. quartil	Mediana	3°. quartil	Limiar (ppm)	Número de amostras anômalas	Valor máximo (ppm)
Cu	17	24	30	50	19	65
Zn	24	40	60	114	52	540
Pb	12	18	26	47	39	520

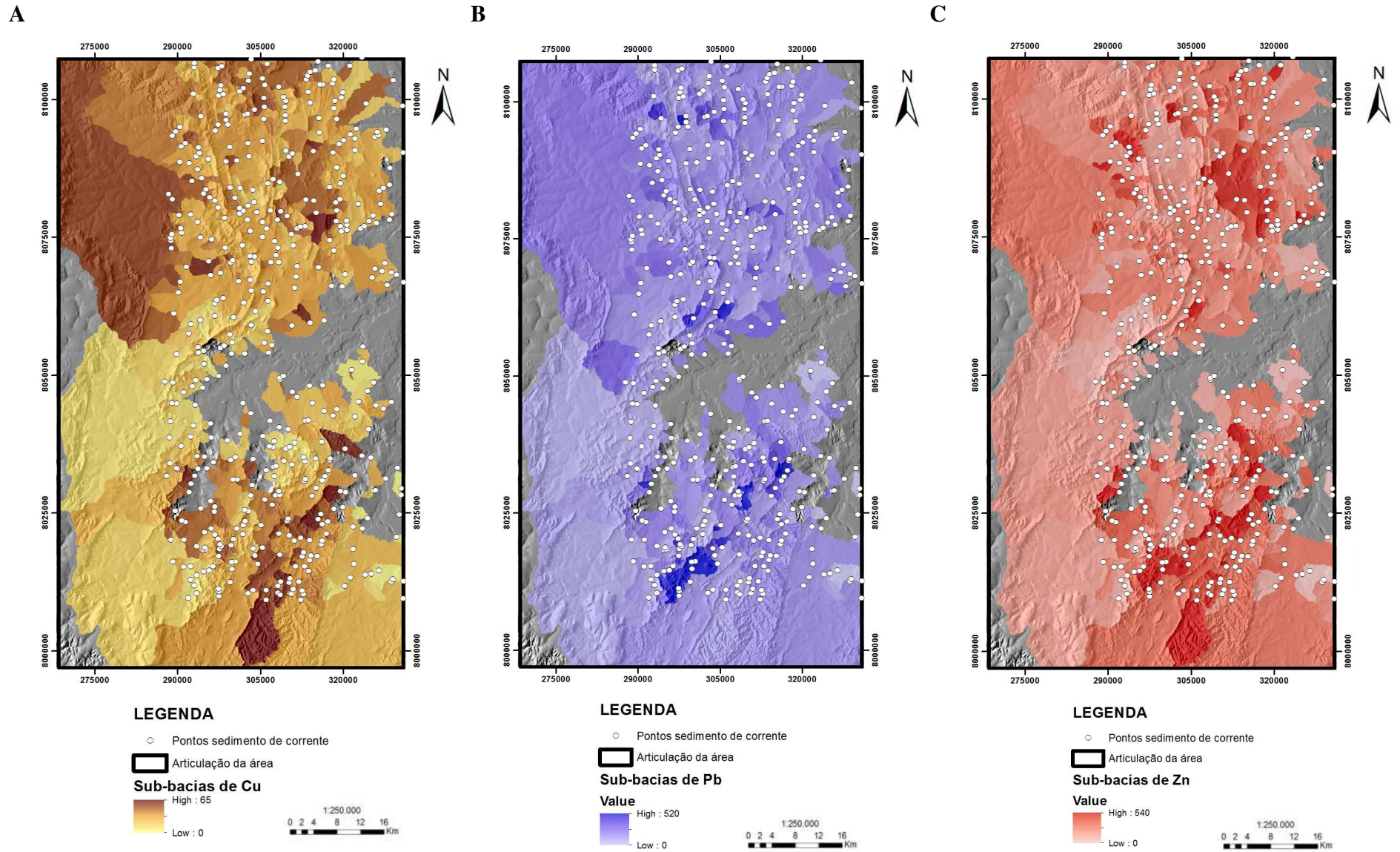


Figura 3.10. Sub-bacias de influência das análises geoquímicas de sedimento de corrente para (A) Cu, (B) Pb e (C) Zn.

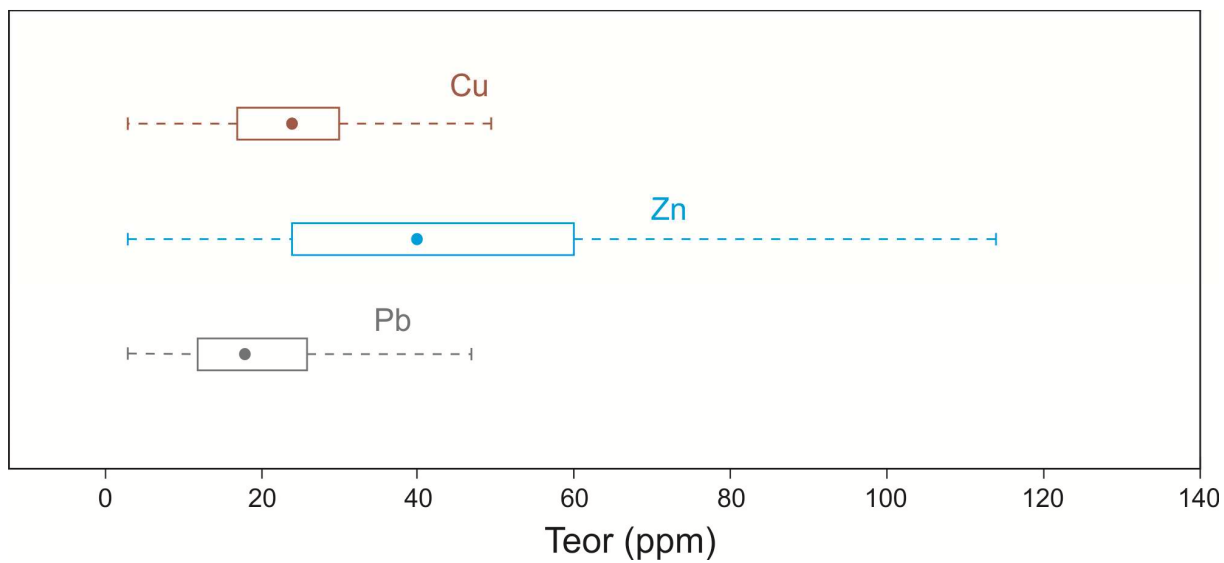


Figura 3.11. Gráficos tipo *boxplot* elaborados a partir dos dados geoquímicos de sedimentos de corrente para Cu, Zn e Pb. Os pontos coloridos em cada caixa do gráfico indicam as medianas de cada conjunto de dados e os limites das linhas pontilhadas correspondem aos limiares superior e inferior.

CAPÍTULO 4. INTEGRAÇÃO DE DADOS

Neste capítulo são tratadas as técnicas utilizadas para integração dos dados e são mostrados os resultados e discussões referentes a cada abordagem. Acrescenta-se que na seção “Anexos” é possível visualizar os produtos apresentados neste capítulo em tamanho maior.

4.1. INTRODUÇÃO TEÓRICA

Há dois tipos de modelos utilizados para o mapeamento de potencial mineral, os modelos guiados pelo conhecimento (*knowledge-driven*) e os modelos guiados pelo dado (*data-driven*) (Bonham-Carter, 1994 *apud* Silva, 2011). Enquanto no primeiro modelo utiliza-se da experiência do executor para guiar o processo de seleção e atribuição dos parâmetros, no segundo os parâmetros são estimados por cálculos estatísticos (Franca-Rocha *et al.* 2000).

Neste trabalho, foram utilizados dois métodos de integração de dados guiados pelo conhecimento, quais sejam, lógica *fuzzy* e soma ponderada, visando a produção do mapa de favorabilidade de mineralizações de Pb e Zn na área de Vazante-Paracatu.

Lógica Fuzzy

Em modelos baseados no conhecimento, um conjunto de informações de entrada associada a uma metodologia permite a determinação de zonas ou áreas que satisfaçam um conjunto de critérios. Se esse critério é definido segundo regras determinísticas, significa que o modelo aplica operadores de lógica booleana no conjunto de dados de entrada. O dado de saída, por sua vez, será um mapa binário, em que cada ponto satisfaz ou não as condições do modelo (Bonham-Carter, 1994 *apud* Câmara *et al.* 2001). Ao contrário desta abordagem, a lógica *fuzzy* permite criar classes contínuas, que variam entre graus de pertinência de 0 a 1. Nesse caso, os indivíduos podem pertencer total ou parcialmente à classe, bem como não pertencer a determinada classe (McBratney *et al.*, 2000; Câmara *et al.*, 2001; Almeida *et al.*, 2003; McBratney *et al.*, 2003; Mendonça-Santos & Santos, 2003, *apud* Lima, 2013) (Figura 4.1).

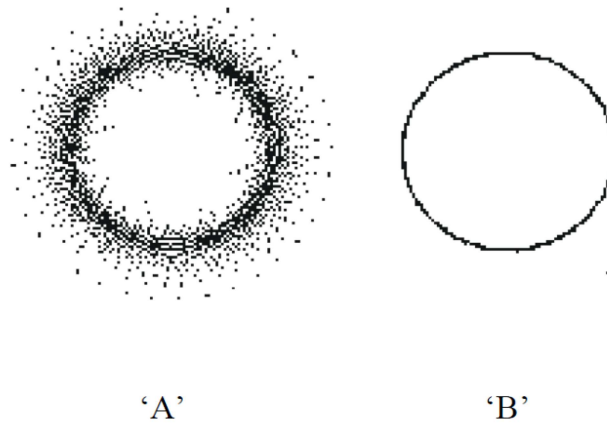


Figura 4.1. Diagrama de Venn ilustrando a diferença de limites entre um conjunto *fuzzy* (A) e um conjunto booleano (B) (Burrough, 1998, *apud* Lima, 2013).

Para caracterizar formalmente um conjunto *fuzzy*, pode-se recorrer ao conceito de função de pertinência, uma função que, dado o valor de um atributo z , determina se o elemento avaliado pertence ou não a um determinado conjunto em análise. As funções de pertinência podem assumir diversas formas, variando conforme as características dos dados (Lima, 2013). As formas mais usuais incluem linear, gaussiana e sigmoideal (Tabela 4.1).

Tabela 4.1. Funções de pertinência utilizadas na técnica de integração *fuzzy* e suas respectivas descrições.

Função	Descrição
<p>Função Gaussiana</p>	<p>Transforma os valores originais em uma distribuição normal. O ponto central (<i>midpoint</i>) é o de maior importância do conjunto de dados, atribuindo-lhe o valor de pertinência 1. À medida que se distancia do ponto central, tanto nas direções positiva e negativa, o valor de pertinência diminui.</p> <p>O parâmetro <i>spread</i> altera a largura da curva.</p>

	Função	Descrição
Função <i>Small</i>		<p>Usada quando os dados de entrada de menor valor possuem maior probabilidade de ocorrerem no conjunto, portanto, maior pertinência. O ponto central (<i>midpoint</i>) é o ponto de inflexão da curva, na qual esta muda a sua concavidade.</p> <p>O parâmetro <i>spread</i> define a forma da função.</p>
Função <i>Large</i>		<p>Usada quando os dados de entrada de maior valor possuem maior probabilidade de ocorrerem no conjunto, portanto, maior pertinência. O ponto central (<i>midpoint</i>) é o ponto de inflexão da curva, na qual esta muda a sua concavidade.</p> <p>O parâmetro <i>spread</i> define a forma da função.</p>
Função Linear		<p>Aplica uma função linear de acordo com os valores especificados para mínimo e máximo.</p> <p>Abaixo do valor mínimo será atribuído pertinência 0 e acima do valor máximo será atribuído pertinência 1.</p> <p>A função pode ser positiva (azul) ou negativa (vermelha).</p>

De acordo com Câmara *et al.* (2001), os dados em um conjunto *fuzzy* podem ser manipulados utilizando métodos lógicos para selecionar e combinar dados de vários conjuntos, de forma a possibilitar sua integração. Por meio do uso de operadores, é possível obter um mapa resultante da sobreposição de vários conjuntos de informação *fuzzy* (Meirelles, 1997 *apud* Lima, 2013). Há vários tipos de operadores que podem ser utilizados para integração dos dados, cada qual utilizando uma abordagem distinta. A Tabela 4.2 traz maiores detalhes sobre tais operadores.

Tabela 4.1. Operadores utilizados na técnica de integração *fuzzy* e suas respectivas descrições.

Operador	Definição
AND	Define o menor membro que controla os conjuntos <i>fuzzy</i> , proporcionando estimativas bastante conservadoras.
OR	Controla os arquivos de saída a partir do maior valor do membro <i>fuzzy</i> , que torna as estimativas mais otimistas.
PRODUCT	Combinação que obedece uma função o valor do membro <i>fuzzy</i> e o número de mapas a serem combinados. Usando este operador, os valores tendem a ser pequenos.
SUM (soma)	Adiciona os valores <i>fuzzy</i> de todos os dados de uma determinada célula, e o resultado é uma função linear crescente, baseado no número de critérios da análise. O resultado é sempre maior ou igual ao maior membro <i>fuzzy</i> .
GAMMA	É definido a partir do produto algébrico dos operadores <i>fuzzy sum</i> e <i>fuzzy product</i> , ambos elevados à potência do parâmetro gama, conforme a equação geral $(FuzzySum)^{\gamma} * (FuzzyProduct)^{1-\gamma}$.

Fonte: modificado de Oliveira, 2003

Soma Ponderada

O método soma ponderada (*weighted sum*) é uma ferramenta de integração que permite atribuir pesos (importância) e combinar múltiplos dados de entrada. Destaca-se que esses pesos podem ser valores inteiros ou racionais (*floating* ou pontos flutuantes). Sendo assim, na soma ponderada, cada célula do dado de entrada é multiplicada pelo seu respectivo peso e, em seguida, esses valores são somados (Figura 4.2).

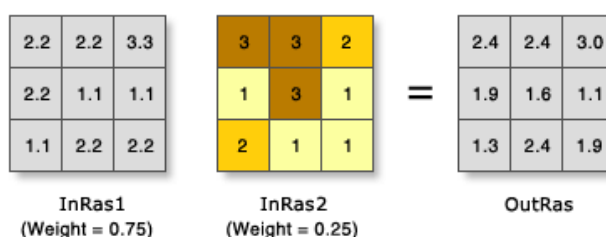


Figura 4.2. Ilustração que demonstra o cálculo matemático realizado pela ferramenta de integração soma ponderada (*weighted sum*) do ArcGis 10.1. (Retirada da ferramenta "ajuda" do programa ArcGis 10.1.)

Na ilustração da Figura 4.2, os dois *rasters* de entrada foram classificados em uma escala comum de 1 a 3. A cada *raster* é assinalado uma porcentagem de influência (peso) – no caso 75% para o primeiro e 25% para o segundo. Os valores das células são multiplicados por sua porcentagem de influência e os resultados são somados de forma a criar um *raster* de saída. Por exemplo, o resultado da primeira célula do dado de saída é dado por $(2,2*0,75) + (3*0,25) = 2,4$.

4.2. MAPAS DE PERTINÊNCIA

Para a aplicação da Lógica *Fuzzy* e da Soma Ponderada, faz-se necessária a atribuição de valores de pertinências entre 0 (não pertinente) e 1 (altamente pertinente) para as diferentes variáveis dos dados apresentados no Capítulo 3. Para tanto, foram utilizadas funções de pertinência lineares e sigmoidais, dependendo do tipo de dado. Na Tabela 4.3 são mostradas as funções de pertinência e os respectivos parâmetros utilizados em cada um dos produtos gerados nos processamentos anteriores.

A função sigmoideal decrescente *Small* foi utilizada para definir variações de pertinência em função da distância, como no caso do fator litológico, no qual foi atribuída pertinência máxima à região central dos corpos de carbonatos e valores decrescentes à medida que aumenta a distância ao redor destas feições. Os valores de *midpoint* das funções lineares foram definidos com base na zona de influência atribuída a cada feição. Neste sentido, considerou-se que os corpos de carbonatos e os lineamentos de feições de relevo têm uma zona de influência maior em relação aos lineamentos obtidos a partir da drenagem.

A função linear foi utilizada nos casos em que foi necessário reescalonar os valores de uma escala. Para os dados geoquímicos, atribuiu-se como valor máximo o limiar calculado para cada elemento por meio da técnica *boxplot*, e o valor mínimo foi arbitrado em 20.

Tabela 4.2. Funções e parâmetros utilizados para atribuição de valores de pertinência para os produtos referentes a cada fator prospectivo.

Fator prospectivo	Produto a ser integrado	Fuzzy Membership	Parâmetros	
			<i>Midpoint: 300</i>	
Litológico	<i>Raster</i> distância euclidiana	<i>Small</i>	<i>Spread: 2</i>	
Estratigráfico	<i>Raster</i>	Linear	Min.: 0 (Outros) Máx.: 2 (Vazante B)	
			Pb	Min.: 20 Máx.: 47
Geoquímico	<i>Raster</i> sub-bacias de influência para Pb, Zn, Cu (valores em ppm)	Linear	Zn	Min.: 20 Máx.: 114
			Cu	Min.: 20 Máx.: 50
Estrutural	<i>Raster</i> distância euclidiana: Drenagem e relevo NE e NW	<i>Small</i>	Drenagem	<i>Midpoint: 90</i> <i>Spread: 2</i>
			Relevo	<i>Midpoint: 300</i> <i>Spread: 2</i>

4.3. INTEGRAÇÃO DE DADOS

4.3.1. Lógica Fuzzy

A partir dos mapas de pertinência, procedeu-se à integração de dados por meio da lógica *fuzzy*. Esta integração se deu em etapas, conforme Figura 4.3. Os operadores utilizados em cada etapa da integração foram selecionados com base em sucessivos testes de forma a encontrar o resultado mais adequado.

Inicialmente, foi realizada a integração dos produtos geoquímicos. Os mapas de pertinência para anomalias de Cu, Pb e Zn foram integrados por meio do operador *gamma*, estabelecendo o valor do parâmetro gama em 0,9. Esta abordagem foi aplicada buscando ressaltar as sub-bacias, nas quais dois ou mais elementos são anômalos.

Em seguida, foram integrados os mapas de pertinência para os fatores litológico e estratigráfico. Nesta etapa, também foi utilizado o operador *gamma*, com valor do parâmetro gama igual a 0,9. O resultado buscou ressaltar áreas com ocorrência de corpos carbonáticos no Grupo Vazante.

Para a integração dos mapas de pertinência gerados para os lineamentos de drenagem e relevo, utilizou-se o operador *sum* (soma). Este operador foi aplicado separadamente para os lineamentos de direção NE, conforme o estabelecido no modelo prospectivo do depósito de Vazante, e NW, em conformidade com o modelo de Morro Agudo.

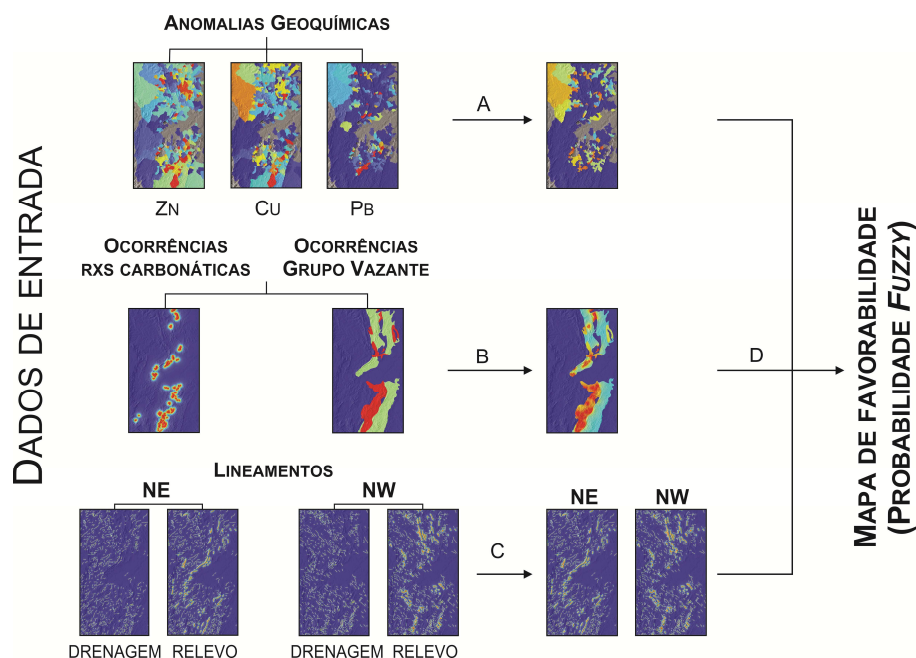


Figura 4.3. Fluxograma com as diferentes etapas empregadas na integração *fuzzy*. (A) Integração dos mapas de pertinência para anomalias geoquímicas de Pb, Zn e Cu por meio do operador *gamma*. (B) integração dos mapas de pertinência elaborados para os fatores litológico e estratigráfico utilizando o operador *gamma*. (C) integrações dos mapas de pertinência dos lineamentos de relevo e drenagem por meio do operador *sum*, obtendo um produto integrado para lineamentos de direção NE e outro para os de direção NW.

De posse destes produtos, a integração final, tanto para o modelo de Vazante quanto para o de Morro Agudo, foi realizada utilizando o operador *gamma* com valor de gama estabelecido em 0,9. O resultado final é apresentado na Figura 4.4. As zonas marcadas em vermelho indicam as regiões de maior favorabilidade para ocorrência de mineralizações de Pb e Zn, de acordo com o definido nos modelos prospectivos. As áreas azuis indicam baixa ou nenhuma favorabilidade.

A análise do produto final indica regiões nas quais não foi realizada a integração, ou seja, áreas de *no data* (não dado). Este comportamento se deve à influência das áreas nas quais não foram geradas sub-bacias devido à ausência de análises geoquímicas, conforme explicado no Capítulo 3. Tanto no modelo de Morro Agudo quanto no de Vazante, as maiores favorabilidades encontram-se na porção central da área, e são corroboradas pela coincidência com a localização das minas de Vazante e Morro Agudo. É possível observar, ainda, que esta zona de alta favorabilidade acompanha a grande estrutura dobrada identificada a partir da extração das feições lineares de relevo (Capítulo 3).

Ressalta-se que os resultados obtidos para os dois modelos prospectivos são análogos, sendo que a única diferença corresponde à direção dos lineamentos marcados com alta favorabilidade em ambos os produtos. Este fato é decorrente da qualidade dos dados utilizados na integração, podendo-se citar, como exemplo, o mapa geológico em escala 1:1.000.000, que não permitiu distinguir as áreas de ocorrência das Formações Serra do Poço Verde e Serra do Calcário.

As altas favorabilidades atribuídas às feições lineares são observadas mesmo em regiões marcadas em azul, dando um aspecto poluído ao produto final. Este aspecto é resultado da alta pertinência atribuída às porções centrais destes lineamentos, e não guardam significado real de favorabilidade. Com o objetivo de melhorar a visualização e interpretação dos dados, optou-se por apresentá-los na forma de intervalos de valores de favorabilidade; foram estabelecidas cinco classes com variação de 0,2 unidades (Figura 4.5). Este novo produto evidencia o alto potencial da porção centro sul da área, com ocorrências mais esparsas na região centro norte. No entanto, a contribuição dos lineamentos para o aspecto poluído do mapa ainda pode ser observado.

Acrescenta-se que a região marcada com média a alta favorabilidade (laranja) no extremo noroeste da área é resultante, principalmente, da contribuição do mapa de pertinência para as anomalias de Cu, no entanto não se considera que esta seja uma área de relevância, tendo em

vista que outros fatores prospectivos, como o litológico e o estratigráfico, têm pertinência baixa nesta região.

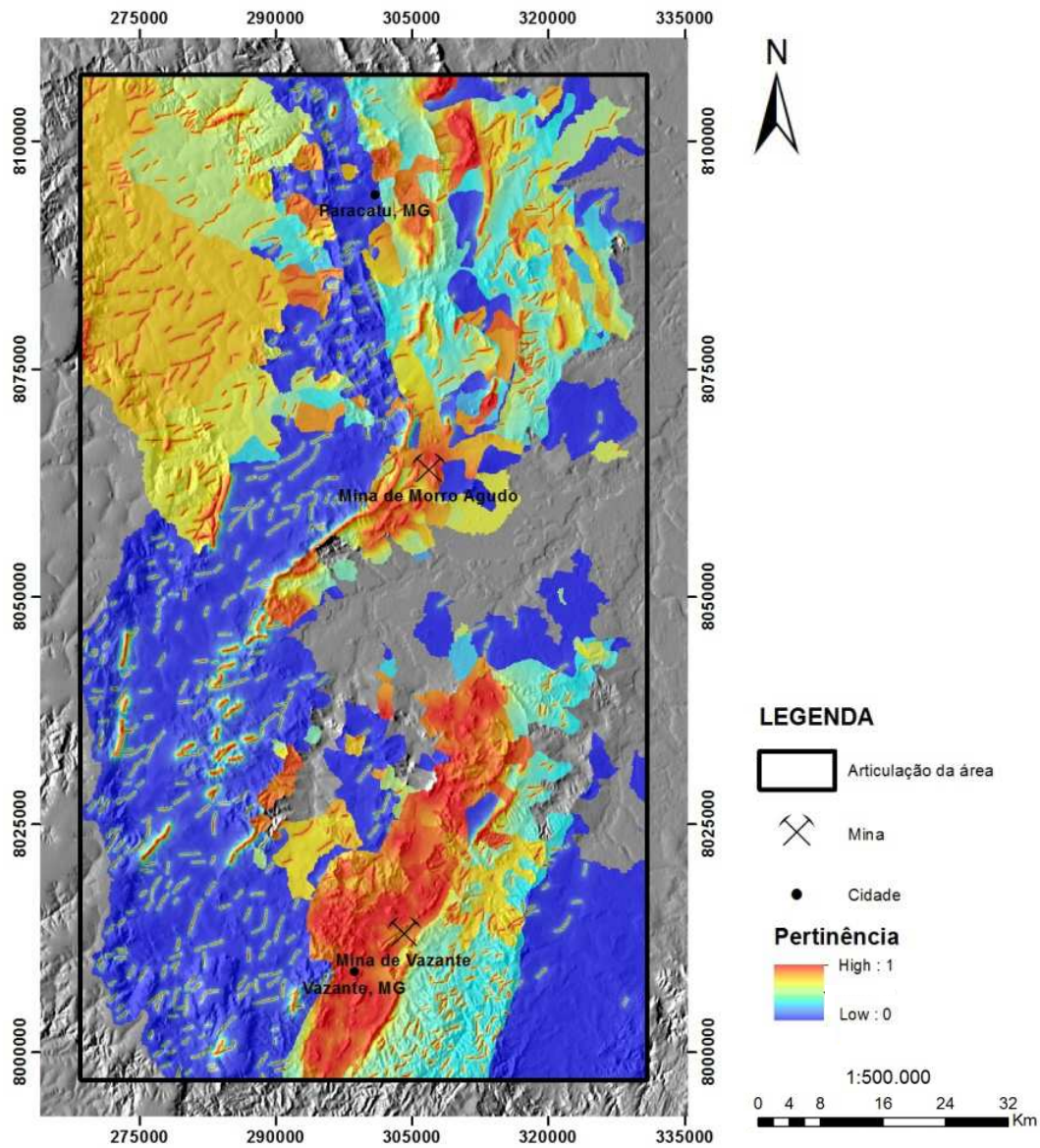


Figura 4.4. Mapa de favorabilidade para o Modelo de Vazante obtido a partir da aplicação do método *fuzzy* de integração, apresentado em variação de 0 (baixa favorabilidade) a 1 (alta favorabilidade). (Anexo 3).

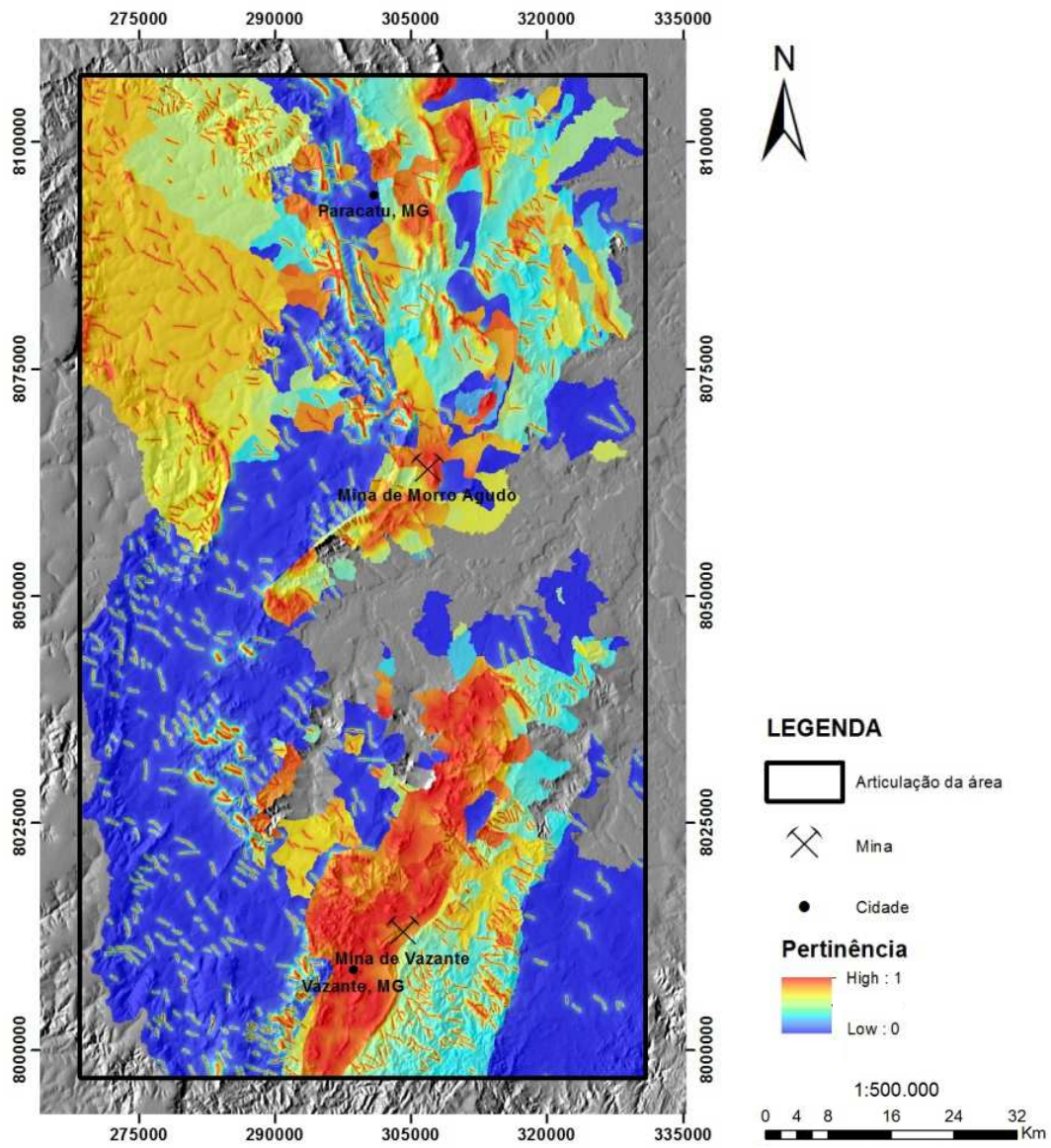


Figura 4.5. Mapa de favorabilidade para o Modelo de Morro Agudo obtido a partir da aplicação do método *fuzzy* de integração, apresentado em variação de 0 (baixa favorabilidade) a 1 (alta favorabilidade). (Anexo 5).

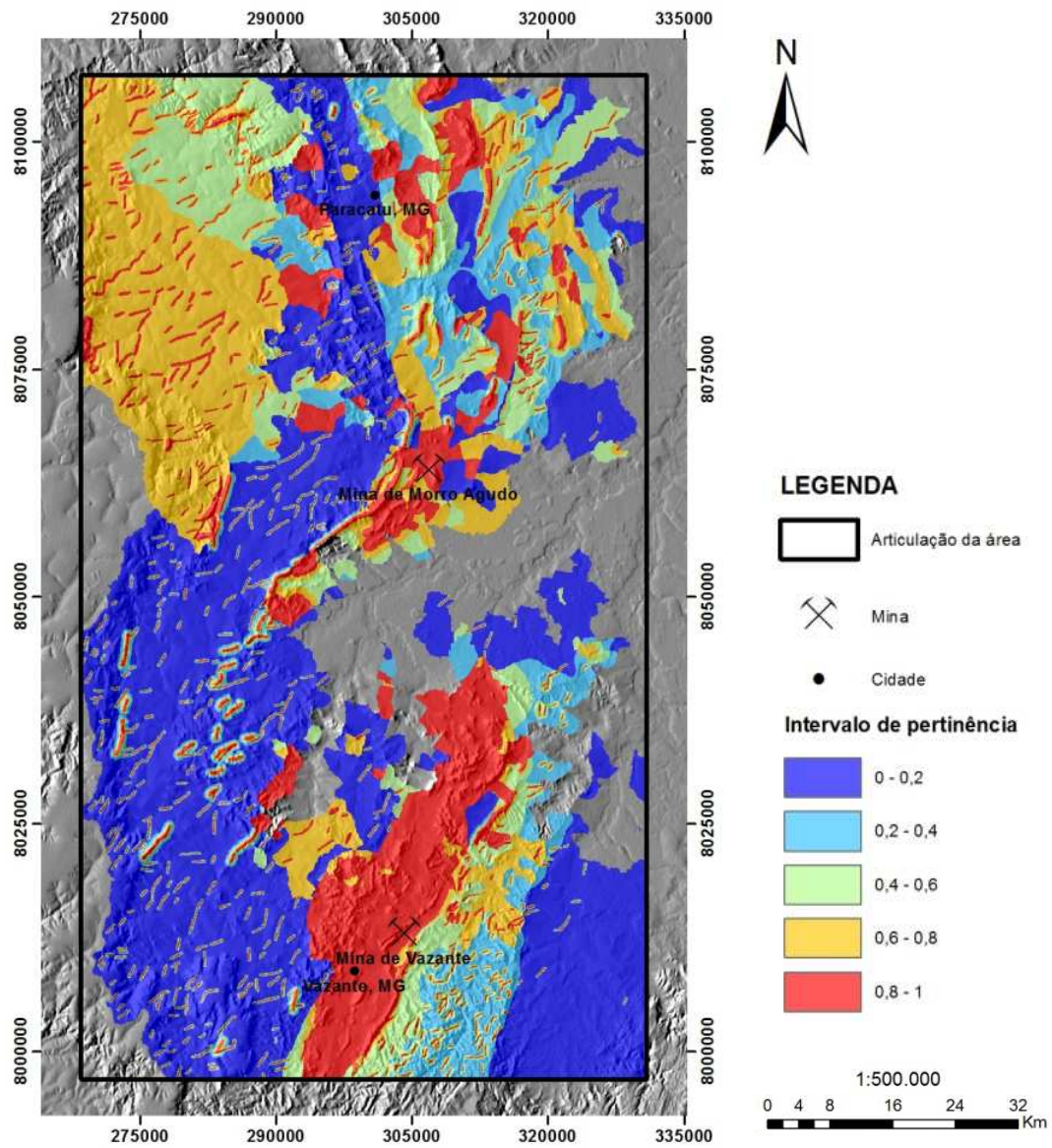


Figura 4.6. Mapa de favorabilidade para o Modelo de Vazante obtido a partir da aplicação do método *fuzzy* de integração, apresentado na forma de intervalo. (Anexo 4).

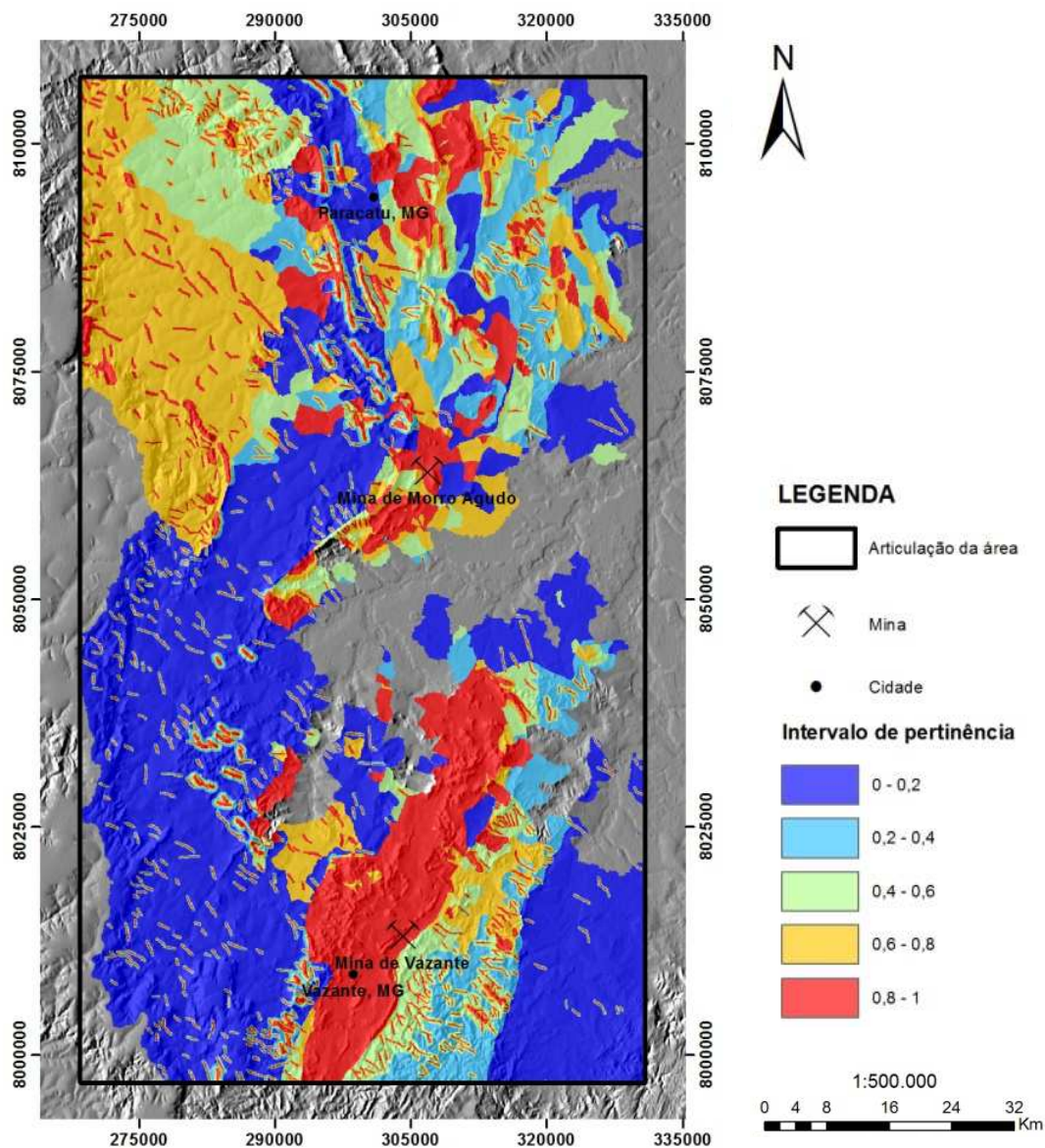


Figura 4.7. Mapa de favorabilidade para o Modelo de Morro Agudo obtido a partir da aplicação do método *fuzzy* de integração, apresentado na forma de intervalo. (Anexo 6)

4.3.2. Soma ponderada

A partir dos mapas de pertinência, procedeu-se à integração de dados por meio da soma ponderada para os modelos de Vazante e Morro Agudo (Figura 4.8). Para esta integração utilizaram-se os mapas de pertinência de lineamentos, anomalias de Cu, Pb e Zn, litologia e estratigrafia. Ao contrário da lógica *fuzzy*, não foram realizadas etapas intermediárias de integração.

Para aplicar o método da soma ponderada, definiram-se pesos a cada mapa de pertinência obtido na etapa 4.2. A ponderação levou em consideração a importância de cada fator prospectivo, conforme definido nos modelos, bem como a qualidade dos dados de entrada (Tabela 4.4). Os resultados da integração são mostrados na Figura 4.7.

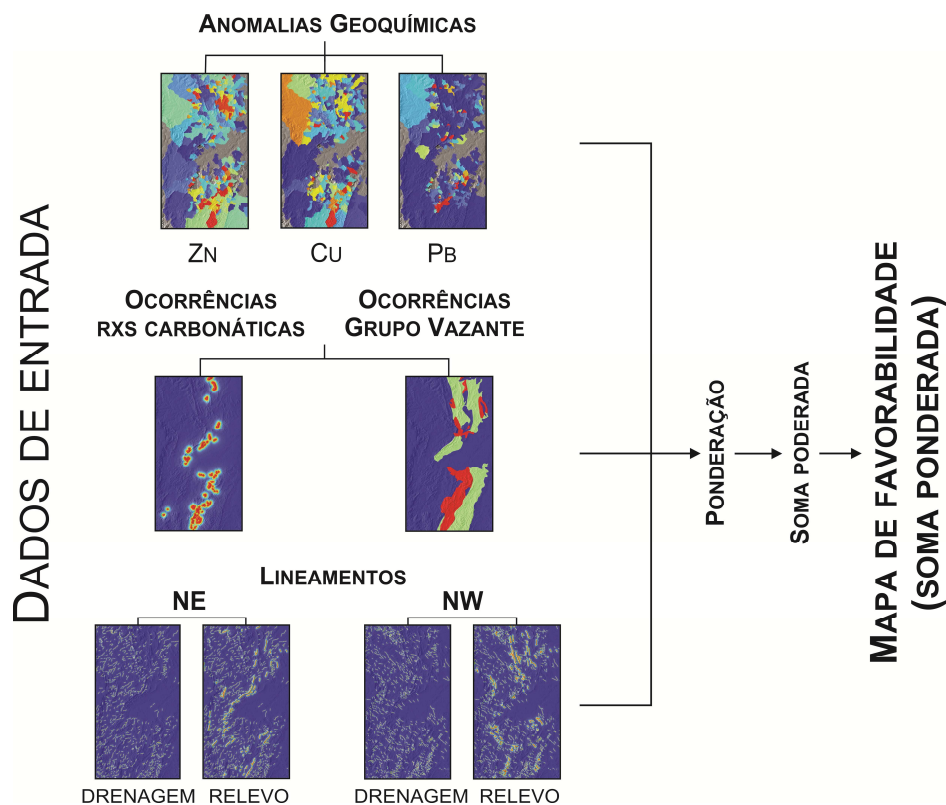


Figura 4.8. Fluxograma com as etapas adotadas na integração por meio da técnica da soma ponderada. A ponderação foi feita utilizando os dados apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.3. Ponderação atribuída aos mapas de pertinência para a aplicação da técnica de soma ponderada.

Fator Prospectivo	Dado	Peso
Geoquímico	Sub-bacia de Cu	4
	Sub-bacias de Pb	10
	Sub-bacia de Zn	10
Estrutural	Lineamentos	2
Litológico	Delimitação dos carbonatos	8
Estratigráfico	Mapa geológico da CPRM	6

De forma análoga ao resultado obtido na lógica fuzzy, as zonas marcadas em vermelho indicam as regiões de maior favorabilidade para ocorrência de mineralizações de Pb e Zn, e as áreas azuis indicam baixa ou nenhuma favorabilidade. Pela análise dos resultados, é possível perceber que a abordagem da soma ponderada fornece um produto restritivo, com menos áreas de alta favorabilidade, que são restritas às regiões das minas de Morro Agudo e Vazante.

Assim como observado nos mapas *fuzzy*, o produto final da soma ponderada indica regiões nas quais não foi realizada a integração, ou seja, áreas de *no data* (não dado). Este comportamento se deve à influência das áreas nas quais não foram geradas sub-bacias devido à ausência de análises geoquímicas, conforme explicado no Capítulo 3.

Não são observadas diferenças marcantes entre os resultados obtidos para o modelo de Morro Agudo e o de Vazante. Observa-se que, ao contrário do resultado obtido pela integração *fuzzy*, a contribuição das feições lineares não é notada nos mapas. Tal característica é explicada pelo baixo peso atribuído aos correspondentes mapas de pertinências. Além disso, nota-se que a influência das anomalias de cobre na porção noroeste é minimizada no produto da soma ponderada, ao contrário do observado no mapa *fuzzy*. Este comportamento é novamente explicado pelo baixo peso atribuído ao mapa de pertinência de anomalias de cobre.

Com o objetivo de melhorar a visualização e interpretação dos dados, optou-se por apresentá-los na forma de intervalos de valores de favorabilidade, que variam de zero a 37. Desta forma, foram estabelecidas cinco classes com intervalos de sete unidades (Figura 4.8). O produto obtido reforça o potencial mais elevado da porção central da área, com destaque para as regiões próximas dos depósitos de Vazante e Morro Agudo.

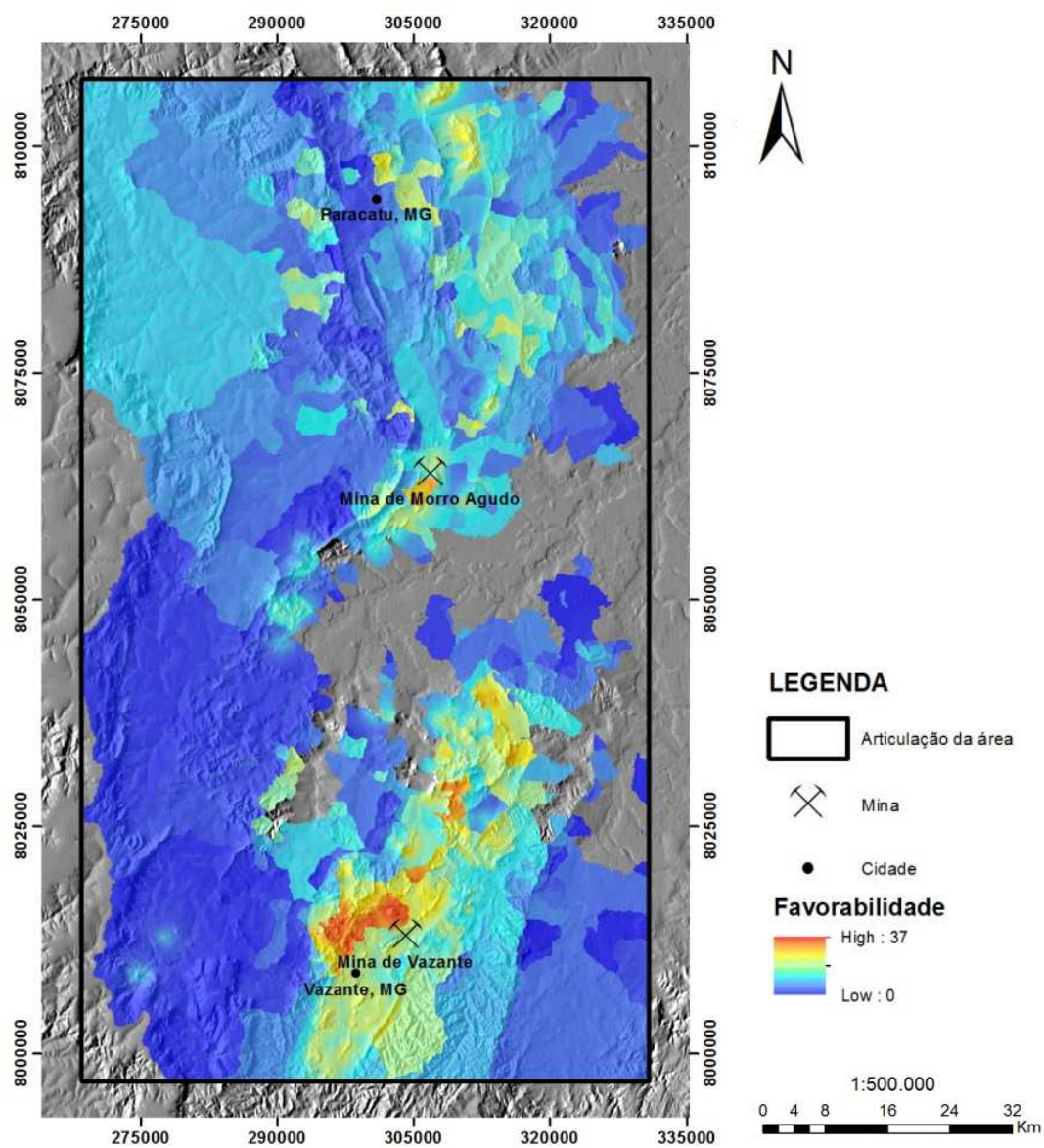


Figura 4.9. Mapa de favorabilidade para o Modelo de Vazante obtido a partir da aplicação do método da soma ponderada de integração, apresentado em variação de 0 (baixa favorabilidade) a 37 (alta favorabilidade). (Anexo 7).

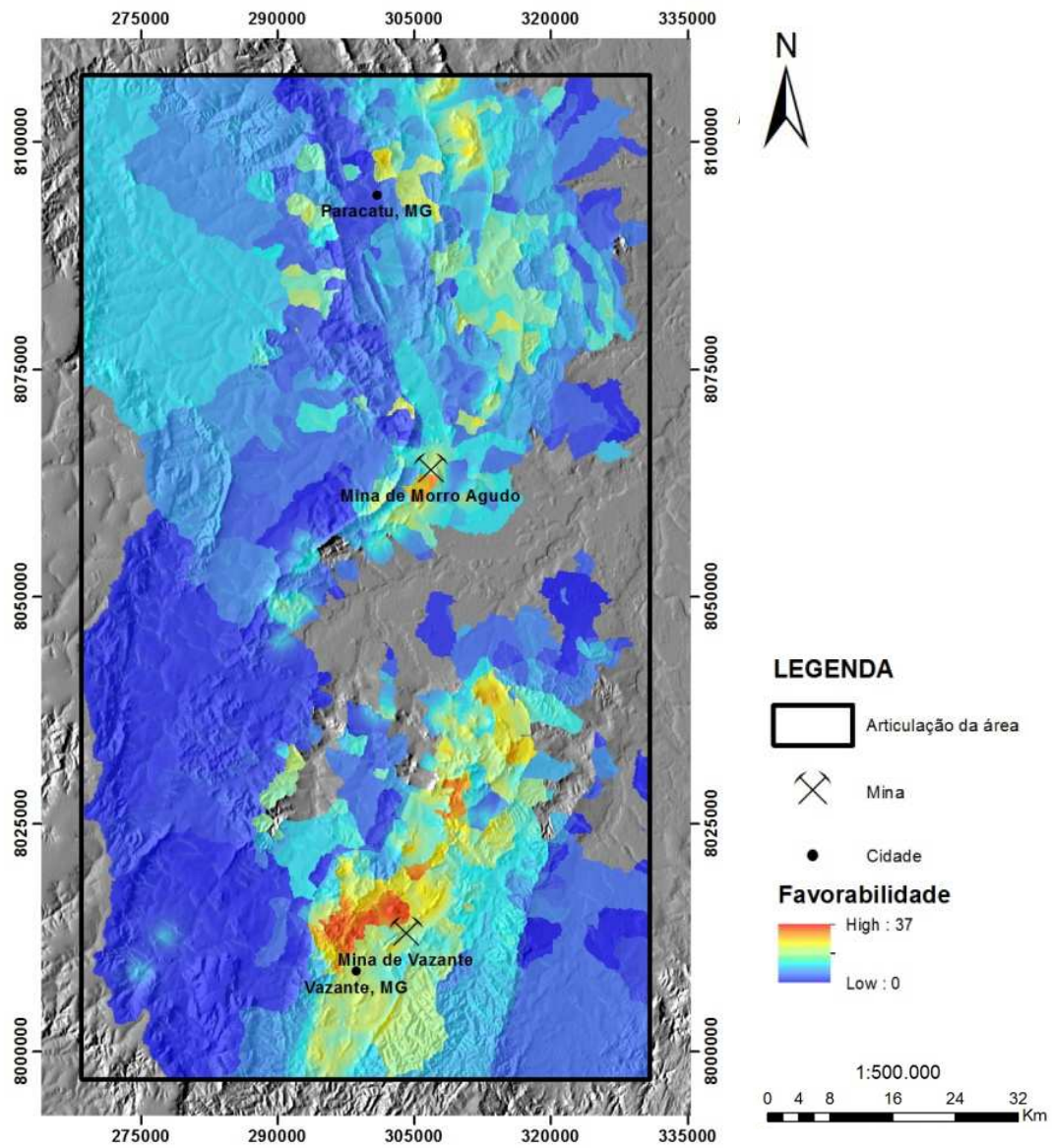


Figura 4.10. Mapa de favorabilidade para o Modelo de Morro Agudo obtido a partir da aplicação do método da soma ponderada de integração, apresentado em variação de 0 (baixa favorabilidade) a 37 (alta favorabilidade). (Anexo 9).

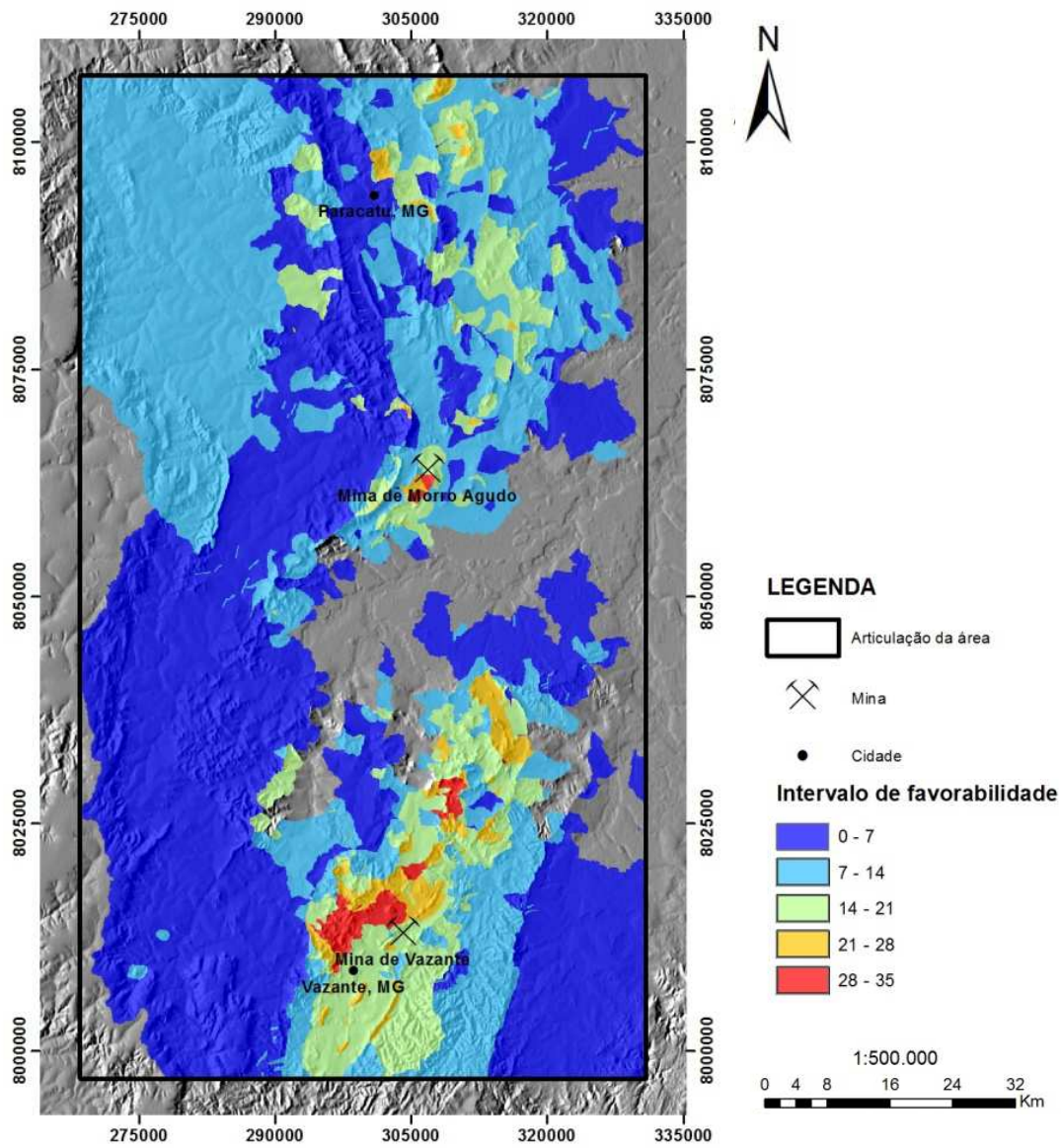


Figura 4.11. Mapa de favorabilidade para o Modelo de Vazante obtido a partir da aplicação do método da soma ponderada de integração, apresentado na forma de intervalo. (Anexo 8).

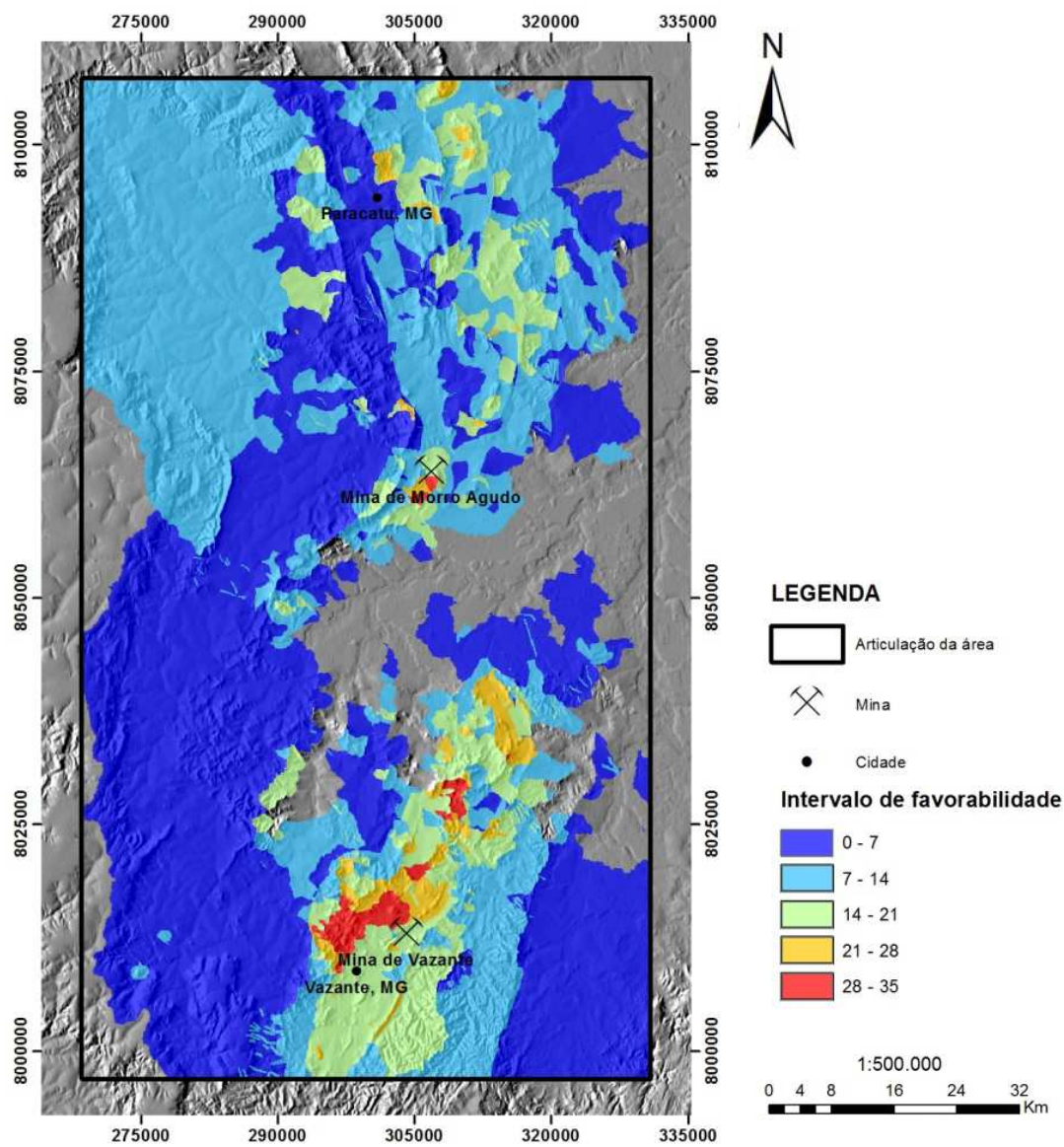


Figura 4.12. Mapa de favorabilidade para o Modelo de Morro Agudo obtido a partir da aplicação do método da soma ponderada de integração, apresentado na forma de intervalo. (Anexo 10).

CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados e discussões apresentados nos capítulos 3 e 4, pôde-se chegar às seguintes conclusões:

- ❖ Os dados de entrada utilizado na integração foram adquiridos a partir de fontes distintas, nem sempre com as características ideais, o que dificultou o tratamento dos dados e influenciou os resultados finais. A exemplo, pode-se citar o dado litológico, que foi feito em função da delimitação de elevações de possível composição carbonática, exigindo conhecimento prévio da área. Os dados referentes à geoquímica impuseram limitações, uma vez que não há pontos que contemplam todas as bacias hidrográficas que banham a área, gerando regiões de não dado (*no data*) nos mapas de pertinência. Além disso, o mapa geológico da CPRM não se encontra em escala adequada ao nível de detalhe pretendido ao trabalho.
- ❖ A limitação dos dados disponíveis impossibilitou que outros fatores importantes, como valores de *background* para cada tipo litológico ou análises geoquímicas de elementos farejadores, fossem utilizados na integração. Essas restrições fizeram com que os mapas de favorabilidade para os modelos de Morro Agudo e Vazante obtidos pela técnica *fuzzy* fossem iguais, tendo como única diferença a direção das feições estruturais – NW para Morro Agudo e NE para Vazante. Já, em função do baixo peso dado às feições estruturais, os mapas de favorabilidade adquiridos pela aplicação da técnica da soma ponderada foram idênticos para os modelos de Vazante e Morro Agudo.
- ❖ Quanto aos dados de lineamentos estruturais, esses não se mostram ideais para a integração utilizando o método *fuzzy*, tendo em vista que identificaram muitas áreas que somente indicam a existência de lineamentos, resultando em áreas de falsa alta favorabilidade
- ❖ Na confecção dos mapas de pertinência, a seleção de diferentes funções de pertinência e alterações em seus respectivos parâmetros geraram diferentes produtos, mais ou menos restritivos (ou mais ou menos otimistas). Essas escolhas têm influência direta no produto final da integração.
- ❖ A geração dos mapas de pertinência deve ser feita em função do dado e, por esse motivo, é importante ter um conhecimento adequado da informação utilizada. Para

isso, é preciso a realização de diversos testes com diferentes funções e parâmetros, bem como é necessário saber o que cada alteração acarreta no produto final, permitindo a sua interpretação correta.

- ❖ A aplicação do método de integração *fuzzy* permitiu a elaboração de um mapa que indica alta favorabilidade para ocorrência de mineralizações de Pb e Zn na região central da área, com destaque para a porção centro sul. Essas regiões são corroboradas pela coincidência da localização dos depósitos de Vazante e Morro Agudo. O produto final identificou diversos alvos em função da contribuição das feições estruturais. Por fim, a técnica *fuzzy* mostrou-se mais complicada de ser implementada tendo em vista as particularidades de cada operador disponível.
- ❖ O método de integração da soma ponderada gerou um mapa de favorabilidade mais restritivo do que o obtido por meio da técnica *fuzzy*, definindo menos áreas de alta favorabilidade. A visualização do produto final em forma de intervalos possibilitou uma melhor delimitação de áreas de média e alta favorabilidade, que no produto original não são muito evidentes. Ao contrário do observado no mapa obtido pela integração *fuzzy*, o produto da soma ponderada não teve aspecto “poluído” pela influência dos lineamentos estruturais.
- ❖ Ambos os métodos apontaram a porção central como sendo a de maior favorabilidade para a ocorrência das mineralizações de Pb e Zn, portanto, recomenda-se que eventuais esforços prospectivos sejam direcionados a essa área. Ressalta-se que essa porção central coincide com a região de ocorrência das rochas carbonáticas do Grupo Vazante, acompanhando a grande estrutura dobrada identificada na extração das feições lineares de relevo na área.
- ❖ Cada método de integração aplicada neste trabalho possui suas vantagens e restrições, no entanto, ambos se mostraram boas ferramentas para a construção de mapas de favorabilidade, gerando produtos de alta relevância para projetos e campanhas de exploração mineral.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F.F.M. 1967. **Origem e evolução da Plataforma Brasileira**. Departamento Nacional de Produção Mineral. Boletim 24, 36 pp.
- AMARAL, G., 1968. **Geologia e depósitos de minério na região de Vazante, Estado de Minas Gerais**. Unpublished Doctorate thesis, Escola Politécnica Universidade de São Paulo, Brasil, 133 pp.
- ARAÚJO FILHO, J.O. 2000. **The Pirineus syntaxis: an example of intersection of two Brasiliano fold-thrust belts in Central Brazil and its implications for the tectonic evolution of Western Gondwana**. Revista Brasileira de Geociências 30(1): 144-148.
- ARAÚJO, C. C. & MACEDO, A. B. 2004. **Geoprocessamento de dados geológicos para mapeamento de favorabilidade para cobre, chumbo e zinco no Vale do Ribeira (SP_PR)**. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo 34/93/0: 317-328.
- BARBOSA O., BRAUN O.P.G., DYER R.C., CUNHA C.A.B.R. 1970. **Geologia da região do Triângulo Mineiro**. Rio de Janeiro, DNPM/DFPM, Boletim 136. 140pp.
- BARBOSA, O. 1955. **Guia das Excursões**. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 9., Not.3.
- CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A.M.V. 2001. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. Disponível em:<<http://mtcm12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/04.22.07.43/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em Jan. 2015.
- DARDENNE M.A., FREITAS-SILVA F.H., SOUZA J.C.F., CAMPOS J.E.G. 1998. **Evolução tectono-sedimentar do Grupo Vazante no contexto da Faixa de Dobramentos Brasília**. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 40, Belo Horizonte, Resumos Expandidos, p. 26.
- DARDENNE, M.A., 2000. **The Brasília Fold Belt**. In CORDANI U.G., MILANI E.J., THOMAZ FILHO A., CAMPOS D.A. (Eds.), Tectonic Evolution of South América, Brazil, 31th Intern. Geological Congress, Rio de Janeiro, 231-263.

- FRANCA-ROCHA, W., BONHAM-CARTER, G. & MISI, A. **Estimando a favorabilidade para recursos minerais na Bacia de Irecê pelos métodos lógica nebulosa e pesos das evidências.** *Sitientibus*, Feira de Santana, n.22, p.27-54, jan./jul. 2000.
- FUCK R. A. PIMENTEL, M. M. SOARES, J. E. P. DANTAS, E. L. 2005. **Comportamento da Faixa Brasília.** *In: IX Simp. de Geol. do Centro-Oeste.* Goiânia. 26-27.
- FUCK, R.A. 1994. **A Faixa Brasília e a compartimentação tectônica na Província Tocantins.** *In: SBG, Simpósio de Geologia do Centro-Oeste, 4, Anais.* 184-187.
- FUCK, R.A., JARDIM DE SÁ, E.F., PIMENTEL M.M., DARDENNE, M.A., SOARES, A.C.P. 1993. **As faixas de dobramento marginais do Cráton São Francisco: síntese dos conhecimentos.** *In: Dominguez, J.M.L., Misi, A. Ed. O Cráton do São Francisco.* 161-185.
- HEINECK, C. A.; HECHT, C.; MELLO, F. J. C.; OLIVEIRA, J. J. C., 1975. **Projeto Geoquímica do Bambuí. 1.Parte. Geoquímica Piloto.** Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais.
- HEINECK, C. A., Vieira, V. S., DRUMOND, J. B. V., LEITE, C. A. L., LACERDA FILHO, J. V., VALENTE, C. R., LOPES, R. C., MALOUF, R. F., OLIVEIRA, I. W. B., OLIVEIRA, C. C., SACHS, L. L. B., PAES, V. J. C., JUNQUEIRA, P. A., NETTO, C. 2004. **Folha SE 23 - Belo Horizonte.** *In: Schobbenhaus, C., Gonçalves, J. H., Santos, J. O. S., Abram, M. B., Leão Neto, R., Matos, G. M. M., Vidotti, R. M., Ramos, M. A. B., Jesus, J. D. A. (eds). Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Sistema de Informações Geográficas. Programa Geologia do Brasil.* CPRM, Brasília, CD-ROM.
- IYER, S.S., HOEFS, J., KROUSE, H.R., 1992. **Sulfur and lead isotope geochemistry of galenas from Bambuí Group, Minas Gerais, Brazil: implications on ore genesis.** *Economic Geology* 87, 437 – 443.
- IYER, S.S., KROUSE, H.P., BABINSKI, M., 1993. **Isotope investigations on carbonate rocks hosted lead–zinc deposits from Bambuí Group, Minas Gerais, Brazil: implications for ore genesis and prospect evaluation.** *Simpósio do Cráton do São Francisco, 2, Anais, Salvador,* pp. 338–339.

- LEMOS, M. G. **Caracterização geológica e tecnológica do minério de zinco do Extremo Norte da Mina de Vazante, Minas Gerais**. 2011. 193 p. (427/2011). Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Estadual de Campinas, São Paulo. 2011.
- LIMA, L. A. S. **Aplicação dos métodos semi-automático e lógica fuzzy para o mapeamento de solos da Bacia do Sarandi**. 2013. 142 p. (n.49). Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade de Brasília, Brasília. 2013.
- MONTEIRO, L. V. S. **Modelamento metalogenético dos depósitos de zinco de Vazante, Fagundes e Ambrósia, associados ao Grupo Vazante, Minas Gerais**. 2002. 362 p. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo. 2002.
- MONTEIRO, L. V. S., BETTENCOURT, J. S., JULIANI, C., de OLIVEIRA, T. F. 2007. **Nonsulfide and sulfide-rich zinc mineralizations in the Vazante, Ambrósia and Fagundes deposits, Minas Gerais, Brazil: Mass balance and stable isotope characteristics of the hydrothermal alterations**. *Gondwana Research* vol. 11, p. 362–381.
- MONTEIRO, L.V.S., BETTENCOURT, J.S., JULIANI, C., OLIVEIRA, T.F. 2006. **Geology, petrography, and mineral chemistry of the Vazante, Ambrósia, and Fagundes Neoproterozoic carbonate-hosted Zn–(Pb) deposits, Minas Gerais, Brazil**. *Ore Geology Reviews* 28, 201–234.
- NEVES, L. P. **Características descritivas e genéticas do depósito de Zn-Pb Morro Agudo, Grupo Vazante**. 2011. 89 p. (n.280). Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade de Brasília, Brasília. 2011.
- OLIVEIRA, G. D. **Reconstrução Paleoambiental e Químioestratigrafia dos Carbonatos Hospedeiros do depósito de Zinco Silicatado de Vazante, MG**. 2013. 95 p. (n.311). Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade de Brasília, Brasília. 2013.
- PARADIS, S., HANNIGAN, P., AND DEWING, K. 2007. **Mississippi Valley-type (MVT) lead-zinc deposits, in Goodfellow**. W. D. ed., *Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication 5*, p. 185-203.

- PIMENTEL, M.M., FUCK, R.A., BOTELHO, N.F. 1999. **Granites and the geodynamic history of the Neoproterozoic Brasília Belt, Central Brazil: a review.** *Lithos*, **46**(3): 463-483.
- PIMENTEL, M.M., DARDENNE, M.A., FUCK, VIANA, M.G., JUNGES, S., SEER, H.J., FISCHER, D.P. 2001. **Nd isotopes and the provenance of sediments of the Neoproterozoic Brasília Belt, central Brazil.** *Journal of South American Earth Sciences*, **14**: 571-585.
- REIMANN, C., FILZMOSER, P. and GARRETT, R.G., 2005. **Background and threshold: critical comparison of methods of determination.** *Science of the Total Environment* **346**, 1-16.
- RIGOBELLO, A.E., BRANQUINHO, J.A., DANTAS, M.G. da S., OLIVEIRA, T.F., NEVES FILHO, W., 1988. **Mina de zinco de Vazante.** In: Shobbenhaus, C., Coelho, C.E.S. (Eds.), *Principais depósitos minerais do Brasil*, DNPM 3, pp. 101–110.
- SILVA, E. C. **Integração de dados geofísicos e geológicos com ênfase na geração de alvos potenciais para exploração aurífera em Terrenos Granito-Greenstone da Região Sudeste do Pará.** 2011. 241 p. (n.281). Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade de Brasília, Brasília. Ago. 2011.
- TUKEY, J.W., 1977. **Exploratory Data Analysis.** Addison-Wesley, Reading, 688 pp.

ANEXOS